

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



**Ensino da Física das Radiações através de
Experiências Simples**

Ana Maria Santos Martins Pinto

“Dissertação orientada por Prof. Doutor Luís Peralta”

MESTRADO EM FÍSICA PARA O ENSINO

Junho de 2006

" A dúvida é o começo da sabedoria. "

Galileu Galilei

Dedico este trabalho ao Luís Manuel
meu marido e aos meus filhos
Ana Rita e Ruben

AGRADECIMENTOS

Muito especialmente ao meu orientador, Professor Luís Peralta, da Faculdade de Ciências de Lisboa, pelo inestimável apoio, pelo seu acompanhamento sempre solidário, pelos saberes transmitidos, pela paciência e amizade demonstrada durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) pela disponibilização do espaço e material para a construção do aparelho didáctico de leitura.

À colega de mestrado Florbela Rego pelo apoio, amizade, companheirismo e disponibilidade sempre demonstrada para me ajudar quer na execução da parte experimental, estando sempre presente e colaborante, quer na resolução de pequenas dúvidas que me foram surgindo ao longo da realização deste trabalho.

Aos alunos do 11º ano turma A (2003/2004), que no ano lectivo de 2004/2005 frequentaram o 12º ano, na Escola secundária de São João da Talha, pela sua compreensão e apoio, para os dias em que por acumulação de cansaço, as aulas possam ter sido leccionadas com menos paciência.

Ao meu amigo Sérgio Hortelão por todo o apoio dado durante a elaboração da página Laboratório Virtual.

À Presidente do Centro de Formação de Professores da Zona Oriental de Loures, Dr^a Cristina Sampaio, por me ter informado e inscrito nas acções de formação sobre Flash Macromedia, e aos meus colegas que durante essas acções colaboraram na minha aprendizagem.

Aos meus colegas, Luís Soares, José Cruz, Carlos Pombo e Helena Magalhães, professores da Escola Secundária de São João da Talha, da área de informática, que muito me ajudaram e ensinaram nesta área.

À colega e amiga Elvira Monteiro, da área de Geologia, da Escola Secundária de São João da Talha, pela sua ajuda e colaboração, quer na pronta disponibilidade de alteração de aulas sempre que o meu trabalho na faculdade a isso obrigava, quer pela sua ajuda na realização e organização da própria tese deste mestrado.

Agradeço aos alunos da turma A do 11º Ano (2005/2006), da Escola Secundária de São João da Talha, que se protificaram a trabalhar com o Laboratório Virtual, gastando 40 minutos do seu tempo.

À funcionária da Biblioteca da FCUL, Idália Gomes pela sua simpatia e colaboração na procura de autores ou temas que necessitei para a pesquisa necessária à realização do meu trabalho.

Aos meus familiares e amigos que sempre me motivaram e apoiaram neste trabalho.

RESUMO

Ao analisar os programas de Física e Química dos 10º e 11º anos homologados em 2001/2002, bem como o programa para o 12º ano a entrar em vigor em 2005/2006, podemos verificar que a Física Moderna passou a constar dos programas destes três anos. O ensino desta parte da Física é de primordial importância para a formação dos alunos, sendo um estímulo para o conhecimento de uma Física mais contemporânea e próxima dos desafios que o mundo actual coloca. Contudo na unidade de Física Moderna do programa para o 12º ano não se propõem trabalhos de carácter experimental, o que nos parece ser um ponto a rever.

Na tentativa de colmatar um pouco esta falha, apresentamos neste trabalho um conjunto de experiências, na área da Física de Radiações. Estas experiências são dirigidas sobretudo ao campo da interacção da radiação com os materiais, procurando-se explorar o conceito de dose de radiação absorvida. Tendo esse objectivo em mente organizou-se o trabalho em duas vertentes. Numa mais experimental e aplicada procedeu-se à concepção e desenvolvimento de experiências de medição de dose de radiação fornecidas por fontes de radiação. Para a medição das doses recorreu-se à técnica de medida em filme, tendo-se desenvolvido e construído um aparelho didáctico de medida da densidade óptica das películas fotográficas. A segunda vertente do trabalho consiste no desenvolvimento de aplicações informáticas que de forma interactiva permitam apresentar aos alunos os conceitos físicos da interacção da radiação com a matéria e de dose de radiação absorvida. Estas aplicações permitirão consolidar os conhecimentos adquiridos quer na aula teórica, quer os conhecimentos obtidos através das experiências laboratoriais, quer ainda permitir explorar um leque de situações físicas mais amplo que o que está naturalmente disponível no laboratório.

ABSTRACT

Through analyzation of the year 10 and year 11 Chemistry and Physics educational program homologated during 2001/2002, as well as the year 12 educational program which is entering into effect during 2005/2006, we are able to verify that Modern Physics has been included in the educational program for the past 3 years. The learning process in this part of Physics is primordially important in the education of students, stimulating them in the recognition of Physics as being more contemporary and neighbouring real world challengers. However the unit of Modern Physics of the year 12 educational program does not offer projects of an experimental point of view, which should be reviewed.

In an attempt to reverse this fault, we are presenting in this study a series of experiments in the area of Radiation Physics. Those experiments were mainly conducted in the interaction between radiations and materials, trying to explore the amount of radiation that was absorbed by the material. Having this goal in mind, the study was conducted in two main directions. In a more experimental way, we measured the quantity of radiation that was given out from the sources. In order to measure it, we used the technique of film. To do this, we built a gauge to measure the optical density of the photographic film. The second part of the study was the development of computer programs, which allow the students to present the physical concepts of the interaction between the material and the amount of radiation that was absorbed. These applications will allow the students to consolidate their knowledge, through theoretical classes and practical classes that take place in the laboratory. This will also allow the students to have a wider range of physical experiences than has been normally available in a laboratory.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO I – Evolução do Estudo da Física	14
1.1. Introdução Geral da Física.....	14
1.2. Ensino da Física.....	18
1.3. Estado da Arte	20
1.3.1. O que se ensina e em que grau	21
1.3.2. A preparação do professor padrão	24
1.3.3. A necessidade de formação dos Professores	27
CAPÍTULO II - Interação da Radiação com a Matéria	29
2.1. Produção de raios X.....	29
2.2. Produção de raios γ	32
2.3. Processos de interacção da radiação electromagnética com a matéria.....	34
2.3.1. Efeito fotoeléctrico	34
2.3.2. Efeito de Compton.....	35
2.3.3. Produção de Pares.....	38
2.4. Coeficientes de atenuação	40
2.5. Interação de partículas carregadas com a matéria	43
CAPÍTULO III - Conceitos Básicos de Dosimetria	45
3.1. Características do campo de radiação.....	45
3.1.1. Fluência de fotões.....	46
3.1.2. Taxa de fluência de fotões.....	46
3.2. Quantidades dosimétricas	46
3.2.1. Transferência de energia.....	47
3.2.1.1. Kerma	48
3.2.1.2. Dose absorvida	48
3.2.1.3. Relação entre kerma e dose absorvida.....	49
3.3. Dosimetria com câmara de ionização.....	53
3.3.1. Câmara de ionização de ar livre	53
3.3.2. Câmara de ionização cilíndrica “ Thimble Chamber”.....	56
3.4. Dosimetria termoluminescente (T.L.D.).....	57
3.5. Dosimetria em filme	60

3.5.1. Película fotográfica.....	60
3.5.2. Formação da imagem latente.....	63
3.5.3. Processo de revelação.....	67
3.5.4. Medidas de dose absorvida com filme.....	70
3.5.5. Escolha dos filmes.....	71
3.5.6. Medição de perfis de dose com filme.....	74
CAPÍTULO IV – Sistema Didático de Dosimetria.....	76
4.1. Desenvolvimento de um Sistema de Dosimetria Didático.....	76
4.2. Protótipo do Leitor.....	77
4.2.1. Descrição dos Circuitos.....	78
4.2.1.1. Fonte de Alimentação.....	78
4.2.1.2. Circuito Emissor de Luz.....	79
4.2.1.3. Circuito Detector.....	80
4.3. Fantomas.....	81
4.3.1. Fantoma de Gelatina.....	81
4.3.2. Fantoma de Água.....	83
4.3.3. Fantoma Sólido.....	84
4.4. Fontes de Radiação.....	87
4.4.1. Cobalto 60.....	87
4.4.2. Fonte Didática de Produção de Raios X.....	88
4.4.3. Fonte de Amerício 241.....	88
4.5. Dosímetros.....	89
CAPÍTULO V – Calibração do Sistema.....	93
5.1. Calibração do sistema.....	93
5.1.1. Procedimento de Leitura.....	93
5.1.2. Calibração Absoluta dos Filmes.....	94
5.1.2.1. Filme Poly-Soft.....	94
5.1.2.2. Filme X-OMAT V.....	96
5.1.3. Calibração Relativa dos Filmes.....	97
5.1.3.1. Filme Poly-Soft.....	98
5.1.3.2. Filme X-OMAT V.....	99
CAPÍTULO VI – Resultados Experimentais.....	100
6.1. Medição de Perfil de Dose com Filme.....	100
6.1.1. Medição de Perfil de Dose com Câmara de Ionização.....	102

6.2. Medição de Perfil de Dose em Profundidade	105
CAPÍTULO VII – Utilização das Novas Tecnologias	111
7.1. Programa Educativo Digital utilizando o Macromedia Flash	111
7.1.1. Simulações Ilustrativas dos Conteúdos Teóricos	113
7.1.2. Modelo Simplificado da Interação de Fótons com a Matéria	128
7.2. Apresentação do Laboratório Virtual aos Alunos	129
7.3. Elaboração de inquéritos	130
7.3.1. Aplicação dos inquéritos	130
7.4. Análise dos dados através dos inquéritos	131
7.4.1. Inquérito de satisfação	131
7.4.2. Inquérito de conhecimento	138
CONCLUSÃO	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149
ANEXOS À BIBLIOGRAFIA	153
ANEXOS	155

INTRODUÇÃO

Num mundo em constante transformação, como é o nosso, os estudantes e os professores necessitam de ensinar a si próprios uma aptidão essencial, “aprender a aprender”.

Os alunos do ensino secundário, de uma forma geral memorizam factos que lhes são transmitidos, não mostrando qualquer interesse pela descoberta ou pela vida por detrás dos factos memorizados.

Estes alunos, têm medo de fazer perguntas e, quando as fazem aceitam qualquer explicação mesmo que a resposta não os satisfaça ou elucide. Têm uma postura de grande insegurança, sendo para eles muito mais importante o que os seus pares poderão pensar deles.

Nesta fase das suas vidas penso que o problema da falta de interesse, não é só devido ao facto de se encontrarem a travessar a puberdade, ou à pressão que os colegas exercem sobre eles, mas, em grande parte, é devido ao facto de, hoje em dia, o ensino da Ciência ser ministrado muitas vezes de uma forma pouco competente e pouco motivadora e os seus agentes terem pouca formação sobre o que estão a ensinar, não gastando muito tempo na sua própria formação.

Outro problema que se junta ao anterior prende-se com o facto dos novos programas dos ensinos básico e secundário serem construídos independentemente um do outro, e ainda independentemente das necessidades do ensino superior. Seria mais vantajoso e, mais aliciante para os alunos, conceber o programa de Física dos ensinos básico e secundário numa perspectiva global e não numa perspectiva sectorial, não perdendo de vista as necessidades dos conteúdos necessários a uma menor dificuldade de adaptação ao ensino superior.

Apesar de todas estas contrariedades, cabe ao professor a aplicação dos programas de forma equilibrada juntando, por um lado, a abstração e a formalização necessárias à formulação clara de ideias, conceitos e leis e, por outro lado, a sua ilustração com situações do quotidiano e aplicações tecnológicas.

Sendo a Física uma ciência experimental, a prática laboratorial deve ter lugar de destaque, na sua leccionação. No entanto as condições em que se encontram a maioria dos laboratórios de Física das escolas dos ensinos Básico e Secundário são precárias, tornando-se cada vez mais importante o recurso às novas tecnologias, onde seja possível apresentar os conteúdos programáticos recorrendo a simulações animadas, com as quais o aluno possa interagir. Cada vez mais os alunos precisam de se familiarizar com o método experimental, e não apenas de ler “coisas” sobre ciência em livros.

Com a entrada em vigor da nova reforma do ensino secundário (2003/2004), homologada em 2001, são mencionados alguns temas de Física Moderna, ao longo dos três anos deste ciclo. No entanto, devido a vários factores, estes conteúdos normalmente não são leccionados sendo, paradoxalmente, aqueles que mais curiosidade despertam nos alunos.

Este trabalho tem por objectivo principal encontrar uma forma de ensinar de modo prático alguns conceitos básicos de Física das Radiações, dando especial importância à interacção entre a radiação e a matéria, que é leccionada no 12º ano, fazendo a ligação com o programa do 11º ano, onde se inicia o estudo da radiação electromagnética, apresentando ainda alguns conceitos de dosimetria básica, através da apresentação de um aparelho didáctico de fácil utilização. Pretende-se, assim, de uma forma eminentemente prática, atrair os jovens para a Ciência.

Como a dosimetria não é contemplada nos programas do ensino secundário da reforma que está em vigor, propõe-se que seja criado um clube de Ciência onde os alunos realmente interessados se possam inscrever, e aprender um pouco mais sobre Física Moderna.

Este trabalho é estruturado em sete capítulos, nos quais se apresentam aspectos teóricos e práticos necessários para se atingirem os objectivos propostos.

No primeiro capítulo realiza-se uma abordagem sobre a Física Moderna, apresentando alguns resultados que estiveram na origem da evolução da Física no início do século XX. Neste capítulo pretende-se ilustrar como se constrói a ciência, através da apresentação de novos conceitos ou teorias não explicáveis pelas teorias vigentes. Ainda neste capítulo se mostra o que se ensina em Portugal, e em que graus, bem como o nível de preparação do professor padrão.

No segundo e terceiro capítulos apresentam-se alguns conceitos teóricos essenciais à compreensão de vários assuntos, tais como a interacção da radiação com a matéria, e a dosimetria de modo a clarificar as descrições apresentadas nos capítulos seguintes. A apresentação destes conteúdos foi feita de modo simplificado sem a apresentação de cálculos matemáticos elaborados.

Ainda no terceiro capítulo faz-se também a apresentação teórica dos diferentes dosímetros, dando especial importância aos filmes. Estes dosímetros são de aquisição fácil, e apresentam custos baixos na sua utilização. Como a maioria das escolas tem câmara escura construída de raiz, seria interessante trabalhar na revelação de filmes sujeitos à exposição da radiação em parceria com um possível clube de fotografia.

No quarto capítulo apresenta-se a descrição do aparelho (fotodensitómetro didáctico) por nós construído e testado utilizando dois tipos de filmes diferentes. Apresentam-se os vários fantomas trabalhados bem como as várias fontes de radiação testadas.

No quinto capítulo apresenta-se a calibração absoluta e relativa do sistema através da comparação entre os ensaios efectuados com os dois tipos de filme diferentes e os efectuados recorrendo ao método ionométrico.

No sexto capítulo faz-se à apresentação da parte experimental em que se baseou este trabalho. Neste capítulo apresenta-se a avaliação dos materiais disponíveis à execução do mesmo, bem como as condições experimentais em que se fez essa avaliação.

No sétimo capítulo apresenta-se uma aplicação informática utilizando uma ferramenta poderosa na criação de materiais multimédia, o Macromedia Flash. Pretende-se com as simulações aqui apresentadas levar os alunos a uma melhor compreensão da interacção da radiação com a matéria.

Por último apresentam-se as conclusões e tecem-se alguns comentários acerca da possível aplicação desta experiência na escola.

CAPÍTULO I – Evolução do Estudo da Física

1.1. Introdução Geral da Física

A evolução da ciência foi marcada por três momentos históricos: (1) a revolução científica, com rupturas a nível religioso e político que permitiram a institucionalização da ciência; (2) a revolução industrial que promoveu o desenvolvimento do conhecimento, com o objectivo da aplicabilidade prática; (3) a Segunda Guerra Mundial, onde o papel da ciência na sociedade deixou marcas favoráveis e desfavoráveis.

Falar da Revolução Científica é falar de um período da história da humanidade que decorreu durante dois séculos (1500 a 1700), que levou ao abandono da visão do mundo aristotélico e à sua substituição pela visão do mundo newtoniano, também conhecido por mecanicista. De uma filosofia natural aristotélica adoptada pela cristandade medieval e associada a uma astronomia geocêntrica de Ptolomeu passa-se para uma filosofia mecanicista que estava associada a uma astronomia heliocêntrica, proposta por Copérnico. É no século XVII que Newton integra a astronomia copernicana num sistema natural que unificaria a física celeste (macroscópica) com a física terrestre (microscópica), e transformaria a filosofia mecanicista numa tarefa capaz de descrever a ordem natural, “com experiências seguras [...], com o auxílio da geometria, procurando, como escreveu Kant no século XVIII, “estabelecer as regras segundo as quais ocorrem certos fenómenos na natureza”.

É no século XVIII que se inicia a revolução industrial onde se promove uma nova evolução do conhecimento com o objectivo do desenvolvimento tecnológico, e consequentemente, para o desenvolvimento da indústria. Nesta fase a ciência contribuiu essencialmente para a resolução das necessidades que emergiam da sociedade.

Durante estes dois séculos é importante salientar alguns dos avanços verificados no âmbito da Física. No século XIX Dalton revela a sua concepção da natureza atómica da matéria, e em 1860 Mendeleev propõem o sistema periódico da química dos elementos. A variedade de matéria aparentemente infinita até ao momento é reduzida conceptualmente a um número finito de elementos, constituídos por pequenas unidades

semelhantes, chamadas átomos. Cada elemento emite e absorve radiação característica, que pode ser analisada por um espectrómetro.

Maxwell propõem um conjunto de equações diferenciais que explicam e unificam numa única interacção os fenómenos eléctricos e magnéticos. Em 1888 Hertz descobre as ondas electromagnéticas e confirma a teoria de Maxwell.

Nos finais do século XIX o conhecimento adquirido pelo homem relativamente ao espaço, tempo, matéria e energia parecia ser fundamentalmente correcto. Embora continuassem as pesquisas em física, julgava-se que as leis básicas do universo eram conhecidas. Tinha-se nessa altura a sensação que a Física havia concluído a sua tarefa e que, exceptuando alguns aspectos que era preciso aperfeiçoar, a ciência chegara às portas da “Grande Resposta”.

Contudo no século XX a evolução sofrida pela ciência foi de tal modo drástica que importa salientar alguns marcos a nível da sociedade que afectaram a concepção de ciência existente. As descobertas científicas, que põem em causa as anteriores, conduzem a novos conceitos, de que a relatividade é, apenas um exemplo.

É nesta altura que surge uma nova concepção do mundo físico, quando Max Planck anuncia, que a energia não é emitida ou absorvida de forma contínua, mas sim em pequenas porções discretas chamadas quanta, ou fótons, cuja grandeza é proporcional à frequência da radiação. Nascia a Física Quântica e consolidavam-se as mudanças de concepção que já vinham sendo anunciadas desde os fins do século XIX.

É em 1895, com a descoberta totalmente inesperada dos raios X por Röntgen, que se inicia a história da radiação ionizante na física moderna. Röntgen realizava as suas experiências com um tubo de Crook (figura 1.1) quando verificou a existência de fluorescência no gás residual e nas paredes do próprio tubo.

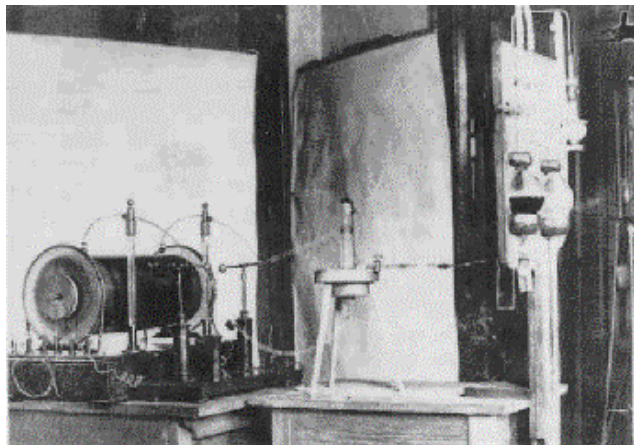


Fig.1.1. Tubo de Crook utilizado por Röntgen na descoberta dos raios X

Após dias de intenso trabalho Röntgen observa que estes raios possuem propriedades diferentes dos até então conhecidos: O seu poder de penetração em diferentes tipos de material pode ser visualizado através do esquema da figura 1.2.

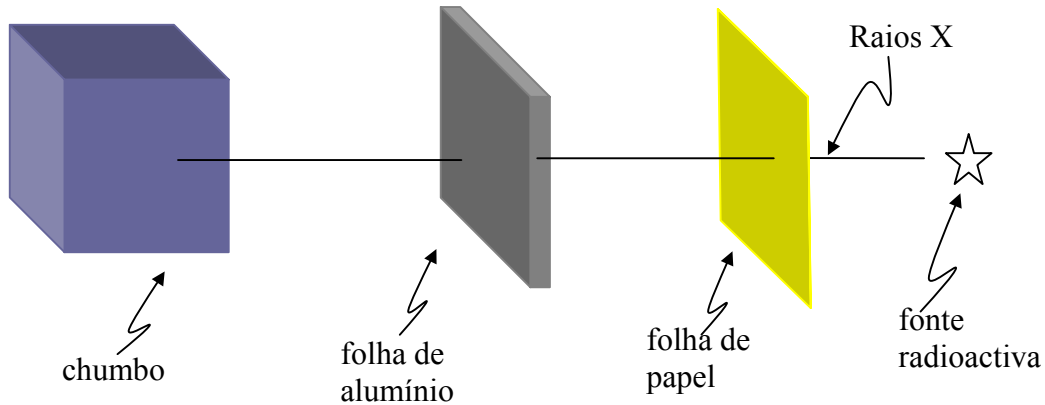


Fig. 1.2 Esquema demonstrativo do poder de penetração dos raios X

Pretende-se mostrar com esta figura que as folhas de papel e de alumínio são atravessadas pela radiação X, enquanto que a peça de chumbo apenas sofre uma pequena absorção.

A figura 1.3 mostra a fotografia que Röntgen tirou à mão da sua mulher em Dezembro de 1895, contrastando os diferentes graus de absorção nos tecidos moles, ossos e a aliança de ouro no seu anelar esquerdo.



Fig. 1.3. Fotografia que Röntgen tirou à mão da sua mulher

Ficou também demonstrado na altura que contrariamente aos já conhecidos raios catódicos, os raios X não sofriam qualquer deflexão em presença de um campo magnético. Foi descoberto ainda que estes raios impressionam placas fotográficas e provocam a perda de carga em electroscópios carregados. Este fenómeno é explicado pela capacidade que os raios X têm de ionizar as moléculas do ar, provocando a neutralização da carga do electroscópio.

Bequerel anuncia na Academia das Ciências de Paris em Fevereiro de 1896 a descoberta da radioactividade, que é confirmada mais tarde, em várias substâncias pelos Curies (1898). Rutherford em 1911, propõem a existência do núcleo atómico. Surge nesta altura um novo ramo da ciência a “Física Nuclear” dedicada ao estudo da matéria ao nível mais fundamental. A investigação sobre as propriedades do núcleo continuaram até hoje, tendo-se descoberto entre 1940 e 1950 a existência de partículas mais elementares que o núcleo. A física nuclear é olhada como descendente da física atómica e a progenitora da física das partículas (Kenneth Krane,1987). A física nuclear ocupa o centro das atenções na investigação para a descoberta dos constituintes da matéria, através de experiências com núcleos. A investigação das propriedades nucleares e das leis que governam a estrutura do núcleo contribuíram para o desenvolvimento de uma série de equipamentos tais como detectores de fumo, pacemakers cardíacos, aparelhos de imagem ligados à medicina, e utilizados como meio de diagnóstico e de tratamento, entre muitos outros, que permitem o aumento do nível, da qualidade e da esperança de vida. Mas, paralelamente a ciência também apresenta uma face menos simpática de que são exemplos a bomba de Hiroshima e as armas químicas e biológicas.

A física nuclear tem na realidade três preocupações fundamentais: investigar as partículas fundamentais e as suas interacções, classificar e interpretar as propriedades do núcleo, e procurar avanços tecnológicos que beneficiem a sociedade.

1.2. Ensino da Física

Durante os primeiros anos do século XX, o ensino das ciências, foi justificado pela sua relevância para a vida e pela sua contribuição para um conhecimento partilhado do mundo por parte de todos os membros da sociedade (De Bóer, 2000). Nos anos 40 o ensino das ciências estagnou, vindo nos anos 50 a renascer o interesse da noção de ciência para os cidadãos. Entre os anos 50 e 60 o significado da “ciência para uma efectiva cidadania”, era o objectivo do ensino das ciências. Nesta altura, surgiram nas escolas secundárias projectos curriculares inovadores com a intenção de melhorar o ensino da matemática e das ciências em geral. Os novos cursos de ciências eram rigorosos do ponto de vista científico e foram realizados esforços para encaminhar os melhores alunos para estudos da ciência. Ao longo dos anos 70 e início dos anos 80, a ciência é abordada num contexto social.

No início do século XX a finalidade do ensino da ciência nas escolas secundárias, alternava entre a formação geral e a preparação para a universidade e entre a satisfação das necessidades práticas dos alunos e das exigências intelectuais da sociedade. No entanto a massificação do ensino a partir da década de sessenta, deste século, provocou uma “sobre certificação” educativa, o que explica a desvalorização geral dos diplomas e a crescente falta de correspondência entre nível de ensino educativo e posto de trabalho. No início do século XXI é, mais uma vez, considerada parte da formação geral de todos os alunos, com o objectivo actual, de desenvolver um conjunto de competências que se revelam em diferentes domínios, tais como o conhecimento, o raciocínio, a comunicação e as atitudes.

As tendências educacionais que influenciam o ensino a partir de metade do século XX, continuam a ser preponderantemente construtivista, mas um construtivismo que concede uma importância considerável à aprendizagem de determinados conteúdos específicos e destaca a influência educativa do professor como um dos factores determinantes para que a actividade construtiva do aluno se oriente numa ou noutra direcção (C. Coll, 1992).

É portanto de grande importância que na formação dos professores se tenham em atenção os seguintes aspectos: uma compreensão da natureza do conhecimento científico, um melhor entendimento dos conceitos e teorias da Física, uma compreensão dos obstáculos e possíveis dificuldades dos alunos e uma concepção das ciências como “empresa colectiva e histórica” e o entendimento das suas relações com a tecnologia, a cultura e a sociedade.

Outro factor que deveria influenciar fortemente o ensino de física é o grande desenvolvimento desta ciência nestas últimas décadas. Vivemos hoje num mundo altamente tecnológico, onde se fala constantemente em fibras ópticas, códigos de barras, fusão nuclear, como proposta de energia limpa, raios X, microcomputadores, etc, etc, etc... e o nosso ensino ainda está em Galileu, Newton, Ohm, ou seja ainda não chegou ao século XX. Estamos no início do século XXI, mas em termos de ensino estamos muito longe desta época. Em 1905 Einstein propunha o Princípio da Relatividade Geral, e em 2004 em face dos programas em vigor, podemos constatar que ainda não ensinamos a relatividade Einsteiniana aos alunos do ensino secundário.

É no ano lectivo 2005-2006 que entra em vigor para o 12º ano a Reforma do Ensino Secundário e, com ela a inclusão, de uma unidade sobre Física Moderna, no programa deste ano. Esta unidade permite dar uma visão mais realista ao aluno do que é a física neste início de século, destacando aspectos essenciais da construção do conhecimento científico, ao apresentar e confrontar ideias e teorias científicas que revolucionaram a física e a própria ciência.

1.3. Estado da Arte

Educar é ensinar a aprender, pois quando os nossos alunos souberem aprender estão aptos a sobreviver nesta sociedade, que lhes reclama adaptações constantes e competências muito diversas.

A estrutura do nosso sistema educativo depende do Estado. O currículo apresenta-se como um processo contínuo de decisão que envolve o contexto político – administrativo, o contexto de gestão escolar e a execução na sala de aula. É um meio para a obtenção de determinados objectivos que, na Lei de Bases do Sistema Educativo e nas alterações posteriormente introduzidas (LBSE, 1986, alíneas b), c), e, f), art.º 3º), tem como último fim:

A formação do carácter e da cidadania do aluno, preparando-o para uma reflexão constante sobre os valores espirituais, estéticos, morais e cívicos..., desenvolver a capacidade para o trabalho e proporcionar, com base numa sólida formação geral, uma formação específica para a ocupação de um justo lugar na vida activa que permita ao indivíduo prestar o seu contributo ao progresso em consonância com os seus interesses, capacidades e vocação... contribuir para a realização pessoal e comunitária dos indivíduos.

De acordo com a alínea 6 do artigo 10º da mesma Lei, cada professor no ensino secundário é responsável, em princípio, por uma só disciplina, possuindo uma função educativa especializada. Tal levanta, quase sempre, inúmeras barreiras à interdisciplinaridade inerente à filosofia da própria Lei de Bases do Sistema Educativo. Contudo, ao nível das competências da operacionalização do currículo, existe bastante flexibilidade no que respeita ao papel do professor. No ensino secundário, o discurso escolar actual predominante é o da autonomia, da adaptação e da flexibilidade curricular. No entanto, a prática é bem diferente: em cada disciplina existe a necessidade de cumprir um programa (Gallagher, J.J. 1996) e preparar os alunos para a avaliação nacional (exames).

No documento sobre a proposta de revisão curricular para o ensino secundário lê-se:

“A elaboração dos programas das disciplinas deve centrar-se no essencial; mais do que memorizar grandes quantidades de informação que, nos dias de hoje, se encontra cada vez mais acessível, importa saber procurá-la, sistematizá-la, avaliar

a sua pertinência para o problema a resolver, explorá-la nas suas virtualidades. Estas competências são hoje consideradas indispensáveis e devem ser devidamente valorizadas e desenvolvidas”. DES (2000, p. 20)

1.3.1. O que se ensina e em que grau

Uma das finalidades formativas do Ensino Secundário no domínio das ciências deve ter em conta a valorização das aprendizagens adquiridas anteriormente pelos alunos no Ensino Básico e ajudá-los a reintrepetar conhecimentos prévios, alargando os seus conhecimentos, criando-lhes estímulos para o trabalho individual, aumentando-lhes a auto-estima e preparando-os para percursos de trabalho cada vez mais independentes.

No que diz respeito à Física e Química, estas disciplinas devem, tornar os alunos conscientes do papel da Física e da Química na explicação de fenómenos do mundo que os rodeia, bem como na sua relação com a Tecnologia.

Os programas de Física e Química para os 10º e 11º anos do Ensino Secundário, são orientados não para se atingir um nível de especialização muito aprofundado, mas para que os alunos alcancem um desenvolvimento intelectual e bases de conhecimento que permitam aceder, com a formação adequada, às disciplinas de Física e de Química, de carácter opcional, no 12º ano (DES, 2001).

Assim a componente de Química, do 10º e 11º anos procura constituir-se como um caminho para que os alunos possam alcançar um modo de interpretação do mundo que os rodeia naquilo que o constitui hoje, no quanto e como se afasta do que foi no passado e de possíveis cenários de evolução futura (DES, 2003). Segundo os autores destes programas, e para salientar o carácter dinâmico da Ciência devem os alunos ser confrontados com explicações aceites em diferentes épocas, explicitando esse dinamismo, assente mais em reformulações e ajustes do que em rupturas paradigmáticas. Neste contexto no final do 11º ano os alunos terão alcançado uma visão sobre (DES, 2001):

- a diversidade de substâncias existentes (famílias – grupos funcionais; estrutura – ligação química; composição – elementos químicos)
- a interpretação química sobre a organização do mundo material (Tabela Periódica dos Elementos Químicos; estrutura atômica – alguns modelos)
- a natureza das reacções químicas que podem ocorrer (reacções de ácido-base, de precipitação, de oxidação-redução) e modelos interpretativos (equilíbrio químico).

A componente de Física, dos 10º e 11º anos pretende ser um instrumento com que os alunos possam alcançar um modo de interpretação do mundo que os rodeia e de compreender como esse conhecimento foi sendo conseguido. Nesta perspectiva e segundo o documento do programa de 11º ano, a Física pode e deve ser ensinada mostrando como os seus princípios e resultados básicos foram estabelecidos e como fazem parte de uma relevante herança cultural proporcionadora de meios de desenvolvimento da sociedade. De modo a evidenciar o carácter dinâmico da Ciência, deverá mostrar-se como as teorias consideradas hoje correctas substituíram outras que, por sua vez, já teriam dado lugar a outras, em cada época considerada mais plausível.

Pode verificar-se, que segundo estes autores, é muito importante a apresentação da História da Física como motor da compreensão da natureza do conhecimento científico e da grande importância da Física na sociedade, uma vez que a descoberta das leis fundamentais desta disciplina tiveram profunda repercussão na Humanidade, pois conduziram a aplicações práticas que transformaram profundamente a economia, a medicina, os transportes e tantos outros aspectos da nossa vida.

Os alunos no final do 11º ano devem ter adquirido conhecimentos que lhes permitam acompanhar assuntos em que a Física tenha um papel dominante. Assim o programa referente a estes dois anos pretende dar-lhes uma visão sobre:

1. Lei da Conservação da Energia (em áreas como a Termodinâmica, a Mecânica, numa abordagem integradora da Cinemática e da Dinâmica, e a Electricidade) numa perspectiva ambiental.
2. a informação através das telecomunicações baseada na propagação ondulatória (luz e som).
3. as relações entre as forças e os seus efeitos (em particular, os movimentos).

No 12º ano os programas das disciplinas de Física e de Química, são orientados para que os alunos alcancem um nível de especialização aprofundado, desenvolvimento intelectual e bases de conhecimento que permitam a realização de exames finais de âmbito nacional.

O Ministério de Educação disponibiliza orientações de gestão de programas, contendo “o núcleo significativo de objectivos e conteúdos, que como a própria designação revela, determina a parte do programa que, em primeira linha e obrigatoriamente, deverá constituir, a nível nacional, o processo de ensino-aprendizagem a desenvolver”. Este documento foi elaborado partindo do pressuposto que os alunos adquiriram os pré-requisitos necessários ao desenvolvimento do programa. Foi também tido em conta o papel relevante das actividades experimentais no processo de ensino-apredizagem.

Embora seja do conhecimento geral que os alunos do 12º ano apresentam grandes deficiências a nível de conhecimentos básicos, tal não pode justificar o não cumprimento dos programas. Daí sugere o documento referido, que se faça uma abordagem prévia de conteúdos/conceitos que constituem pré-requisitos para estas disciplinas.

Na disciplina de Física o núcleo significativo de conteúdos e de conceitos essenciais divide-se em três grandes unidades:

1. Mecânica (onde pela primeira vez se faz a representação vectorial das grandezas físicas já conhecidas nos anos anteriores, onde se estudam os movimentos rectilíneos, curvilíneos e oscilatórios. Faz-se uma abordagem exhaustiva da Dinâmica de uma partícula material em movimento num plano, da Dinâmica de um sistema de partículas materiais, e da Mecânica dos fluidos. Aborda-se ainda nesta unidade a Gravitação)
2. Electricidade e Magnetismo (onde se apresenta o campo e o potencial eléctrico, os circuitos eléctricos e a acção de campos magnéticos sobre cargas em movimento e correntes).
3. Física Moderna (onde na Teoria da relatividade se abordam as noções de referenciais inerciais e acelerados, bem como a relatividade galileana e a

relatividade geral e restrita de Einstein. Faz-se a introdução à física quântica e estudam-se núcleos atômicos e a radioactividade).

Na disciplina de Química o núcleo significativo de conteúdos e de conceitos essenciais divide-se em três grandes unidades:

1. Metais e ligas metálicas (onde se aborda a importância dos metais na sociedade actual, as propriedades periódicas dos elementos da Tabela Periódica tais como a energia de ionização e a afinidade electrónica, a estrutura e propriedades dos metais, a degradação e a protecção de metais e reacções de oxidação-redução. Faz-se a diferença entre célula voltaica e electrolítica. Aborda-se ainda metais, complexos e cor, os metais no organismo humano e por último os metais como catalizadores).
2. Combustíveis, energia e ambiente (esta unidade divide-se em duas secções onde na primeira se estudam os combustíveis, tais como o carvão, o gás natural e o crude, e na segunda a energia, o calor, a entalpia e a variação de energia. Na primeira secção faz-se uma abordagem aos compostos de carbono, sua nomenclatura, isomeria, hibridização e geometria, refere-se ainda a electronegatividade e polaridade de ligações e de moléculas. Estuda-se o comportamento do gases ideais e as interações intermoleculares. Na segunda secção desta unidade estuda-se entalpias de reacção e a Lei de Hess. Estuda-se ainda a radioactividade e o período de semi-vida)
3. Plásticos, vidros e novos materiais (nesta unidade aborda-se os plásticos e os estilos de vida das sociedades actuais, os plásticos e os materiais poliméricos, os plásticos como substitutos do vidro e ainda novos materiais como por exemplo os biomateriais, os compósitos e os materiais de base sustentada)

1.3.2. A preparação do professor padrão

O ensino das ciências ocupa, no nosso ponto de vista, um lugar determinante na educação e formação dos jovens enquanto cidadãos de uma sociedade caracterizada pela constante transformação, por novas noções temporais e espaciais, pela diversidade cultural, pela complexidade tecnológica e pela incerteza científica que conduzem a

formas de estar e pensar muito diversas. Pretendemos que os nossos alunos, enquanto alunos de ciências, adquiram, não somente conhecimentos científicos, mas, também, desenvolvam competências e atitudes que lhes permitam assumir o seu lugar enquanto cidadãos com um papel crítico e interveniente.

Ensinar é um verbo presente na nossa actividade profissional diária, cuja concretização exige estudo e aperfeiçoamento constantes, num envolvimento total, com a finalidade de melhorar a actividade exercida e contribuir para uma aprendizagem efectiva, satisfatória e recompensadora para aqueles que conosco se cruzam – os alunos. Ao entrar numa sala de aula estamos a estabelecer uma ligação complexa com um objectivo determinado. Confrontamo-nos, por um lado, com um grupo de alunos “seres complexos, únicos, com características pessoais e sociais distintas e, por vezes, antagónicas” e, por outro, com a obrigatoriedade de ensinar determinados assuntos que, por sua vez, são determinados por um currículo que nos é apresentado como resultado final de um trabalho de estudo e aperfeiçoamento do ensino a ser ministrado aos alunos. Este apresenta finalidades preestabelecidas, determina os conteúdos científicos a abordar e sugere a gestão do tempo a dispensar com cada assunto, podendo mesmo, por vezes, sugerir estratégias.

Ao professor cabe dar corpo ao currículo tanto no terreno como, particularmente, na sala de aula. O papel do actual professor de ciências é o de ser um mediador na aprendizagem do aluno, procurando o equilíbrio entre os conhecimentos académicos e o desenvolvimento de competências mais abrangentes que permitirão ao aluno desenvolver-se como cidadão. Ser professor, na nossa realidade educativa, significa ter, inicialmente, uma habilitação científica, habitualmente seguida por uma formação pedagógica, que nos permite ter acesso ao ensino. Ao longo do percurso profissional é possível adoptar uma postura passiva, restrita à escola, ao grupo disciplinar ou à disciplina leccionada, subjugada às orientações superiores e aos manuais escolares, sem se tentar alargar os horizontes. A acomodação poderá ser mesmo o pior inimigo dos professores: impede-os de tentar alcançar outras metas que contribuam para uma actuação diferente da do habitual professor – reproduzidor que, ao longo do tempo, recorre, constantemente, às mesmas estratégias e a exemplos pouco atractivos que em nada motivam a descoberta de novos rumos, isto é, a descoberta de novas estratégias, novas abordagens, correndo o risco de tornar as suas aulas aos olhos dos seus alunos de “enfadonhas”. O professor pode também optar por uma atitude activa apostando no seu

crescimento pedagógico científico e tecnológico, escolhendo uma das sugestões de formação que se fazem periodicamente na área da investigação pedagógica, científica e/ou tecnológica.

Que papel deverá então ter o professor nesta escola do século XXI? Deverá continuar a ser a autoridade suprema, que sabe tudo, incumbida de ensinar o aluno que nada sabe? Que fazer quando o aluno, usando a grande variedade de canais alternativos que a tecnologia coloca ao seu alcance – como acontece com a Informática e a Internet – aparece na escola a falar de coisas que o professor, muito naturalmente, ignora? Será que deve ser mandado calar, porque está a “perturbar a aula” – porque está a falar de coisas, bem reais, de que a escola não sabe falar? Ou deveremos começar a explorar outras parcerias de aprendizagem, mais consentâneas com o mundo em que vivemos? Outras parcerias verticais, horizontais e oblíquas? Uma parceria riquíssima, e de natureza oblíqua, é a do mestre com o aprendiz, em que os dois aprendem, cada um à sua maneira! O mestre usa a sua maturidade e a sua longa experiência. O aprendiz usa a criatividade da sua inexperiência, o seu espírito de aventura, a sua destreza física porventura superior. Pensamos que é neste contexto que, aos poucos, sem grandes rupturas, o papel do professor deve ser adaptado à criação de uma escola nova, onde possa saber criar contextos de aprendizagem fecundos, identificar muito mais as dificuldades de aprendizagem e estruturar as vivências exteriores do aluno, transformando-as em saberes estruturantes e operacionais.

Ao analisarmos os programas de Física e Química propostos na revisão curricular homologada em 2001, consideramos fundamental para a nossa formação, enquanto professores, aderir às metodologias aí propostas e à filosofia subjacente, tentando deixar um ensino das ciências, cuja aplicação curricular se resume a meras sequências de factos científicos e tecnológicos, de fronteiras bem delimitadas e de conhecimentos muito especializados, para repensar o modo como ensinamos, recorrendo a aplicações concretas de problemas da vida quotidiana do cidadão. O ensino dos nossos alunos, enquanto cidadãos, deve proporcionar-lhes uma aprendizagem, quer de conhecimentos, quer de desenvolvimento de competências, onde é imprescindível pensar, crítica e reflexivamente, sobre temas e problemas.

Deparamo-nos frequentemente com a resposta interiorizada que atribui à escola o papel de ajudar os indivíduos a compreender o mundo que os rodeia e a consciencializar-se do

seu próprio envolvimento, presente e futuro, nesse mundo, onde é impossível conceber a sociedade ocidental de que fazemos parte, sem o actual conhecimento científico e tecnológico. Não raras vezes a ligação entre ciência e tecnologia é vista, pela sociedade, de modo passivo, como sendo automática e desprovida de questões éticas, políticas e sociais. Este mundo exige de nós uma grande responsabilidade ao nível dos comportamentos individuais e colectivos, mas também ao nível da sua própria gestão. Isto leva-nos a supor que a resolução de problemas, através da ciência e da tecnologia não pode ser realizada independentemente da sociedade.

Tal como referido no relatório J. Delors , 1996, cabe à escola disponibilizar instrumentos que habilitem os alunos a dominar as novas tecnologias, a enfrentar os conflitos, a cultivar a criatividade e a empatia de que terão necessidade para serem cidadãos actores e criadores. Segundo o mesmo relatório, a falta de um ensino científico de qualidade, a nível do secundário, compromete o desenvolvimento da capacidade científica de qualquer país. Destaca-se a necessidade, cada vez mais consciente, de aumentar o nível de literacia científica de todos os cidadãos e isto leva-nos, enquanto professores, a questionar a nossa posição actual, obrigando-nos de algum modo a contribuir para este fim, enveredando por novos rumos. Estes tornam fundamental capacitar o aluno para retomar, num contexto diferente, na vida real, determinada aprendizagem realizada em contexto escolar. O dinamismo e a eficácia do conhecimento são reforçados pelo recurso a outras atitudes e práticas (que ultrapassem a memorização e repetição). Destas salientamos o interesse pela descoberta, a pesquisa metódica, o espírito crítico e selectivo, a resolução de problemas e as tomadas de decisão. Mais do que adquirir informação, pretende-se que o aluno aprenda a procurá-la e a geri-la, de modo a continuar a fazê-lo no futuro, atendendo a que o conhecimento científico adquirido na escola não é total, devido ao explosivo progresso da ciência e da tecnologia.

1.3.3. A necessidade de formação dos Professores

É hoje cada vez mais partilhada a ideia de que a formação científica dos cidadãos em sociedades de cariz científico/tecnológico deve incluir três componentes que são: a educação em Ciência, a educação sobre Ciência e a educação pela Ciência (DES, 2001)

Segundo este documento no primeiro caso está em causa a dimensão conceptual do currículo, o conhecimento em si mesmo dos conceitos, leis, princípios e teorias, aspecto que tem sido enfatizada nos programas anteriores. Na educação sobre Ciência o objecto de estudo é a natureza da própria ciência, onde a sua prática é fundada sobre valores da lógica e do rigor e é orientada para a aquisição do saber pela experimentação e pela análise. Assim a criação do saber representa a actividade merecedora do mais elevado reconhecimento intelectual. É fundamental que o currículo escolar se debruce sobre processos e objectos técnicos usados no dia-a-dia, que se discutam problemáticas sócio-científicas, que se revele a Ciência como uma parte do património cultural da nossa época. A educação pela Ciência tem como objectivo a dimensão formativa e cultural do aluno através da ciência, valorizando a sua formação pessoal e social.

Neste quadro impõe-se aos professores mudanças significativas, mas específicas, nas suas práticas, às quais podem aderir ou resistir. Estas incluem, ao nível do ensino, a introdução compulsiva da avaliação do desempenho, não como actualmente é realizada – mera formalidade burocrática –, mas como meio regulador de métodos e modelos utilizados pelo professor, onde a formação contínua se centra nas necessidades de formação prática, em detrimento de acções de formações teóricas ou obsoletas. Todavia, estas mudanças são indissociáveis do impacto que causam na motivação, na energia, na voluntariedade, no espírito reflexivo e na própria capacidade dos professores lidarem com tais inovações. M.A. Pedrosa (2001), refere que os professores tendem a reproduzir modelos de actuação a que foram expostos na sua própria formação sendo, portanto, imprescindível que estes se envolvam em actividades práticas de natureza diversificada, nomeadamente, as que permitam, a partir do mundo exterior à realidade escolar, trabalhar com problemas, proporcionar a criação de situações e utilizar contextos susceptíveis de gerar discussão dirigida à identificação de problemas, a partir dos quais se desenvolva o trabalho prático no ensino das ciências. Neto e Valente (1997) afirmam que “uma educação que não prepare o aluno para resolver problemas... não será nunca uma verdadeira educação”. Os autores relembram Dewey ao considerar que os problemas são imprescindíveis para a própria actividade de pensar, actuando como estímulo do pensamento. A formação de professores ocupa um papel determinante na implementação eficaz do ensino das ciências. Esta deverá proporcionar oportunidades de consciencialização e actuação sobre as práticas, no sentido de promover o ensino das ciências preconizado pelos objectivos actuais.

CAPÍTULO II - Interação da Radiação com a Matéria

2.1. Produção de raios X

Os raios X foram descobertos em 1895 por Wilhelm Röntgen, quando estudava o efeito da passagem da corrente eléctrica usando tubos onde era feito o vazio. Os fenómenos luminosos que aparecem com gases a baixa pressão podiam ser interpretados como sendo devidos à ionização do gás contido no tubo. No entanto quando a luminosidade aparece, com vazio mais intenso, não se deve já aos gases mas a fenómenos de fluorescência que variavam de cor conforme a natureza do vidro da parede do tubo utilizado. Estes raios eram muito energéticos e atravessavam com facilidade a matéria, impressionavam chapas fotográficas protegidas e não eram desviadas por campos magnéticos, o que queria dizer, que contrariamente aos raios catódicos estes não eram constituídos por partículas carregadas. A denominação de “raios X” foi-lhe atribuída pelo facto de Röntgen não conhecer bem a sua natureza física.

Os raios X são ondas electromagnéticas de alta energia, que se propagam em linha recta e com a velocidade da luz, com uma energia cerca de 10 keV a 1 MeV (o que corresponde a uma frequência cerca de 10^{17} a 10^{19} Hz) como se pode ver no espectro electromagnético da figura 2.3.

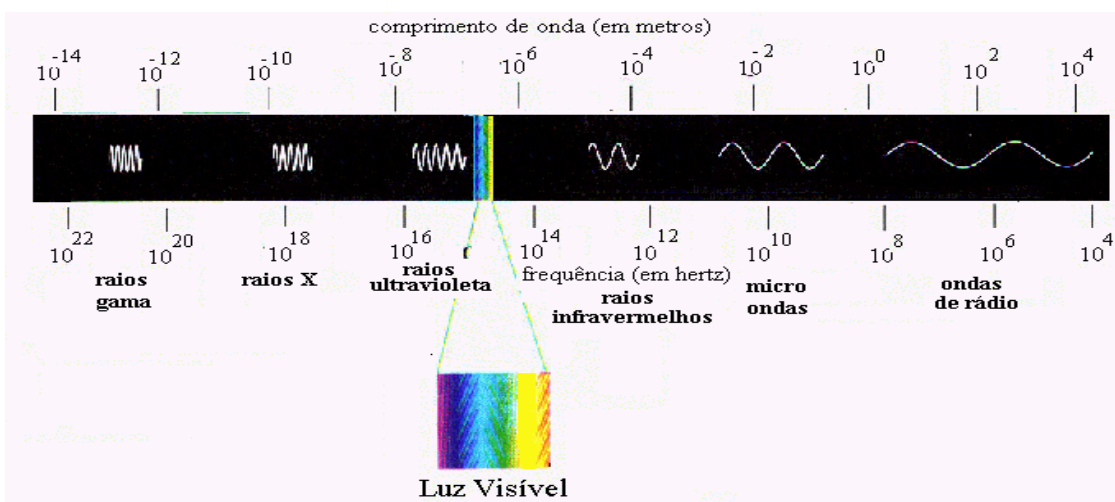


Fig.2.3 – Espectro electromagnético

Os raios X podem ser produzidos quando um feixe de electrões de elevada energia cinética atinge um alvo metálico. Os electrões incidentes perdem a sua energia cinética na interacção com os electrões dos átomos que constituem o alvo, sendo desviados devido à interacção colombiana com os núcleos dos mesmos, ou provocando a ionização e/ou excitação dos átomos do alvo.

A partir desta interacção podem obter-se dois tipos de espectros de raio X. Um contínuo, chamado radiação de travagem, e outro descontínuo, chamada radiação característica.

No primeiro caso os electrões podem ser deflectidos nas proximidades do núcleo atómico perdendo energia por emissão de um fotão X, como mostra a figura 2.4

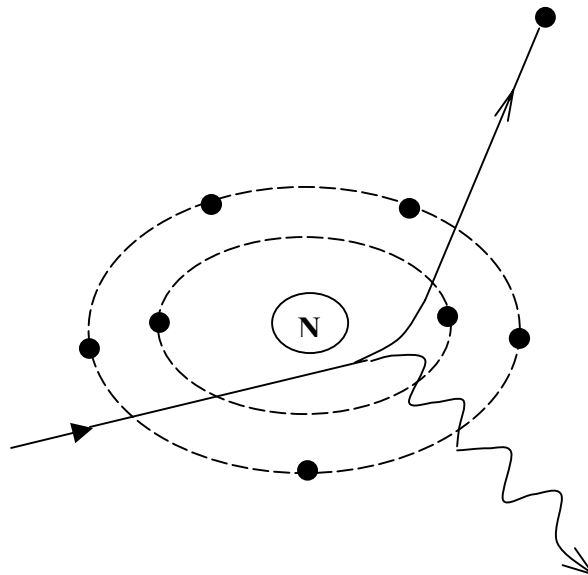


Fig. 2.4 Representação da emissão de um fóton X (radiação de travagem)

Esta deflexão deve-se às forças eléctricas que os núcleos exercem sobre os electrões, produzindo uma travagem dos mesmos e consequentemente uma diminuição da sua energia cinética. Os raios X produzidos por travagem dos electrões no alvo podem ter um valor máximo de energia que corresponde à energia cinética dos electrões incidentes.

Assim um feixe mono energético de electrões produz um espectro contínuo de raios X com energia até ao valor da energia do feixe (Turner J. E., 1985).

No segundo caso se a energia cinética do electrão incidente for suficientemente elevada pode interagir com algum dos electrões das camadas interiores do átomo do alvo removendo-o, criando aí uma lacuna.

Esta lacuna pode ser preenchida quando um electrão, proveniente de uma camada mais elevada, transita para a camada de energia mais baixa que a contém. Esta transição pode ser acompanhada pela emissão de um fotão X cuja energia é igual à diferença de energia entre as duas camadas referidas, como mostra a figura 2.5.

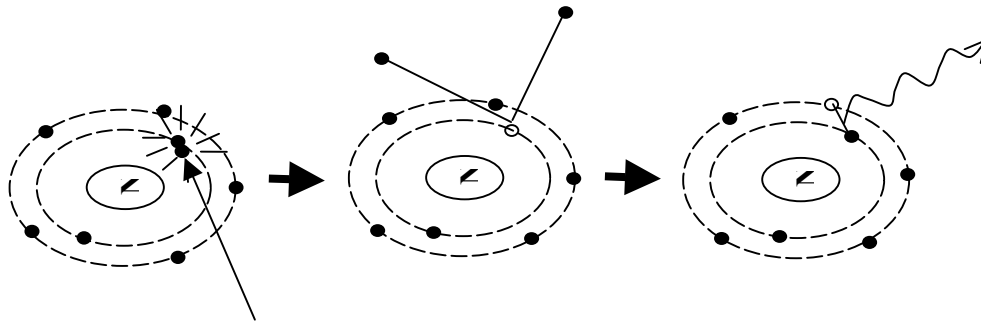


Fig.2.5.Representação da emissão de um fóton X (radiação característica)

De acordo com a mecânica quântica, os electrões nos átomos, distribuem-se em camadas de energia, K, L, M,... A figura 2.6 mostra um esquema simplificado das camadas de energia, com indicação de algumas transições correspondentes à emissão de espectros K e L de raios X, para o átomo de molibdénio.

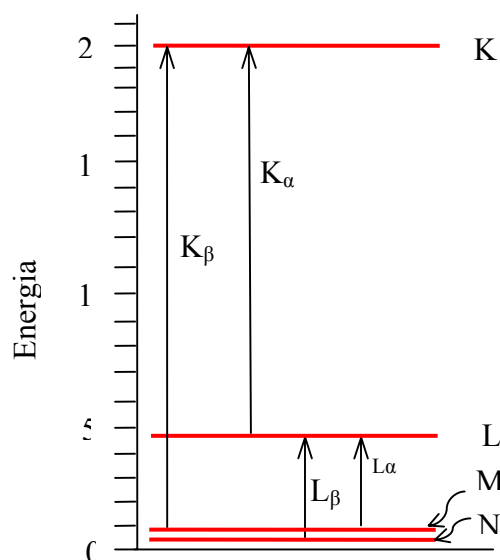


Fig. 2.6. Diagrama simplificado dos níveis de energia para o átomo de molibdénio, mostrando as transições que originam alguns dos raios X característicos daquele elemento (adaptado a partir de Halliday, Resnick, Walker, 2005).

As energias dos fótons X emitidos são características do elemento de que é feito o alvo. O espectro de energias discreto, referente à radiação característica que é emitida devido a interações entre os electrões incidentes e os electrões orbitais dos átomos do alvo, surge sobreposto ao espectro contínuo de energia dos fótons X produzidos por travagem dos electrões no alvo, como mostra a figura 2.7, para o molibdénio e para o cobre, em que λ é o comprimento de onda e I a intensidade relativa. As transições K_α e K_β na figura 2.6 são as que produzem os dois picos de raios X na figura 2.7, para o átomo de molibdénio. A linha espectral K_α , por exemplo, é originada quando um electrão da camada L preenche uma lacuna na camada K.

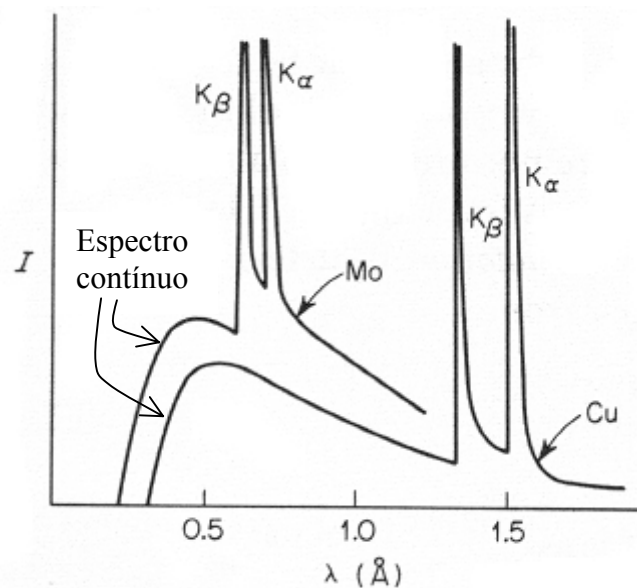


Fig. 2.7. Espectro de raio X característico para o molibdénio e para o cobre.

Estes espectros são como as “impressões digitais” das emissões de raios X.

2.2. Produção de raios γ

Tal como na estrutura electrónica do átomo, o núcleo é também caracterizado por níveis discretos de energia.

Podem ser feitas transições entre estes níveis com emissão ou absorção de radiação electromagnética com uma energia igual à diferença de energia dos níveis que participaram na transição. Estas energias são elevadas e caracterizam a alta energia de ligação do núcleo. À radiação electromagnética emitida ou absorvida com alta energia

chamam-se raios γ , e tal como os átomos apresenta linhas espectrais características do núcleo emissor. (Leo, W.R., 1987).

Neste trabalho os fotões γ foram obtidos através de uma fonte de ${}^{60}_{27}\text{Co}$

O ${}^{60}_{27}\text{Co}$ é um isótopo radioactivo que pode ser produzido num reactor nuclear quando se bombardeia o seu isótopo estável o ${}^{59}\text{Co}$ com neutrões.

Na figura 2.8 encontra-se representado um esquema simplificado do decaimento do ${}^{60}_{27}\text{Co}$ (Turner J. E., 1985).

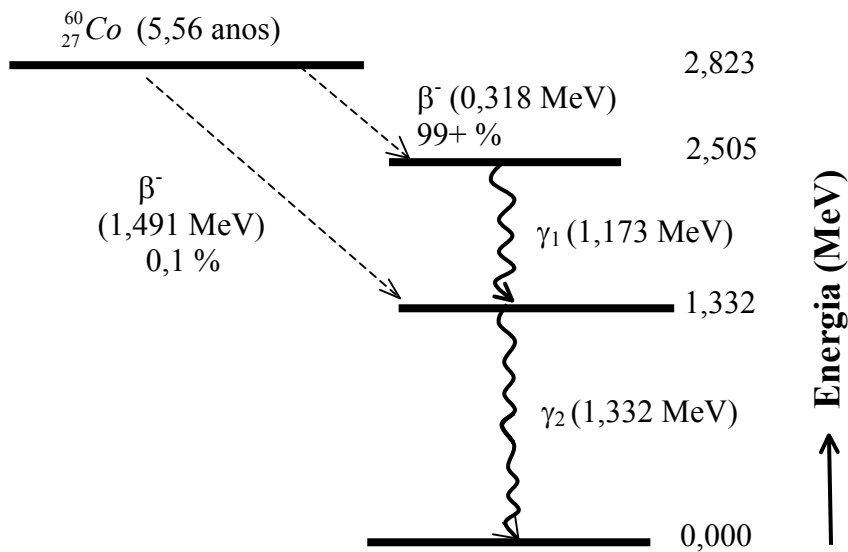


Fig. 2.8. Esquema de decaimento do ${}^{60}_{27}\text{Co}$ (adaptado a partir de Turner J. E., 1985)

O ${}^{60}_{27}\text{Co}$ é um radioisótopo que emite partículas β^- , 99% das quais com a energia cerca 0,318 MeV, originando um átomo de níquel no estado excitado. Este isótopo do ${}^{60}\text{Ni}$ possui um excesso de energia de aproximadamente 2,505 MeV, e emite sucessivamente dois fotões γ com energias de 1,173 MeV e 1,332 MeV para atingir o seu estado fundamental. As restantes 0,1% de partículas β^- , emitidas com uma energia de aproximadamente 1,491 MeV, dão origem a um outro isótopo de ${}^{60}\text{Ni}$ no estado excitado com uma energia cerca de 1,332 MeV, que por sua vez emite um fotão γ com energia de aproximadamente 1,332 MeV para atingir o estado fundamental.

2.3. Processos de interacção da radiação electromagnética com a matéria

Quando um feixe de radiação electromagnética interaccua com um meio, há diferentes processos de interacção entre fotões incidentes e os átomos que constituem o meio. Neste trabalho os processos de interacção de maior importância são o efeito fotoeléctrico, a difusão de Compton e a produção de pares electrão-positrão. Iremos de seguida apresentar os principais aspectos de cada um destes processos, e referir os coeficientes de atenuação.

2.3.1. Efeito fotoeléctrico

O efeito fotoeléctrico (Leo, W.R., 1987) envolve a absorção da energia de um fotão incidente por um electrão dum átomo do meio, com a sua consequente ejeção de uma camada K, L, M ou N do átomo (Figura.2.9). A energia do electrão ejectado é então dada por $h\nu - E$, onde $h\nu$ representa a energia do fotão incidente e E a energia de ligação do electrão atómico.

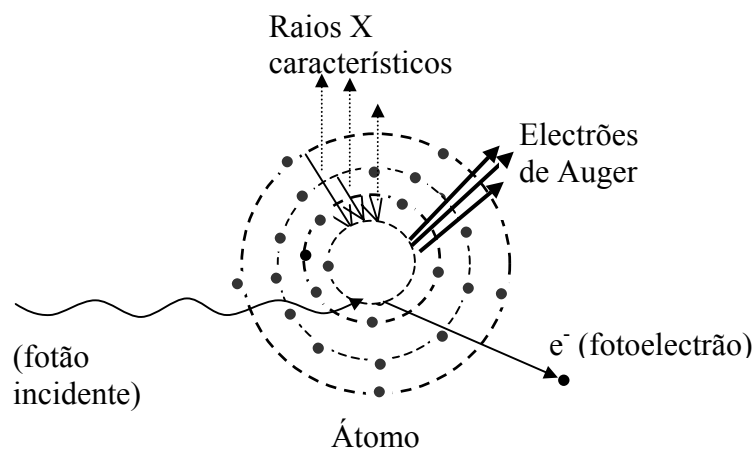


Fig.2.9. Efeito fotoeléctrico (Khan, F.M., 1984)

A lacuna deixada na camada K pelo fotoelectrão será preenchida por um electrão da camada L, onde por sua vez fica uma lacuna que virá a ser preenchida por um de ordem superior, e assim sucessivamente até que o nível sem electrão seja o de menor energia. Esta desexcitação dos electrões produz a emissão de radiação característica de raios X e a possível emissão de electrões de Auger.

Por vezes acontece que um electrão que se encontre na camada L faz uma transição para a camada K para preencher uma lacuna que aí exista, libertando energia que é igual à diferença de energia entre os níveis de transição. Pode ocorrer uma ejeção de um electrão para fora do átomo, se ele captar a energia libertada na transição anterior, resultando nesse caso um electrão de Auger. Estes dois processos são concorrentes.

A probabilidade de se produzir um fotoelectrão quando um raio de luz incide num átomo é dependente do número atómico Z do átomo e da energia E dos fotões incidentes. Esta probabilidade varia aproximadamente com a grandeza física $\frac{Z^4}{E^{3,5}}$.

Pode verificar-se analisando esta grandeza que a probabilidade de se produzir um fotoelectrão é maior para materiais com elevado Z e baixa energia dos fotões incidentes.

2.3.2. Efeito de Compton

No efeito de Compton (Leo, W.R., 1987) um fotão de energia $h\nu$ interage com um electrão livre.

Na matéria os electrões encontram-se ligados, no entanto, se a energia de ligação desses electrões for muito inferior à dos fotões incidentes, podemos considerá-los electrões livres. Da interacção entre o electrão e o fotão incidente, resulta um fotão de menor energia, (fotão difundido), emitido numa direcção que faz um ângulo θ com a direcção de incidência. O electrão é ejectado, numa direcção que faz um ângulo ϕ com a direcção de incidência, mas com maior energia cinética do que o fotão difundido. A radiação difundida no efeito de Compton tem, comprimento de onda λ' maior do que o comprimento de onda λ da radiação incidente. Na figura 2.10 a) e b) representa-se esquematicamente este processo.

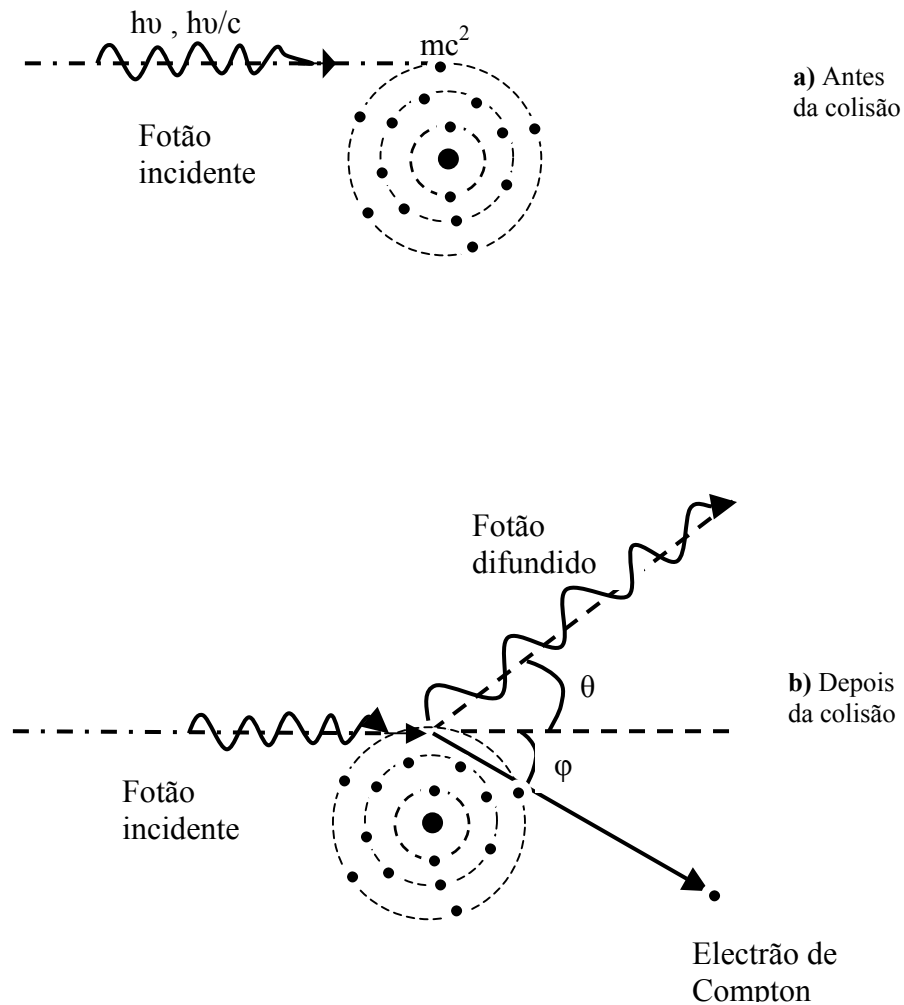


Fig. 2.10 Diagrama ilustrando o efeito de Compton do fóton sobre um electrão considerado livre e estacionário, antes da colisão a) e depois da colisão b). (esquema adaptado a partir de Turner 1985)

O esquema apresentado pretende mostrar que um fóton de energia $h\nu$, incide num electrão livre estacionário com energia mc^2 (ver figura 2.10 a)). Após a colisão (fig 2.10 b)) o fóton é desviado de um ângulo θ com uma energia $h\nu'$. O desvio do electrão de Compton tem um ângulo ϕ e transporta uma energia E' e um momento p' .

Nesta colisão há sempre conservação da energia total e do momento linear. Assim aplicando as leis da conservação da energia e do momento teremos:

$$h\nu + mc^2 = h\nu' + E' \quad [2.1]$$

$$h\nu/c = h\nu'/c \cos \theta + p' \cos \varphi \quad [2.2]$$

$$0 = h\nu'/c \sin \theta - p' \sin \varphi \quad [2.3]$$

resolvendo estas três equações obtêm-se para as energias do fóton difundido e do electrão de Compton as equações apresentadas respectivamente em 2.4 e 2.5 e para o ângulo φ formado pela direcção do fóton incidente e pela direcção do electrão de Compton a equação [2.6].

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)} \quad [2.4]$$

$$E_c = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\gamma(1 - \cos \theta)}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)} \quad [2.5]$$

$$\cot \varphi = (1 + \gamma) \tan \frac{\theta}{2} \quad [2.6]$$

Onde $\gamma = \frac{h\nu}{m_e c^2}$ sendo $m_e c^2$ a energia do electrão em repouso (0,511 MeV) e θ o ângulo formado pela direcção de propagação do fóton incidente e pela direcção do fóton difundido.

2.3.3. Produção de Pares

Quando um fóton incidente se aproxima do núcleo fica sujeito a uma forte força Columbiana, convertendo-se num par electrão-positrão (figura 2.11). Para que este processo aconteça é necessário que o fóton incidente tenha energia superior ao dobro da energia de repouso do electrão (1,022 MeV)

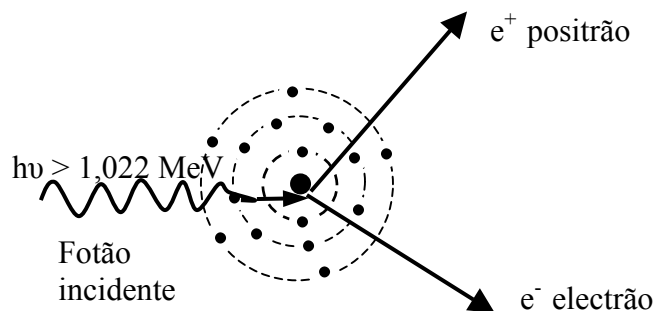


Figura 2.11. Esquema do mecanismo da produção de pares (esquema adaptado a partir de Turner 1985)

A diferença entre as energias do fóton incidente e do electrão em repouso é convertida em energia cinética do electrão (E_{c-}) e do positrão (E_{c+}), conforme a equação seguinte:

$$h\nu - 2m_e c^2 = E_{c+} + E_{c-} \quad [2.7]$$

É obvio que o valor de $2 m_e c^2$, ou 1,022 MeV, é um limite para a ocorrência deste processo, e em geral a produção de pares é importante para fótons incidentes de elevada energia.

A figura 2.12 mostra a importância da produção de pares relativamente aos dois processos referidos anteriormente, para valores de energia acima de 5 MeV.

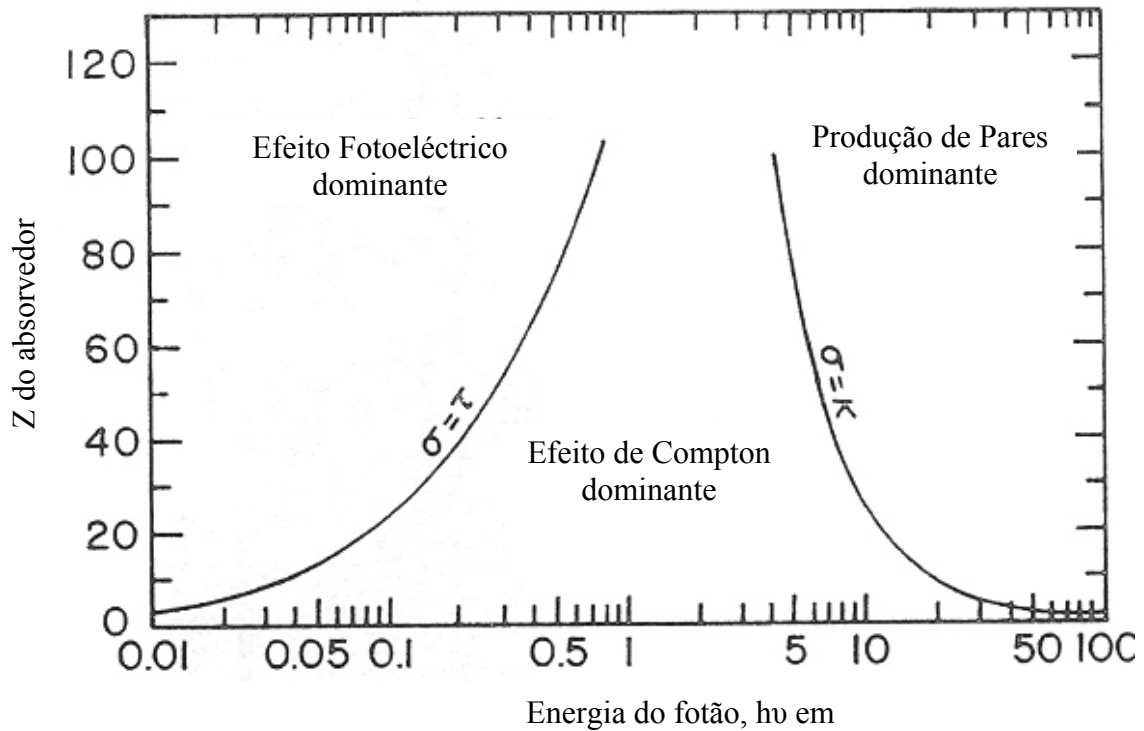


Figura 2.12. Os três processos de interação de fótons com a matéria e as suas zonas de ocorrência.

Na figura 2.13 apresentamos um esquema representativo das interações de um feixe de fótons com um meio através dos processos anteriormente referidos.

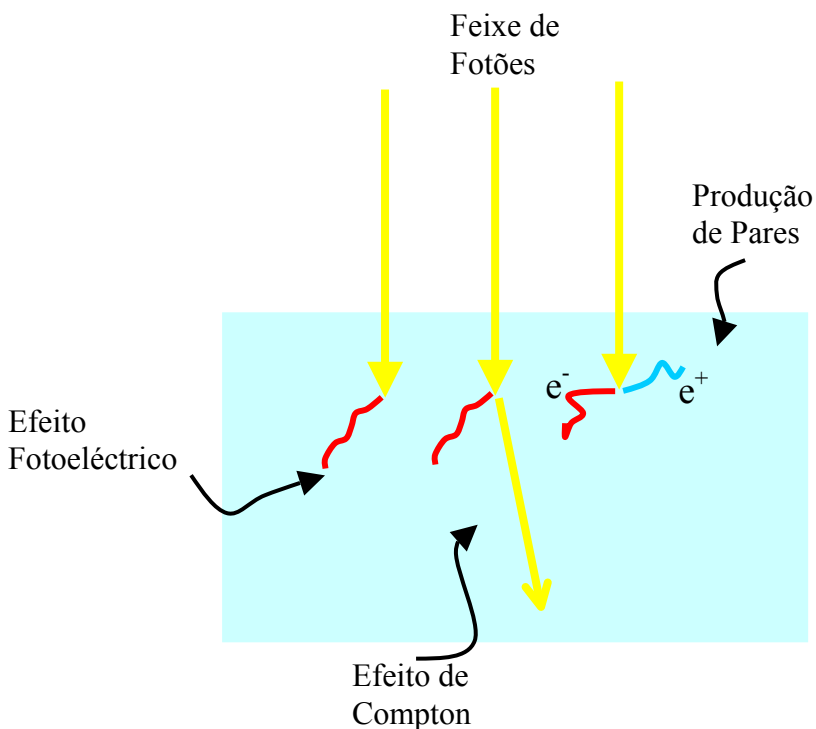


Fig. 2.13. Esquema que representa um meio onde incide um feixe de fótons que interage com esse meio através dos processos referidos ao longo do texto. (adaptado a partir de Nahum - Lesson 2)

2.4. Coeficientes de atenuação

Como acabámos de expor a interacção da radiação X e gama com a matéria faz-se através de processos físicos, tais como o efeito fotoeléctrico, difusão de Compton e criação de pares electrão-positrão. A probabilidade de ocorrência de cada um destes processos depende essencialmente da energia do fóton incidente e do tipo de material atravessado.

É de fundamental importância neste momento perceber o conceito de “atenuação”.

Consideremos um feixe monoenergético e não divergente de raios paralelos que incide perpendicularmente a um alvo uniforme constituído por uma amostra fina de um determinado absorvente homogéneo (figura 2.13).

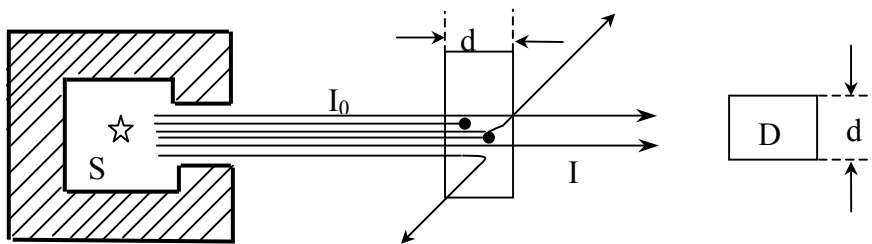


Figura 2.13. Esquema de uma montagem experimental para medir a absorção de radiação num meio material de espessura dx . O feixe de radiação da fonte S é colimado e desviada ou absorvida pelo material. O feixe de intensidade I atinge o detector D. (adaptado de Krane, 1987)

Nesta montagem pode ver-se um pequeno detector de tamanho d que é colocado a uma distância do alvo de modo a que só os fótons que não sofrem interacção (fótons primários) sejam detectados. Os fótons difundidos não são contabilizados.

Se a intensidade do feixe de fótons incidentes que atravessa um meio material segundo uma determinada direcção for (I_0), e a intensidade após ter atravessado uma espessura x desse meio for (I), a relação entre as intensidades da radiação antes e depois de atravessar o meio é dada pela seguinte lei de atenuação

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad [2.8]$$

Onde μ , o coeficiente linear de atenuação total, é a soma dos coeficientes lineares de atenuação devido ao efeito fotoelétrico, efeito de Compton e produção de pares.

Para cada um dos processos de interação com o meio material referidos é possível definir um coeficiente de atenuação parcial de tal forma que se tem

$$\mu = \tau + \sigma + \pi \quad [2.9]$$

em que τ , σ e π são respectivamente coeficiente de atenuação linear para o efeito fotoelétrico, efeito de Compton e produção de pares.

Analisando o gráfico da figura 2.12 podemos apreciar com facilidade o tipo de absorção predominante, conhecendo a energia da radiação incidente e o número atômico do elemento absorvente. Assim no eixo das abcissas está representada a energia da radiação e em ordenadas o número atômico dos elementos absorventes. As duas curvas representadas correspondem aos pontos para os quais o efeito fotoelétrico é tão provável como o de Compton ($\sigma = \tau$), e o efeito de Compton tão provável como a formação de pares ($\sigma = \pi$)

Para um material de densidade ρ os coeficientes mássicos para o efeito fotoelétrico, efeito de Compton e produção de pares são respectivamente τ/ρ , σ/ρ e π/ρ , sendo o coeficiente mássico total μ/ρ dado por (Turner J. E., 1985) e (Graham, Donald T., 1996).

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\pi}{\rho} \quad [2.10]$$

Analisando agora a contribuição de cada um dos termos para o coeficiente mássico total, apresentamos a figura 2.14 onde se mostra a variação dos coeficientes mássicos para os três processos de interação com a energia dos fótons incidentes para o ar e para

o chumbo, materiais que apresentam respectivamente baixo e elevado número atômico. Nestes gráficos está representado também o coeficiente mássico total

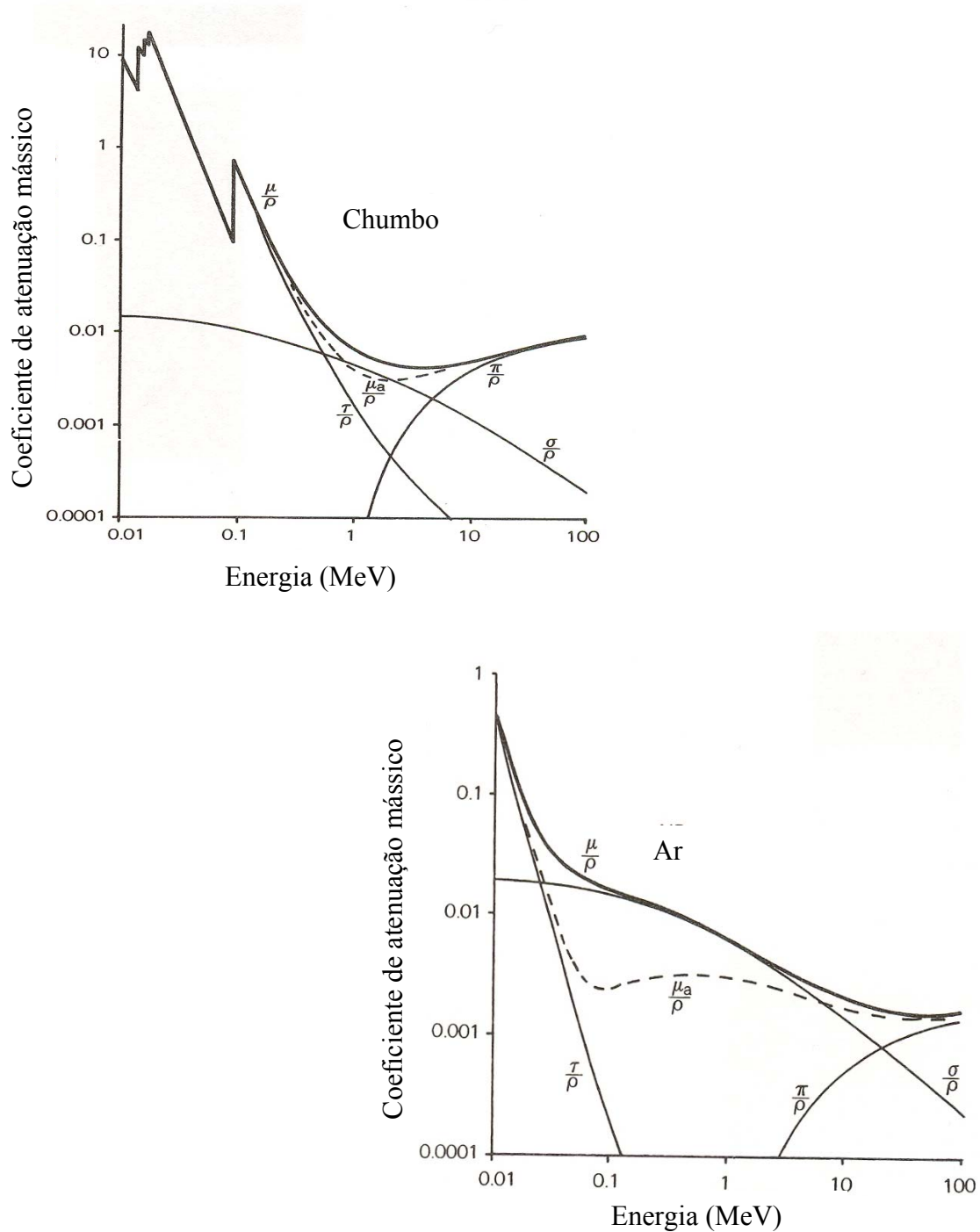


Figura 2.14. Coeficientes mássicos para o efeito fotoelétrico (τ/ρ), para o efeito de Compton (σ/ρ), para a criação de pares (π/ρ) e para o total (μ/ρ), para o ar e para o chumbo.(adaptado a partir de Graham, 1996)

Nestes materiais podemos verificar que as interações por efeito fotoeléctrico são predominantes para baixas energias o que contribui para uma diminuição pronunciada do coeficiente de atenuação mássico total até cerca de 200 keV.

Entre cerca de 200 keV e 5 MeV é predominante o efeito de Compton, o que justifica a diminuição mais lenta do coeficiente de atenuação total, isto porque nesta gama de energia o coeficiente de atenuação mássico é aproximadamente igual para todos os materiais, com excepção do hidrogénio, devido à semelhança de densidade electrónica dos materiais (a forma da curva σ/ρ é a mesma para o ar e para o chumbo).

A partir de valores de energia superiores a 1,02 MeV a interacção predominante é a produção de pares. Podemos verificar que para o material de número atómico elevado, o chumbo, este processo torna-se preponderante a partir de energias menores.

2.5. Interação de partículas carregadas com a matéria

Sempre que um feixe de fótons primários interacciona com um meio, são colocadas partículas carregadas em movimento. Estas partículas nomeadamente electrões e positrões são chamadas partículas ionizantes secundárias. Estas partículas perdem energia por colisão com os electrões atómicos do meio. Contudo, devido à sua pequena massa verifica-se uma perda de energia do electrão por emissão de radiação electromagnética sob influência do campo eléctrico do núcleo. Esta radiação é chamada Radiação de Travagem (Bremsstrahlung) (Leo, W.R., 1987).

De um modo clássico, este mecanismo pode ser entendido como a radiação electromagnética emitida devida à momentânea aceleração do electrão ou positrão que é desviado, da sua trajectória inicial ao passar próximo do núcleo, pelo forte campo electromagnético criado pelo núcleo.

Para um dado material, a perda de energia por emissão de radiação de travagem é pequena para baixas energias. No entanto, como a energia aumenta progressivamente, a probabilidade de bremsstrahlung cresce significativamente, tornando-se este mecanismo comparável ou mesmo mais importante do que a perda de energia por colisão – ionização. As perdas de energia por radiação e por colisão igualam-se para uma energia

chamada Energia Crítica, E_c , acima da qual a perda por radiação domina completamente.

A perda total de energia do electrão e do positrão $(dE / dx)_{\text{tot}}$ tem assim duas contribuições, uma devida às perdas por colisão com electrões atómicos, $(dE / dx)_{\text{col}}$, e a outra devida às perdas por emissão de radiação de travagem $(dE / dx)_{\text{rad}}$:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{tot}} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{col}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} \quad [2.11]$$

Na figura 2.16 estão representadas as perdas de energia para os electrões de cobre em função da energia do electrão.

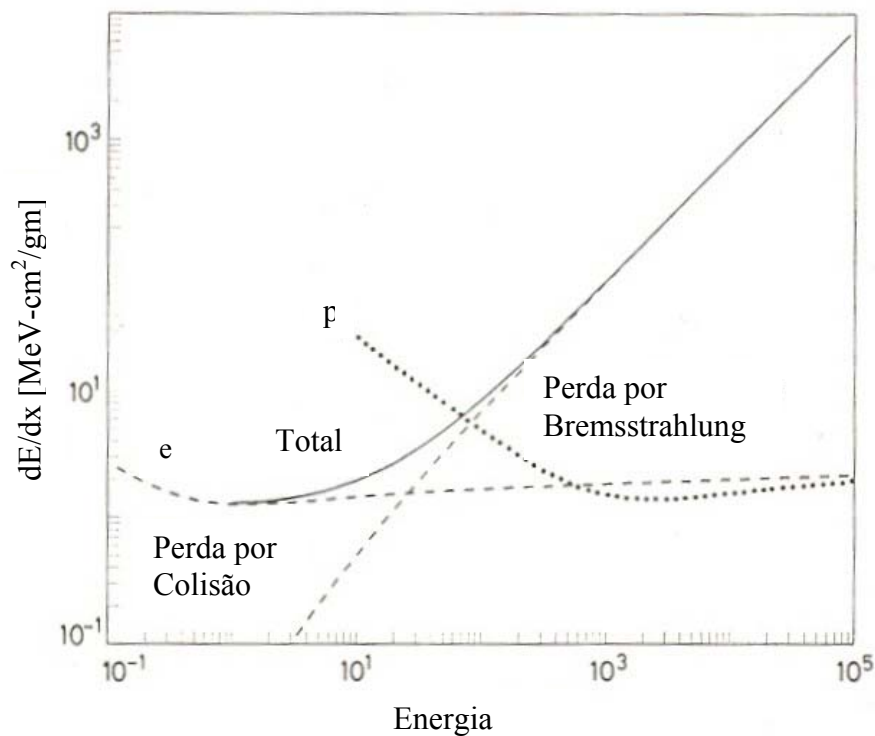


Fig. 2.16. Perda de energia para os electrões de cobre em função da energia do electrão (adaptado a partir de Leo, 1987).

CAPÍTULO III - Conceitos Básicos de Dosimetria

Dosimetria é um ramo da ciência que estuda quantitativamente os efeitos químicos e ou biológicos que as radiações ionizantes provocam num meio absorvente.

O tipo de processos de interação entre a radiação incidente e o meio absorvente depende das características quer da radiação quer do meio.

È tão importante o conhecimento das características físicas do feixe de radiação incidente, como a quantificação da energia depositada por ele num determinado meio.

3.1. Características do campo de radiação

Seja N o número de raios incidentes que penetram numa esfera que circunda um ponto P , durante um intervalo de tempo finito, figura 3.1.

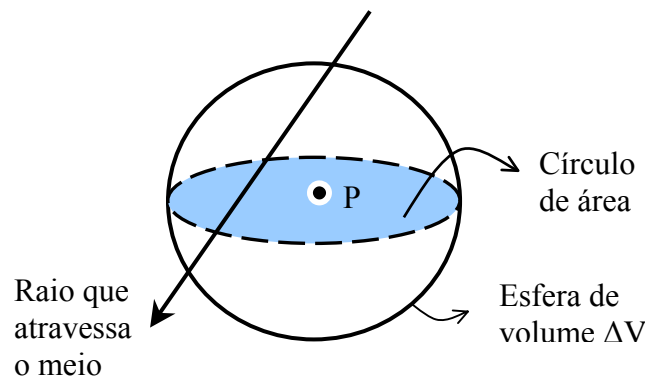


Fig. 3.1. Caracterização do campo da radiação no ponto P em termos da radiação que atravessa a superfície esférica. (adaptado a partir de Nahum, E. Alan)

Se ΔV for o volume da esfera com centro no ponto P , o círculo de maior área é Δa . O limite de Δa , quando o volume se torna suficientemente pequeno é, da . Assim qualquer que seja a direcção do raio incidente, a área perpendicular a essa direcção é sempre a mesma e é igual a da .

3.1.1. Fluência de fótons

Para descrever um feixe de fótons monoenergéticos, teremos que especificar o número de fótons, dN que atravessa a área (da) referida na figura 2.1, (Nahum, E. Alan, e Cunningham, 1983) O quociente entre estas duas unidades é o que a International Commission on Radiological Units and Measurements chama de fluência de fótons, Φ .

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad [3.1]$$

A unidade em que se exprime esta grandeza é m^{-2} .

3.1.2. Taxa de fluência de fótons

A taxa de fluência de fótons é definida como o número de fótons que atravessam a área da , por unidade de tempo. É dada pela expressão:

$$\phi = \frac{d\Phi}{dt} \quad [3.2]$$

Esta grandeza é também chamada densidade de fluxo. A unidade em que se exprime esta grandeza é $m^{-2} s^{-1}$. (Nahum, E. Alan e Cunningham, 1983)

3.2. Quantidades dosimétricas

Para quantificar a quantidade de energia depositada por um feixe de fótons num determinado meio é necessário a apresentação de grandezas, tais como kerma, dose absorvida e outras que directa ou indirectamente se relacionam com as anteriormente referidas

3.2.1. Transferência de energia

A transferência de energia de um feixe de fótons para um determinado meio ocorre em duas etapas. A primeira (a) envolve a interação do fóton com um átomo resultando na libertação de um electrão. Uma segunda etapa (b), envolve a transferência da energia do electrão para o meio através de excitações ou ionizações dos átomos do meio, como está ilustrado na figura 3.2. (Johns e Cunningham,1983)

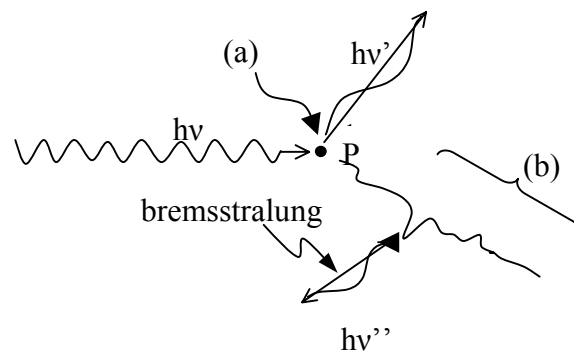


Fig. 3.2. Esquema representativo da transferência de energia de um fóton ($h\nu$) para o meio. (adaptado a partir de Johns e Cunningham,1983)

O fóton incidente com energia $h\nu$ interage em (a) transferindo parte da sua energia a um electrão dando-lhe energia cinética. Este perde a maioria da sua energia em colisões com electrões atómicos ao longo do trajecto (b). A transferência de energia em (a) é chamada kerma, e ao longo do trajecto (b) é chamada dose absorvida.

O fóton de energia $h\nu'$ é disperso em (a). O fóton de energia $h\nu''$ (de travagem) é radiado devido à aceleração do electrão que é desviado, da sua trajectória inicial ao passar próximo dum núcleo.

3.2.1.1. Kerma

Para descrever a interacção inicial do fóton com a matéria ICRU introduziu a quantidade chamada kerma. Kerma são as iniciais de Kinetic Energy Released in the Medium (foi adicionado o “a” apenas por razões fonéticas).

Por definição kerma é o quociente entre $d \overline{E_{tr}}$ e dm . Onde $d \overline{E_{tr}}$ é a energia cinética média transferida do fóton para o electrão, num elemento de volume de massa dm .

$$K = \frac{d \overline{E_{tr}}}{dm} \quad [3.3]$$

A unidade do kerma é o Joule por kilograma [$J.k^{-1}$] ou Gray [Gy]

Kerma, segundo Johns e Cunningham, é a grandeza que melhor relaciona o tipo de feixe de radiação incidente com os seus efeitos. Assim para um dado feixe de fótons com energia $h\nu$ e uma fluência de fótons Φ , kerma também pode ser dado por:

$$K = \Phi \cdot \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \cdot \overline{E_{tr}} \quad [3.4]$$

Onde (μ/ρ) é o coeficiente de atenuação mássico do meio e $\overline{E_{tr}}$ é a média da energia transferida ao electrão pelo meio em cada interacção.

3.2.1.2. Dose absorvida

A quantidade de energia depositada por uma radiação ionizante num meio através de ionizações e excitações é chamada dose absorvida, D . É expressa pelo quociente:

$$D = \frac{d \overline{E_{ab}}}{dm} \quad [3.5]$$

Onde $d \overline{E_{ab}}$ é a energia média depositada pela radiação ionizante na unidade de volume de massa, dm , do meio, centrada no ponto P da figura 3.2.

A unidade utilizada para dose absorvida no Sistema Internacional (SI) é o gray, (Gy) que é definida como sendo 1 J kg^{-1} . Esta unidade veio substituir uma unidade especial o rad (Radiation Absorbed Dose). A relação entre estas duas unidades é:

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$$

$$1 \text{ Gy (gray)} = 1 \text{ J/kg} = 10^7 \text{ erg} / 10^3 \text{ g} = 100 \text{ rad}$$

Em dosimetria é também importante o conhecimento da grandeza taxa de dose que é definida como quociente entre a dose absorvida, dD , por unidade de tempo, dt .

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad [3.6]$$

A unidade (SI) da taxa de dose é $\text{Jkg}^{-1}\text{s}^{-1}$. O nome habitualmente utilizado para definir a unidade desta grandeza é gray por segundo (Gy s^{-1}).

3.2.1.3. Relação entre kerma e dose absorvida

A transferência de energia do fóton incidente a um electrão secundário comunicando-lhe energia cinética, (kerma) não se efectua no mesmo local onde se verifica a absorção de energia pelo meio (dose absorvida), porque os electrões libertados cedem energia ao meio ao longo de todo o seu percurso nesse meio (trajecto (b) mostrado na figura 3.2). Estes electrões, como já foi referido no início desta secção, perdem energia ao longo do seu trajecto no meio devido a colisões com electrões atómicos e, ainda, por emissão de radiação de travagem. A energia perdida nas colisões com os electrões atómicos é que constitui a energia absorvida pelo meio uma vez que contribui para as ionizações e, ou excitações dos átomos do meio. Como a energia perdida por radiação de travagem se realiza a distâncias consideráveis do elemento de massa dm , não se inclui no cálculo da energia absorvida pelo meio.

Para podermos compreender a relação entre kerma e dose absorvida vamos recorrer à figura 3.3 (Johns e Cunningham, 1983) onde se mostra esquematicamente o movimento

dos electrões devido a interacções com um feixe de fótons de elevada energia que incide num meio.

Vamos começar por considerar um feixe de fótons primários de elevada energia que incide num dado meio material pondo os seus electrões em movimento. O percurso destes electrões considera-se rectilíneo, todos com a mesma direcção, e com um comprimento igual ao alcance R dos electrões no meio. Considera-se também que os electrões depositam energia de uma forma uniforme ao longo de todo o seu percurso.

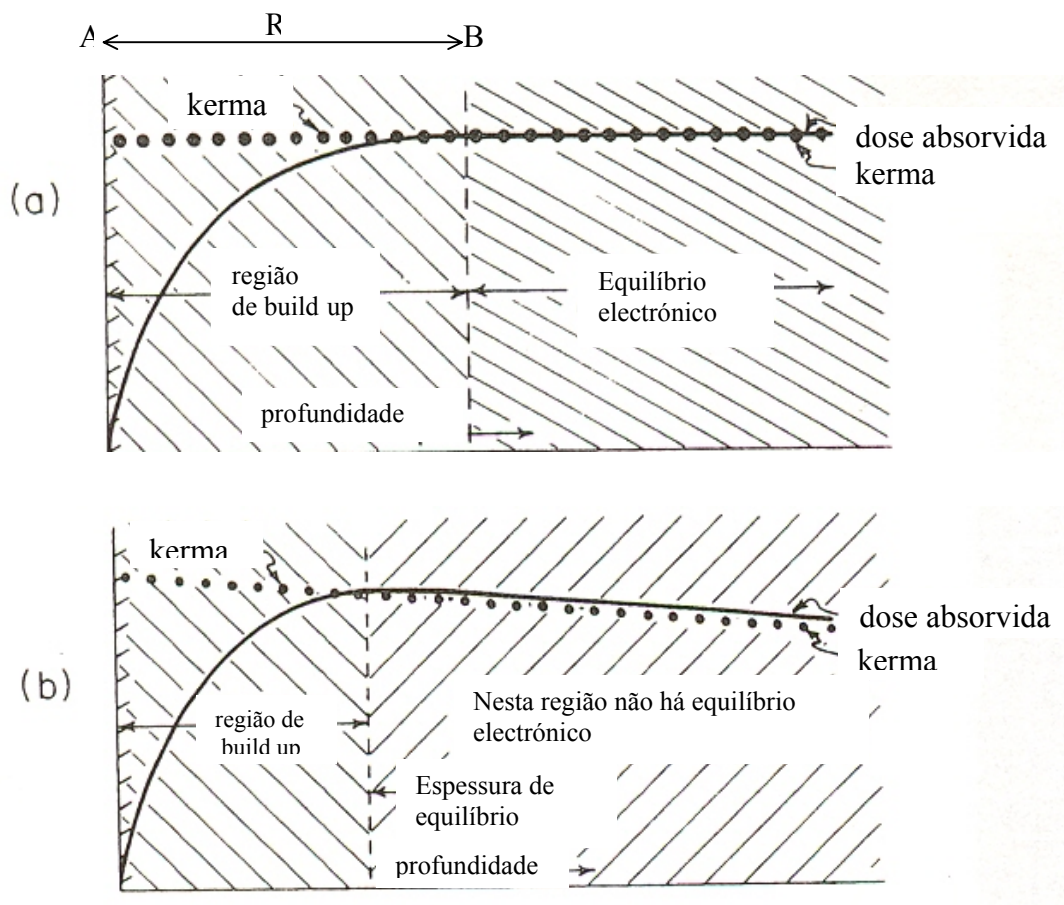


Figura 3.3. Gráficos mostrando esquematicamente como varia a dose absorvida e o kerma com a profundidade. Como kerma e dose absorvida têm a mesma unidade são representadas no mesmo gráfico a) sem atenuação das interacções primárias, b) com atenuação das interacções primárias. (adaptada a partir de Johns e Cunningham, 1983)

Começamos por analisar o primeiro gráfico (a) onde o feixe incidente de fótons primários não sofre atenuação. Neste caso o número de electrões libertado pelos fótons

primários é sempre o mesmo, qualquer que seja a unidade de comprimento do meio, sendo portanto o kerma constante. A energia depositada no meio depende do número de electrões postos em movimento e não depende directamente dos fotões incidentes.

Neste caso a ionização em B, é igual ao total das ionizações produzidas pelos electrões postos em movimento à superfície do meio material (A), e ao longo do seu percurso até B. A partir de B e uma vez que não há atenuação o número de electrões que atravessa qualquer porção do meio é sempre a mesma.

A dose absorvida é proporcional à ionização produzida, iniciando em zero à superfície do material (A), atingindo o valor máximo à profundidade B. Esta porção do meio entre A e B é chamada de região de “build up”. A zona a maior profundidade de B é chamada a região de equilíbrio electrónico porque o número de electrões aí parado é igual ao número de electrões aí colocados em movimento, ou seja a fluência é constante nesta região.

Analisando o gráfico em questão verifica-se que na região de “build up” as curvas referentes a kerma e dose absorvida têm evolução diferente. A dose absorvida apresenta como era de prever um acréscimo de zero à superfície do meio até um valor máximo à profundidade B. A partir desta profundidade e já na região de equilíbrio electrónico, onde kerma continua com o valor constante, dose absorvida é mostrado pela linha horizontal na figura 3.3 a). Considerando que não há perdas de energia por radiação de travagem, a dose absorvida é igual ao kerma nesta zona.

Na figura 3.3 b) é mostrada uma situação real onde não é atingido o equilíbrio electrónico. Aqui vamos assumir que o feixe de radiação primário é atenuado exponencialmente com uma redução de 5% ou longo do meio material. Assim o número de electrões colocados em movimento ao longo desse meio é menor que no caso anterior. Contudo, visto a diferença ser pequena considera-se que existe um equilíbrio electrónico aproximado nesta região.

A ionização em B é composta, tal como no caso anterior pelas ionizações devidas aos electrões que iniciam o seu movimento à superfície do meio (A), e aos electrões que iniciam o seu movimento ao longo do meio e até B. Desta forma, a ionização em B é menor do que o total de ionização produzida por todos os electrões cujos percursos são iniciados à superfície do meio, devido à atenuação a que o feixe de fotões primários é sujeito. Assim, verifica-se um aumento de dose absorvida desde a superfície de penetração até atingir um valor máximo e depois diminui com o aumento da

profundidade. Devido a esta atenuação o pico de dose absorvida já não coincide com a profundidade de alcance dos electrões no meio, em B.

Analisando o gráfico em questão concluímos que enquanto kerma diminui continuamente, a dose absorvida sofre primeiro um acréscimo até atingir o valor máximo que corresponde à espessura de equilíbrio, e depois diminui continuamente. Para além da espessura de equilíbrio as curvas correspondentes a dose absorvida e kerma decrescem exponencialmente, estando a da dose absorvida ligeiramente acima da curva de kerma, não considerando as perdas de energia por radiação de travagem.

Nesta secção foi apresentada a equação 3.4 através da qual é possível calcular kerma se for conhecida a fluência num dado ponto. No entanto não se conhece uma equação que nos permita calcular a dose absorvida, sendo esta grandeza mais importante para a medida.

A relação mais comum entre kerma e dose absorvida é a que se refere na figura 3.3 b). Neste caso a dose absorvida difere de kerma de um factor de correcção, b, ligeiramente superior à unidade, sendo a dose absorvida calculada a partir da equação 3.7.

$$D = \Phi \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \overline{E_{ab}} \quad b \quad [3.7]$$

Na prática, b assume usualmente o valor da unidade.

3.3. Dosimetria com câmara de ionização

Para se determinar o valor de dose absorvida num determinado ponto de um meio material exposto a radiação ionizante, é necessário que se introduza no meio um dosímetro. Devido à elevada sensibilidade deste dispositivo este método, chamado ionométrico, é hoje em dia um dos mais utilizados em dosimetria.

Um dos primeiros dosímetros usados para a determinação da dose absorvida foi uma câmara de ionização constituída por uma cavidade cheia de ar.

3.3.1. Câmara de ionização de ar livre

Segundo Cunningham e Turner o dispositivo utilizado para medir a exposição é a câmara de ionização de ar livre apresentada esquematicamente na figura 3.4.

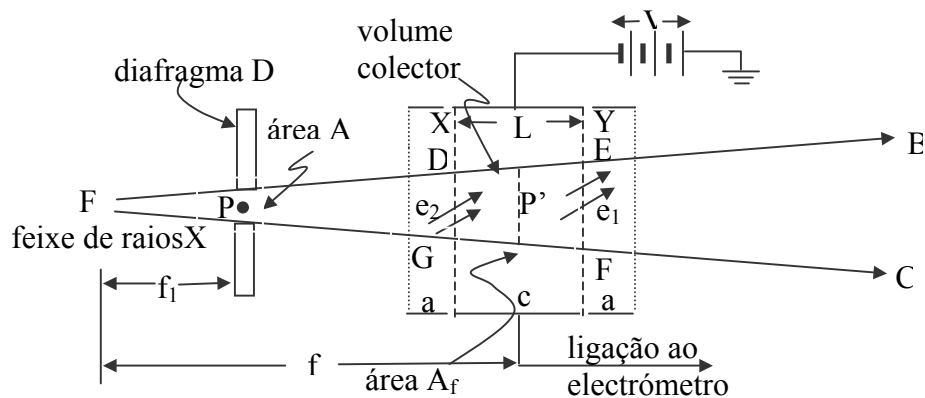


Fig. 3.4. Diagrama esquemático da câmara de ionização de ar livre standard (adaptada a partir de Turner, 1985 e Cunningham, 1983)

Nesta figura pode observar-se um feixe de raios X emitido a partir do foco F que é colimado pelo diafragma D, e entra na zona central entre duas placas paralelas uma à outra e que constituem os electrodos da câmara de ionização. A placa inferior é constituída por três electrodos. Representando a letra *c* o electrodo colector que se encontra ligado a um electrómetro, e a letra *a* os electrodos auxiliares, que têm como função proteger o electrodo colector. A placa superior tem potencial negativo. Entre as duas placas é criado um campo eléctrico uniforme, com as linhas de campo perpendiculares aos electrodos, em todo o volume colector, que é a zona central do electrodo.

A área (A) do diafragma limita o cone de irradiação, e nestas câmaras os fotões interagem apenas com o ar.

Os electrões são postos em movimentos pelos fotões incidentes no volume de ar representado pelas letra DEFG na figura, devem perder a sua energia no ar contido no volume colector, produzindo aí iões que são atraídos para as placas. Os iões de carga positiva são atraídos pela placa superior, e os de carga negativa pela placa inferior.

Há no entanto electrões que são postos em movimento neste volume de ar mas produzem iões fora dele, e outros que produzem iões neste volume mas são postos em movimento fora dele, situações representadas na figura pelas setas e_1 e e_2 respectivamente. Se, o número de iões perdidos através dos percursos e_1 , igualar o número de iões ganhos através dos percursos e_2 , existe equilíbrio electrónico. Devido a este equilíbrio pode considerar-se que todos os iões colectados entre os planos X e Y foram produzidos por electrões postos em movimento por fotões incidentes no volume de ar DEFG. Deste modo conhecendo a massa de ar no volume colector e medindo-se a ionização produzida, podemos determinar a exposição $X_{P'}$ no centro do volume especificado (ponto P'). Note-se que os iões são colectados no volume DEFG, que é igual ao produto entre a área da secção transversal do feixe no plano que contém o ponto P' à distância f da fonte (A_f) e o comprimento do eléctrodo colector L . Se dQ for a carga colectada e ρ a densidade do ar vem:

$$X_{P'} = \frac{dQ}{\rho \cdot A_f \cdot L} \quad [3.8]$$

Na prática é mais conveniente determinar a exposição na posição onde se encontra o diafragma (ponto P). Não considerando a atenuação do feixe pelo ar, e se f_1 for a distância entre a fonte de radiação e o diafragma e f a distância da fonte ao ponto P', atendendo a que exposição em P é maior do que em P' por um factor quadrado $\left(\frac{f}{f_1}\right)^2$

ter-se-á:

$$X_P = \left(\frac{f}{f_1}\right)^2 \frac{\Delta Q}{\rho \cdot A_f \cdot L} \quad [3.9]$$

Atendendo ainda a que as áreas das secções transversais do feixe no diafragma e no ponto P', respectivamente A e A_f verificam a relação $A_f = A \left(\frac{f}{f_1} \right)^2$, ter-se-á por fim:

$$X_P = \frac{\Delta Q}{\rho \cdot A \cdot L} \quad [3.10]$$

A distância entre as placas e o volume DEFG representado na figura deve ser superior ao alcance dos electrões libertados pelos fotões incidentes nesse volume porque, caso tal não se verifique, estes podem colidir com os eléctrodos antes de ceder toda a sua energia no ar e, assim colectar uma carga inferior à real. A localização do volume especificado, para que exista equilíbrio electrónico, deve ser tal que a distância PP' seja maior ou igual, ao alcance dos electrões libertados em todas as direcções, pois caso contrário, haverá mais energia perdida do que ganha. Além disso para se verificar equilíbrio electrónico deve ser constante a taxa de fluência de fotões ao longo do volume colector.

Relativamente às correcções que é necessário efectuar incluem-se a correcção da atenuação do ar entre o diafragma e o volume colector, a correcção relativa à recombinação dos iões, as correcções dos efeitos da pressão, temperatura e humidade do ar na densidade ρ do ar e também as possíveis ionizações provocadas pelos fotões incidentes.

Na prática para se ter uma ideia da dificuldade de utilização da câmara de ionização de ar livre, pode referir-se como exemplo que fotões de 3 MeV produzem electrões cujo alcance no ar é de 1,5 m, tornando necessária uma câmara de grandes dimensões para medir a exposição desta radiação.

As dimensões da câmara estão relacionadas com a energia do feixe incidente, porque, à medida que aumenta a energia dos fotões incidentes aumenta também a energia dos electrões bem como o seu alcance no ar. Assim o aumento da energia do feixe provoca o aumento do volume da câmara, aumentando também a distância entre os eléctrodos.

Com o aumento da distância entre os eléctrodos põe-se em causa a uniformidade do campo eléctrico e tornam-se mais prováveis as ionizações produzidas pelos fotões incidentes, bem como as recombinações dos iões.

O aumento das dimensões da câmara origina o aumento da distância entre o diafragma e o volume colector aumentando por isso a atenuação do feixe.

Por todas estas razões a câmara de ionização de ar livre standard é apenas utilizada para feixes de fotões com energia até 3 MeV (Cunningham, 1983).

As dimensões deste equipamento limitam a sua mobilidade o que torna o seu uso em geral incómodo, não sendo portanto um aparelho utilizado para medições de exposição de rotina.

O método mais utilizado para a determinação da dose absorvida baseia-se em medições efectuadas com uma câmara de ionização de cavidade, que tem por base a teoria de Bragg-Gray, que nos permite calcular a dose sem as restrições que anteriormente foram referidas.

3.3.2. Câmara de ionização cilíndrica “Thimble Chamber”

Na prática um sistema dosimétrico é constituído por uma câmara de ionização de pequenas dimensões e o respectivo electrómetro previamente calibrado. As câmaras de ionização apresentam-se sob variadas formas e dimensões, sendo construídas com diferentes materiais, consoante o fim a que se destinam. Estas câmaras são constituídas essencialmente por uma parede da câmara, o ar dentro das paredes e os eléctrodos.

Turner, 1985 e Cunningham, 1983 descrevem o princípio de funcionamento e aplicações das câmaras de ionização das quais passaremos a apresentar os aspectos mais relevantes da determinação da dose absorvida com a câmara de ionização cilíndrica “Thimble Chamber”.(figura 3.5)

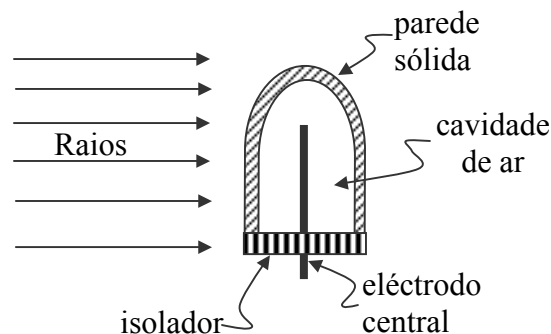


Fig. 3.5. Diagrama ilustrativo de uma câmara de ionização cilíndrica (adaptada de Cunningham, 1983)

As cargas produzidas pela ionização do ar no interior da câmara são colectadas pelo eléctrodo sendo a câmara ligada a um electrometro, que as recolhe.

Conhecendo o volume de ar na cavidade e portanto a sua massa, pode determinar-se a carga produzida por unidade de massa, ou seja a exposição no centro da cavidade, e a partir do conhecimento desta grandeza e utilizando uma expressão matemática específica pode calcular-se a dose absorvida nesse ponto do meio caso o volume ocupado pela cavidade fosse substituído pelo meio absorvente.

3.4. Dosimetria termoluminescente (T.L.D.)

Certos materiais cristalinos, quando aquecidos, têm a capacidade de emitir uma certa quantidade de luz proporcional à radiação ionizante a que foram previamente sujeitos. Esta emissão de luz por aumento de temperatura é chamada termoluminescência. Medindo a luz emitida pode determinar-se a dose de radiação previamente recebida. Esta é uma técnica pontual e é chamada dosimetria por termoluminescência, ou TLD.

Durante a década de sessenta, Cameron e os seus colegas da Universidade de Wisconsin experimentaram a capacidade de termoluminescência de vários materiais e demonstraram que a exposição à radiação ionizante provocava em alguns deles maior emissão de luz após serem aquecidos. Esta técnica de termoluminescência induzida por radiação permitiu o desenvolvimento de um sistema de dosimetria sensível e preciso, utilizado na altura para controlar a exposição dos técnicos de saúde à radiação e medir a dose que os pacientes recebiam durante os processos terapêuticos e de diagnóstico. Este sistema alcançou também uma grande difusão em estudos de radiação experimental, sobre tudo quando se necessitava de detectores de pequenas dimensões ou para o controlo de radiação em espaços ambientais com baixo nível de radiação.

Muitos materiais, incluindo certos tecidos orgânicos, apresentam a propriedade de termoluminescência induzida por radiação. No entanto os materiais utilizados nos TLD são de natureza inorgânica. O TLD mais utilizado é o de fluoreto de lítio (LiF), que mede dose absorvida numa vasta gama, desde 10^{-5} Gy a 10^3 Gy. Para gamas elevadas de

dose a sensibilidade não é rigorosamente constante por isso, quando é requerida precisão nos valores lidos é necessário calibrar as amostras de TLD contra doses dentro da gama de interesse. (Johns e Cunningham, 1983)

O material inorgânico tem uma estrutura cristalina regular, mas ao introduzir impurezas (activadores) na rede o grau de imperfeição aumenta. Os níveis de energia deste material estão ilustrados na figura 3.6.

Este diagrama mostra os níveis de energias de um cristal com a banda de valência e de condução, bem como os níveis de energia na zona proibida, resultantes da introdução de impurezas. Quando o material é irradiado é absorvida energia do feixe de radiação incidente, e alguns dos electrões do cristal que se encontram na banda de valência são enviados para níveis de energia mais alta, ou seja para a banda de condução. Grande parte desses electrões voltam de imediato para o estado fundamental, mas alguns são “capturados” ficando nos níveis excitados do activador (impurezas).

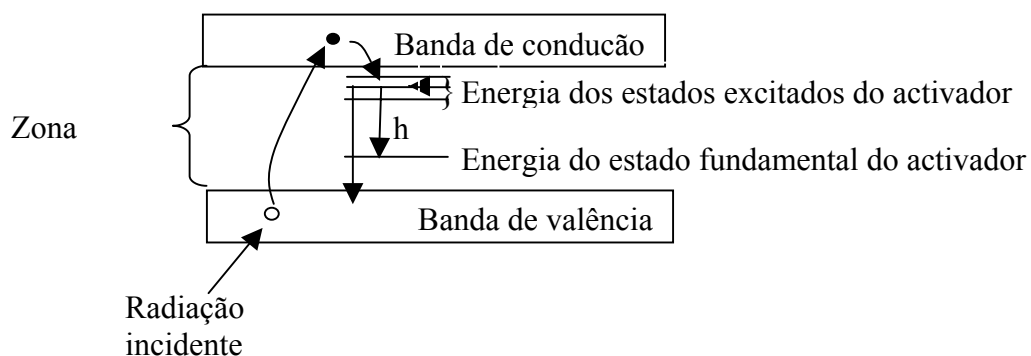


Fig. 3.6. O diagrama representa os níveis de energia de um cristal onde foi introduzido um activador (impurezas) para aumentar a eficiência da fluorescência e produzir fótons na região do visível com energia $h\nu$.

Após aquecimento do cristal, estes electrões “capturados” são enviados para níveis de energia superior na banda de condução, donde podem voltar para o estado fundamental emitindo luz. A quantidade total de luz emitida será proporcional ao número de electrões que são “capturados”, e por sua vez proporcional à quantidade de energia absorvida da radiação incidente.

Quando uma determinada amostra de fluoreto de lítio é aquecida a uma velocidade constante, a luz emitida em função do tempo pode ser expressa num gráfico como

mostra a figura 3.7. Esta curva é chamada a curva de brilho “glow curve” para o fluoreto de Lítio.

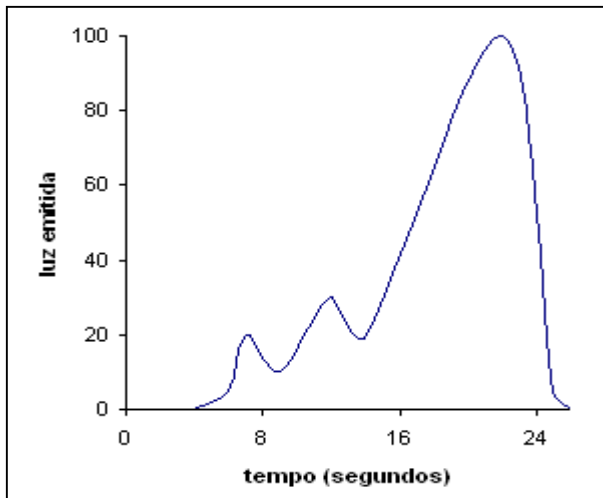


Fig. 3.7. Curva de brilho para o LiF mostrando a quantidade relativa de luz emitida em ordem ao tempo de aquecimento. (adaptado de Cunningham, 1983 e Glenn Knoll, 2000)

Ao longo do tempo de aquecimento a temperatura aumenta, verificando-se um aumento irregular de emissão de luz, que se pode ver no diagrama através do aparecimento de diferentes picos. Estes correspondem às diferentes transições electrónicas que se verificam no cristal do TLD. A área abaixo da curva representada na figura 3.7 é directamente proporcional à energia de radiação ionizante absorvida pelo material termoluminescente.

O processo de medida da luz emitida é mostrado na figura 3.8.

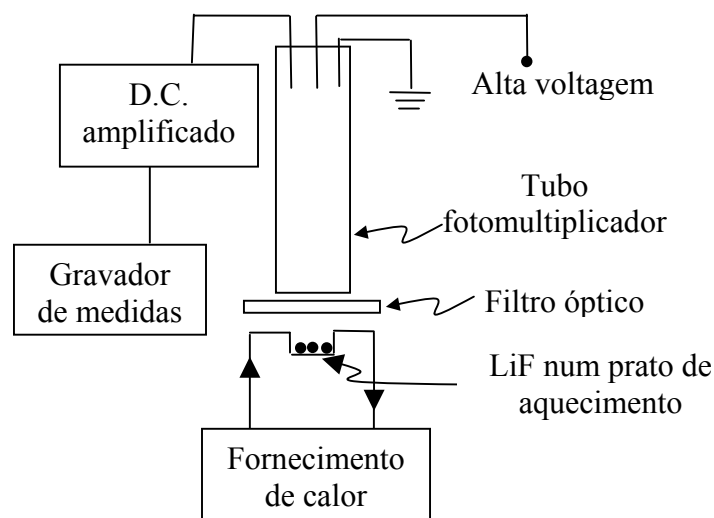


Fig. 3.8. Diagrama esquemático do equipamento necessário para medir a luz emitida do material termoluminescente. (adaptado a partir de Johns Cunningham, 1983).

A amostra irradiada é colocada num aquecedor onde é feito o fornecimento de calor, como se vê na figura. O tubo fotomultiplicador converte pequenas quantidades de luz emitidas pelos cristais do TLD em sinais eléctricos que posteriormente são ampliados e gravados num registador.

Os TLD podem ter formas diferentes. Podem ter a forma de uma pastilha, de um cilindro ou pó.

As amostras de TLD podem ser reutilizáveis após um cozimento cuidadoso. Com uma utilização cuidadosa os TLDs com forma cilíndrica ou em pastilhas têm uma reprodutibilidade de cerca de 2%.

3.5. Dosimetria em filme

A dosimetria em filme é considerada uma alternativa aos métodos dosimétricos anteriormente referidos utilizados para medir curvas de dose. O filme apresenta relativamente à câmara de ionização e ao dosímetro de termoluminescência, a vantagem de uma elevada resolução espacial. Enquanto que os dois primeiros métodos são pontuais, o filme permite a aquisição numa dada área que é o plano do filme.

Para a real compreensão da dosimetria em filme é necessário conhecer o processo fotográfico básico. Este envolve vários aspectos tais como a constituição da película fotográfica, o processo de formação da imagem latente e o processo de revelação.

3.5.1. Película fotográfica

O filme utilizado neste trabalho (filme radiográfico) consiste essencialmente numa emulsão de sais de prata, parte activa da emulsão, colocada sobre um suporte flexível que se chama película.

As películas têm como base substâncias sintéticas, chamada “base poliéster” que é feita de uma resina de polietileno. A base que serve de suporte à emulsão fotográfica deve ser flexível, semi-rígida, tão homogénea quanto possível, e deve transmitir o máximo de luz possível. Esta constitui a camada mais espessa do filme, vulgarmente 0,18 mm de

espessura num total que varia entre 0,2 e 0,4 mm. Consoante o tipo de filme, a base pode ser revestida numa ou em ambas as superfícies por uma camada de emulsão.

A emulsão fotográfica distribui-se uniformemente nas faces da base. Esta emulsão consiste, essencialmente, numa suspensão de cristais de brometo de prata num meio coloidal, vulgarmente gelatina. Entre a emulsão e a base há uma fina camada de material adesivo, chamada camada subjacente ou substrato (Figura 3.9), cuja finalidade é assegurar que a emulsão se adere uniformemente à base, mantendo-as unidas durante a utilização e revelação do filme.

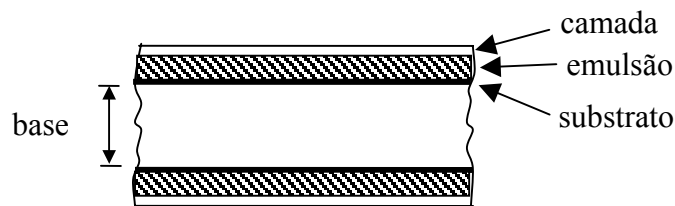


Fig. 3.9. Corte de uma película fotográfica. A parte larga é a base. A emulsão contém a informação útil. (Adaptado de Michael Thompson, 1994)

A parte da emulsão que não se encontra encostada à base é protegida por uma fina camada de gelatina transparente (camada protectora). A gelatina após um tratamento conveniente torna-se flexível e resistente às pressões e contaminações resultantes da utilização e revelação da película

A emulsão obtém-se adicionando uma solução de nitrato de prata e uma solução de um halogeneto (bromo, iodo ou cloro) de potássio a uma solução de gelatina. Estas soluções combinam-se formando um precipitado de brometo de prata, de acordo com a equação:



Onde AgNO_3 é o nitrato de prata, KX o halogeneto de potássio, $\text{AgX}\downarrow$ o halogeneto de prata, significando a seta que este produto da reacção precipita e KNO_3 o nitrato de potássio. O nitrato de potássio e o excesso de iões halogeneto são posteriormente eliminados da emulsão lavando-a com água quimicamente pura.

Os cristais de halogeneto de prata são o ingrediente activo da emulsão. Os utilizados mais frequentemente, cerca de 95% das vezes, são de brometo de prata (AgBr), os restantes podem ser iodeto de prata (AgI) ou cloreto de prata (AgCl).

Os cristais de prata produzidos como foi descrito anteriormente são cristais iónicos com estrutura cúbica de faces centradas, nas quais os iões prata (Ag^+) alternam a sua posição com os iões de halogeneto (X^-). Na figura 3.10 representa-se a rede cristalina do brometo de prata salientando as duas redes interpenetrantes de iões prata e brometo.

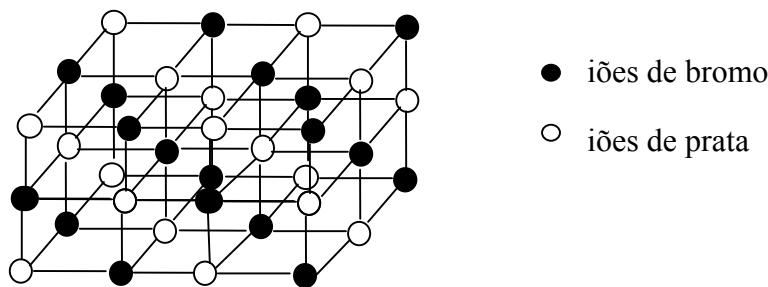


Fig. 3.10. Rede cristalina do brometo de prata. (Adaptado de Stewart Bushong, 1995)

Nas emulsões, enquanto decorre a precipitação do brometo de prata adicionam-se pequenas quantidades de iodeto de potássio para aumentar a sensibilidade do filme. Devido a isto alguns iões de bromo do cristal são substituídos por iões iodo, mantendo-se a estrutura da rede cristalina inalterada.

A forma e estrutura da rede cristalina dos halogenetos de prata não é perfeita e algumas dessas imperfeições conferem aos cristais as propriedades de retenção de imagem. O tipo de imperfeição que se considera responsável por este facto é um contaminante químico (partícula sensível), em geral sulfureto de prata (SAg_2), que se introduz na rede cristalina ou, o que é mais frequente, permanece à sua superfície.

O tamanho médio e a forma dos cristais obtidos, bem como a sua distribuição na emulsão, dependem das condições em que decorreu o processo de precipitação, no qual as partículas de halogeneto de prata se aglomeram e recristalizam no tamanho de grão requerido, que determina a sensibilidade final da emulsão à acção da luz. Dependem

ainda da temperatura, agitação e concentração das soluções utilizadas, bem como da velocidade com que foram adicionadas as soluções de nitrato de prata e halogeneto de potássio à solução de gelatina.

O tamanho dos cristais bem como a sua distribuição dos cristais de halogeneto de prata é muito importante no processo fotográfico já que determinam a sensibilidade e o contraste do filme. Em geral a sensibilidade de um filme é tanto maior quanto maior for o tamanho médio dos cristais, enquanto que o contraste é tanto maior quanto menor for o tamanho médio dos cristais na emulsão.

A concentração dos cristais de halogeneto de prata é determinante para a rapidez da película.

Os halogenetos de prata são particularmente sensíveis a toda a radiação electromagnética até ao comprimento de onda de aproximadamente 460 nm, onde se inclui a radiação X, a radiação ultravioleta e a radiação azul.

A sensibilidade dos filmes pode aumentar para comprimentos de onda superiores se forem adicionados corantes específicos à emulsão. Devido à adição de corantes diferentes conhecem-se películas ortocromáticas sensíveis até ao amarelo e as pancromáticas sensíveis a todo o espectro visível.

3.5.2. Formação da imagem latente

Quando um filme radiográfico é exposto à radiação X, à luz visível ou a partículas carregadas verifica-se a deposição de energia na emulsão por interacção fotoeléctrica com os átomos de alguns cristais de halogeneto de prata, provocando neles algumas alterações. Essas alterações que apenas são visíveis após a revelação da película fotográfica constituem a “imagem latente”.

A revelação da película fotográfica converte a imagem latente em imagem permanente, visível a olho nu, destruindo ao mesmo tempo a imagem latente.

Para que a imagem seja visível é necessário actuar sobre a emulsão com uma substância reveladora numa operação chamada revelação. A imagem latente é constituída somente por prata metálica e a sua “invisibilidade” deve-se à proporção média da prata que

existe nesta imagem, aproximadamente um átomo de prata por cada dez milhões de moléculas de brometo de prata.

O processo fotográfico que utiliza a gelatina como veículo dispersor e aglutinante dos sais de prata, começou a ser utilizado em 1880. Este sistema de emulsionar o material sensível revolucionou absolutamente a fotografia não apenas nos aspectos mais técnicos. No entanto, houve que esperar até aos anos 30 deste século, para que se comesçassem a utilizar as novas teorias da mecânica quântica ao estudo da formação de imagens latentes

Em 1938, os professores N. F. Mott e R. W. Gurney da Universidade de Bristol propuseram uma teoria que se mantém com poucas variantes até os nossos dias.

Antes de expormos a teoria de Gurney-Mott, há que ter em conta alguns aspectos muito importantes que dizem respeito à constituição dos cristais de brometo de prata.

Estes cristais são formados por um conjunto de pequenos iões de prata positivos e de iões brometo negativos, que têm um tamanho relativo muito maior. Uns e outros encontram-se distribuídos numa rede cristalina como mostra a figura 2.12. Trata-se de uma estrutura uniforme, excepto quando se desloca um ião de prata deixando uma lacuna no seu lugar, devido a uma perturbação exterior como se pode ver através da ilustração da figura 3.11.

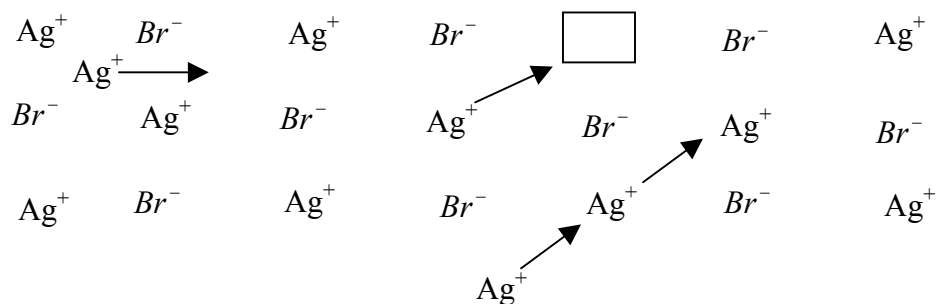


Fig.3.11. Ilustração do movimento dos iões de Ag^+ numa rede cristalina de brometo de prata (modelo bidimensional). O quadrado representa uma lacuna do ião Ag^+ deixado na rede. (Adaptado de Herz 1969)

Este estado é conhecido como alteração de Frenkel e o ião prata fora do seu lugar recebe o nome de ião intersticial. Estes iões podem mover-se facilmente de uma posição intersticial para outra, enquanto que os restantes iões de prata, que ocupam posições

“normais” na rede, apenas podem abandonar as suas posições e passar a ocupar as lacunas deixadas pelos primeiros. Os iões dos halogéneos, neste caso iões brometo, não podem deslocar-se para ocupar estas posições intersticiais, uma vez que as suas dimensões são grandes, comparativamente ao espaço entre os iões na rede cristalina. O aumento do número de iões de prata intersticiais e da sua mobilidade com a temperatura justifica, assim, o aumento da condutividade iónica com a temperatura até se atingir um valor de saturação.

A absorção de energia resultante de uma interacção entre um fóton de radiação incidente sobre um cristal de halogeneto de prata pode ser detectado através da transição de um electrão da banda de valência para a banda de condução do cristal.

Num cristal de brometo de prata a banda de valência encontra-se completamente preenchida com os electrões associados aos iões de bromo. A banda de condução dos iões de prata está por sua vez completamente vazia e separada da banda de valência por um intervalo de energias proibidas (figura 3.12).

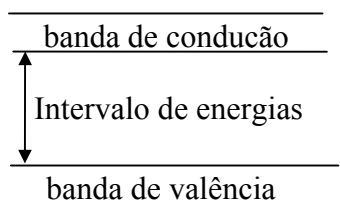


Fig. 3.12. Estrutura de bandas de brometo de prata

Quando um fóton com energia superior à correspondente ao intervalo de energias proibidas incide no cristal, há electrões da banda de valência que transitam para a banda de condução, podendo aí mover-se livremente.

Os electrões movem-se livremente nesta banda até que ao passar próximo de uma impureza são capturados ficando aí retidos até que recebam energia suficiente para passarem de novo para a banda de condução associada ao brometo. Estas impurezas são chamadas centros de sensibilidade ou sensibilizadores químicos.

Os centros de sensibilidade, que actuam como pontos de agregação, levam à formação da imagem latente, e podem ter duas origens diferentes.

-Ou são constituídos por alguma descontinuidade estrutural na superfície ou no interior do cristal de halogeneto de prata, devido ao movimento de iões de prata intersticiais, referidos anteriormente. Esta imperfeição é chamada centro de deslocação.

-Ou são constituídos por pequenas quantidades de impurezas químicas (sulfureto de enxofre) presentes na gelatina, que como já foi referido se denominam de sensibilizadores químicos,

Segundo a teoria de Gurney-Mott a imagem latente forma-se em várias etapas que são ilustradas na figura 3.13.

Na figura 3.13 A, o triângulo pretende representar um cristal de brometo de prata. As manchas negras à superfície do cristal representam centros de sensibilidade externos de sulfureto de prata.

Na figura 3.13 B representa-se o início da primeira etapa do processo quando a radiação incide sobre um cristal de brometo de prata transferindo parte ou toda a sua energia para ele, e libertando um electrão secundário (ou vários, dependendo da energia da radiação incidente) com energia suficiente para percorrer uma grande distância dentro do cristal. O electrão secundário liberta electrões de baixa energia (representados na figura pelos pequenos traços horizontais) pertencentes aos iões de bromo que se deslocam na banda de condução do cristal até serem capturados pelos centros de sensibilidade, que ficam carregados negativamente como se pode ver na figura 3.13 D.

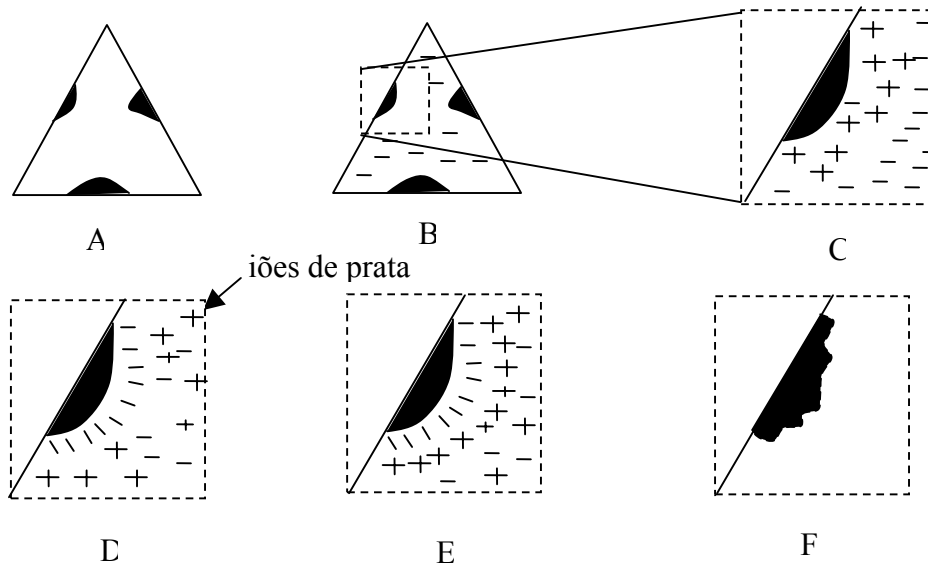


Fig.3.13. Ilustração do mecanismo de formação da imagem latente, segundo a teoria de Gurney-Mott (Adaptado de Michael Thompson, 1994)

Na segunda etapa do processo (figura 3.13 E) os centros de sensibilidade ficam carregados negativamente devido à concentração de electrões ao seu redor, e atraem electrostaticamente os iões de prata intersticiais, com carga positiva, neutralizando-os. O número de iões positivos neutralizados é igual ao número de electrões capturados pelo centro de sensibilidade, que se transformam em átomos de prata. Estes átomos depositam-se sobre o centro de sensibilidade formando um agregado de átomos de prata como se pode ver pela figura 3.13 F. Esta concentração de átomos recebe o nome de centro de imagem latente, que na fase da revelação provoca a redução dos restantes iões de prata a prata atómica.

A teoria de Gurney-Mott mostra que a probabilidade de formação da imagem latente aumenta com o número de electrões libertados no cristal pela radiação incidente.

3.5.3. Processo de revelação

Revelação é o termo utilizado para se referir às reacções químicas e físicas que transformam a imagem latente em imagem visível e permanente, devido à conversão dos cristais de halogeneto de prata que foram expostos à radiação incidente, em agregados de prata metálica. Estes agregados adquirem uma coloração negra durante a revelação.

A revelação engloba várias fases sucessivas, que são o banho revelador, o banho de lavagem e o banho de fixação, como está ilustrado na figura 3.14. Este processo tem lugar numa câmara escura, protegendo o filme da luz visível durante todo o ciclo. A revelação utilizada neste trabalho foi manual, sendo o tempo de permanência do filme em cada uma das etapas do processo de 4 minutos.

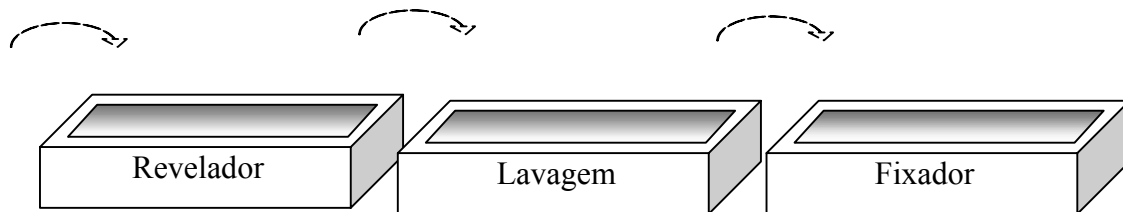


Fig.3.14. A sequência dos passos utilizados na revelação.

A imagem latente é invisível uma vez que apenas alguns iões se transformam em prata metálica e se depositam nos centros de sensibilidade. O banho revelador tem a função de multiplicar este processo vários milhões de vezes até que todos os iões prata do cristal exposto à radiação se tenham transformado em prata metálica, convertendo assim a imagem latente em imagem visível. É esta multiplicação, semelhante à avalanche de electrões captados pelo contador Geiger-Mueller, que permite às emulsões fotográficas competir em termos de sensibilidade, com outros instrumentos usados em dosimetria básica.

Para transformar o ião prata em prata metálica, o primeiro deve absorver um electrão. Quimicamente, a reacção descreve-se do seguinte modo:



O revelador é constituído por vários compostos químicos que se comportam como agentes redutores cedendo com facilidade o electrão necessário para neutralizar um ião positivo, produzindo a redução da prata, chamando-se a este ião o agente redutor.

Os cristais de halogeneto de prata que não foram expostos à radiação têm uma carga electrostática negativa distribuída por toda a sua superfície. Os expostos têm a carga negativa distribuída pela superfície do cristal, excepto na zona onde se encontra um centro de sensibilidade. A carga negativa que envolve o cristal dificulta a penetração do electrão do revelador ao longo de toda a sua superfície para reduzir o ião prata, excepto na zona da partícula de sensibilidade dos cristais expostos. Nestes cristais, o revelador penetra pela zona referida e ataca os iões de prata reduzindo-os como já foi referido a prata metálica.

Os cristais que não foram irradiados continuam transparentes e inactivos, enquanto que os outros se apresentam escurecidos.

O tempo de permanência no banho do revelador, a temperatura do banho e a concentração do agente redutor são algumas das condições que podem influenciar o resultado da revelação.

Uma vez concluída esta fase, os cristais expostos são destruídos completamente e fica em seu lugar um grão negro de prata metálica. Os cristais não expostos não se modificam durante este processo.

Ao reduzir um ião prata, liberta-se um ião brometo que migra através do cristal até à gelatina, onde se dissolve no líquido revelador e é eliminado da película.

O filme de seguida passa por um banho de lavagem para neutralizar o agente redutor restante na emulsão e desta forma interromper bruscamente a redução.

Em seguida o filme é introduzido no banho de fixação, que normalmente se chama de “agente de limpeza”, constituído por uma solução de tiosulfato de amónio. O agente de limpeza elimina a emulsão de cristais de halogeneto de prata que não tenham sido revelados nem expostos.

Após terminada a fixação a emulsão fica cheia de produtos químicos deste banho, bem como com complexos de prata. Para os retirar os filmes devem ser lavados de preferência com água corrente, uma vez que estes produtos químicos são solúveis em água.

A etapa final de todo este processo é a secagem dos filmes.

3.5.4. Medidas de dose absorvida com filme

Como foi referido na secção anterior, quando um filme é exposto à radiação X sofre um enegrecimento, visível após a revelação, devido à redução dos iões prata a prata metálica.

O enegrecimento do filme é medido em unidades de densidade óptica (DO), sendo a densidade óptica definida como o logaritmo decimal da relação entre a intensidade da luz visível incidente (I_0) e a transmitida (I):

$$DO = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad [3.13]$$

A dosimetria em filme, não é um método directo de determinação da dose absorvida no seio de um dado meio quando exposto à radiação ionizante. Assim, para se determinar a dose absorvida nesse meio, com um filme, deve fazer-se a calibração da sua resposta relativamente a um outro dosímetro, composto por uma câmara de ionização previamente calibrada e o respectivo electrómetro associado.

Os filmes, mesmo não sendo expostos à radiação ionizante, quando são revelados apresentam uma certa densidade óptica. Esta densidade óptica é chamada de “velo” ou “fog”¹, e é devida à absorvância do próprio suporte da emulsão, e da revelação de alguns cristais não expostos.

A densidade óptica de um filme que não foi sujeito à radiação ionizante, é considerado “ruído”, chamando-se densidade óptica de velo.

Neste trabalho o que se pretende medir é a densidade óptica devido à exposição do filme, ou valor líquido da densidade óptica (net density), D_{NET} , que é a diferença entre a densidade óptica total devida à exposição em questão e a densidade de velo.

$$D_{NET} = D_{total} - D_{velo} \quad [3.14]$$

¹ Termo utilizado na literatura inglesa

$$D_{\text{NET}} = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) - \log_{10} \left(\frac{I_0}{I_v} \right) \quad [3.15]$$

$$D_{\text{NET}} = \log_{10} \left(\frac{I_v}{I} \right) \quad [3.16]$$

Onde I_v é a intensidade da luz transmitida quando um filme não é sujeito a radiação ionizante

Na prática o valor da densidade de velo foi obtido fazendo a revelação de um filme “virgem”, não sujeito a qualquer radiação. Este filme foi obtido cortando uma tira do utilizado para medir a densidade óptica total e a sua revelação foi feita no mesmo dia em que se fizeram todas as revelações dos filmes impressionados.

A densidade óptica máxima que corresponde à saturação é o valor mais elevado que se pode medir numa dada emulsão fotográfica quando todos os cristais de prata dessa emulsão forem expostos e revelados.

Segundo um manual da kodak, os valores mais comumente encontrados para a densidade óptica de saturação encontram-se entre 3,2 e 4,0 para filmes de exposição directa e revelação automática, e aproximadamente 6,0 para filmes de exposição directa e revelação manual. Na prática e segundo o mesmo manual os valores encontrados são inferiores em qualquer das situações.No nosso trabalho o valor obtido para densidade óptica de saturação foi de 0,8.

3.5.5. Escolha dos filmes

A escolha de um filme para a realização deste trabalho deve ter em conta a sua resposta à radiação. A resposta do filme quando exposto à radiação está relacionada com as mudanças físicas que se verificam nos cristais de brometo de prata necessárias à produção da imagem latente bem como as mudanças químicas durante o processo de revelação para formar a imagem visível. Alguns filmes têm a capacidade de responder mais rapidamente do que outros. Esta resposta define a velocidade ou sensibilidade do filme.

Os factores que influenciam a velocidade de um filme são a espessura da camada de emulsão e o tamanho dos cristais de brometo de prata. Quanto maior forem os cristais, ou a espessura da camada de emulsão, maior é a resposta do filme, ou seja, menor a radiação necessária para produzir uma determinada densidade óptica específica.

A cada tipo de filme corresponde a sua curva característica, que é a representação gráfica da densidade óptica do filme em função do logaritmo da exposição relativa.

Segundo o manual da kodak a exposição é determinada pelo produto entre a intensidade da radiação e tempo de exposição, quando se trata de exposições de filmes à luz visível.

A figura 3.15 é um exemplo de uma curva característica de um filme.

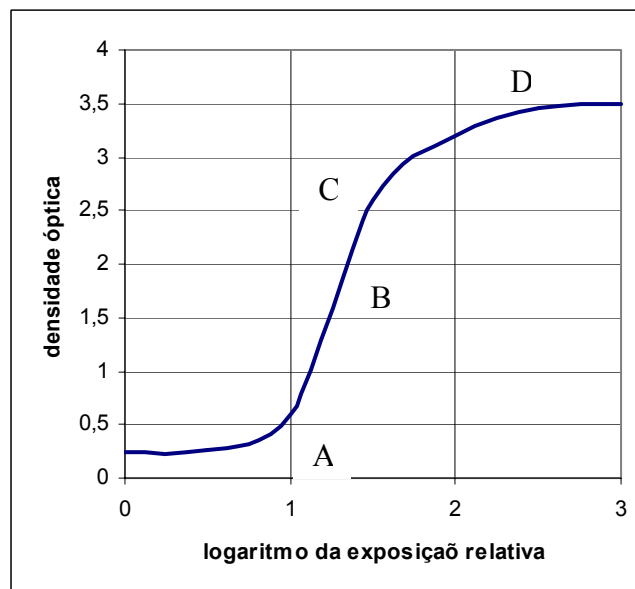


Fig. 3.15 Curva característica de um filme (Adaptada de Michael Thompson, 1994).

A zona referenciada com a letra A no gráfico corresponde à densidade óptica de velo ou fog que tem valores muito baixos de densidade, aproximadamente 0,25, segundo Michael Thompson, 1994.

Como já foi dito anteriormente este valor pode ser considerado “ruído”. É uma situação indesejável, mas durante a revelação do filme há sempre alguns cristais de prata que são reduzidos mesmo quando o filme não é exposto à radiação.

A zona com a letra B (região linear) no gráfico deve corresponder à região onde devemos trabalhar com o filme. A extensão desta zona varia com o tipo de filme.

Na zona C também chamada “ombro da curva” corresponde ao início da saturação do filme. Nesta zona os aumentos da exposição produzem aumentos de densidade óptica gradualmente menores até atingir a saturação, zona D. Esta zona corresponde à redução de todos os cristais de prata existentes no filme a prata metálica, independentemente da quantidade de radiação a que o filme está exposto.

Como cada filme apresenta uma curva característica é possível fazer uma comparação entre eles através da relação densidade óptica – logaritmo da exposição relativa, como se pode verificar através da figura 3.16, onde se comparam dois tipos de filmes diferentes, A e B.

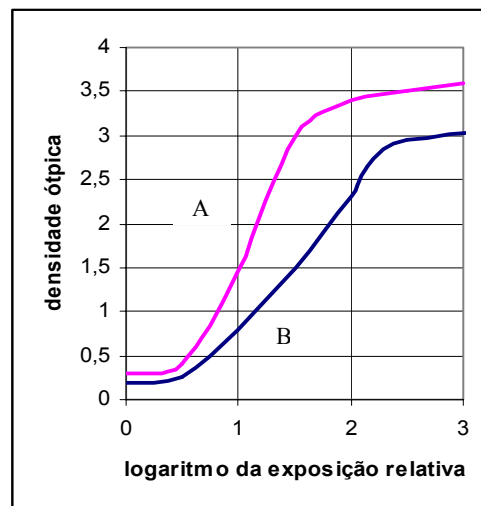


Fig. 3.16. Comparação entre densidade óptica e o logaritmo da exposição relativa para dois tipos de filmes diferentes (Adaptada de Michael Thompson, 1994)

O filme com a curva característica A apresenta maior velocidade (sensibilidade) do que o da letra B.

Na realização deste trabalho utilizámos dois tipos diferentes de filmes da kodak. O primeiro o “dental film ultra speed Super Poly- Soft” com a referência 3100960, e o segundo o X-OMAT V. O primeiro filme é utilizado para baixas taxas de dose e maior sensibilidade, enquanto o último é um filme de baixa velocidade, e conseqüentemente para taxas de dose superior.

3.5.6. Medição de perfis de dose com filme

Quando um feixe de radiação incide sobre um fantoma homogêneo a dose absorvida vai variando à medida que a profundidade no fantoma aumenta.

Podem traçar-se curvas de perfil e através delas podemos caracterizar a variação da dose absorvida em planos perpendiculares ao eixo central do feixe de radiação. Estas curvas obtêm-se para diferentes profundidades medindo-se, em cada uma delas, a dose absorvida ao longo do plano perpendicular e ainda perpendiculares ao eixo central do feixe de radiação. Na figura 3.17 pretende-se mostrar as distribuições de dose originada pelo feixe de raios X num fantoma homogêneo. Na figura 3.17 a) pretende-se ilustrar a variação de dose absorvida ao longo do eixo central do feixe de radiação, assim como ao longo da distância ao eixo central do feixe de radiação num plano perpendicular ao feixe (figura 3.17 b).

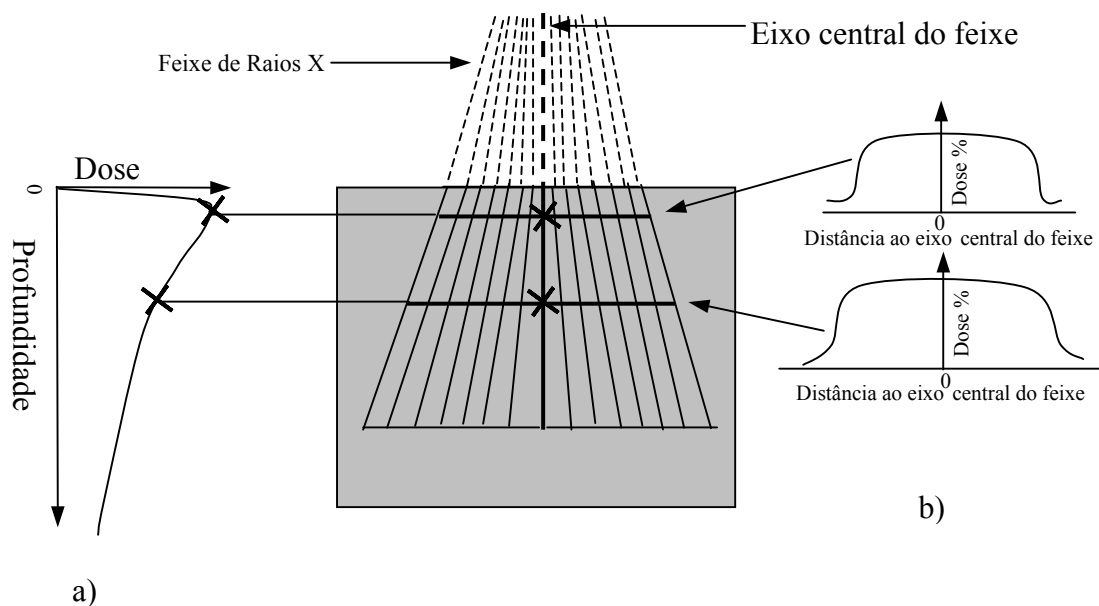


Fig. 3.17. Esquema da distribuição de dose absorvida ao longo do eixo central do feixe de radiação a) e perpendicularmente a esse feixe, em duas posições diferentes b).

A partir das curvas de perfil medidas segundo os eixos X e Y é possível obter-se informação sobre a homogeneidade e simetria do feixe de radiação.

A forma destas curvas depende de vários parâmetros de entre os quais salientamos a energia do feixe radiação e o tamanho do campo de irradiação.

A região de build-up é tanto mais extensa quanto mais elevada for a energia do feixe de radiação, e neste caso o valor máximo de dose absorvida é atingido a uma profundidade maior, como se pode ver através da figura 3.18. Utilizando como fonte de radiação os raios X, que segundo o autor corresponde à curva de 4MV na figura 3.18, pode verificar-se que a região de build-up é detectada para uma profundidade muito pequena.

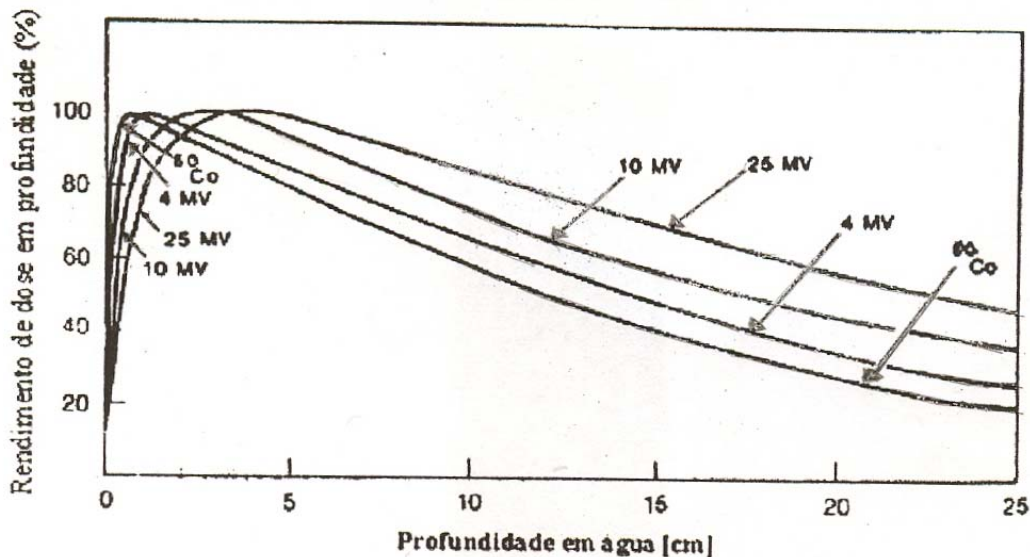


Fig. 3.18. Curvas de rendimento de dose em profundidade para o ^{60}Co e para feixes de fótons de diferentes energias (adaptado a partir de Gunilla,1996).

No nosso trabalho ao utilizarmos feixes de raios X de energia 59 keV, muito inferior à verificada para o mesmo feixe no gráfico da figura 3.18, não foi possível ver a região de build-up.

No caso da figura para o ^{60}Co , e para o mesmo autor o campo de irradiação foi o igual ao dos feixes de raios X, mas a distância da superfície do fantoma ao foco foi de 50 cm. Através do gráfico pode ver-se que nestas condições a região de build-up é detectada para uma profundidade muito pequena.

No nosso trabalho a energia da nossa fonte de ^{60}Co era inferior à referida neste gráfico, e a distância da superfície do fantoma ao foco era de 14 mm. Nestas condições não conseguimos nos nossos gráficos detectar a presença desta região.

CAPÍTULO IV – Sistema Didáctico de Dosimetria

4.1. Desenvolvimento de um Sistema de Dosimetria Didáctico.

O presente trabalho teve como objectivo o desenvolvimento de um sistema didáctico de dosimetria simples, de modo que pudesse ser reproduzido nas escolas do Ensino Secundário.

Este conteúdo programático, a dosimetria, ainda não consta dos programas deste grau de ensino, e por isso este sistema poderia ser aplicado num clube de ciência. Devemos salientar no entanto que a teoria de suporte ao estudo da dosimetria e que constitui a interacção da radiação com a matéria já é contemplado no currículo do 12º ano.

Escolhemos a dosimetria em filme uma vez que esta técnica é uma alternativa atraente, de fácil manuseamento e de baixo custo, relativamente aos restantes métodos dosimétricos.

Neste capítulo apresentaremos os materiais utilizados no trabalho experimental em que se baseou esta tese, focando aspectos relevantes dos mesmos para o cumprimento dos objectivos a que nos propusemos.

Assim o trabalho experimental subdividiu-se em três fases. Numa primeira fase construímos um aparelho para medir os valores do grau de enegrecimento dos filmes expostos e não expostos à radiação, que nos levou à determinação da intensidade de luz transmitida (I) através do filme, e da intensidade de luz incidente (I_0) no filme.

Numa segunda fase fizemos a exposição dos filmes à radiação ionizante e a revelação dos mesmos.

Numa terceira fase utilizando o aparelho construído e uma câmara de ionização com o respectivo electrómetro, procedemos à calibração do sistema (capítulo V).

Através dos valores medidos de I e I_0 calculámos a densidade óptica e fizemos a sua representação gráfica em função da dose absorvida no meio (fantoma), também chamada curva de calibração absoluta. Os valores de dose absorvida foram obtidos por método ionométrico, no mesmo instante em que se expunham os filmes à radiação ionizante. Procedemos também nesta fase à calibração relativa do sistema, estabelecendo a relação entre a densidade óptica e o tempo de exposição dos filmes à radiação. Neste capítulo apresentamos o protótipo do aparelho medidor do

enegrecimento dos filmes, os materiais utilizados, ou seja, os fantasmas as fontes de radiação, e os dosímetros testados.

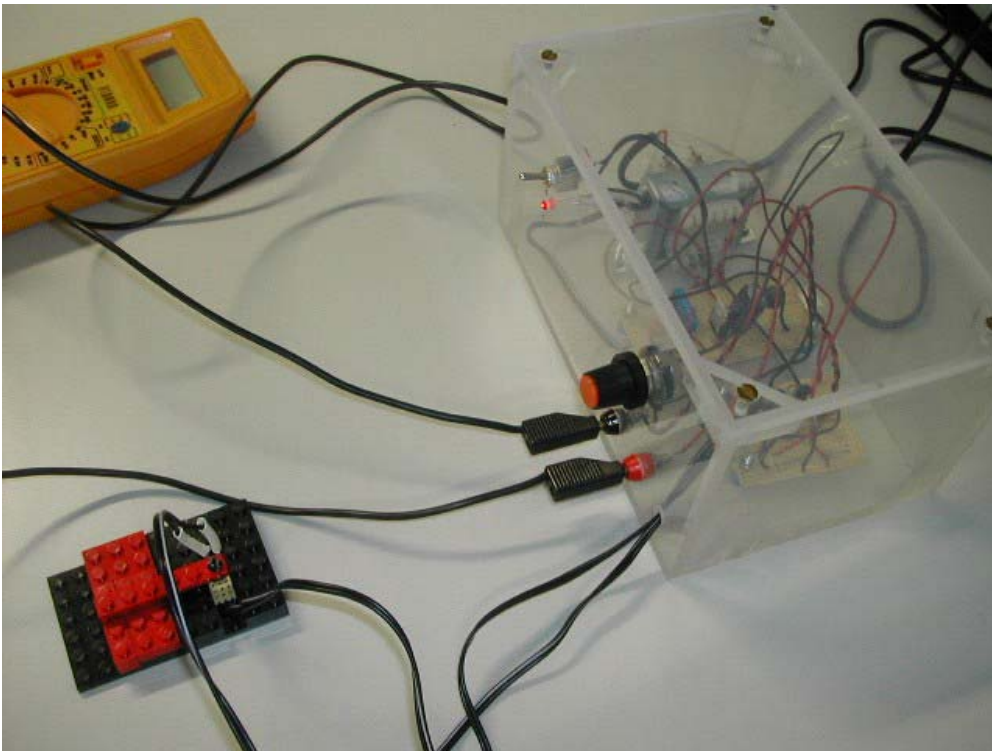
4.2. Protótipo do Leitor

O protótipo do leitor que apresentamos é constituído por uma cabeça de leitura onde foi montado um LED de infravermelho, que tem uma janela opaca à luz visível e tem a vantagem de não necessitar de estar “isolado” da luz ambiente. O sinal da cabeça de leitura é amplificado, e lido por um voltímetro.

Para a construção do amplificador recorremos a uma nota técnica da Sharp “Optoelectronics”, com referência SMA99017, onde encontramos alguns esquemas e notas sobre “circuitos com aplicação de fotodíodos / fototransistores”.

Para a construção deste aparelho procurámos utilizar materiais comuns e acessíveis de forma a podermos ter uma reprodutibilidade nas escolas, bem como recorrer a esquemas electrónicos básicos..

A fotografia 4.1 mostra o aparelho que é constituído por uma caixa em acrílico onde foram montados os circuitos necessários ao seu funcionamento, a cabeça de leitura montada em peças de LEGO^{®2}, bem como um multímetro.



Fotografia 4.1: Fotografia do aparelho.

² ® marca registada

4.2.1. Descrição dos Circuitos

Entre os circuitos propostos pela nota técnica da Sharp, escolhemos um de realimentação negativa para obter amplificadores cujo ganho seja estável e linear, o que na prática significa que o ganho deve depender pouco dos parâmetros que caracterizam os elementos activos que constituem o circuito.

4.2.1.1. Fonte de Alimentação

Este circuito foi montado como mostra a figura 4.1 e é constituído por um transformador de 12V, um interruptor (B), uma ponte rectificadora (A), um Three Terminal Regulator (LM317), para a estabilização da tensão de saída e um condensador electrolítico (de 1000 μF / 25 V).

A resistência variável R_v permite o ajuste da tensão de saída.

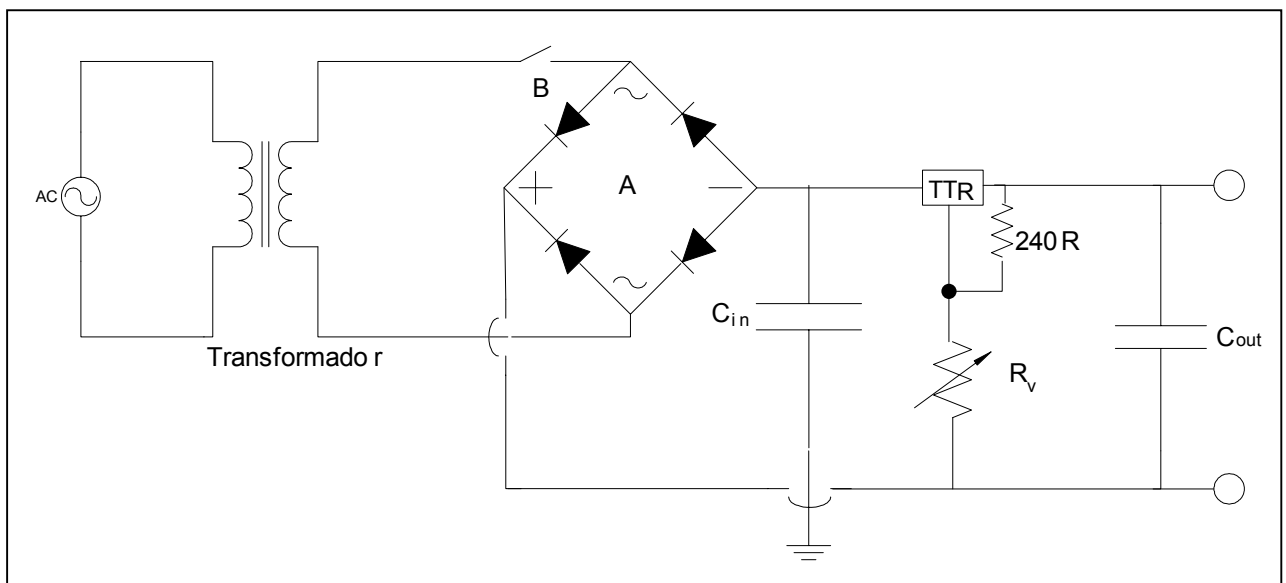


Fig. 4.1. Esquema do circuito da fonte de alimentação

4.2.1.2. Circuito Emissor de Luz

O circuito emissor de luz, como se pode ver pela figura 4.2, é constituído por um LED de infravermelho (LED IR CQY 89 A), uma resistência variável e uma resistência de protecção de 120 Ω . Este circuito é utilizado para iluminar o fotodíodo do circuito detector.

Estes dois circuitos constituem a cabeça de leitura do nosso aparelho, tendo-se colocado o LED à frente do fotodíodo.

Quando se interpõe, entre estes dois componentes, um filme mais ou menos enegrecido a quantidade de luz que chega ao fotodíodo varia, sendo esta variação medida a partir da variação da diferença de potencial de saída V_{out} .

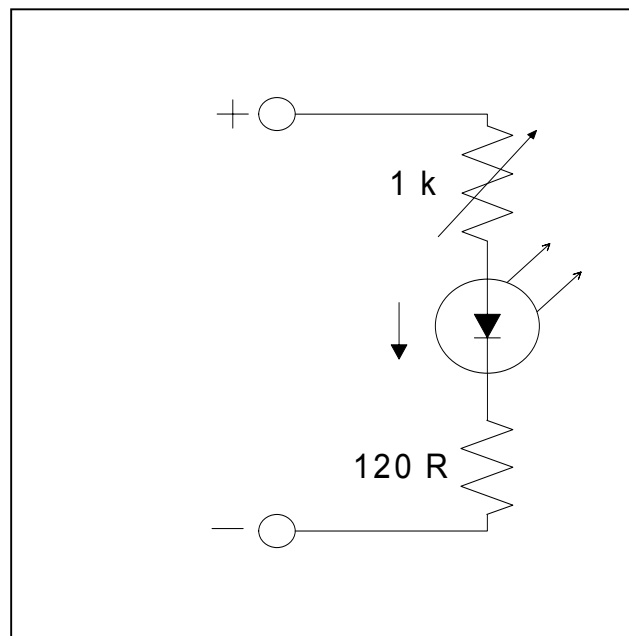


Fig.4.2. Esquema do circuito de emissão de luz

4.2.1.3. Circuito Detector

Na figura 4.3 pode ver-se o circuito detector constituído por um fotodíodo, dois transístores Tr_1 e Tr_2 , duas resistências de $27\text{ k}\Omega$, uma resistência de $2,7\text{ k}\Omega$.

A fotocorrente produzida pelo fotodíodo, chega ao transístor (Tr_1), que faz aumentar a tensão à sua saída (amplificador de tensão). O transístor adicional (Tr_2), faz aumentar a corrente de saída, sendo um amplificador de corrente.

Os valores lidos são a diferença de potencial à saída do amplificador.

Este fotodíodo apresenta a particularidade de ter uma janela opaca à luz visível, não sendo, portanto, necessário colocá-lo dentro de uma caixa escura

O LED emissor/receptor não tinha colimação. Este factor introduz uma limitação ao nível da resolução espacial do feixe de luz, uma vez que assim este feixe atravessa uma zona mais alargada do filme tornando a leitura pouco precisa, do ponto de vista espacial.

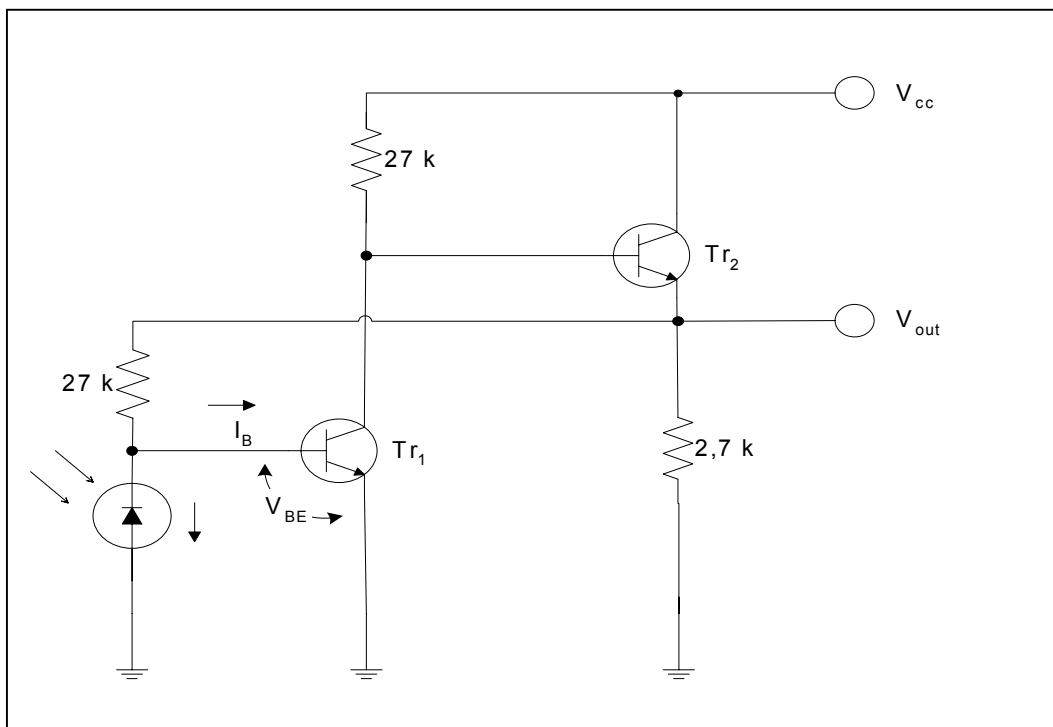


Fig. 4.3. Esquema do circuito detector

4.3. Fantomas

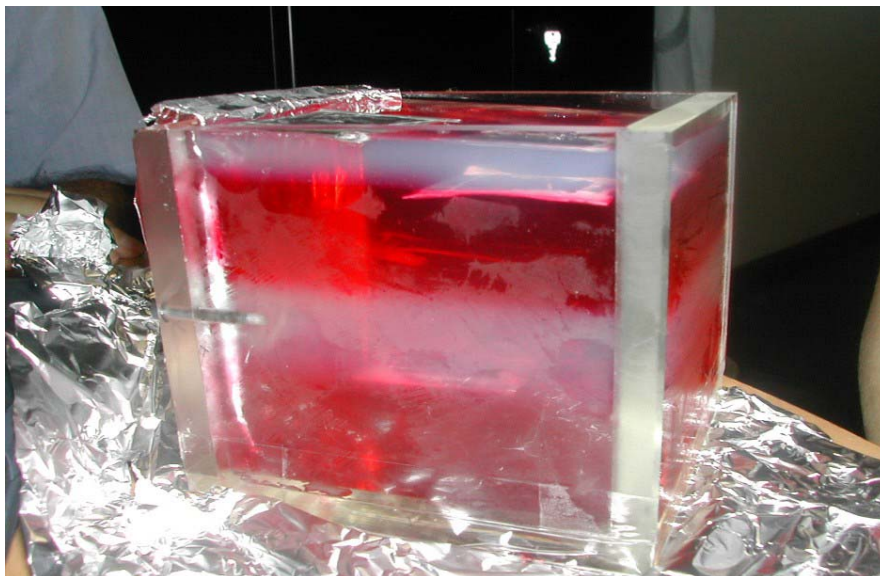
A I.C.R.U. define fantoma como “um material cujas propriedades de absorção e de dispersão, para uma dada irradiação, simulam tanto quanto possível aquelas de um dado material biológico tais como os tecidos moles, o músculo, os ossos, ou a gordura” (I.C.R.U. report 44, 1989).

Neste trabalho utilizámos vários fantomas que passamos a expor. Ao longo da apresentação mostramos aquele que escolhemos, por ser de mais fácil manuseamento e levar-nos a resultados mais reprodutíveis.

4.3.1. Fantoma de Gelatina

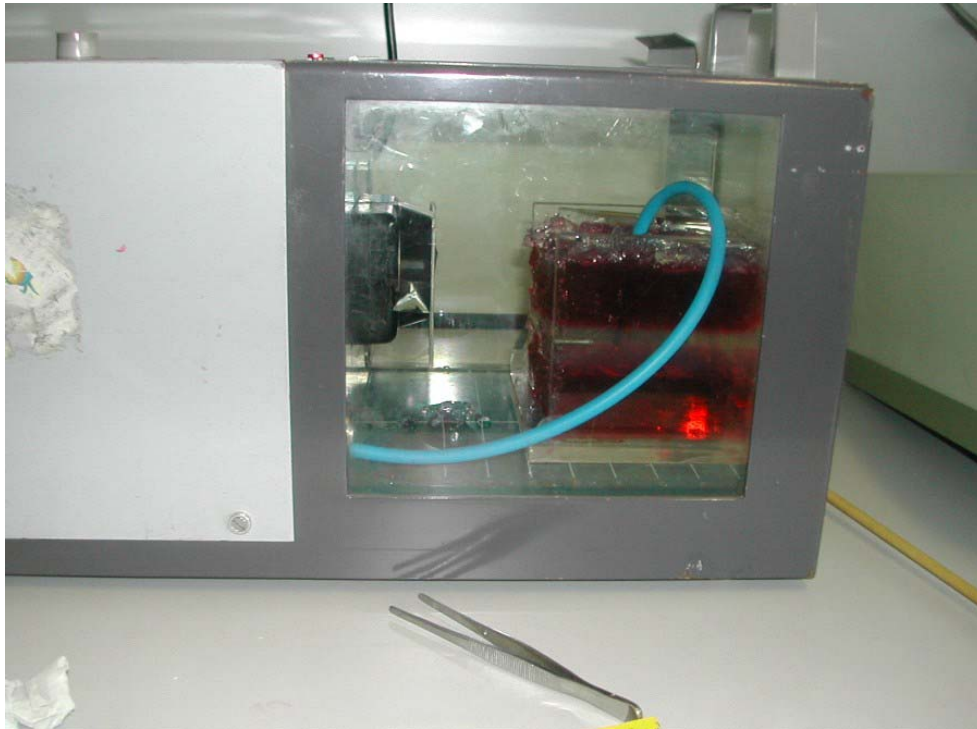
Sendo este um trabalho para ser realizado com alunos do ensino secundário começámos por ensaiar um fantoma de gelatina, pelo seu impacto visual, e à partida parecendo de fácil manuseamento. Após algumas medições, chegámos à conclusão que as distâncias entre a fonte de radiação e a câmara de ionização, ou os filmes são difíceis de medir, e não têm grande rigor.

A fotografia 4.2 mostra o recipiente onde foi feita a gelatina, de cores diferentes para produzir um efeito visual atraente, e onde se podem ver alguns filmes protegidos com papel de alumínio, e colocados dentro da gelatina. Os filmes foram colocados na altura em que se procedia à montagem das diferentes gelatinas.



Fotografia 4.2. Fantoma de gelatina com filmes devidamente protegidos com papel de alumínio colocados à medida que as gelatinas iam solidificando.

Na fotografia seguinte (4.3) pode ver-se o fantoma de gelatina dentro do aparelho didático de produção de raios X, numa fase seguinte do trabalho, onde se pode verificar o mau estado da gelatina após terem sido retirados os primeiros filmes, e depois de uma primeira exposição à radiação. Nesta fase pretendia-se fazer o estudo da dose absorvida na gelatina, ao longo de um eixo paralelo à fonte, com uma câmara de ionização.



Fotografia 4.3. Aparelho didático de produção de raios X com o fantoma de gelatina e a câmara de ionização.

4.3.2. Fantoma de Água

De seguida utilizámos um fantoma de água, para tentarmos obviar o problema da falta de rigor nas medições das distâncias entre a fonte e a câmara de ionização. Com a água medimos a dose absorvida apenas com a câmara de ionização como mostra a fotografia 4.4.

A distância da fonte de radiação à câmara de ionização é fácil de determinar, e mais rigorosa, uma vez que a câmara é montada numa régua graduada ajustável e colocada por cima do recipiente que contem a água.

Nesta fotografia podem ver-se além do fantoma, dois castelos de chumbo presentes durante a realização do trabalho como medida de protecção relativamente à fonte de radiação utilizada, ^{60}Co , que na fotografia se encontra na peça amarela de LEGO à frente do fantoma de água.



Fotografia 4.4. Fantoma de água, com a montagem da câmara de ionização, a fonte de ^{60}Co montada em peças de LEGO e dois castelos de chumbo para protecção.

Este fantoma embora apresentasse a vantagem de se medir com facilidade a distância entre a fonte de radiação e a câmara de ionização, torna-se limitativo, uma vez que o dosímetro que pretendemos utilizar são filmes, que se molhariam ao serem introduzidos na água.

4.3.3. Fantoma Sólido

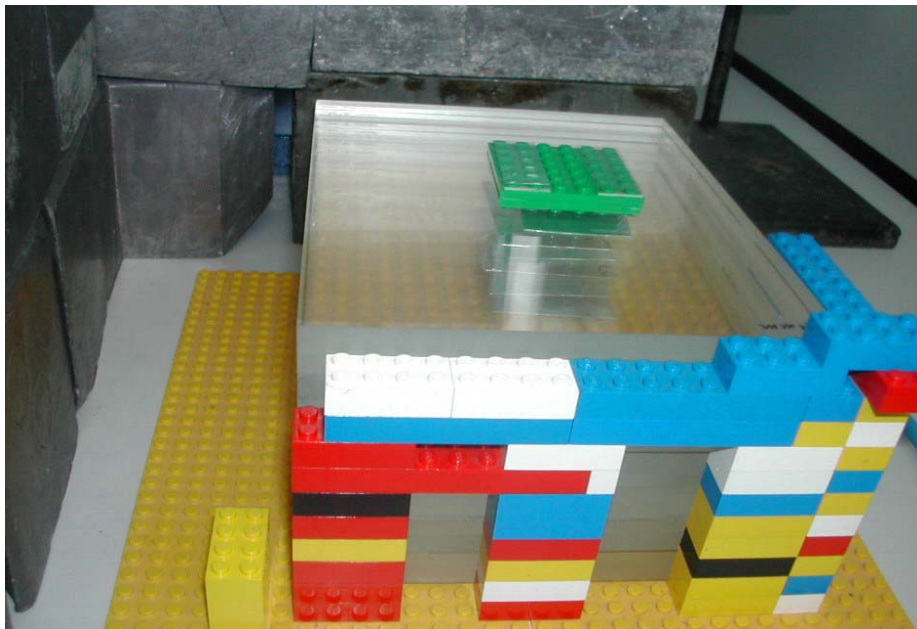
A impossibilidade de introduzir os filmes em água levou-nos a pensar na utilização de um fantoma sólido.

Este fantoma que apresenta um impacto visual menor, é de mais fácil manuseamento e leva-nos a resultados mais reprodutíveis (fotografia 4.5).

É constituído por várias placas de plexiglass independentes e identificadas individualmente, cuja espessura foi previamente determinada com uma craveira.

Estas placas têm superfícies planas, permitindo a compressão uniforme do filme entre elas. Uma destas placas possui uma cavidade onde pode ser introduzida a câmara de ionização.

Nesta fotografia pode ver-se que as placas que constituem o fantoma estão fixas com uma “cercadura” feita com peças de LEGO, para evitar o deslizamento das mesmas e tornar reprodutível o posicionamento. Pode ainda ver-se sobre o fantoma, uma caixa verde também de LEGO, dentro da qual foi colocada uma fonte de radiação de ^{60}Co , da qual falaremos mais pormenorizadamente na secção 4.4.1.



Fotografia 4.5. Fantoma sólido preso numa cercadura feita com peças de LEGO, para manter a posição relativa das placas que constituem o fantoma.

Quando a fonte de radiação foram os raios X, obtidos através do aparelho didático existente na Faculdade de Ciências, efectuaram-se ensaios utilizando o fantoma sólido sendo neste caso as placas que o constituem colocadas como mostra o esquema da figura 4.4, e a fotografia 4.6.

A primeira placa de espessura 14,0mm contém uma cavidade que se utilizou para colocar a câmara de ionização.

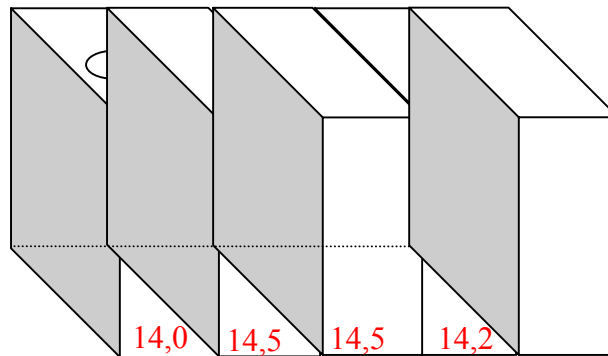
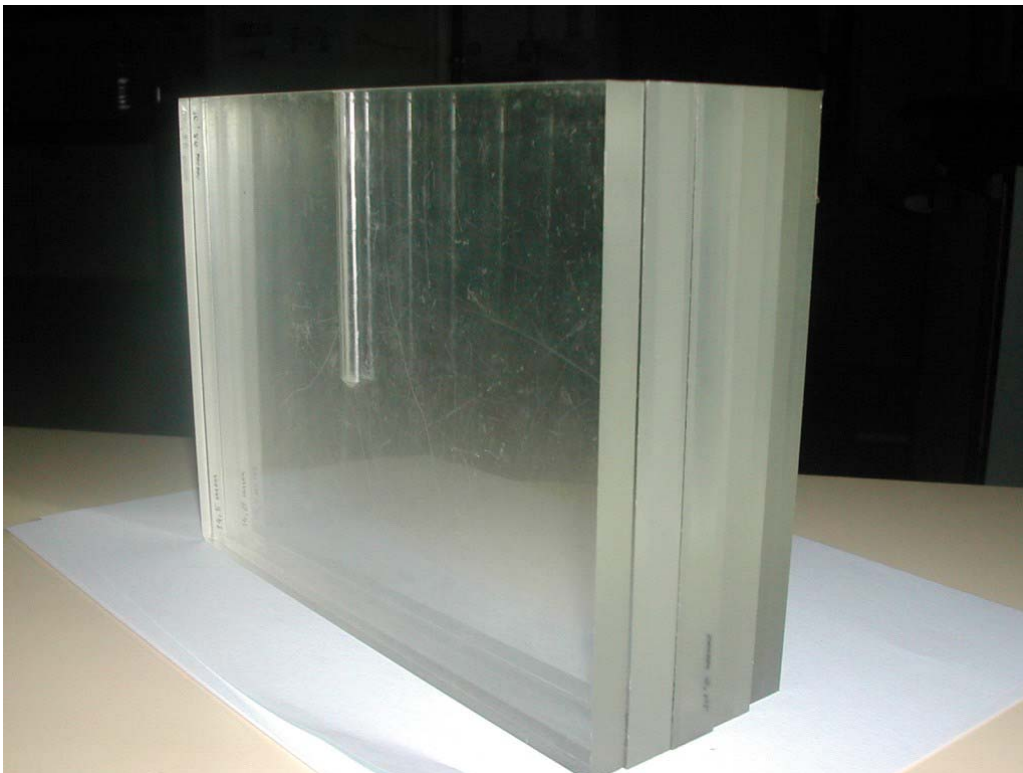


Fig. 4.4. Esquema da montagem das placas que constituem o fantoma sólido, utilizado com o aparelho didático de raios X. Os valores registados a vermelho em cada placa na figura correspondem à espessura das mesmas em mm.



Fotografia 4.6. Fantoma sólido utilizado com a fonte didáctica de raios X

Estas placas foram colocadas no aparelho didáctico de raios X estando a primeira, à distância de 140 mm da fonte. Optámos por esta distância porque através de ensaios efectuados nos quais irradiámos filmes a distâncias menores do que 140 mm pudemos concluir que estes saturavam.

Tendo o cuidado de manter a distância entre a face do fantoma e a fonte de radiação foi-se trocando a posição da primeira placa com as seguintes, tendo por objectivo fazer o estudo da dose absorvida ao longo do eixo central do feixe de radiação até 68,5 mm de profundidade.

4.4. Fontes de Radiação

Nesta secção apresentamos as fontes de radiação disponíveis para a realização do nosso trabalho. Demos especial atenção ao ^{60}Co , ao ^{241}Am e à fonte didáctica de raios X.

4.4.1. Cobalto 60

Num primeiro ensaio utilizaram-se 9 fontes de radiação gama, de ^{60}Co com aproximadamente 5 μCi cada uma, preparadas no Instituto de Tecnologia Nuclear (I.T.N.), em Sacavém.

Neste Instituto com a ajuda de um reactor nuclear produziu-se este radioisótopo ao bombardear com neutrões o seu isótopo estável ^{59}Co .

As nove fontes de ^{60}Co foram encapsuladas entre duas peças de LEGO, como se pode ver na figura 4.5, e na fotografia 4.7. Como o diâmetro de cada fonte era ligeiramente inferior ao das cavidades cilíndricas existentes na parte de trás de cada uma das peças de LEGO e, a sua espessura desprezável em relação à das cavidades das peças, foi possível dispor as nove fontes como ilustra a figura 4.5.

Optámos pela colocação das fontes de radiação deste modo em vez de umas por cima das outras para obtermos um campo de radiação maior e especialmente mais uniforme.

Após a colocação das fontes as duas peças foram encaixadas uma na outra.

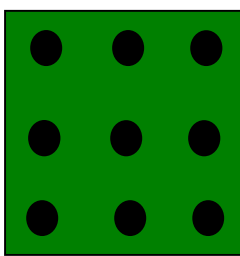


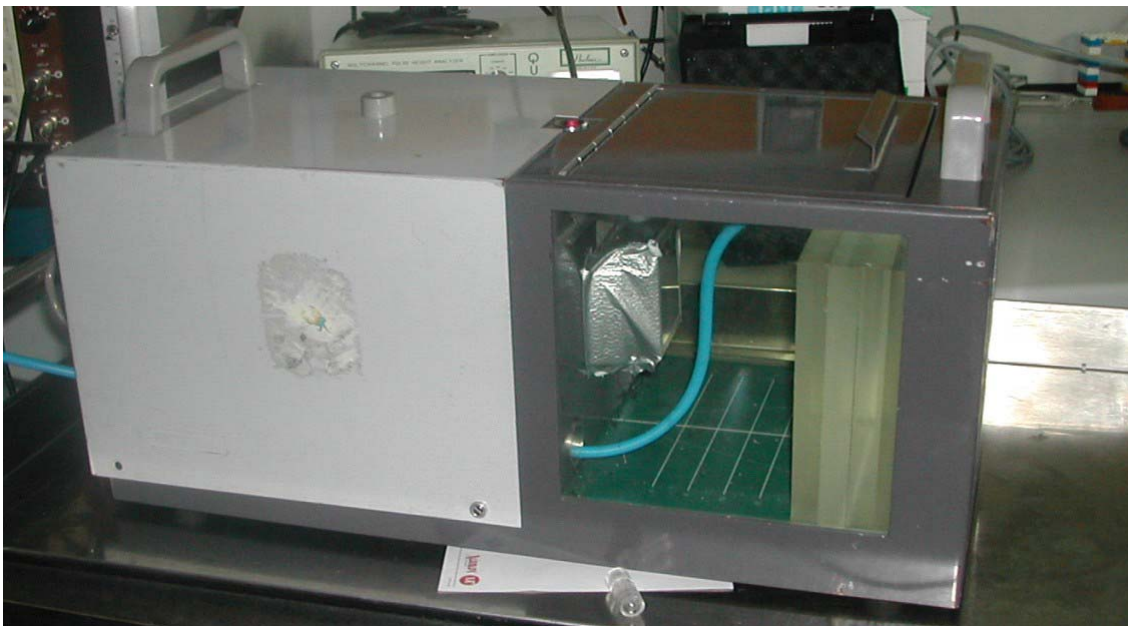
Fig. 4.5. Esquema da localização das nove fontes de ^{60}Co na parte de trás de uma das peças de LEGO.



Fotografia 4.7. Peça de LEGO com as nove fontes de ^{60}Co encapsuladas

4.4.2. Fonte Didáctica de Produção de Raios X

A ampola de raios X que foi utilizada neste trabalho opera a 59 keV e 1 mA (15 R/min) a uma distância do alvo de 13 cm. O alvo desta ampola é de tungsténio. Este aparelho, pode ser visto na fotografia 4.8.



Fotografia 4.8. Fonte didáctica de Raios X

4.4.3. Fonte de Amerício 241

Esta é uma fonte radioactiva que emite fotões na mesma gama de raios X que o aparelho didáctico apresentado na secção anterior. A fonte de ^{241}Am encontra-se blindada numa caixa com 8 cm de diâmetro, e é construída em anel. Esta fonte encontrava-se ainda dentro de uma caixa de chumbo para nossa protecção, como se pode ver na fotografia 4.9.



Fotografia 4.9. Fonte de ^{241}Am colocada dentro da caixa de chumbo azul

4.5. Dosímetros

Utilizaram-se para a realização deste trabalho dois tipos de dosimetria. A dosimetria em filme e a ionometria.

Como foi referido no capítulo anterior usaram-se dois tipos diferentes de filme. O primeiro “Poly-Soft” é um filme de pequenas dimensões, e é fornecido com um revestimento de protecção próprio, estanque à luz.

O segundo “X-OMAT V” é um filme de dimensões superiores, e é fornecido em placas com um revestimento próprio também estanque à luz. No entanto, devido às dimensões deste segundo filme, comparadas com as dos fantasmas utilizados no trabalho, tornou-se necessário dividi-lo em pequenos filmes, que eram posteriormente envolvidos cuidadosamente em papel de alumínio, para não serem impressionados pela luz, e numerados. Todo este procedimento foi efectuado na câmara escura.

A ionometria foi utilizada para a calibração relativa e absoluta do sistema de leitura, e para comparação dos valores de dose absorvida utilizando fontes de radiação diferentes, e fantasmas também diferentes. Utilizámos um sistema dosimétrico calibrado composto

por uma câmara de ionização de 0,3 cm³ da marca PTW, e modelo nº 31003, e o respectivo electrómetro associado da mesma marca PTW.

Em virtude do elevado preço da câmara de ionização anteriormente referida, preço este não suportável pelas escolas para quem se destina este trabalho, fizeram-se ensaios para comparar os valores lidos pela câmara de ionização e por um detector Geiger-Müller, a diferentes distâncias da fonte de radiação.

As primeiras medições efectuadas com o detector Geiger, independentemente do tempo de irradiação e da distância à fonte, eram aproximadamente iguais, o que mostrava que o feixe de radiação saturava o detector.

Isto verifica-se porque o feixe de radiação é muito intenso.

Após vários ensaios concluímos que era necessário utilizar 3 chapas de aço à saída da fonte para atenuar o feixe.

Ao aumentar o número de chapas de aço colocadas à saída da fonte de radiação, aumenta a atenuação e, como efeito temos que os feixes com maior comprimento de onda e menor energia são os mais atenuados. Assim aqueles que atravessam as placas são os têm menor comprimento de onda.

Assim ao colocar as placas à frente da fonte, a diminuição da dose de radiação é devido ao menor número de fotões que atingem o fantoma.

Foram efectuadas leituras de dose absorvida pela câmara de ionização e pelo detector Geiger durante o mesmo intervalo de tempo e às mesmas distâncias da fonte de radiação.

Cada um dos pontos foi lido nos dois aparelhos ao fim de 5, 10, 20 e 30 segundos de exposição, e às distâncias de 11, 14 e 18 centímetros da fonte de radiação. Os valores obtidos foram trabalhados e obteve-se o gráfico representado na figura 4.6. Neste gráfico relacionam-se os valores de dose absorvida lida pela câmara de ionização, com os valores lidos no detector Geiger, às distâncias referidas. Cada uma das rectas corresponde às leituras efectuadas a 11 cm, 14 cm e 18 cm como se referênciam na legenda do gráfico.

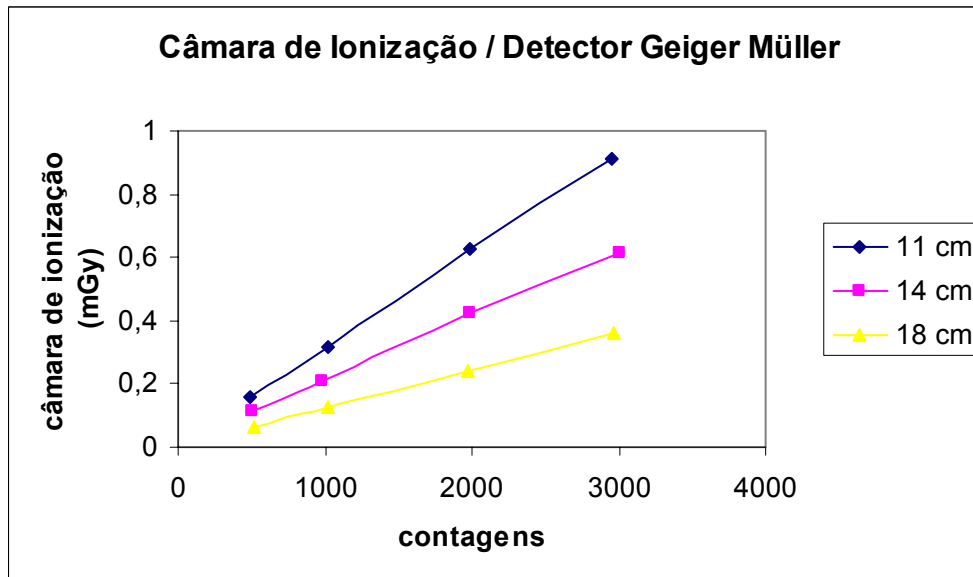


Fig. 4.6. Gráfico da comparação dos valores lidos pela câmara de ionização e o detector Geiger Müller.

De seguida os valores encontrados foram tratados, relacionando agora o tempo de exposição com as leituras efectuadas pela câmara de ionização e pelo detector Geiger Müller. Os pontos de cada série foram lidos respectivamente à distância de 11, 14 e 18 centímetros da fonte de radiação. O gráfico encontrado está representado na figura 4.7.

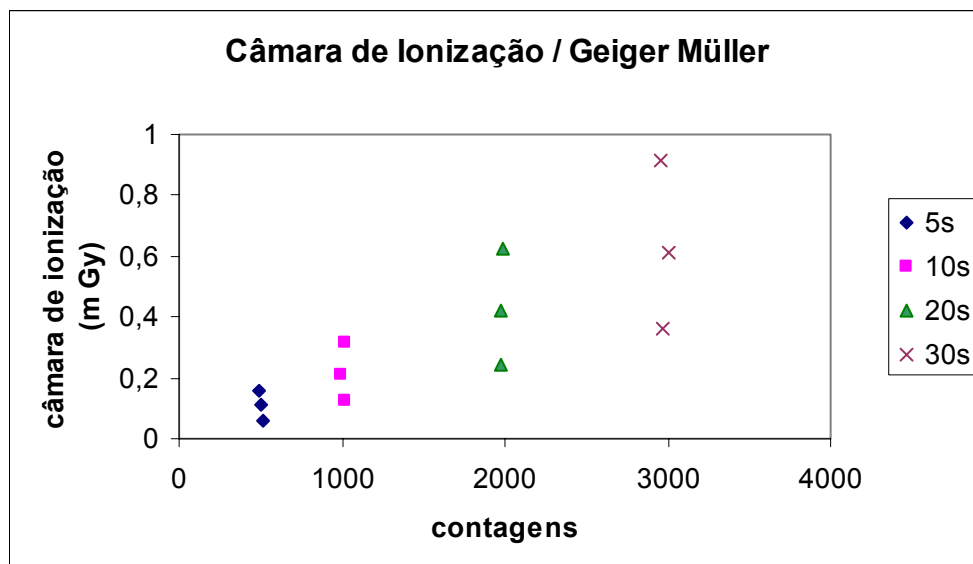


Fig. 12. Gráfico da comparação dos valores lidos pela câmara de ionização e o detector Geiger Müller.

Através destes ensaios pode perceber-se que estamos a trabalhar numa zona em que existe proporcionalidade entre os valores obtidos pela câmara de ionização e pelo contador Geiger, para uma mesma distância.

CAPÍTULO V – Calibração do Sistema

5.1. Calibração do sistema

Como já foi referido no capítulo anterior a dosimetria em filme não é um método directo de determinação de dose absorvida, uma vez que a grandeza medida directamente num filme revelado que foi exposto a radiações ionizantes é a densidade óptica. A determinação da dose absorvida por um dado meio com um filme é determinada pela calibração da resposta do filme em relação a uma câmara de ionização calibrada e o respectivo electrómetro associado.

Na realização deste trabalho, e como foi referido no capítulo III, utilizámos dois tipos de filme diferentes, tornando-se portanto necessário proceder à calibração do sistema para cada um dos filmes.

Nesta fase do trabalho utilizámos o aparelho didático de raios X e o fantoma sólido, colocado no aparelho conforme referido no capítulo IV.

5.1.1. Procedimento de Leitura

Para procedermos à calibração do sistema optámos por fazer a leitura da dose absorvida em profundidade, e ao longo do eixo central do feixe de radiação, utilizando a câmara de ionização e o respectivo electrómetro, e simultaneamente utilizar um dos filmes como dosímetro.

Antes de se iniciarem as leituras de dose efectuou-se o zero ao electrómetro ao qual a câmara de ionização está ligada.

Colocámos a câmara na cavidade própria da placa, como mostra a figura 4.5 do capítulo IV, e colámos um filme na parte da frente da mesma. Esta placa foi sendo colocada a profundidades diferentes, sendo irradiada pela fonte de raios X durante 5 segundos, de cada vez.

Ao fim desse tempo registou-se o valor de dose absorvida que é lida no electrómetro, e retirámos o filme irradiado que numerámos.

Este procedimento repetiu-se até à profundidade máxima de 68,5 mm.

Os filmes foram depois revelados. Fez-se a revelação de um filme virgem, não exposto a qualquer radiação. Este processo de revelação teve lugar numa câmara escura, protegendo os filmes da luz visível durante todo o ciclo. A revelação utilizada neste trabalho foi manual, sendo o tempo de permanência em cada uma das etapas de 4 minutos. Este processo foi explicado na secção 3.5.3 do capítulo III.

O líquido revelador utilizado tinha a referência CAT 5016316 e o fixador a referência CAT 5016308.

Após a secagem dos filmes, fez-se a leitura da intensidade de luz transmitida através dos mesmos que apresentam enegrecimentos diferentes devido à diferente exposição à radiação ionizante, usando o protótipo do aparelho exposto na secção 4.2 do capítulo IV. Sendo este valor lido num voltímetro, a unidade de medida é o V (volt).

Registou-se assim o valor da intensidade do feixe de luz transmitida através do filme, (I). Procedeu-se do mesmo modo com o filme virgem, não exposto a qualquer radiação, para determinar o valor da intensidade de velo (I_v).

Determinou-se a densidade óptica que, é dado pelo logaritmo do quociente entre I_v e I.

$$DO = \log_{10} \left(\frac{I_v}{I} \right)$$

5.1.2. Calibração Absoluta dos Filmes

Para obter o gráfico de calibração absoluta para cada filme fez-se corresponder a cada densidade óptica medida no filme ao longo do eixo central do feixe, a diversas profundidades a dose absorvida, à mesma profundidade, medida através de métodos ionométricos.

5.1.2.1. Filme Poly-Soft

Para o filme Poly-Soft e após vários ensaios verificámos que com este tipo de filme seria necessário fazer a atenuação do feixe de radiação com 3 folhas de aço, uma vez que se assim não fosse saturava.

Os valores obtidos para este tipo de filme apresentam-se na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores da dose absorvida, intensidade de luz transmitida através do filme e densidade óptica em função da profundidade. O valor de I_v foi de 4,03V

profundidade (mm)	dose absorvida (mGy)	I (V)	D.O.
0	0,108	2,92	0,140
14,5	0,088	3,18	0,103
29,0	0,065	3,40	0,070
43,2	0,046	3,62	0,050
58,0	0,029	3,84	0,021

Na figura 5.1 apresenta-se o gráfico da curva de calibração absoluta para o filme Poly-Soft.

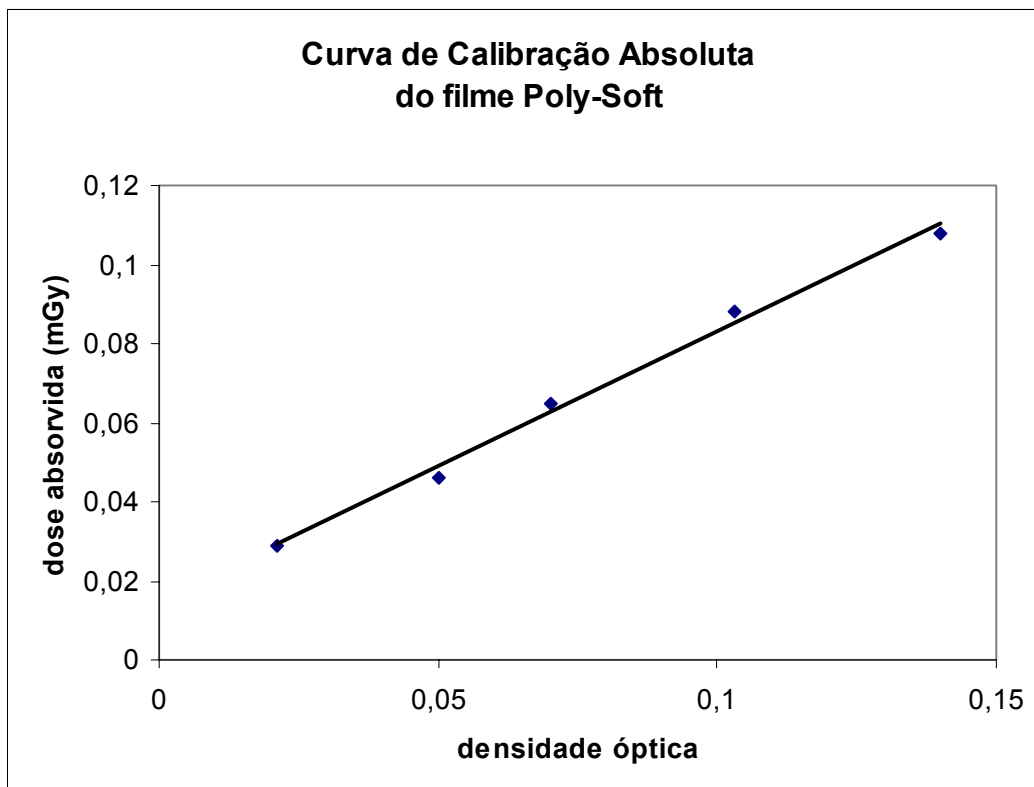


Fig. 5.1. Gráfico relacionando a densidade óptica e a dose absorvida.

Nesta figura mostra-se o resultado do ajuste da curva aos pontos obtidos experimentalmente, expressa através da equação

$$D = 0,6821 DO + 0,0148$$

onde, DO, representa o valor da densidade óptica do filme a uma dada profundidade e, D, o valor da dose absorvida pelo filme a essa profundidade.

Pode verificar-se que na curva de calibração deste filme não aparece a zona de saturação, uma vez que sendo este um filme com maior sensibilidade e utilizado para baixas taxas de dose, tivemos que proceder à atenuação do feixe, passando a trabalhar na zona de proporcionalidade.

5.1.2.2. Filme X-OMAT V

Durante os ensaios efectuados verificámos que sendo este um filme de baixa velocidade, e consequentemente utilizado para taxas de dose superior, não necessitávamos de atenuar o feixe de radiação.

Assim após o tratamento dado ao filme na câmara escura, como explicado na secção 4.5 do capítulo IV, devido ao seu tamanho, procedemos como referido na secção 5.1.1. deste capítulo, e obtivemos os resultados que se apresentam na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valores da dose absorvida, intensidade de luz transmitida através do filme e densidade óptica em função da profundidade. O valor de I_v foi de 4,03V

profundidade (mm)	dose (mGy)	I (V)	DO
0	32,64	0,8	0,702
14,8	18,74	1,03	0,592
29,3	11,20	1,4	0,459
43,5	6,48	1,88	0,320
58,6	3,59	2,24	0,255

Na figura 5.2 apresenta-se o gráfico da curva de calibração para o filme X-OMAT V.

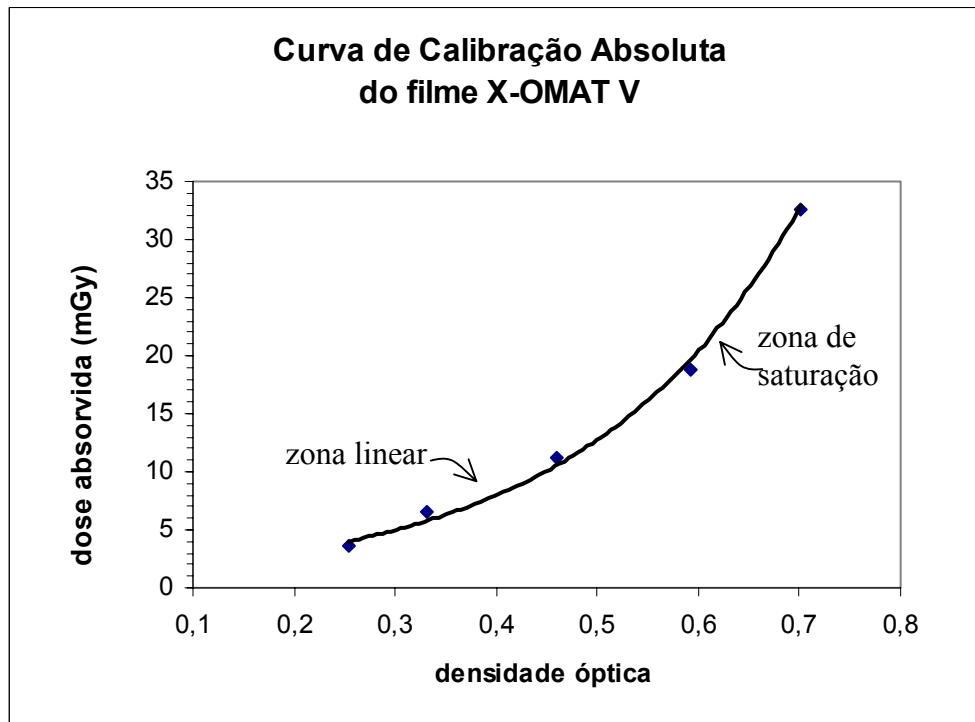


Fig. 5.2. Gráfico relacionando a densidade óptica e a dose absorvida.

Fazendo o ajuste da curva aos pontos obtidos experimentalmente, obteve-se a equação

$$D = 1,2182 e^{4,6997 DO}$$

onde, DO, representa o valor da densidade óptica do filme a uma dada profundidade e, D, o valor da dose absorvida pelo filme a essa profundidade.

Pode verificar-se que na curva apresentada deste filme aparece uma zona de saturação e uma zona linear, que assinalámos no gráfico.

5.1.3. Calibração Relativa dos Filmes

Através da calibração relativa dos filmes podemos encontrar a zona linear e a zona de saturação mesmo sem utilizarmos a câmara de ionização.

Poderá ser um método a utilizar numa escola secundária, onde não existe o recurso de uma câmara de ionização, para se determinar qual a zona linear do filme

5.1.3.1. Filme Poly-Soft

Neste caso os valores foram obtidos a partir da irradiação dos filmes a tempos diferentes mas à distância de 170 mm da fonte didáctica de raios X, e mantendo a atenuação referida na secção 5.1.2.1.

Os valores são apresentados na tabela 5.3

Tabela 5.3 – Valores da densidade óptica em função do tempo de exposição para o filme Poly-Soft.

t (s)	D.O.
0	0
5	0,025
10	0,042
20	0,080
30	0,114

Na figura 5.3 apresenta-se a curva de calibração relativa para o filme Poly-Soft

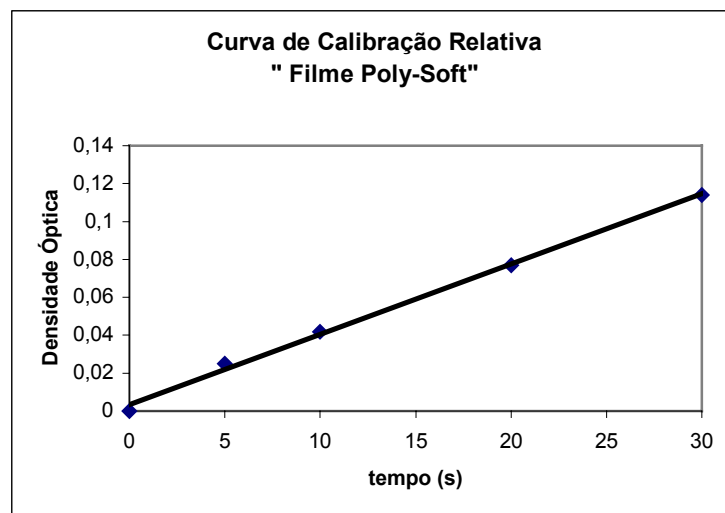


Fig. 5.3. Curva de calibração para o filme Poly-Soft.

5.1.3.2. Filme X-OMAT V

Os valores foram obtidos ao se irradiarem os filmes durante intervalos de tempo diferentes mas sempre colocados à distância de 198 mm da fonte didáctica de raios X.

Os valores são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores da densidade óptica em função do tempo de exposição para o filme X-OMAT V.

Tempo(s)	DO
0	0
5	0,030
10	0,054
15	0,080
20	0,102

Na figura 5.4 apresenta-se a curva de calibração relativa para o filme X-OMAT V.

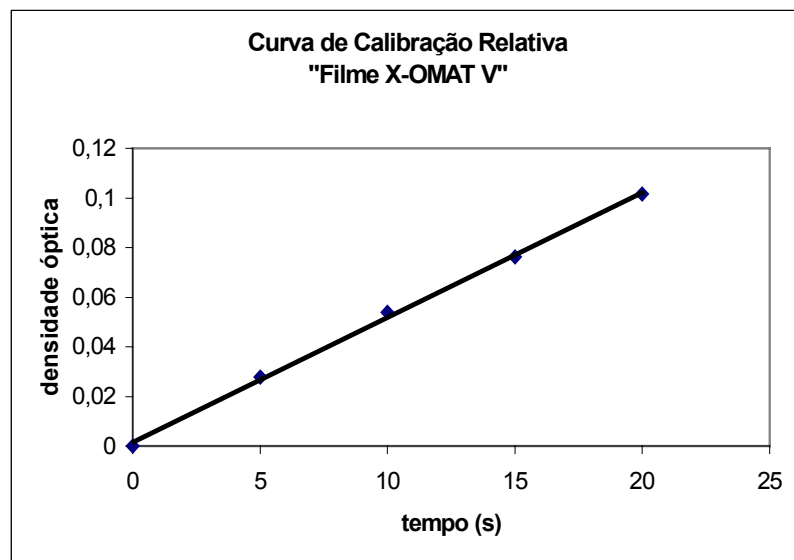


Fig. 5.4. Curva de Calibração Relativa para o filme X-OMAT V.

Através da análise das curvas de calibração relativa dos dois tipos de filme podemos verificar que só apanhámos a zona linear sem chegar à zona de saturação.

CAPÍTULO VI – Resultados Experimentais

Apresentamos agora os resultados obtidos na realização do nosso trabalho, distribuídos em duas secções. Na primeira apresentamos a medição de perfil de dose com filme, e na segunda a medição de perfis de dose em profundidade. Mostramos ainda a validade da utilização de filmes para o estudo da dose absorvida em ambiente de escola secundária.

6.1. Medição de Perfil de Dose com Filme

Com o objectivo de obter informação sobre a simetria do feixe de radiação fizemos o estudo das curvas de perfil.

Através das curvas de perfil podemos caracterizar a variação da dose absorvida em planos perpendiculares ao eixo central do feixe de radiação.

Para fazer o estudo dos perfis de dose com filme cortámos tiras do filme X-OMAT V que foram coladas sobre as placas de plexiglas, que por sua vez foram empilhadas uma sobre as outras formando o fantoma, e este foi envolvido em papel de alumínio. Este procedimento foi efectuado na câmara escura para evitar que os filmes fossem irradiados pela luz, e conseqüentemente destruídos.

Este conjunto foi colocado à frente de uma fonte de ^{241}Am , durante 3 horas. Utilizámos esta fonte de radiação, com uma geometria diferente, para ver se detectávamos algumas diferenças.

Com esta montagem o primeiro filme ficou à distância de 10mm da fonte, os seguintes sucessivamente às distâncias de 24,5 mm, 39,0 mm, 53,8 mm e 68,9 mm.

Após terem sido irradiados os filmes foram revelados e secos. Em cada filme foi traçada uma recta que foi graduada. O zero da graduação corresponde ao ponto central da recta.

Depois de lidos os valores do enegrecimento do filme com o protótipo do aparelho referido na secção 4.2., determinámos o valor correspondente de densidade óptica, que posteriormente foi normalizada relativamente ao eixo central e ao valor encontrado na posição central desse eixo pertencente à recta obtida para o filme colocado a menor distância da fonte (10 mm). Na tabela 6.1 apresentam-se os valores calculados para a densidade óptica e percentagem de densidade óptica, em função da posição relativa em que foi feita a leitura da intensidade de luz transmitida através do filme, para diferentes profundidades

Tabela 6.1 – Valores da densidade óptica e percentagem de densidade óptica, para diferentes profundidades, usando o filme X-OMAT V. O valor de I_v utilizado para os calculos foi de 4,40 V.

10,0 mm		24,5 mm		39,0 mm		53,8 mm		68,9 mm	
posição	DO (%)	posição	DO (%)	posição	DO (%)	posição	DO (%)	posição	DO (%)
-7	21,30	-7	17,00	-8	11,50	-7	12,50	-8	9,80
-6	25,00	-6	21,70	-7	14,00	-6	14,30	-7	10,50
-5	35,10	-5	27,30	-6	17,20	-5	20,60	-6	12,50
-4	49,50	-4	37,90	-5	22,70	-4	19,60	-5	13,50
-3	70,00	-3	49,50	-4	29,30	-3	22,30	-4	16,50
-2	90,10	-2	60,70	-3	35,40	-2	25,00	-3	18,50
-1	97,20	-1	65,40	-2	39,20	-1	25,60	-2	20,20
0	100,00	0	66,60	-1	41,30	0	25,80	-1	21,00
1	99,30	1	64,60	0	41,30	1	25,80	0	21,50
2	96,50	2	60,70	1	41,60	2	25,20	1	21,70
3	86,00	3	49,80	2	40,50	3	22,70	2	21,50
4	64,20	4	37,10	3	36,40	4	21,10	3	20,40
5	45,00	5	26,40	4	29,90	5	19,40	4	19,40
6	32,00	6	19,60	5	22,30	6	16,80	5	14,90
7	23,30	7	14,70	6	17,70	7	15,40	6	13,60
8	18,10	-	-	7	14,00	8	14,00	7	11,80
9	15,40	-	-	8	11,80	9	14,20	8	10,50

Na figura 6.1 apresentam-se as curvas de perfil de dose para as diferentes profundidade.

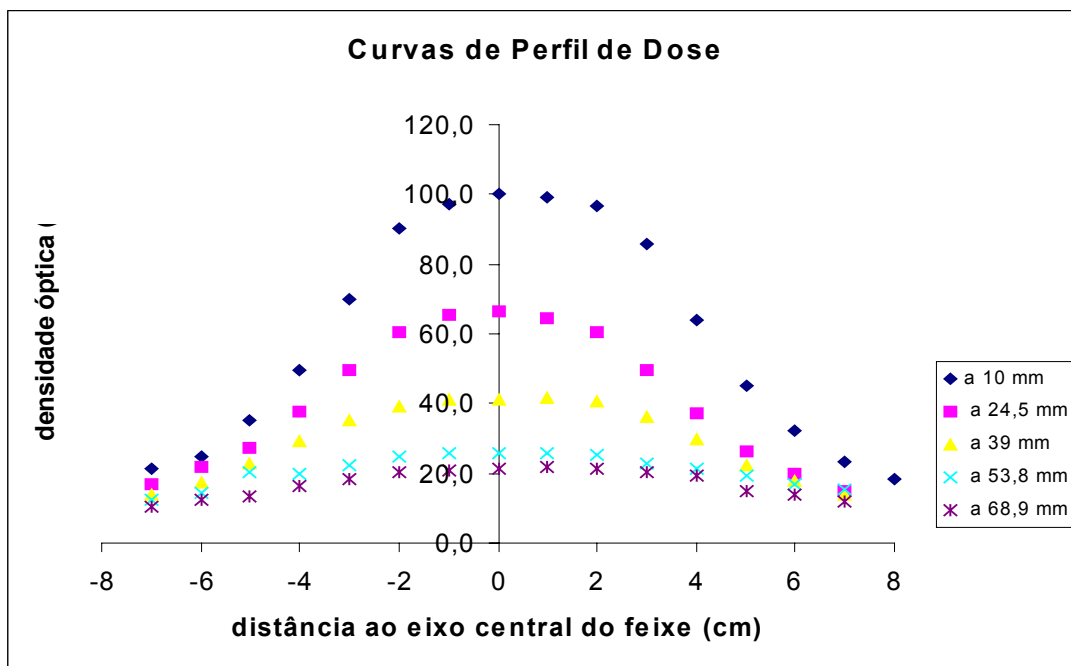


Fig. 6.1. Curvas de perfil de dose para um feixe de radiação, obtidas num fantoma sólido à distância de 10 mm, 24,5 mm, 39,0 mm, 53,8 mm e 68,9 mm da superfície do fantoma, e ao longo de um eixo pertencente a um plano perpendicular a esse feixe de radiação.

A partir da análise destas curvas de perfil de dose podemos concluir que utilizando filmes como dosímetros obtemos um feixe de radiação simétrico.

6.1.1. Medição de Perfil de Dose com Câmara de Ionização

O objectivo nesta fase do trabalho é verificar se a geometria do feixe de radiação utilizado para a obtenção das curvas de perfil de dose com filmes, está de acordo com as obtidas através da utilização da câmara de ionização já anteriormente referido.

Para atingir este objectivo utilizámos as placas que constituem o fantoma sólido e a fonte de ^{241}Am .

Para fazer a leitura da dose absorvida ao longo de um eixo perpendicular ao feixe de radiação, utilizámos três placas diferentes, tendo, cada uma delas, uma cavidade para a colocação da câmara de ionização em posições diferentes relativamente ao eixo central.

Uma das placas tem a cavidade na parte central da mesma, e as outras duas a 2 cm e a 5 cm do centro.

A placa que contem a cavidade para a colocação da câmara de ionização, foi posta à distância de 61 mm da fonte de radiação, .

Foram feitas 5 leituras de dose absorvida após 60 segundos de exposição. Os valores de dose lidos no electrómetro são apresentados na tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Valores de dose absorvida e percentagem de dose em função da posição relativa num eixo perpendicular ao feixe de radiação a uma distância de 61 mm da fonte de radiação.

posição	dose absorvida(mGy)	dose(%)
-5	0,077	41,85
-2	0,175	95,11
0	0,184	100,00
2	0,175	95,11
5	0,077	41,85

Como no caso da determinação dos gráficos da secção anterior os valores de dose absorvida neste caso, foram normalizados relativamente ao eixo central e foi calculada a sua percentagem. Na figura 6.2 apresenta-se o gráfico que relaciona a percentagem de dose absorvida em função das posições num eixo perpendicular ao feixe de radiação.

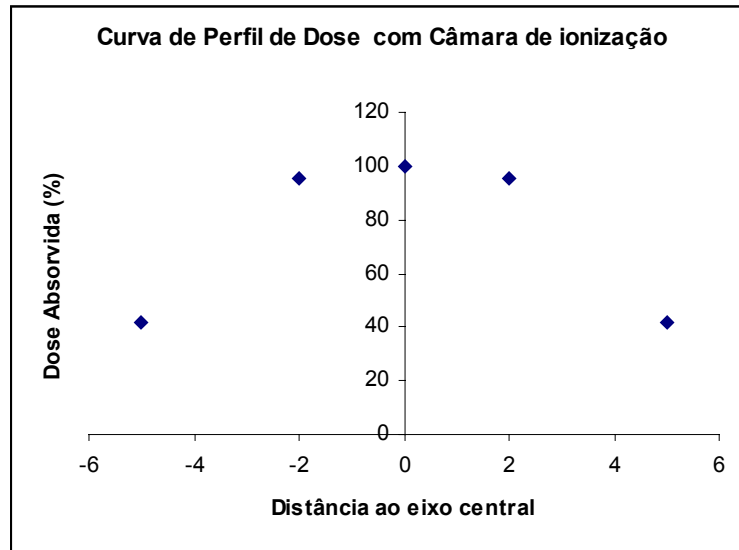


Fig. 6.2. Curva de perfil de dose para um feixe de radiação, obtida num fantoma sólido à distância de 61 mm da superfície do fantoma, e ao longo de um eixo pertencente a um plano perpendicular a esse feixe de radiação.

Comparámos os resultados obtidos com a câmara de ionização colocada a 61 mm de distância da fonte com os resultados obtidos com o filme às distâncias de 53,8 mm e 68,9 mm. Foi feita a normalização dos valores encontrados relativamente ao eixo central e ao valor encontrado na posição central desse eixo pertencente à recta obtida para a menor distância à fonte, que neste caso foi de 53,8 mm.

Os resultados obtidos apresentam-se no gráfico da figura 6.3

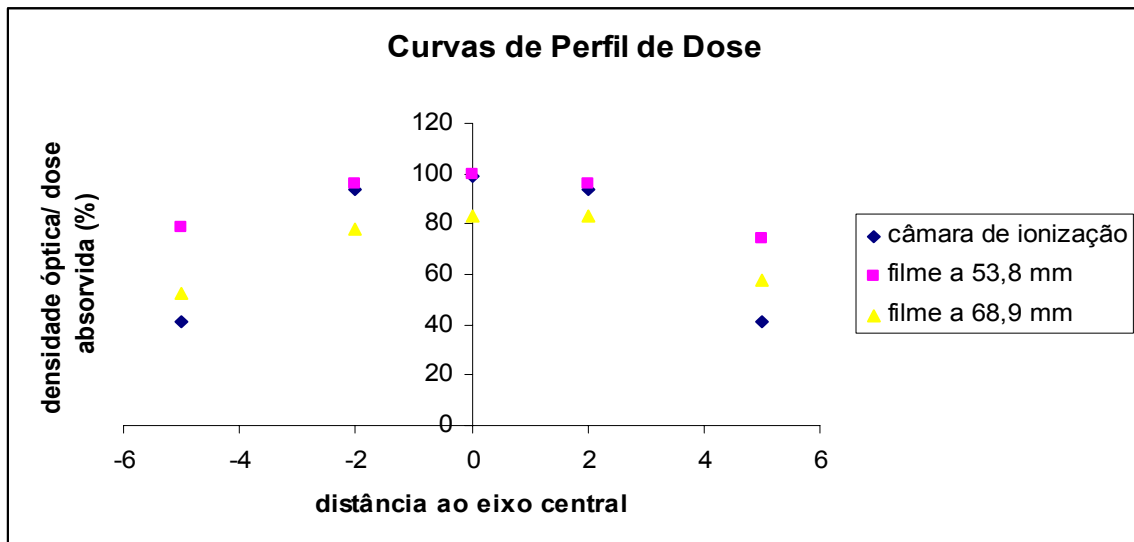


Fig. 6.3. Curvas de perfil de dose para um feixe de radiação, obtida num fantoma sólido à distância de 61 mm da superfície do fantoma com a câmara de ionização e às distâncias de 53,8 mm e 68,9 mm utilizando filmes como dosímetro.

Comparando os valores obtidos com a câmara de ionização, com um tempo de exposição à radiação de 60 segundos, e os obtidos para as mesmas posições utilizando filme, mas com um tempo de exposição de 3 horas, podemos verificar que as curvas de perfil obtidas pelos dois processos têm uma forma idêntica, o que nos pode levar a concluir que o estudo da simetria do feixe de radiação pode ser feita apenas recorrendo a filmes com as características do X-OMAT V.

6.2. Medição de Perfil de Dose em Profundidade

Com as três fontes de radiação apresentadas na secção 4.4 fizeram-se medições de dose absorvida em profundidade ao longo do eixo central do feixe de radiação nos fantasmas de gelatina e sólido, referidos na secção 4.3, utilizando o método ionométrico.

Com a fonte de ^{60}Co e os fantoma sólido e de gelatina, utilizou-se um tempo de integração de 300 segundos. Os resultados obtidos apresentam-se no gráfico da figura 6.4.

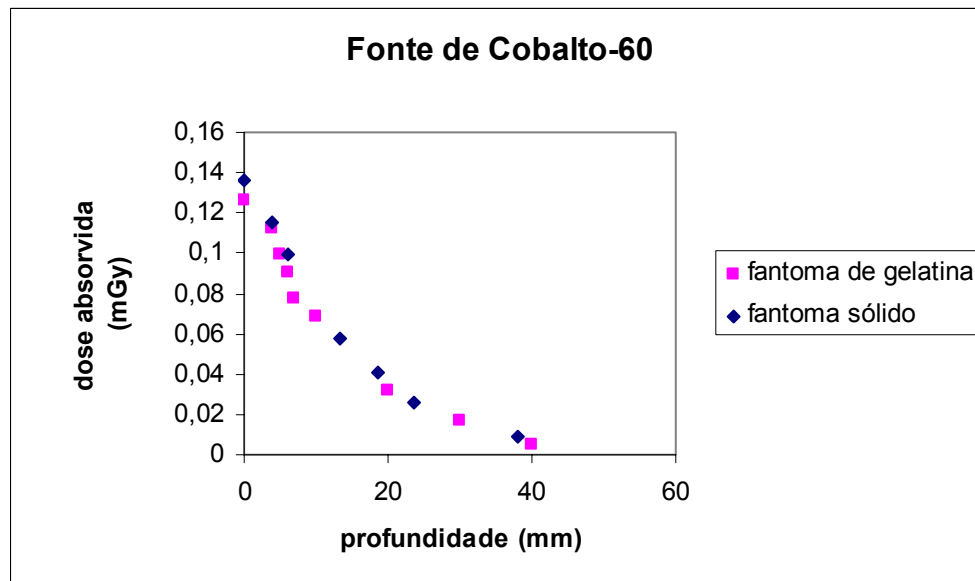


Fig. 6.4. Curvas relacionando a dose absorvida e a profundidade para os fantasmas sólido e de gelatina, usando a fonte de ^{60}Co .

Nestes gráficos não se vê a região de build-up porque a distância entre a superfície do fantoma e a câmara de ionização onde se regista o valor da primeira leitura de dose absorvida é superior à largura desta região, e é uma fonte muito fraca em termos energéticos.

Da análise do gráfico anterior podemos também retirar que as curva obtidas pela câmara de ionização colocada a profundidades diferentes nos dois fantasmas, utilizando a fonte de ^{60}Co apresentam-se idênticas, no entanto:

1- a gelatina, é muito difícil trabalhar. Os valores das medidas da distância entre a fonte e a câmara de ionização, lidas são apenas aproximadas, uma vez que a gelatina se vai desmoronando à medida que é manuseada.

A utilização de filmes num fantoma de gelatina é possível, uma vez que não são molhados. No entanto e devido ao facto da gelatina perder o seu aspecto compacto à medida que é manuseada, os filmes devem ser colocados na altura em que a gelatina é feita. Este fantoma só pode ser utilizado uma vez, porque após a irradiação, os filmes são retirados para serem tratados, ficando de imediato o fantoma estragado.

2- as placas de plexiglass, são fáceis de obter, fáceis de manusear, as distâncias entre a fonte e a câmara de ionização são muito precisas, e os valores obtidos são bons.

Concluimos que o melhor fantoma para ser utilizado neste trabalho deve ser constituído por placas de plexiglass.

Como a fonte ^{60}Co era muito fraca foi abandonada.

Com a fonte didáctica de raios X e o fantoma sólido, utilizou-se um tempo de integração de 10 segundos.

No início do ensaio a distância entre a fonte e o detector foi de 140 mm. Esta distância corresponde à superfície do fantoma, onde a profundidade é zero. Como já foi referido na secção 4.3.3. uma das placas possui uma cavidade onde foi introduzida a câmara de ionização. Por troca com as placas seguintes e tendo sempre em atenção a distância da primeira placa à fonte de radiação, fez-se o estudo da dose absorvida ao longo do eixo central, para diferentes profundidades.

Os resultados obtidos apresentam-se no gráfico da figura 6.5.

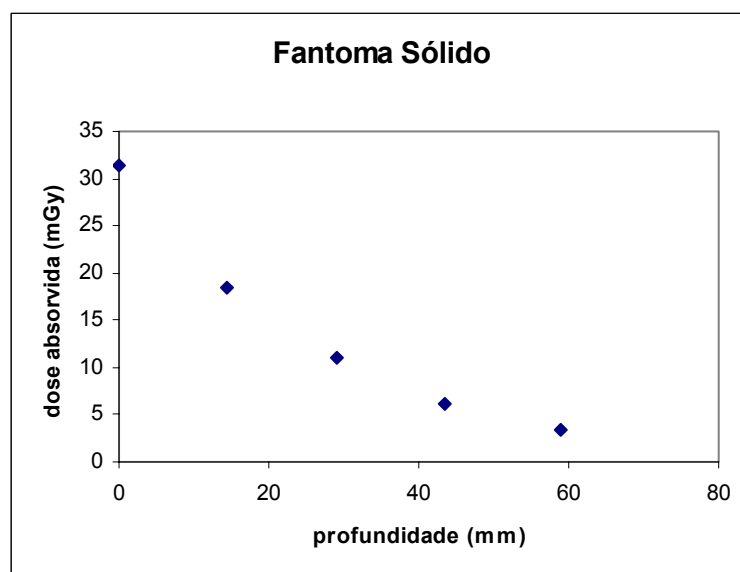


Fig. 6.5. Curva dose absorvida em função da profundidade para um fantoma sólido, usando a fonte didáctica de raios X.

Com objectivo de comparar os resultados de dose absorvida em profundidade, obtidos com a fonte de ^{60}Co e a fonte de raios X, tornou-se necessário atenuar esta última com três placas de aço à saída da fonte, que funcionaram como absorvedores de radiação para obtermos valores de dose absorvida da mesma ordem de grandeza, daquelas que se obtiveram usando a fonte de ^{60}Co . Utilizámos um tempo de integração de 10 segundos com a fonte atenuada.

Na figura 6.6 apresentamos as curvas de dose absorvida em função da profundidade para estas duas fontes.

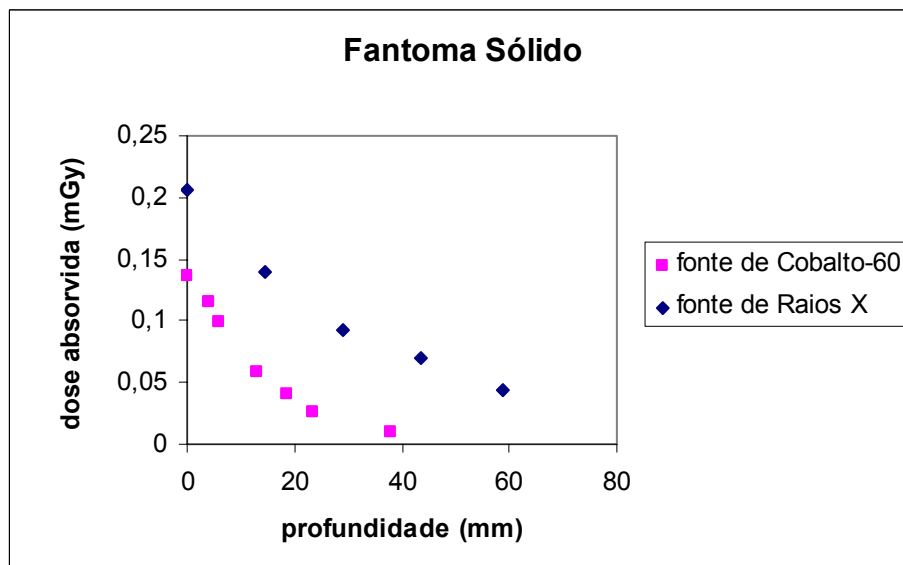


Fig. 6.6. Curvas relacionando a dose absorvida e a profundidade para o fantoma sólido, usando as fontes de raios X e de ^{60}Co .

Analisando o gráfico anterior referente à dose absorvida no fantoma sólido em função da profundidade para a fonte de ^{60}Co e para a fonte didáctica de raios X podemos concluir que este aparelho apresenta resultados que atingem uma profundidade maior, apesar da atenuação a que sujeitámos o feixe de radiação.

Utilizando a fonte de ^{241}Am , e para comparação com os valores encontrados com o aparelho didáctico de raios X, uma vez que estas duas fontes apenas diferem na sua

geometria, foram feitas leituras de dose absorvida, com a câmara de ionização, em função da profundidade, utilizando apenas o fantoma sólido.

O tempo de integração para esta fonte foi de 45 segundos.

Os resultados desta comparação encontram-se nos gráficos da figura 6.7.

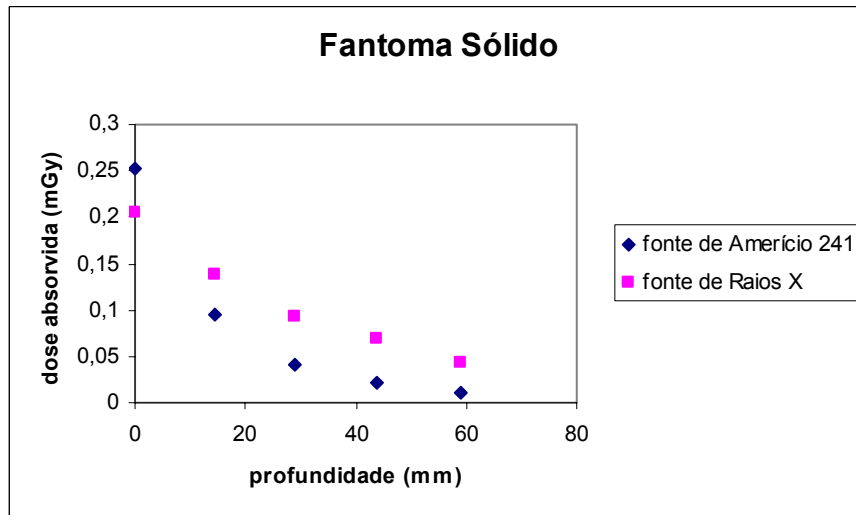


Fig. 6.7. Curvas relacionando a dose absorvida e a profundidade para o fantoma sólido, usando as fontes de raios X e de ^{241}Am .

Analisando o gráfico anterior referente à dose absorvida no fantoma sólido em função da profundidade para a fonte de ^{241}Am e para a fonte didáctica de raios X podemos concluir que este aparelho apresenta resultados que atingem uma profundidade maior, apesar da atenuação que sujeitámos o feixe de radiação. Podemos ainda ver através deste gráfico que a “queda” de dose absorvida quando utilizamos a fonte de ^{241}Am é mais rápida, talvez devido à sua geometria.

Em face dos resultados obtidos o nosso estudo de dosimetria em filme é basicamente efectuado com o aparelho didáctico de raios X e um fantoma sólido.

Fizeram-se também ensaios contemplando os dois tipos de filmes que encontrámos no mercado, e que foram referenciados na secção 4.5 do capítulo IV, tendo como objectivo, utilizando a curva de calibração apresentada na secção 5.1.2.2. do capítulo V, ver qual deles nos dava valores de dose absorvida mais aproximados dos valores encontrados experimentalmente.

Assim, utilizando neste ensaio o filme X-OMAT V, a fonte didáctica de raios X, o fantoma sólido e a câmara de ionização, procedeu-se como já foi referido nos ensaios anteriores.

No início do ensaio a distância entre a fonte e o detector foi 140 mm. Como já foi referido na secção 4.4.3. uma das placas possui uma cavidade onde foi introduzida a câmara de ionização. Na parte da frente desta placa colámos um filme, como foi referido na secção 5.1.1 do capítulo V, do tipo X-OMAT V, que foi trocado cada vez que esta placa mudava de posição com as seguintes, que constituem o fantoma, para se obter a dose absorvida em profundidade no meio a diversas distâncias, e após o tratamento dos filmes irradiados, obtivemos a densidade óptica também às mesmas profundidades.

Os resultados obtidos apresentam-se no gráfico da figura 6.8.

Neste gráfico apresentam-se três curvas que relacionam valores experimentais de dose absorvida, obtidos com a câmara de ionização, os valores de densidade óptica obtidos através do filme X-OMAT V (filme não calibrado) e os valores de dose absorvida obtidos a partir da curva de calibração em função da profundidade (filme calibrado).

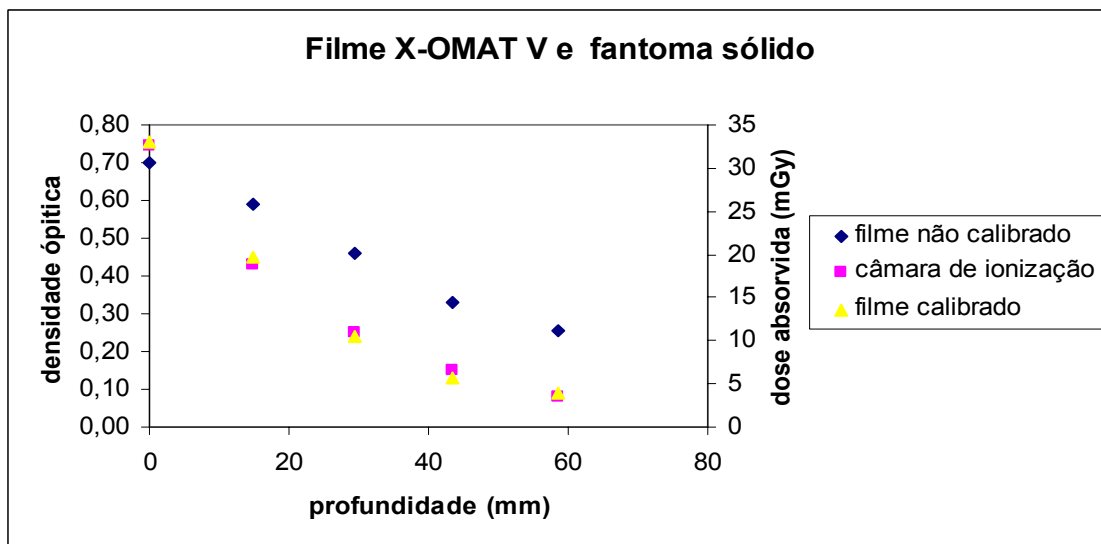


Fig. 6.8. Gráfico relacionando os valores experimentais de dose absorvida (■) , os valores de densidade óptica (◆) e os valores de dose absorvida obtidos através da curva de calibração (▲) em função da profundidade. Usou-se neste ensaio como dosímetro o filme X-OMAT V.

Pela análise deste gráfico pode verificar-se que com os valores de densidade óptica obtidos através deste filme e, utilizando o ajuste através da função da curva de calibração, para o mesmo filme, obtêm-se valores de dose absorvida muito semelhantes aos valores experimentais encontrados.

Procedendo do mesmo modo mas usando o filme Poly-Soft obtiveram-se os resultados, que se apresentam no gráfico da figura 6.9.

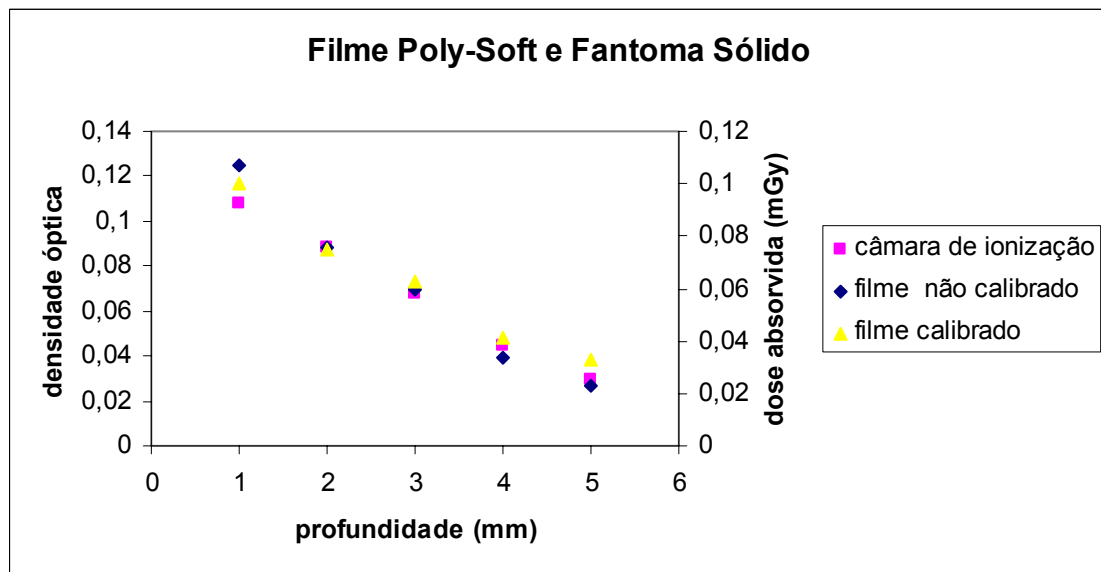


Fig. 6.9. Gráfico relacionando os valores experimentais de dose absorvida (■) , os valores de densidade óptica (◆) e os valores de dose absorvida obtidos através da curva de calibração (▲) em função da profundidade. Usou-se neste ensaio como dosímetro o filme Poly-Soft.

Com este filme podemos ver que os valores experimentais para a densidade óptica obtidos através do filme, os valores de dose absorvida obtidos pelo método ionométrico e os obtidos através da função de ajuste da curva de calibração são muito semelhantes.

CAPÍTULO VII – Utilização das Novas Tecnologias

7.1. Programa Educativo Digital utilizando o Macromedia Flash

Numa sociedade moderna, como é a nossa, onde os avanços das tecnologias informáticas estão em constante evolução, surge um novo conceito de ensino aprendizagem – a construção do conhecimento através da utilização dos computadores.

Os avanços das tecnologias informáticas, contribuem para facilitar a tarefa do ensino aprendizagem, tornando mais fácil aos professores a apresentação dos conteúdos e aos alunos a sua compreensão. Este facto provoca no entanto mudanças significativas em termos das competências exigidas quer aos alunos quer aos professores.

Para que isto seja possível é necessário uma permanente aprendizagem por parte dos professores para uma ampla actualização e consolidação de conhecimentos de informática.

Considerando que o processo de aprendizagem se torna mais eficaz quando baseado em imagens com movimento, e mais produtivo ainda se o aluno puder interactivar com essas imagens, pensou-se em elaborar uma página, “Laboratório Virtual”, com modelos simples para compreender como funciona a interacção da radiação com meios materiais.

Para elaborar esta página foi feita a leitura, foram abertas as aplicação e foi feita uma análise cuidada do trabalho experimental apresentado pelo professor Marco Quinteiro na sua Tese de Mestrado “O estudo das Radiações Ionizantes no 3º ciclo do Ensino Básico e uma aplicação de Novas Tecnologias em Medicina Nuclear”.

Baseando-nos nas ideias apresentadas pelo colega no seu trabalho e utilizando também programação flash fizemos uma adaptação ao ensino secundário.

Assim numa primeira página do “Laboratório Virtual”, apresentamos um menu onde estão sob a forma de botões interactivos, os conteúdos programáticos que pretendemos trabalhar, as simulações interactivas, e ainda os questionários.

Na figura 7.1 apresentamos esta página inicial



Fig.7.1. Página de abertura do Laboratório Virtual.

Os botões de interligação, ou “links” na parte superior e na parte esquerda desta página inicial são utilizados para, a partir dela, ir abrindo os assuntos teóricos a estudar, as simulações com que podem interactivar e os questionários para a sua resolução, tendo por objectivo a verificação da aprendizagem dos conceitos a estudar. Assim ao accionar o rato do computador sobre esses “links” abrimos outras páginas.

O mapa do sítio pode ser esquematizado da seguinte forma:

1. Introdução
2. Quantização da Energia
3. Interação da Radiação com a Matéria
 - Efeito fotoelétrico
 - Efeito de Compton
 - Produção e aniquilação de pares
4. Produção de Raios X
5. Radioactividade
 - Decaimento alfa (α)
 - Decaimento beta (β)
 - Decaimento gama (γ)
6. Poder de Penetração
7. Detectores de Radiação
8. Período de Semi-Desintegração (Interactivo)
9. Interação da Radiação com a matéria para diferentes absorvedores (interactivo)
10. Questionários

7.1.1. Simulações Ilustrativas dos Conteúdos Teóricos

Os conteúdos da física, relacionados com a interacção da radiação com a matéria que pretendemos ensinar, contêm sempre uma explicação teórica sucinta e uma simulação ilustrativa, para levar os alunos a compreender esses conteúdos de uma forma mais simplificada. Esta ideia foi adaptada do trabalho experimental apresentado pelo professor Marco Quinteiro na sua Tese de Mestrado “O estudo das Radiações Ionizantes no 3º ciclo do Ensino Básico e uma aplicação de Novas Tecnologias em Medicina Nuclear”.

Vamos mostrar algumas simulações construídas para este fim. Assim começamos por apresentar uma página onde consta uma pequena exposição teórica sobre o conteúdo “Quantização da Energia” e a respectiva simulação (figura 7.2).

Quantização da Energia

Um modelo de corpo negro pode ser dado por um furo numa cavidade ressonante onde a quantidade de energia que entra é igual à quantidade de energia que sai pelo furo. Um exemplo de corpo negro é o Sol (embora não seja negro)

Max Planck em 1900, explica que a radiação emitida por um corpo negro é feita em “pacotes” de energia, aos quais chamou quanta (plural de quantum). Um quantum corresponde à energia de $E = hf$, em que h é a constante de Planck e f a frequência. A energia da radiação emitida é quantizada e, proporcional à sua frequência. A Teoria de Max Planck marca o nascimento da Teoria Quântica.

Segundo Wien à medida que temperatura do corpo negro vai aumentando o comprimento de onda mais provável da radiação emitida diminui.

Caixa Térmica

Fig.7.2. Página onde se apresenta “Quantização da Energia” e a respectiva simulação.

Na apresentação dos processos de interação da radiação electromagnética com a matéria começámos por distinguir radiação electromagnética ionizante e não ionizante. Para explicar o efeito fotoeléctrico no contexto da radiação electromagnética não ionizante construímos uma célula fotoeléctrica que apresentamos na figura 7.3.

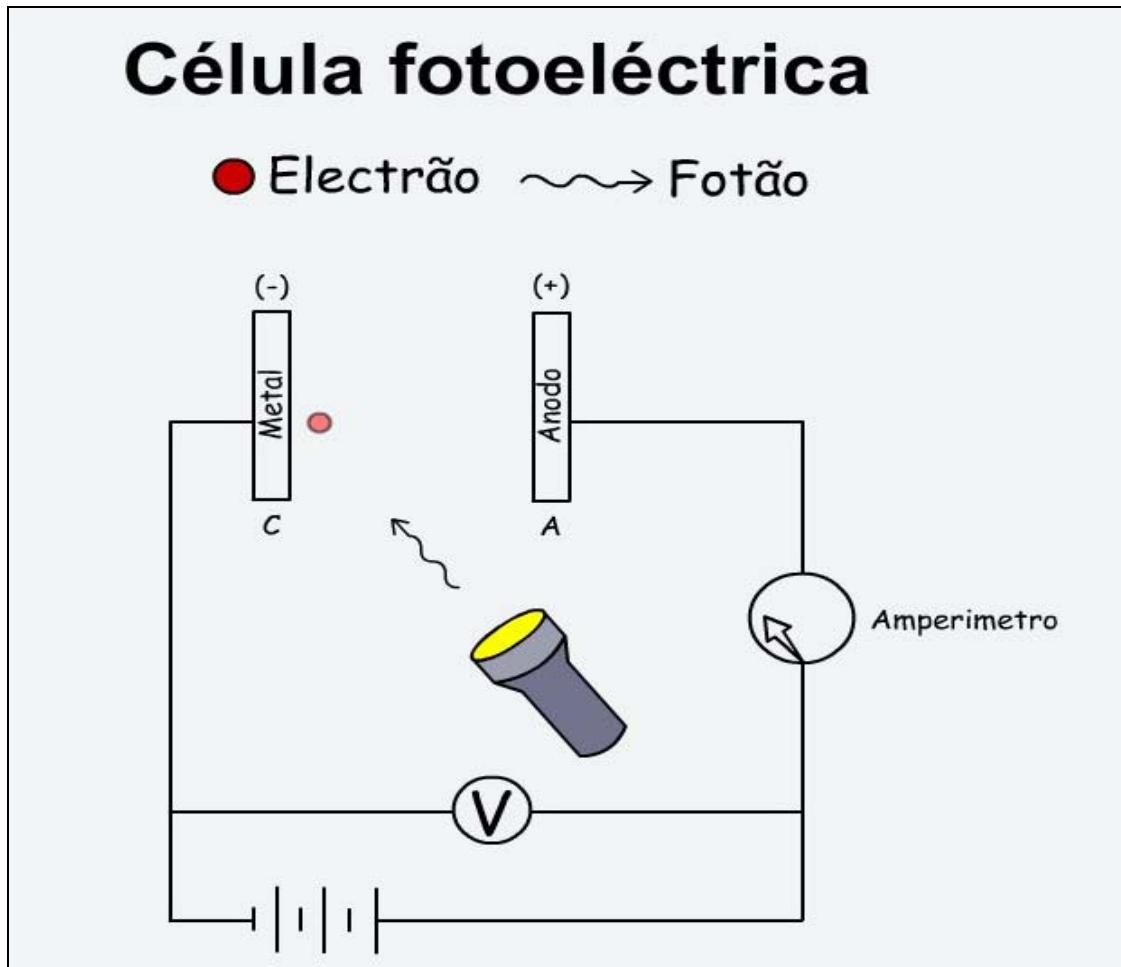


Fig.7.3. Página onde se apresenta e a simulação da célula fotoelétrica.

Para explicar o efeito fotoelétrico no contexto da radiação electromagnética ionizante construímos a simulação que se apresenta na figura 7.4.

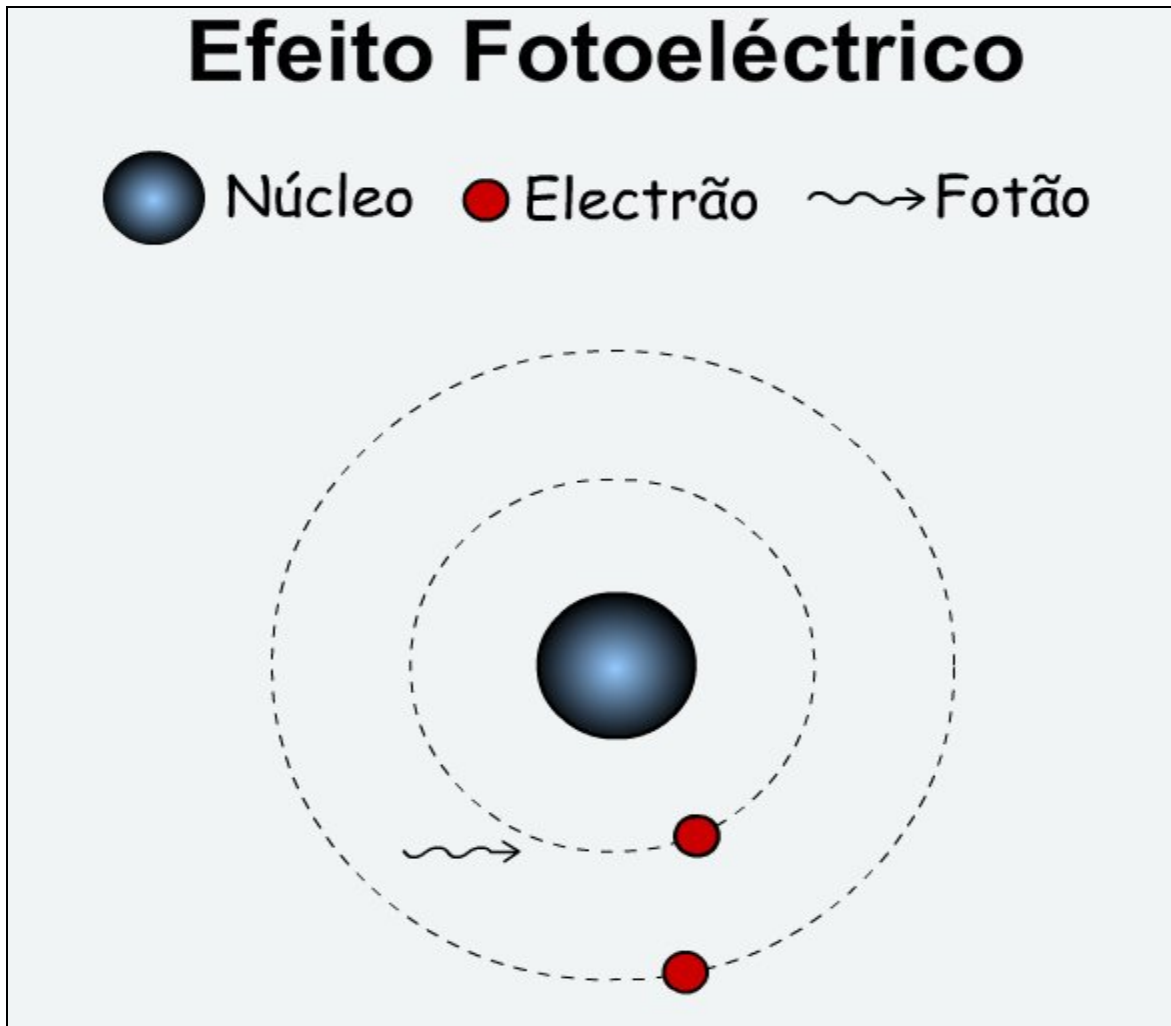


Fig.7.4. Página onde se apresenta e a simulação do efeito fotoelétrico.

Para simular o efeito de Compton construímos uma simulação que apresentamos na figura 7.5.

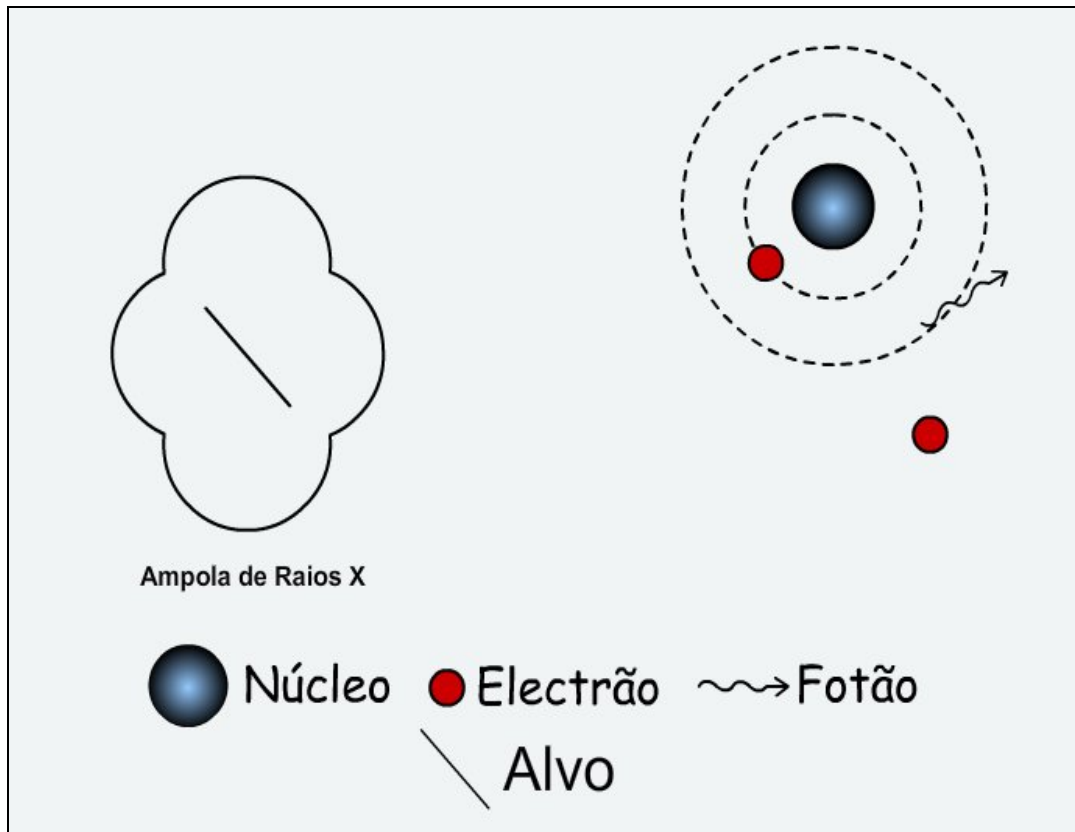


Fig.7.5. Página onde se apresenta e a simulação do efeito de Compton

Nas figuras 7.6.1 e 7.6.2. apresentamos a produção de pares electrão e positrão e a sua aniquilação. Embora estes dois processos de interacção com a matéria estejam construídos na mesma página, a sua apresentação é feita em instantes diferentes. Assim optámos por apresentá-los em duas figuras em separado.

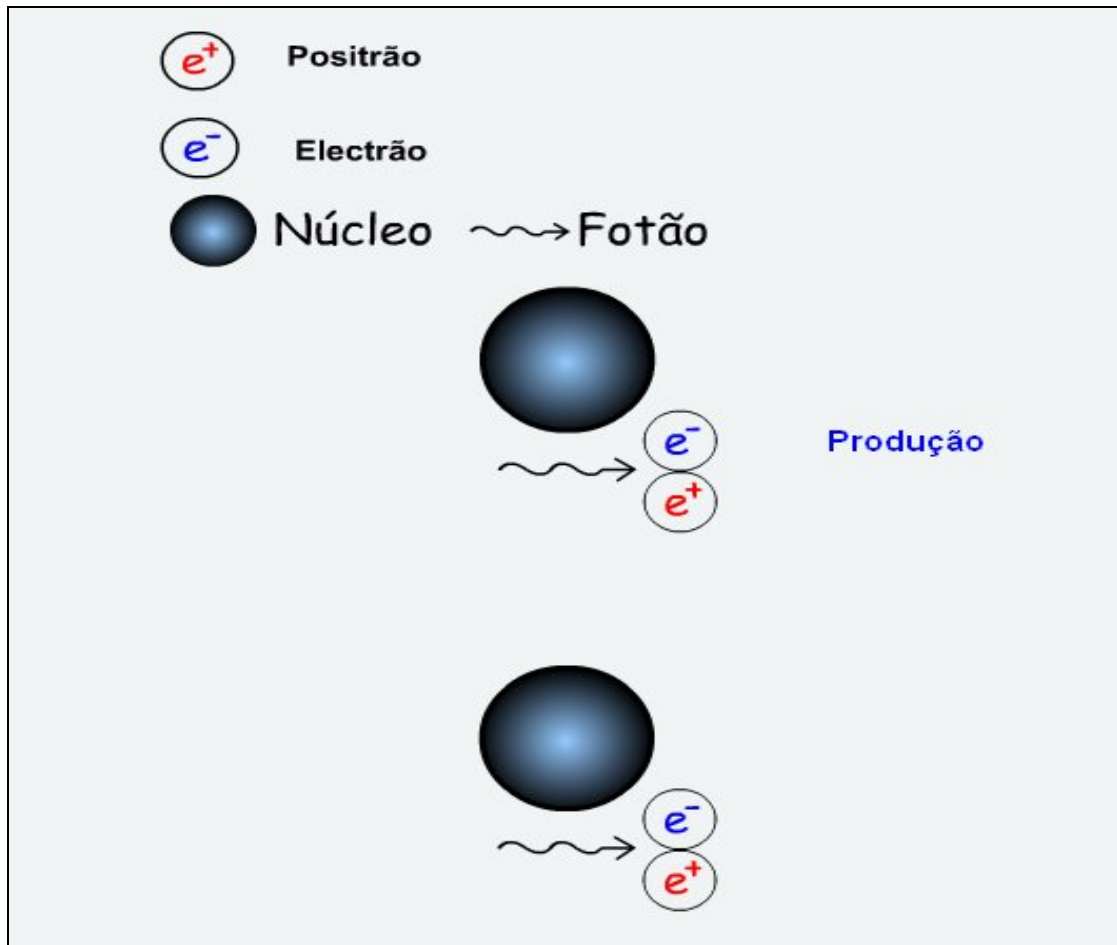


Fig.7.6.1. Página onde se apresenta e a simulação da produção de pares electrão positrão.

Na aniquilação de pares apresentada na figura seguinte apenas reproduzimos a produção dos dois fotões após a aniquilação das partículas intervenientes.

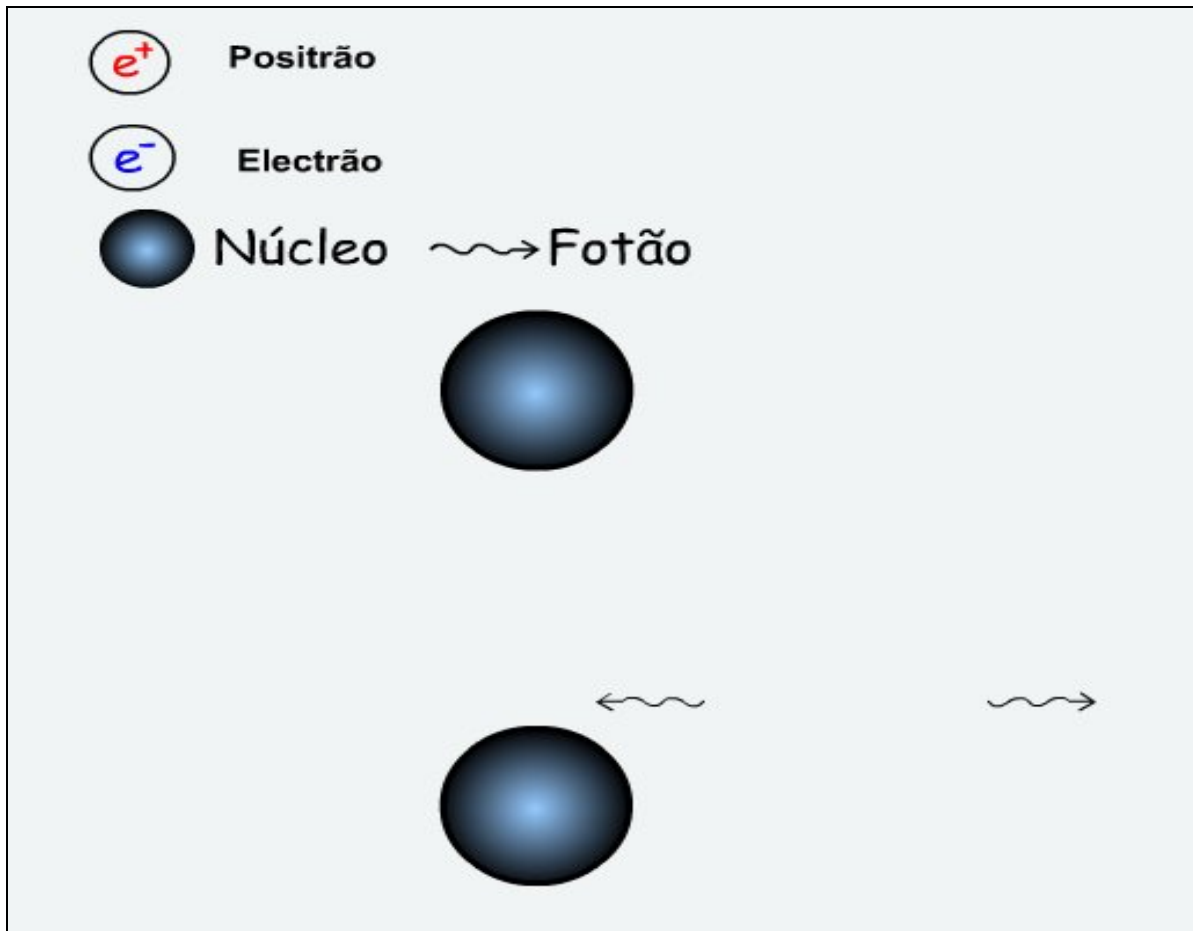


Fig.7.6.2. Aniquilação de pares electrão positrão.

Para apresentar os decaimentos alfa, beta e gama construímos as simulações que se apresentam nas figuras 7.7, 7.8 e 7.9 respectivamente. Nestes conteúdos foi possível colocar as simulações na mesma página das explicações teóricas.



Fig.7.7. Página onde se apresenta e a simulação do decaimento alfa.

Para o decaimento beta construímos duas simulações, uma para o decaimento β^+ e outra para o decaimento β^- . Estas duas simulações são mostradas em tempos diferentes. Primeiro apresenta-se a simulação correspondente ao decaimento β^+ e quando esta termina apresenta-se a simulação correspondente ao decaimento β^- .

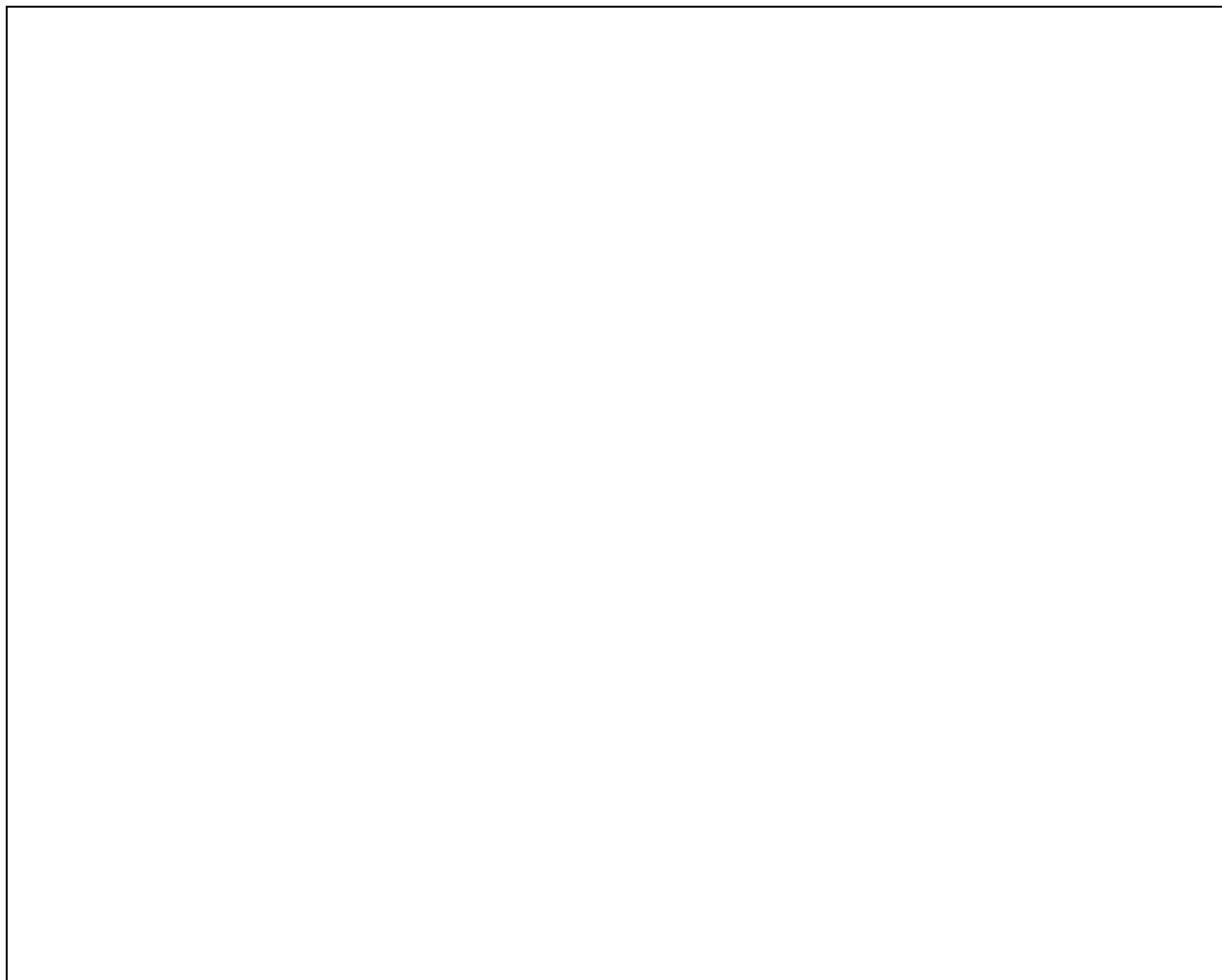


Fig.7.8. Página onde se apresentam as simulações relativas aos decaimentos β^+ e β^- .

Na simulação relativa ao decaimento gama pode ver-se que o núcleo já sofreu um decaimento β^+ , e estando ainda excitado perde o seu fóton.

Decaimento gama (γ)

Muitas vezes, um núcleo instável que sofre um decaimento radioactivo (α ou β) fica num estado excitado. Este núcleo pode sofrer uma desexcitação para um estado de energia mais baixo, pela emissão de um fotão.

Estes fotões são chamados raios gama (γ).
A energia destes fotões é muito elevada ($\approx 1\text{MeV}$ a 1GeV) em relação à energia dos fotões da luz visível (cerca de 1eV). Essa energia (hf) é igual à diferença de energia entre dois níveis de energia nuclear.

O núcleo excitado quando decai pela emissão de um fotão não se altera, a não ser pelo facto de estar num estado de energia mais baixo.

● Protão ○ e^- ~~~~~ Fotão
○ Neutrão ● $\bar{\nu}$

Fig.7.9. Página onde se apresenta a e a simulação do decaimentos gama.

Na figura 7.10. apresentamos uma simulação onde se pode ver o poder de penetração das partículas alfa, beta e gama. Nesta imagem a partícula alfa, já foi travada pela folha de papel, conseguindo apenas ver as partículas beta e gama.

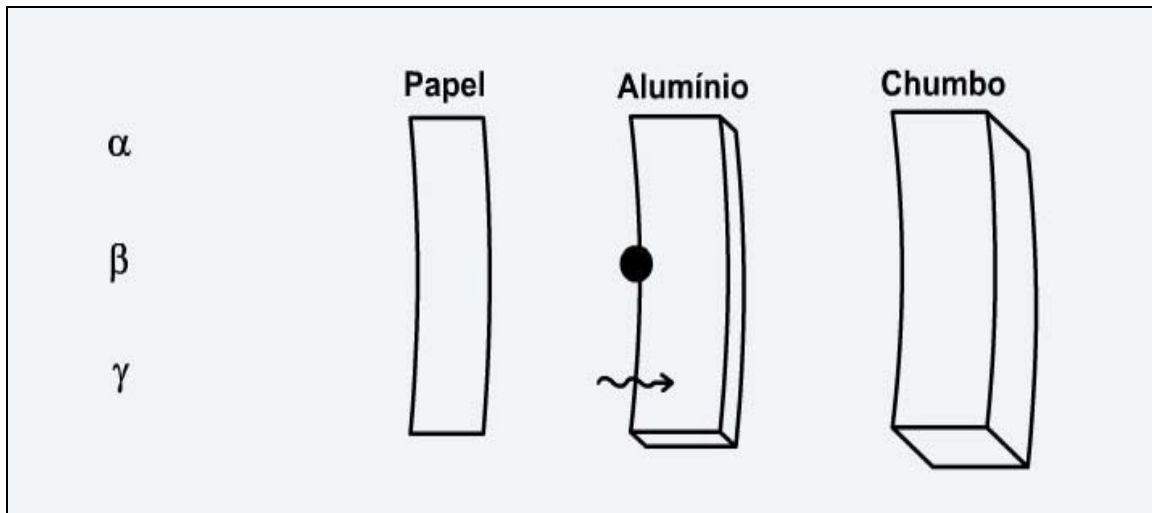


Fig.7.10. Página onde se apresenta e a simulação do poder de penetração das partículas alfa, beta e gama.

Construímos também simulações interactivas, onde o aluno pode explorar, do modo que entender, e durante o tempo que achar necessário, até que o conceito em questão esteja apreendido. Com a ajuda de questionários relacionados com essas interações colocamos os alunos perante questões que representam um desafio à sua atenção, à sua perspicácia e à sua capacidade de raciocínio.

Com a primeira simulação pretendemos que os alunos adquiram, de uma forma facilitada, a compreensão do “Período de Semi-Desintegração” ajudando-os deste modo a compreender e organizar as ideias acerca deste tema.

Nesta primeira simulação apresentamos, numa primeira página, uma definição teórica sobre o período de semi-desintegração (Quinteiro,2005), numa segunda página a simulação e por último numa terceira página seis questões onde os alunos deverão escrever o resultado dos seus cálculos.

Destas seis questões, quatro dizem respeito ao conteúdo programático em estudo e, as duas últimas, embora não estando relacionadas directamente com o conteúdo programático que se está a trabalhar, têm uma resolução matemática igual. Pretende-se proporcionar ao aluno uma aprendizagem, quer de conhecimentos quer de

desenvolvimento de competências, onde é imprescindível pensar, crítica e reflexivamente, sobre outros temas e problemas.

O aluno poderá verificar se as suas respostas estão correctas ou erradas através da mudança da cor do botão para verde ou vermelho respectivamente, ao premir sobre ele com o botão esquerdo do rato.

Na figura 7.11 apresentamos de uma forma estática a simulação referente a este assunto.

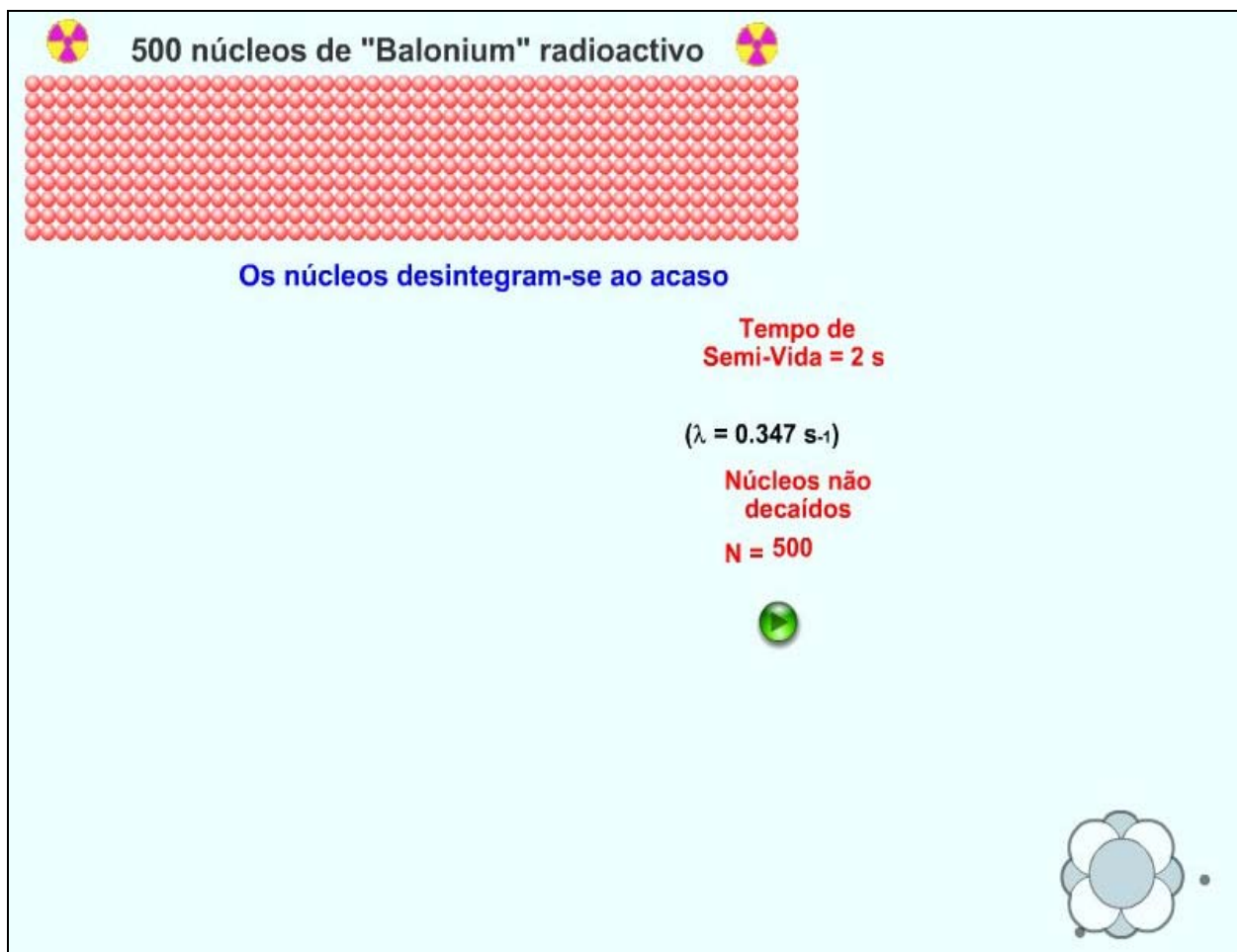


Fig.11. Simulação da desintegração de um dado material com 500 núcleos (adaptado do site <http://faraday.physics.utoronto.ca/PVB/Harrison/Flash/>)

As questões propostas para este conteúdo programático são apresentadas em anexo.

Com a segunda simulação pretendemos que os alunos consigam entender de uma forma facilitada o conceito da “Interacção da radiação com a matéria” ajudando-os deste modo a compreender e organizar as ideias acerca deste tema.

Nesta simulação apresentamos numa primeira página uma nota explicativa do modo como os alunos devem interactuar com ela, e os aspectos da Física que pretendemos realçar. A simulação é apresentada em três páginas diferentes. Na primeira página são apresentados três materiais diferentes, chumbo, alumínio e água, dos quais os alunos podem escolher um. Ao fazerem-no serão enviados para a página seguinte onde escolhem a energia dos fotões que vão incidir sobre a matéria anteriormente escolhida. Após a escolha da energia entram na simulação propriamente dita, na terceira página, onde além da simulação se encontra registado o material e a energia escolhidas. Ainda nesta página existe um “link” que permite repetir todo o processo quantas vezes o aluno achar necessário, podendo alterar os dois parâmetros em jogo, que são o material e a energia dos fotões incidentes.

Po último, os alunos têm também um conjunto de questões que apresentamos em anexo para verificar o nível de aprendizagem adquirida do conceito a estudar. (Quinteiro,2005)

Nas figuras 7.12, 7.13 e 7.14 apresentamos de uma forma estática a simulação referente ao estudo da interacção da radiação electromagnética com diferentes materiais, escolhendo sempre a mesma energia para os fotões incidentes, de 1750 keV.

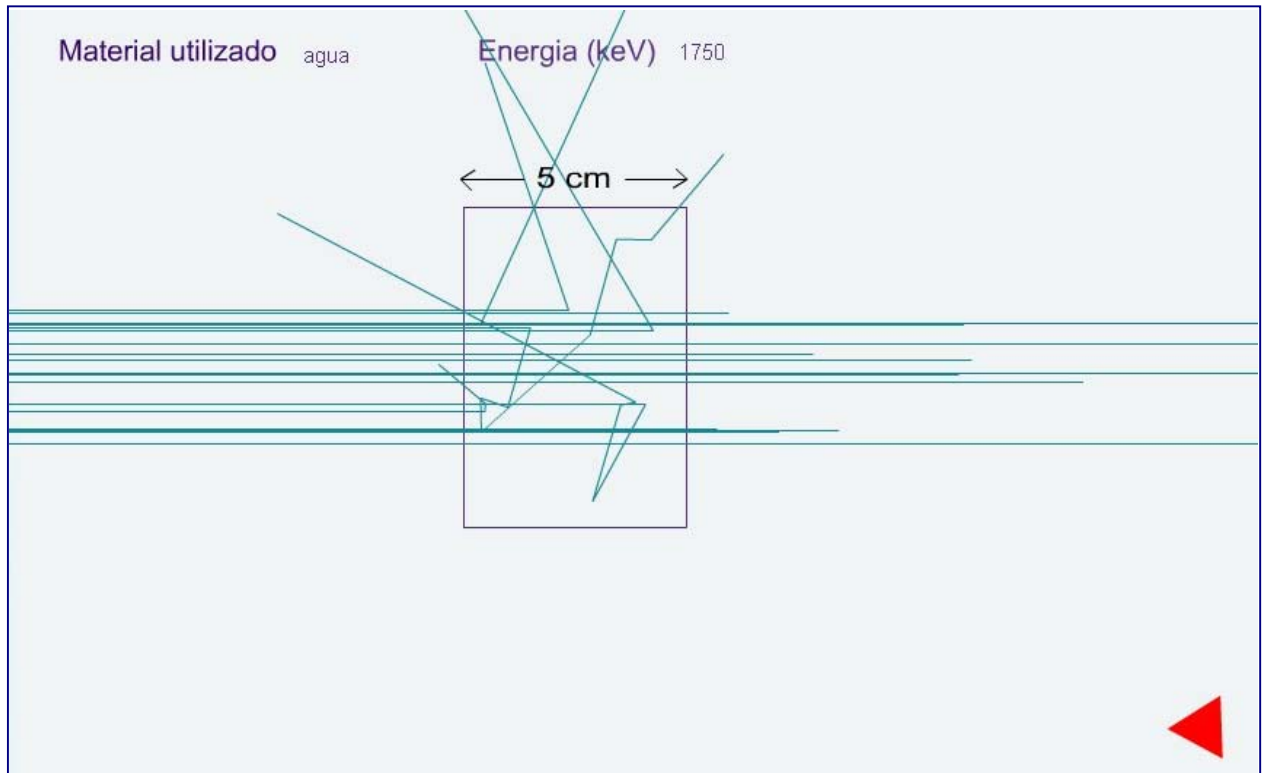


Fig.7.12. Simulação da interacção da radiação electromagnética com a água

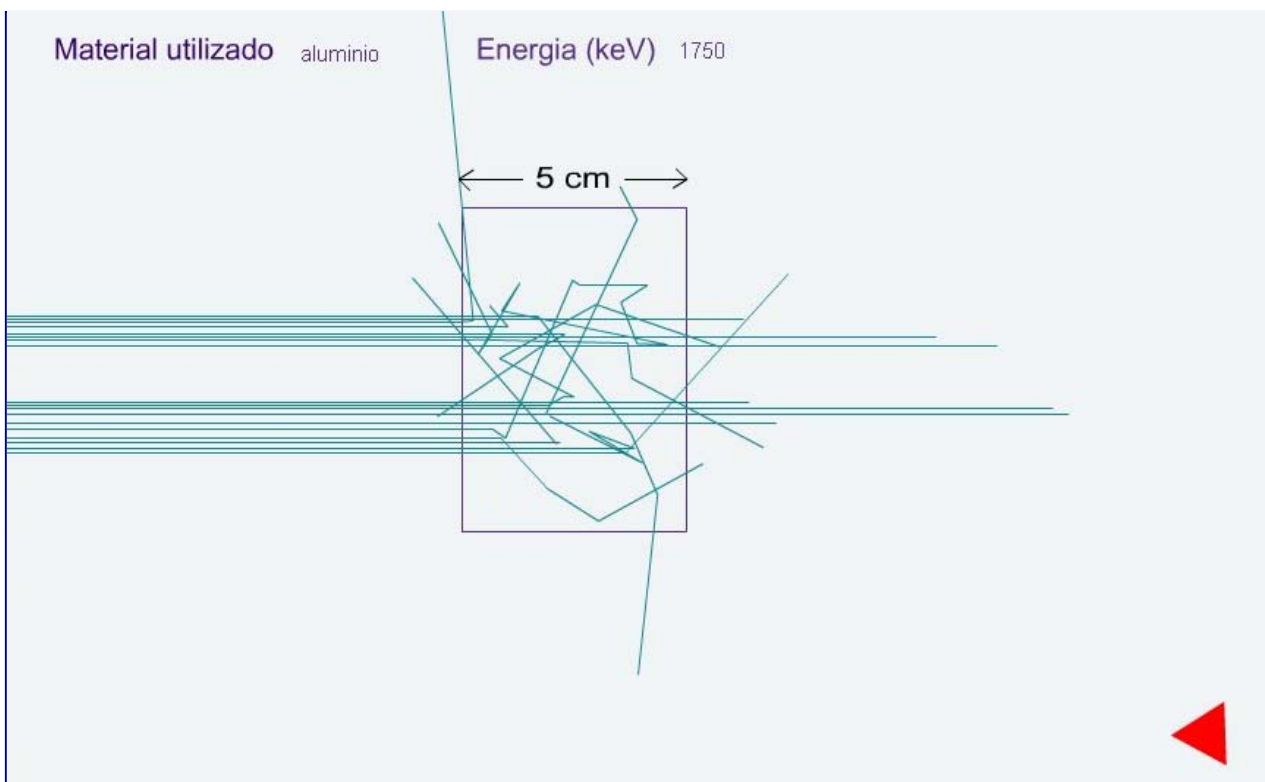


Fig.7.13. Simulação da interacção da radiação electromagnética com o alumínio

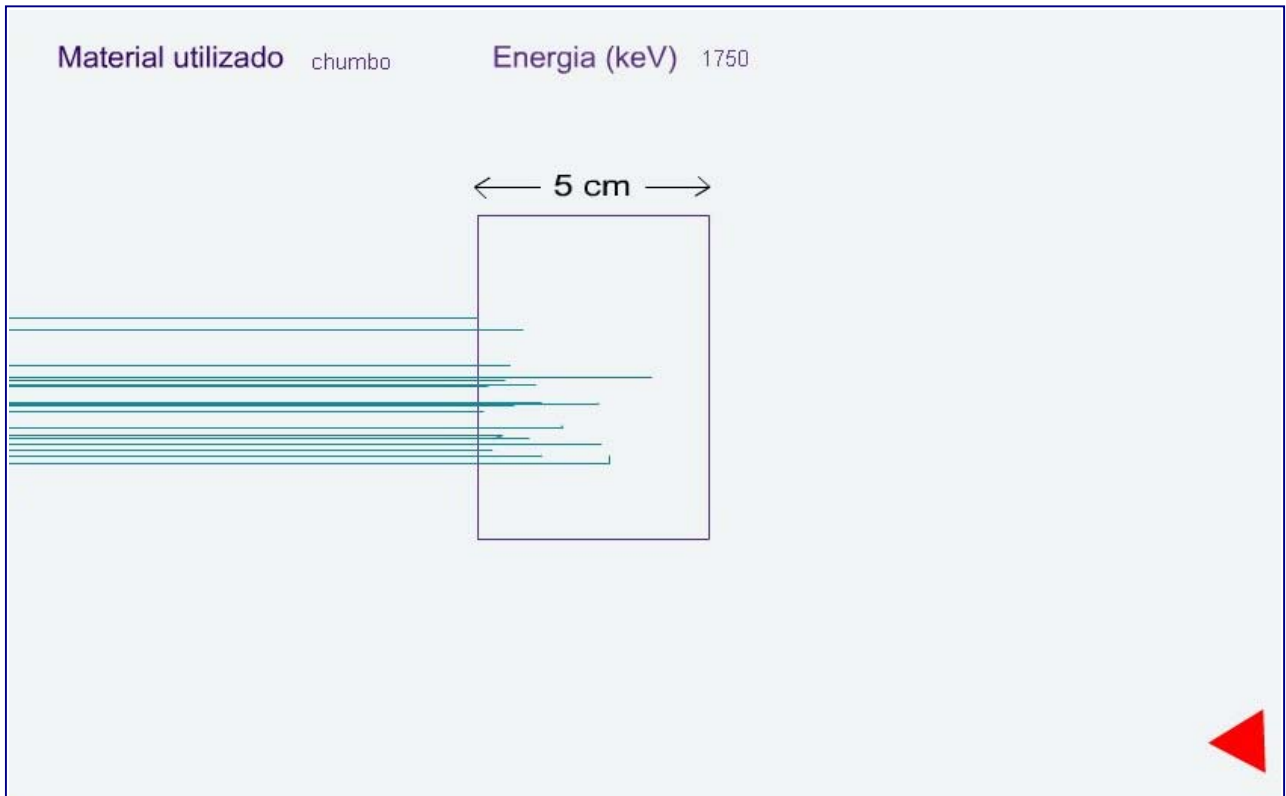


Fig.7.14. Simulação da interacção da radiação electromagnética com o chumbo

As questões propostas para este conteúdo são apresentadas em anexo.

Ao premir com o rato no botão, referente aos questionários que se encontram na página inicial do Laboratório Virtual, temos acesso a três níveis de questões diferentes. O aluno só deve passar ao nível seguinte após conseguir responder com sucesso às questões do nível em que se encontra. Novamente o aluno pode verificar se a sua resposta está correcta premindo sobre o botão que pertence à opção correcta.(Quinteiro, 2005). Nessa altura o botão ficará verde ou vermelho caso a resposta esteja certa ou errada respectivamente. O grau de dificuldade das questões nos três níveis é crescente.

Estes questionários apresentam-se em anexo.

7.1.2. Modelo Simplificado da Interação de Fótons com a Matéria

Nas simulações apresentadas nas figuras 7.12, 7.13 e 7.14 foi usado um modelo muito simplificado da interação dos fótons com diferentes materiais: chumbo, alumínio e água.

Estes materiais foram escolhidos devido às suas características de interação com as radiações ionizantes, tendo em atenção que a água é um substituto do corpo humano, o chumbo é um material utilizado na radioprotecção e o alumínio por ser um material leve e ter características semelhantes ao dos ossos.

Neste modelo um feixe paralelo de fótons monoenergético incide perpendicularmente ao alvo que é constituído por um dos materiais referidos. A intensidade do feixe de fótons incidentes que atravessa o meio material sofre uma atenuação exponencial que é dependente do coeficiente de atenuação linear μ . Nesta simulação este coeficiente resultou da soma dos coeficientes lineares de atenuação referentes ao efeito fotoeléctrico e ao efeito de Compton que serão os únicos efeitos considerados. Os valores utilizados para o cálculo do coeficiente de atenuação total para cada um dos materiais utilizados como meio absorvente foram retirados de tabelas que se encontram no “site” <http://www.physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom>.

Assim só há possibilidade das interacções poderem ser fotoeléctrico (absorção) ou Compton (difusão de um novo fóton), não havendo criação de pares partícula-antipartícula.

A gama de energias utilizada vai de 100 keV a 5 MeV, e os efeitos considerados são o fotoeléctrico e o de Compton. Embora sejam simuladas energias superiores a 1,022 MeV não se introduziu o efeito de produção de pares. Este processo introduz uma correlação entre o electrão/positrão e emissão de radiação gama que pretendemos evitar, visto que a sua simulação representa um grau de complexidade superior ao pretendido para esta apresentação. A introdução da produção de pares seria um ponto a melhorar esta simulação numa próxima revisão.

A simulação processa-se em diferentes passos onde:

1. É escolhida uma distância a ser percorrida pelo fóton incidente até à sua interacção com um electrão dum átomo do meio material.
2. É escolhido o tipo de interacção de acordo com as respectivas secções-eficazes.

3. .Se a interacção entre o fóton incidente e um electrão dum átomo do meio for devida a efeito fotoeléctrico o traço termina e inicia-se o processo um novo fóton.
. Se interacção entre o fóton incidente e o electrão de um átomo do meio for por intermédio de efeito de Compton, resulta um fóton de menor energia, fóton esse difundido isotropicamente (aproximação grosseira). Neste caso é amostrada uma nova distância a percorrer segundo uma nova direcção.

7.2. Apresentação do Laboratório Virtual aos Alunos

Fizemos uma primeira apresentação do “Laboratório Virtual” a alunos de 12º Ano de duas escolas diferentes e de disciplinas diferentes. Uns eram alunos de Química e outros alunos de Física.

Numa das escolas o grupo de alunos de Química já tinha tido uma exposição teórica sobre a Radioactividade e o Período de Semi-Desintegração, assuntos que constam no seu programa. Estes alunos consideraram que foi muito importante o trabalho realizado com o “Laboratório Virtual”, uma vez que com a ajuda das simulações, quer da parte teórica quer das interactivas, conseguiram responder aos questionários todos, podendo assim, concluir que os assuntos em estudo ficaram deste modo compreendidos. Antes deste trabalho havia muitas questões que permaneciam em dúvida.

O outro grupo, composto por alunos de Física que ainda não tinham leccionado estes conteúdos na sala de aula, acharam de bastante interesse pois, segundo eles, a sua aprendizagem, face aos assuntos quando forem leccionados, será mais facilitada. O modo como trabalharam este “Laboratório Virtual” foi diferente dos alunos do outro grupo, mostrando uma grande curiosidade, andando para a frente e para trás sempre que acharam necessário, até conseguirem entender os conteúdos para responderem com sucesso às questões apresentadas.

Na outra escola os alunos eram todos de Física e também sem terem tido ainda algum contacto com estes assuntos. Como os anteriormente referidos mostraram-se bastante interessados, percorreram o programa para a frente e para trás sempre que acharam necessário, e foram de opinião que tinham conseguido responder às questões,

acharam as simulações teóricas muita apelativas conseguindo por vezes perceber melhor os conteúdos depois de verem a simulação animada. Estes alunos sugeriram a colocação de botões que os levassem para outros sítios onde houvesse uma explicação de alguns conceitos básicos que poderão eventualmente estar esquecidos.

7.3. Elaboração de inquéritos

Tendo como objectivo quantificar melhor o grau de satisfação e de conhecimento dos alunos após a utilização deste trabalho, elaboraram-se dois inquéritos com características diferentes. Um, onde se pretende avaliar a satisfação dos alunos ao utilizar o programa e outro onde se pretende avaliar a eficácia do mesmo.

No inquérito de satisfação as questões são de resposta fechada com excepção da última onde se pretende, com uma resposta aberta, recolher a opinião dos alunos relativamente a este trabalho.

No inquérito de avaliação dos conhecimentos adquiridos, as questões são todas de resposta fechada, onde o aluno apenas se limita a classificá-las em verdadeiras ou falsas.

Foi escolhida uma turma de 11º ano da Escola Secundária de São João da Talha . Esta turma, constituída por 29 alunos utilizou o “Laboratório Virtual” em duas sessões, devido a dificuldades de logística.

Para melhor avaliar quer a satisfação quer a aquisição de conhecimentos através da utilização deste programa, era essencial que cada aluno trabalhasse com um computador. Assim, como nesta escola, a maior sala tem treze computadores para os alunos e um para o professor, dividimos o grupo de alunos em dois, sendo ainda necessário a utilização de um portátil para o grupo maior.

7.3.1. Aplicação dos inquéritos

Foram aplicados os inquéritos aos dois grupos de alunos. A cada um dos grupos foi explicado que se tratava de uma investigação no âmbito de um trabalho de mestrado, e que tinha como objectivo analisar a satisfação e a aquisição de conhecimentos

adquiridos através de um processo diferente de aprendizagem baseado na utilização de modelos simples constituídos por imagens com movimento, com as quais o aluno pode interagir, de modo a levá-los à compreensão da interação da radiação com meios materiais.

O estudo começou pela distribuição de um inquérito de conhecimento aos alunos. De seguida foram dadas as instruções quer de preenchimento quer de utilização do programa.

O tempo médio gasto neste processo foi de cerca de 40 minutos.

Ao fim deste tempo o computador foi desligado e foi entregue aos alunos um novo questionário de conhecimento e um inquérito de satisfação para ser preenchido. Para esta fase de preenchimento de inquéritos foram dados cerca de 10 minutos.

A colaboração dos alunos foi positiva, tendo havido muito interesse na sua participação.

7.4. Análise dos dados através dos inquéritos

7.4.1. Inquérito de satisfação

As 7 primeiras questões deste inquérito são de resposta fechada onde os alunos têm apenas que responder sim ou não.

Questão 1

“É uma forma mais fácil de aprender os conceitos básicos de Física Moderna”

Dos 29 alunos que responderam a esta questão um respondeu não e os restantes responderam sim. Na tabela 7.1 e no gráfico 7.1. pode observar-se as respostas atribuídas a esta questão.

	Frequência	Percentagem(%)
Sim	28	97
Não	1	3
Total	29	100

Tabela 7.1 Frequência e percentagem de respostas à questão 1

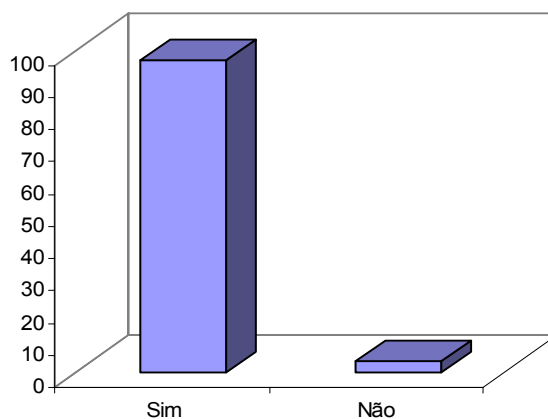


Gráfico 7.1 Percentagem de respostas à questão 1

Questão 2

“É útil para superar as dificuldades existentes na aprendizagem destes conteúdos trabalhados na sala de aula utilizando o método tradicional de ensino”

Dos 29 alunos que responderam a esta questão dois responderam não e os restantes responderam sim. Na tabela 7.2 e no gráfico 7.2. pode observar-se as respostas atribuídas a esta questão.

	Frequência	Percentagem(%)
Sim	27	93
Não	2	7
Total	29	100

Tabela 7.2 Frequência e percentagem de respostas à questão 2

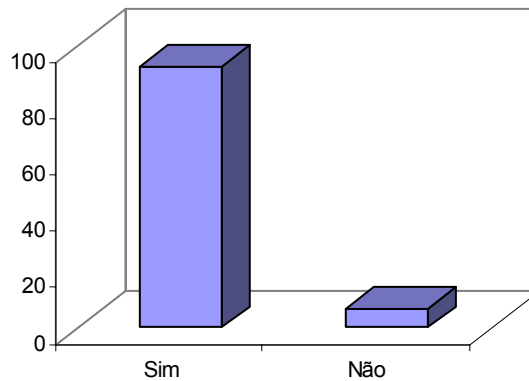


Gráfico 7.2 Percentagem de respostas à questão 2

Questão 3

“Tanto as simulações interactivas como as não interactivas são úteis para a compreensão dos conteúdos teóricos”

Dos 29 alunos que responderam a esta questão um respondeu não e os restantes responderam sim. Na tabela 7.3 e no gráfico 7.3. pode observar-se as respostas atribuídas a esta questão.

	Frequência	Percentagem(%)
Sim	28	97
Não	1	3
Total	29	100

Tabela 7.3 Frequência e percentagem de respostas à questão 3

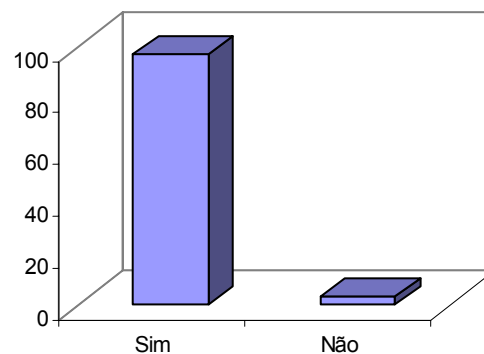


Gráfico 7.3 Percentagem de respostas à questão 3

Questão 3.1**“As simulações interactivas facilitam a aprendizagem dos conceitos”**

Dos 29 alunos que responderam a esta questão dois responderam não e os restantes responderam sim. Na tabela 7.3. e no gráfico 7.3. pode observar-se as respostas atribuídas a esta questão.

	Frequência	Percentagem(%)
Sim	27	93
Não	2	7
Total	29	100

Tabela 7.3 Frequência e percentagem de respostas à questão 3.1

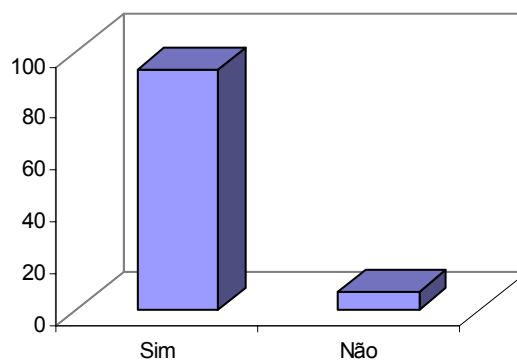


Gráfico 7.3 Percentagem de respostas à questão 3.1

Questão 3.2**“As simulações não interactivas explicam melhor os conteúdos teóricos do que as interactivas”**

Dos 29 alunos que responderam a esta questão três responderam sim e os restantes responderam não. Na tabela 7.4. e no gráfico 7.4. pode observar-se as respostas atribuídas a esta questão.

	Frequência	Percentagem(%)
Sim	3	10
Não	26	90
Total	29	100

Tabela 7.4 Frequência e percentagem de respostas à questão 3.2

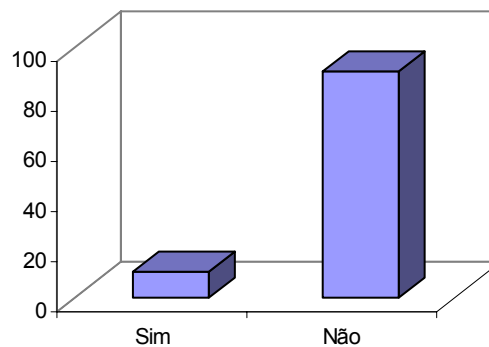


Gráfico 7.4 Percentagem de respostas à questão 3.2

Questão 4

“Após a consulta dos campos teóricos e a realização das simulações interactivas a resolução dos questionários fica facilitada”

Dos 29 alunos que responderam a esta questão dois responderam não e os restantes responderam sim. Na tabela 7.5. e no gráfico 7.5. pode observar-se as respostas atribuídas a esta questão.

	Frequência	Percentagem(%)
Sim	27	93
Não	2	7
Total	29	100

Tabela 7.5 Frequência e percentagem de respostas à questão 4

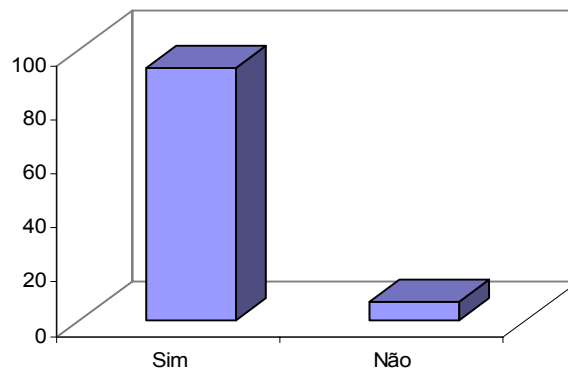


Gráfico 7.5 Percentagem de respostas à questão 4

Questão 5

“Tiveste dificuldade de trabalhar com o Laboratório Virtual”

Dos 29 alunos que responderam a esta questão dois responderam sim e os restantes responderam não. Na tabela 7.6 e no gráfico 7.6. pode observar-se as respostas atribuídas a esta questão.

	Frequência	Percentagem(%)
Sim	2	7
Não	27	93
Total	29	100

Tabela 7.6 Frequência e percentagem de respostas à questão 5

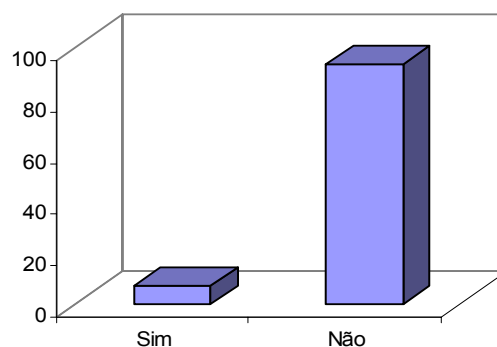


Gráfico 7.6 Percentagem de respostas à questão 5

Questão 6

A última questão deste inquérito é de resposta aberta, onde os alunos manifestaram a sua opinião após trabalharem com o “Laboratório Virtual”.

Registamos aqui apenas algumas das opiniões destes alunos.

“Dá a tua opinião sobre a utilidade desta ferramenta de trabalho”

“Gostei deste trabalho, pois a brincar com o que se pensa que é difícil, melhora a aprendizagem dos alunos com mais dificuldades”

“Esta ferramenta de trabalho facilita muito mais a nossa aprendizagem e é muito divertida não tornando a aula “secante””

“Esta ferramenta de trabalho é útil pois quebra a rotina do ensino tradicional e suscita o interesse dos alunos”

“Gostei desta ferramenta de trabalho, pois é uma maneira de aprender em pouco tempo”

“Gostei muito pois em 40 minutos aprendi algo que parecia ser muito complicado, acho as simulações e questionários muito interessantes e permitem uma maior compreensão”

“É um método muito mais simples de aprendizagem e por isso muito mais fácil e apelativo”

“Penso que é um método de ensino a seguir para o futuro, prático e didático”

“Revolucionária, mas não apelativa. Serve para tirar trabalho aos alunos nas salas de aula”

“É bom para a aprendizagem, pois a interactividade facilita a mesma”

“Parece ser útil para a utilização dos conteúdos, mas acho que as explicações das actividades experimentais deviam ser ao mesmo tempo das simulações”

“É útil pois concilia a parte teórica com as simulações interactivas”

“Excelente programa, compatível com as noções básicas informáticas para a utilização por qualquer pessoa pouco experiente”

Após a análise destes resultados podemos concluir que o método de ensino recorrendo às novas tecnologias é trabalhoso para o professor mas é facilitador para o aluno.

Durante a aplicação desta experiência verificámos que os alunos mostram de imediato uma postura de interesse face à disciplina, tentam sempre responder com rapidez e de uma forma correcta às questões que lhe são propostas, entrando até em competição uns com os outros, mas mostrando-se sempre disponíveis para ajudar qualquer colega que tenha dificuldade no manuseamento do programa.

7.4.2. Inquérito de conhecimento

Os alunos preencheram este inquérito duas vezes. A primeira vez foi antes de utilização do programa e a segunda vez foi depois da sua utilização.

O objectivo em vista para este procedimento foi demonstrar que os alunos podem adquirir conhecimentos importantes, que neste momento constam do seu currículo,

utilizando estratégias que não passam pelo método tradicional de exposição de conteúdos na sala de aula.

Apresentamos aqui as respostas dos alunos antes e depois da realização do trabalho e podemos concluir se se verificou aquisição de conhecimento.

Este inquérito é constituído por 10 questões de resposta fechada, onde os alunos têm apenas que classificar as questões em Verdadeira ou Falsa.

Questão 1

“A energia da radiação electromagnética emitida por um corpo encontra-se quantificada e é proporcional à sua frequência”

Dos 29 alunos que responderam a esta questão 22 responderam correctamente antes do trabalho e após a realização do trabalho 23 alunos passaram a responder correctamente. Nesta questão não se detectou uma diferença significativa.

Questão 2

“A hipótese de Max Planck sobre os quanta marca o nascimento da Teoria Clássica”

Nesta questão detectou-se uma diferença significativa. Os resultados encontrados apresentam-se na tabela e gráfico 7.7.

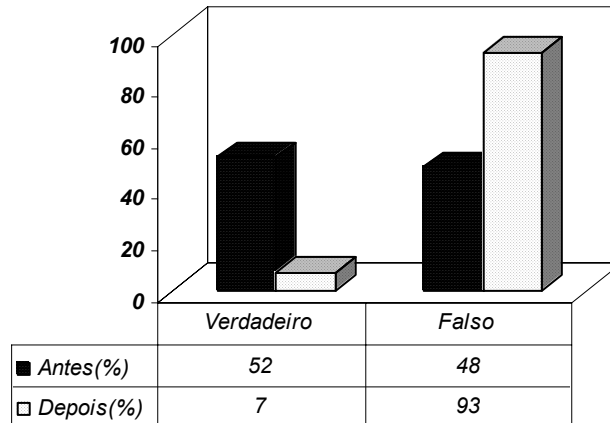


Tabela e Gráfico 7.7 Percentagem de respostas Verdadeiras e Falsas para a questão 2 antes e depois da realização do trabalho

Questão 3

“A possibilidade de ionização dos átomos ou moléculas dos meios materiais depende da energia da radiação electromagnética com que estes interactuam”

Dos 29 alunos que responderam a esta questão 20 responderam correctamente antes do trabalho e após a realização do trabalho 25 alunos passaram a responder correctamente. Nesta questão não se detectou uma diferença significativa.

Questão 4

“O efeito de Compton pode ocorrer quando um fóton colide com um electrão pouco ligado de um átomo do meio material”

Antes da realização do trabalho apenas 10 alunos responderam correctamente a esta questão. Depois de trabalharem com o programa passaram a ser 28 os alunos que responderam correctamente à questão.

Os resultados encontrados apresentam-se na tabela e gráfico 7.8.

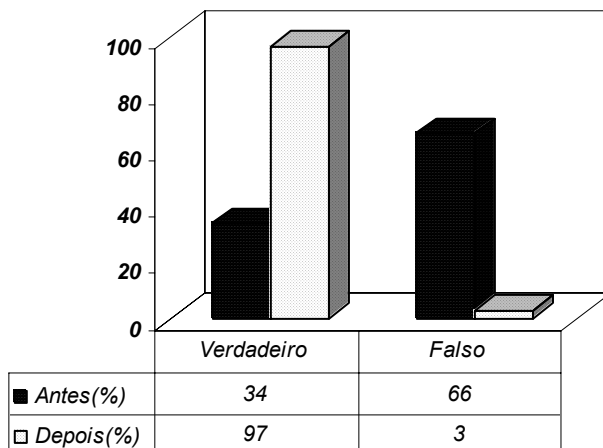


Tabela e Gráfico 7.8 Percentagem de respostas Verdadeiras e Falsas para a questão 4 antes e depois da realização do trabalho

Questão 5

“A produção de pares electrão-positrão dá-se quando um fóton de baixa energia interage com o campo eléctrico de um núcleo atómico”

Dos 29 alunos que responderam a esta questão 12 responderam correctamente antes da realização do trabalho e após a realização do mesmo 22 alunos passaram a responder correctamente.

Os resultados encontrados apresentam-se na tabela e gráfico 7.9.

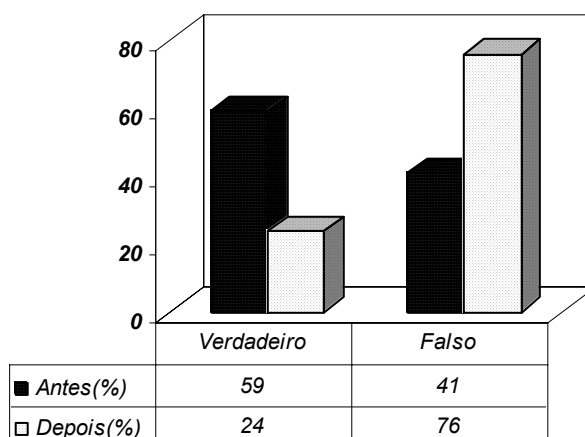


Tabela e Gráfico 7.9. Percentagem de respostas Verdadeiras e Falsas para a questão 5 antes e depois da realização do trabalho

Questão 6

“Os raios X são produzidos quando um alvo metálico é bombardeado por electrões com energia cinética da ordem do keV ou superior”

Antes da realização do trabalho apenas 12 alunos responderam correctamente a esta questão. Depois de trabalharem com o programa passaram a ser 29 os alunos que responderam correctamente à questão.

Os resultados encontrados apresentam-se na tabela e gráfico 7.10.

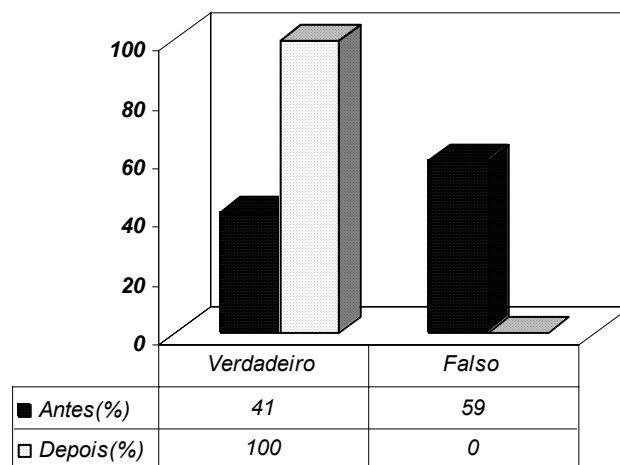


Tabela e Gráfico 7.10 Percentagem de respostas Verdadeiras e Falsas para a questão 6 antes e depois da realização do trabalho

Questão 7

“Só existem as desintegrações radioactivas α , β^- e γ ”

Nesta questão a diferença entre os alunos que responderam correctamente antes e depois da realização do trabalho foi de 14 para 20 alunos.

Os resultados encontrados apresentam-se na tabela e gráfico 7.11.

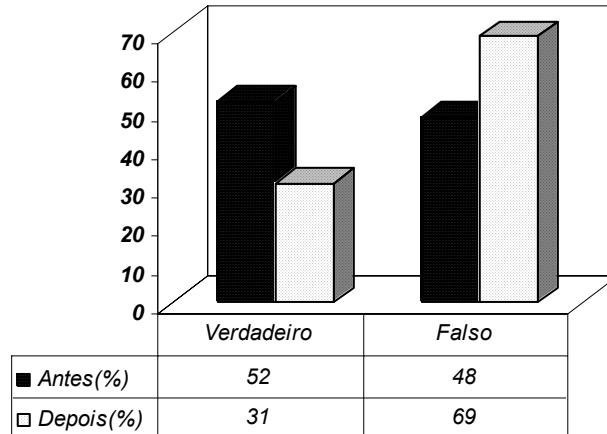


Tabela e Gráfico 7.11 Percentagem de respostas Verdadeiras e Falsas para a questão 7 antes e depois da realização do trabalho

Questão 8

“O período de semi-desintegração de uma determinada espécie radioactiva é o intervalo de tempo necessário para que o número de núcleos radioactivo se reduza a metade do seu valor inicial”

Dos 29 alunos que responderam a esta questão 15 responderam correctamente antes da realização do trabalho e após a realização do mesmo 28 alunos passaram a responder correctamente.

Os resultados encontrados apresentam-se na tabela e gráfico 7.12.

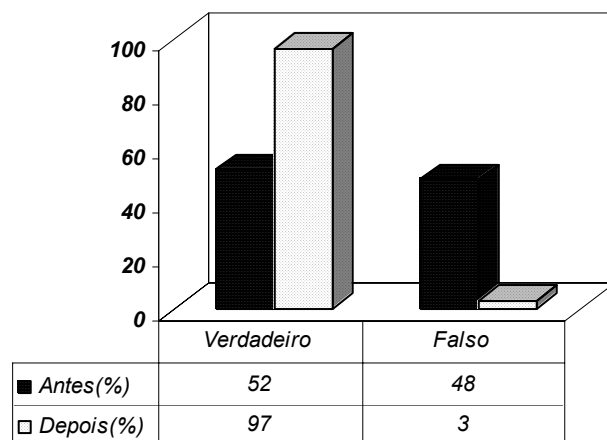


Tabela e Gráfico 7.12. Percentagem de respostas Verdadeiras e Falsas para a questão 8 antes e depois da realização do trabalho

Questão 9**As radiações α , β e γ têm igual poder de penetração**

Nesta questão a diferença entre as respostas respondidas correctamente antes e depois da realização do trabalho não foi muito significativa. O número de alunos que acertaram nesta resposta foram 21 antes e 28 depois.

Questão 10

“Em presença de um campo magnético, as partículas α e β^- são desviadas de acordo com a sua carga eléctrica. As partículas γ não são desviadas porque não têm carga”

No primeiro inquérito o número de alunos que respondeu correctamente a esta questão foi 17. Após terem trabalhado com o programa foram 28 os que acertaram na resposta desta questão.

Os resultados encontrados apresentam-se na tabela e gráfico 7.13.

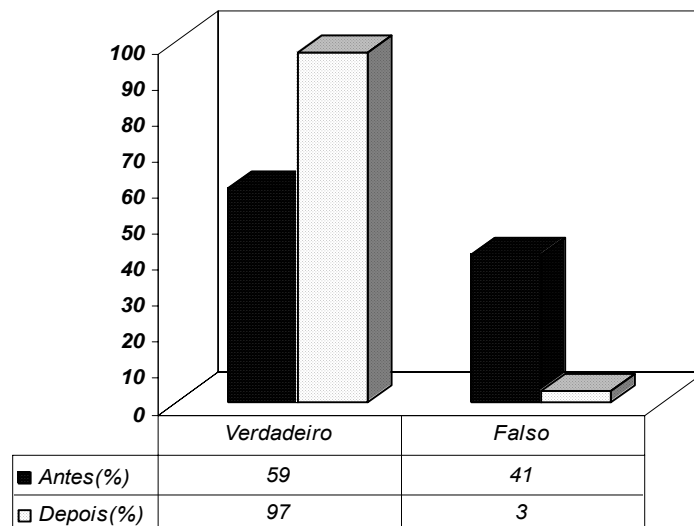


Tabela e Gráfico 7.13. Percentagem de respostas Verdadeiras e Falsas para a questão 10 antes e depois da realização do trabalho

Através da análise deste questionário podemos verificar que existem questões que são mais do conhecimento dos alunos, por estarem relacionadas com conteúdos previamente trabalhados, em anos anteriores, como por exemplo as questões 1 e 3.

Consegue perceber-se também que nas questões relacionadas com os novos conteúdos é significativa a diferença entre os resultados obtidos antes e depois da realização do trabalho.

Podemos concluir que ao utilizar as novas tecnologias na sala de aula se torna mais fácil transmitir os conhecimentos aos alunos, por parte do professor, fazendo aumentar significativamente o interesse pela descoberta e pela pesquisa metódica, por parte do aluno, faz aumentar o seu espírito crítico e selectivo e ajuda na resolução de problemas.

O laboratório virtual tanto poderá ser utilizado na sala de aula, uma vez que estes conteúdos constam no currículo actual do ensino secundário, como poderá ser posto à disposição de todos os alunos da escola, ao colocar este programa na página da Escola. Aí poderá ser consultada sempre que os alunos sintam necessidade ou curiosidade de aprender de uma forma simples estes conteúdos.

Em anexo, e em suporte informático, apresenta-se este nosso “Laboratório Virtual”.

CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentaram-se alguns resultados que estiveram na origem da revolução da Física no início do século XX bem como na evolução do ensino da ciência em Portugal.

Mostrou-se o que se ensina em Portugal e em que grau, nas disciplinas de Física e de Química do ensino secundário e quais as necessidades de preparação e de formação dos professores que se propõem a leccionar estas disciplinas.

Apresentaram-se, de uma forma simples, os conceitos teóricos necessários à execução deste trabalho.

Durante a execução deste trabalho não perdemos de vista os nossos objectivos que sempre foram encontrar experiências para que os alunos aprendessem a Física de Radiações de uma forma facilitada. Assim, atendendo à situação precária em que se encontram os laboratórios das escolas do ensino secundário era importante encontrar experiências que se pudessem fazer sem grandes custos.

Deste modo, recorrendo a materiais de simples construção e aquisição, desenvolvemos experiências de medição de dose de radiação fornecidas por fontes de radiação.

Ao longo do trabalho apresentámos os diferentes tipos de fantasmas disponíveis e mostrámos que a nossa escolha recaiu sobre o fantoma sólido, uma vez que a sua construção é simples, as dimensões das placas que o constituem não necessitam de ser muito rigorosas, e são de plexiglas que é um material de fácil aquisição.

Os filmes disponíveis para a realização deste trabalho que foram adquiridos no mercado, são de baixo custo e de variada apresentação. Encontrámos filmes que são utilizados pelos dentistas, de marca Poly-Soft, que são pequenos e já vêm protegidos da luz ambiente. Quanto aos produtos de revelação destes filmes também existem no mercado e a custos moderados. Como a maior parte das escolas secundárias têm câmaras escuras pode facilmente fazer-se a revelação dos filmes quando impressionados pela radiação.

Relativamente à fonte de radiação será necessária a aquisição de uma fonte didáctica de raios X.

Para a medição da dose recorreu-se à técnica de medida em filme. Para tal desenvolvemos, um aparelho (fotodensitómetro) didáctico, a partir de documentação apropriada, para fazer a leitura da intensidade de luz transmitida através de filmes.

É um aparelho de baixo custo, é de fácil utilização e por esse motivo, pode ser utilizado nas nossas escolas.

Este aparelho utilizou uma técnica dosimétrica que permitiu determinar a dose de radiação de feixes produzidos por uma fonte de raios X, baseada na utilização de filmes. Os filmes impressionados por fontes de radiação, foram revelados, foi feita a determinação da sua densidade óptica com a ajuda do fotodensímetro didáctico e, foi também feita a leitura da dose absorvida recorrendo a métodos ionométricos para, posteriormente, se poderem comparar os dois métodos

Da análise dos dados obtidos podemos concluir que os filmes podem ser facilmente usados como dosímetro nas escolas secundárias.

Utilizando este processo podem medir-se valores de dose absorvida, ao longo do eixo central do feixe de radiação (em profundidade) e, perfis de dose transversais ao eixo central do feixe de radiação.

Estes resultados exemplificam a forma como a radiação de raios X interaccua com a matéria.

Com a ajuda desta experiência os alunos do ensino secundário podem, de uma forma simples, ver uma aplicação directa da interacção da radiação com a matéria e, através dela, são alertados para a existência de uma Nova Física.

Além desta experiência, e como as condições em que se encontram a maioria dos laboratórios de Física das escolas dos ensinos Básico e Secundário são precárias, apostámo-nos a apresentar, recorrendo às novas tecnologias, um local onde fosse possível apresentar os conteúdos programáticos recorrendo a simulações animadas com as quais o aluno pudesse interagir. Assim construímos uma página à qual chamámos “Laboratório Virtual”.

Este material foi apresentado a um grupo de alunos do 12º Ano de Física e de Química que, de imediato, aderiram à nossa proposta, explorando quer a parte teórica, quer a parte mais interactiva.

Como resultado desta apresentação, podemos afirmar que os alunos além de terem mostrado que esta era uma boa forma de aprender estes conteúdos, manifestaram ainda que, através destas animações, as competências eram adquiridas de um modo mais agradável.

Esta página pode ser publicada na internet, na página da escola, para a consulta por parte de todos os alunos e professores interessados.

Podemos, assim, concluir que foram atingidos os objectivos inicialmente propostos com a realização deste trabalho.

Seria muito interessante se, no futuro, se tentasse encontrar outras aplicações para a utilização do aparelho didáctico que aqui apresentámos.

Ao longo deste trabalho, alguns parâmetros relacionados com os programas do ensino secundário foram-se alterando.

No início os programas leccionados nos 10º e 11º anos eram os únicos abrangidos pela reforma do ensino secundário.

No decorrer deste último ano lectivo entrou em vigor o novo programa para o 12º ano.

Verifica-se que a Física Moderna passou a constar dos programas dos três anos deste ciclo de ensino, embora muito timidamente nos dois primeiros, e de um modo um pouco mais abrangente no último.

Neste programa é definido um conjunto de trabalhos laboratoriais obrigatórios que abrangem apenas a Física Clássica. Seria interessante que se experimentasse introduzir o trabalho aqui exposto, uma vez que iria servir para mostrar uma aplicação prática dos conteúdos que se propõem para a unidade de Física Moderna.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anouk Barberousse, 2000, Max Kistler, Pascal Ludwig, “A Filosofia das Ciências do Século XX”.
- Attix, Frank Herbert, 1986, “Introduction To Radiological Physics And Radiation Dosimetry”, John Wiley & Sons, USA,.
- Cherry, P., 1998, A. Duxbury “Practical Radiotherapy Physics and Equipment, Ashford Colour Press, Great Britain.
- Coll, C., 1992, “Los contenidos en la educación escolar. Los contenidos en la reforma”. Madrid, Satillana.
- Cunningham, John Robert, 1983, H. E. Johns “The Physics of Radiology” Charles C. Thomas Publisher, USA.
- De Boer, G. E., 2000, Scientific Literacy: Another Look at his Historical and Contemporary Meanings and its Relationship to Science Education Reform. “Journal of Research in Science Teaching”, 37 (6), 582-601.
- Delors, J., 1996, “Educação um Tesouro a Descobrir”: relatório para a UNESCO da Comissão Internacional sobre Educação para o século XXI. (116-118) Porto: Edições ASA.
- Departamento do Ensino Secundário 2000. Revisão Curricular no Ensino Secundário – Lisboa: Departamento do Ensino Secundário, Ministério da Educação.
- DES Programa de Física e Química A 10º Ano Homologado em 2001 do Ministério de Educação.
- DES Programa de Física e Química A 11º ano, 2003, do Ministério de Educação.
- DES, (Re)Pensar o Ensino das Ciências (pp. 13-18). Lisboa: Departamento do Ensino Secundário, Ministério da Educação.

- Gallagher, J. J., 1996, "Implementing Teacher Change at the School Level". In D.F. Treagust, R. Duit, & B.J. Fraser (Eds), *Improving Teaching and Learning in Science and Mathematics*, (pp. 222-231). New York, NY Teachers College Press.
- Graham, Donald T., 1996, "Principles of Radiological Physics", Churchill Livingstone.
- Herz R. H., 1969, "The Photographic Action of Ionising Radiations", John Wiley & Sons Inc..
- International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), 1993, "Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry" USA.
- Khan, F.M., 1984, "The Physics of Radiation Therapy", Williams and Wilkins, U.S.A.
- Krane, Kenneth S., 1987, "Introductory Nuclear Physics", John Wiley & Sons, Inc.
- Lei nº 115/97 (Alteração à Lei de Bases do Sistema Educativo). Diário da Republica, I Série A, nº 217 p. 508 de 19 de Setembro de 1997.
- Lei nº 46/86 (Lei de Bases do Sistema Educativo). Diário da Republica, 1ª série, (237), 3067-3081.
- Leo, W.R., 1987, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments", Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Mayer-Kuckuk, T. , 1993, "Física Nuclear" Edição da Fundação Calouste Gulbenkian.
- Metcalfe P., 1993, Elliott Andrew, Wong T., Hoban P., "Dosimetry of 6-MV X-ray Beam Penumbra", *Med. Phys.* vol. 20 (nº5).

- Nahum, E Alan Ph.D. “Department of Radiation Oncology” Fox Chase Cancer Centre Philadelphia PA 19111, USA. (Lesson 2)
- Nahum, E Alan Ph.D. “Dosimeter Fundamentals, Radiation Oncology”
- Neto, A.J., & Valente, M.O., 1997, “Aprender a pensar a resolução de problemas: um estudo de orientação metacognitivo em aulas de física do ensino secundário”. Revista de Educação, 6 (2), 25-41.
- Pedrosa, M.A., 2001, “Ensino das Ciências e Trabalhos Práticos-(Re)Conceptualizar...In DES, (Re)Pensar o Ensino das Ciências (pp.35-50), Lisboa. Departamento do Ensino Secundário, Ministério da Educação.
- Resnick, Halliday, 2005, “Fundamentals of Physics”, John Wiley & Sons, USA.
- Sanders, Peter, “Nós e as Radiações”, Comissão das Comunidades Europeias
- Sibata C.H., 1991, Mota H.C., Beddar A.S., Higgins P.D., Shin K.H., “Influence of Detector Size in Photon Beam Profile Measurements”, Phys.Med.Biol.vol.36(nº5).
- Stern R.L., 1992, Fraass B.A., Gerhardsson A., McShan D.L., Lam K.L., “Generation and Use of Measurement-Based 3-D Dose Distributions for 3-D Dose calculation Verification”, Med. Phys. Vol.19 (nº1).
- Suchowerska N., 1997, Davison A., Drew J., Mecalfe P., “The validity of using radiographic film for radiotherapy dosimetry”, Australas Phys. Eng Sci. Med. Vol. 20 (nº19).
- Turner, James E., 1985, “Atoms, Radiation, and Radiation Protection”, second edition, a Wiley-Interscience Publication.
- Clemêncio, Filomena Maria da Costa, 2002, Tese de Mestrado “Dosimetria em Filme de Feixes de Fótons de 4 MV em Radioterapia Externa com o Filme Kodak X-OMAT V,

Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Coimbra.

- Rêgo, Florbela Martins, 2004, Tese de Mestrado “ A Física das Radiações no Ensino”, Departamento de Física da faculdade de Ciências, Lisboa
- Marco Quinteiro, 2005, “O estudo das Radiações Ionizantes no 3º ciclo do Ensino Básico e uma aplicação de Novas Tecnologias em Medicina Nuclear”, Universidade do Algarve

ANEXOS À BIBLIOGRAFIA

Sítios na Internet sobretudo para professores

<http://www.lip.pt/~luis>

(contém toda a informação teórica para a realização dos jogos apresentados neste trabalho, no âmbito do Laboratório Virtual)

<http://www.ualg.pt/LIP->

[Algarve/testes/Fisica_Radiações/Fisicaradiacoes.htm](http://www.ualg.pt/LIP- Algarve/testes/Fisica_Radiações/Fisicaradiacoes.htm)

(contém a página “Radiações Ionizantes aprender com animações” elaborada pelo professor Marco Quinteiro, e que serviu de base para a construção do Laboratório Virtual)

<http://www.physicsweb.org/bestof>

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/default.htm>

(sítio espanhol com um curso interactivo de física)

<http://faraday.physics.utoronto.ca/PVB/Harrison/Flash/Tutorial/FlashPhysics.html>

Sítios na Internet só com simulações

<http://faraday.physics.utoronto.ca/PVB/Harrison/Flash/>

<http://www.ultrashock.com/tutorials/flash5/animation1.html>

<http://www.brainpop.com>

<http://www.flashkit.com/movies/Scripting/Physics/>

http://www.flashkit.com/movies/Scripting/Physics/Newtons-Bryan_He-9109/index.php

<http://www.surendranath.org/Applets.html>

Sítios na Internet com interesse para consultar

<http://feiradeciencias.com.br/>

(aborda diversos temas de física, clássica e moderna, incluindo propostas de actividades práticas e experimentais)

<http://geocities.yahoo.com.br/saladefisica/index.html>

(contém diversos temas de física e applets de laboratório virtual)

<http://www.ufsm.br/gef/inicio>

(aborda vários temas desde fluidos à física moderna)

http://www.io.com/~o_m/ssh_skylab_trainer_inside.html

(o interior da Skylab)

<http://www.icnirp.de/publications.htm>

(sítio da Comissão Internacional para a Protecção de Radiações Não Ionizantes(ICNIRP))

<http://www.lx.it.pt/monit/>

(contém informação sobre efeitos biológicos da radiação electromagnética)

<http://www.cienciaviva.pt/projectos/physics2003/palestrapavconhecimento.pdf>

(contém palestra sobre radioactividade)

<http://www.itn.pt>

(contém informação sobre o radão)

<http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl>

(contém boa informação para alunos sobre física moderna)

<http://wyp.teilchenphysik.org/mc.htm>

(contém informação sobre a descoberta do mundo dos quarks e leptões com experiências reais)

<http://public.web.cern.ch/public/Content/Capters/Education/Education-en.html>

(contém informação sobre os recursos educacionais que o CERN oferece às escolas, professores, alunos não graduados e público em geral)

ANEXOS

Anexo 1 - Questionário de nível 1

Par cada uma das quatro questões propostas neste questionário são indicadas quatro hipóteses de resposta (A), (B), (C) e (D), das quais só uma está correcta.

Faz um click sobre o circulo colocada atrás de cada letra correspondente à alternativa que seleccionares como correcta para cada questão.

1- Um electrão de um determinado átomo recebe energia suficiente para ser libertado desse átomo. Diz-se que o átomo fica:

- (A) no estado fundamental;
- (B) num estado excitado;
- (C) num estado ionizado;
- (D) num estado quantizado;

2-Entre as afirmações seguintes qual a correcta?

- (A) a energia de um electrão ligado a um átomo não pode assumir um valor qualquer;
- (B) a carga do electrão depende da orbital em que ele se encontra no átomo;
- (C) o núcleo de um átomo é composto por protões, e electrões;
- (D) em todos os átomos o número de electrões é igual à soma dos protões e neutrões.

3- Quando a luz incide sobre uma placa de um determinado metal pode ocorrer o efeito fotoeléctrico. Pode dizer-se que.....

- (A)é necessário que os fotões da luz incidente tenham uma energia mínima suficiente para arrancar os electrões do metal;
- (B)o número de electrões arrancados do metal não depende da intensidade da luz incidente;
- (C)a quantidade de electrões emitidos por unidade de tempo depende da energia da luz incidente;
- (D) a quantidade de electrões emitidos por unidade de tempo depende da frequência da luz incidente;

4- Todos os isótopos de um dado elemento possuem o mesmo:

- (A) número de nucleões;
- (B) número de protões;
- (C) número de massa;
- (D) número de neutrões.

Anexo 2 - Questionário de nível 2

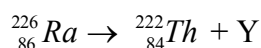
Para cada uma das quatro questões propostas neste questionário são indicadas quatro hipóteses de resposta (A), (B), (C) e (D), das quais só uma está correcta.

Faz um click sobre o circulo colocada atrás de cada letra correspondente à alternativa que seleccionares como correcta para cada questão.

1- Considerando o isótopo de alumínio, ${}_{13}^{27}Al$, o número de neutrões é:

- (A) 12
- (B) 27
- (C) 13
- (D) 14

2- O isótopo do rádio, ${}^{226}Ra$, desintegra-se originando isótopos de radão, ${}^{222}Rn$, com a emissão de uma partícula, segundo a equação:



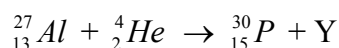
essa partícula representada pela letra Y é:

- (A) γ
- (B) β
- (C) α
- (D) neutrão

3- O ${}^{60}Co$ é um isótopo radioactivo artificial produzido em reactores nucleares. É uma fonte de radiação γ , sendo usada em radioterapia, no tratamento do cancro. Quando o ${}^{60}Co$ emite radiação γ :

- (A) O número atómico diminui de duas unidades;
- (B) O número atómico aumenta de duas unidades;
- (C) O número atómico diminui de uma unidade;
- (D) Não há alteração do número atómico;

4-Na equação da reacção nuclear:



a letra Y representa:

- (A) uma partícula γ
- (B) uma partícula α
- (C) um neutrão
- (D) um electrão

Anexo 3 - Questionário de nível 3

Para cada uma das quatro questões propostas neste questionário são indicadas quatro hipóteses de resposta (A), (B), (C) e (D), das quais só uma está correcta.

Faz um click sobre o circulo colocada atrás de cada letra correspondente à alternativa que seleccionares como correcta para cada questão.

1- Um isótopo radioactivo do mercúrio, ^{197}Hg , decai para ouro, ^{197}Au , com uma constante de desintegração de $0,0108 \text{ h}^{-1}$. Qual o período de semi-desintegração do ^{197}Hg ? Qual a fracção de amostra que permanecerá sem se desintegrar ao fim de três períodos de semi-desintegração? E ao fim de 10 dias? Escolhe a sequência de respostas que responde correctamente a estas questões:

- (A) 74,2 h; 0,500; 0,0856;
- (B) 42,8 h; 0,125; 0,0256;
- (C) 64,2 h; 0,125; 0,0749;
- (D) 24,2 h; 0,625; 0,0158;

2- Para determinar a idade de uma múmia, recorre-se às propriedades do isótopo do carbono, ^{14}C . Se o período de semi-desintegração, do carbono for 5700 anos, uma múmia que apresente uma quantidade de ^{14}C , aproximadamente igual a $1/8$ da quantidade que seria normal em vida, deverá corresponder a um ser que terá morrido há cerca de :

- (A) 22800 anos;
- (B) 11400 anos;
- (C) 16400 anos;
- (D) 2850 anos;

3- O núcleo radioactivo ^{64}Cu tem um período de semi-desintegração de 12,7 h. Se uma amostra contiver 5,50 g de ^{64}Cu puro para $t = 0$, a massa de cobre radioactivo que se desintegrará entre $t = 14,0 \text{ h}$ e $t = 16,0 \text{ h}$ será aproximadamente:

- (A) 265 mg;
- (B) 378 mg;
- (C) 562 mg;
- (D) 757 mg;

4- O núcleo de ^{131}I , é radioactivo, tendo um período de semi-desintegração de 8,04 dias. Ao meio dia de 1 de Janeiro, a actividade de uma certa amostra de Iodo 131 é 600 Bq. Usando o conceito de período de semi-desintegração, a actividade dessa amostra ao meio dia de 24 de Janeiro será:

- (A) um pouco menos do que 200Bq;
- (B) um pouco mais do que 200Bq;
- (C) um pouco menos do que 75Bq;
- (D) um pouco mais do que 75Bq ;

Anexo 4- Questões propostas para a aplicação do conceito “Período de Semi-Desintegração”

Tenta agora responder a estas questões.

1. Para a mesma substância apresentada na simulação, e para o mesmo período de semi-desintegração qual o tempo necessário para desaparecerem 1000 núcleos?
2. E se o período de semi-desintegração fosse 4 segundos? «
3. Neste último caso qual seria o valor da constante de desintegração?
4. Uma amostra de um isótopo radioactivo de bismuto apresenta um período de semi-desintegração de 5 dias. Após 20 dias, qual é a percentagem deste isótopo de bismuto que ainda não se desintegrou?

Como já deves ter reparado o processo aqui utilizado é semelhante a um jogo do tipo roleta.

Partimos de um conjunto de objectos e em cada tiragem há uma probabilidade de esse objecto se “desintegrar”. Se lhe acontecer essa “desintegração” sai do jogo.

Exemplo: Temos um saco de moedas iguais que despejamos em cima de uma mesa. As moedas com a face cara voltada para cima são retiradas. As outras voltam para o saco para serem baralhadas e voltarem a ser atiradas para a mesa, repetindo-se o processo de escolha. Em cada jogada a probabilidade de cada moeda ser retirada é de 50% .

5. Assim se tiveres 2500 moedas quantas vezes deves despejá-las sobre a mesa até retirares todas as moedas?
6. Comprámos 100 dados e colocámo-los num saco. Chocalhámos o saco e jogámos os dados para cima da mesa. De cada vez retirámos aqueles que mostravam 3 pintas. Quantas jogadas serão necessárias para ficarmos sem dados?

Anexo 5- Inquéritos**Inquérito**

Este inquérito destina-se a realizar um estudo sobre a utilidade do “Laboratório Virtual”.

Todas as respostas são confidenciais.

Agradecemos que respondas o mais sinceramente possível pois só assim os resultados serão válidos.

Após a utilização do “Laboratório Virtual”, diz qual a tua opinião respondendo Sim ou Não às seguintes questões:

1- É uma forma mais fácil de aprender os conceitos básicos de Física Moderna.

Sim Não

2- É útil para superar as dificuldades existentes na aprendizagem destes conteúdos trabalhados na sala de aula utilizando o método tradicional de ensino.

Sim Não

3- Tanto as simulações interactivas como as não interactivas são úteis para a compreensão dos conteúdos teóricos.

Sim Não

3.1- As simulações interactivas facilitam a aprendizagem dos conceitos.

Sim Não

3.2- As simulações não interactivas explicam melhor os conteúdos teóricos do que as interactivas.

Sim Não

4- Após a consulta dos campos teóricos e a realização das simulações interactivas a resolução dos questionários fica facilitada.

Sim Não

5- Tiveste dificuldade de trabalhar com o “Laboratório Virtual”.

Sim Não

6- Dá a tua opinião sobre a utilidade desta ferramenta de trabalho.

.....
.....

Agradecemos a tua colaboração

Inquérito

Este inquérito destina-se a realizar um estudo sobre os conhecimentos adquiridos pelos alunos que trabalharam com o “Laboratório Virtual”.

Todas as respostas são confidenciais.

Agradecemos que respondas o mais sinceramente possível pois só assim os resultados serão válidos.

Classifica as questões seguintes em **Verdadeiro** ou **Falso**

- 1- A energia da radiação electromagnética emitida por um corpo encontra-se quantificada e é proporcional à sua frequência.
- 2- A hipótese de Max Planck sobre os quanta marca o nascimento da Teoria Clássica.
- 3- A possibilidade de ionização dos átomos ou moléculas dos meios materiais depende da energia da radiação electromagnética com que estes interactivam.
- 4- O efeito de Compton pode ocorrer quando um fóton colide com um electrão pouco ligado de um átomo do meio material.
- 5- A produção de pares electrão-positrão dá-se quando um fóton de baixa energia interage com o campo eléctrico de um núcleo atómico.
- 6- Os raios X são produzidos quando um alvo metálico é bombardeado por electrões com energia cinética da ordem do keV ou superior.
- 7- Só existem as desintegrações radioactivas α , β^- e γ .
- 8- O período de semi-desintegração de uma determinada espécie radioactiva é o intervalo de tempo necessário para que o número de núcleos radioactivo se reduza a metade do seu valor inicial.
- 9- As radiações α , β e γ têm igual poder de penetração.
- 10- Em presença de um campo magnético, as partículas α e β^- são desviadas de acordo com a sua carga eléctrica. As partículas γ não são desviadas porque não têm carga.

Agradecemos a tua colaboração