



**universidad  
de león**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BIOMÉDICAS**

**TESIS DOCTORAL EN**

**HIGIENE, SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO**

**PROTECCIÓN DE LOS TRABAJADORES FRENTE AL  
RIESGO DE EXPOSICIÓN A RADIACIONES IONIZANTES  
EN LA INDUSTRIA DE FOSFATOS EN PORTUGAL**

**Directores:**

Profesora Doctora María Jesús Tuñón González

Profesor Doctor Eurico José dos Santos Calado

**Autor:**

José Manuel Gil Estevez

León, abril 2012



*“Nada es veneno, todo es veneno,  
todo depende de la dosis”*

*Paracelso<sup>1</sup>  
(1493-1541)*

---

<sup>1</sup> Seudónimo de Theophrastus Bombastus von Hohenheim. Médico y químico suizo.

# Agradecimientos

Agradezco a la Profesora María Jesús Tuñón González y al Profesor Eurico José dos Santos Calado, por el apoyo y estímulo que me han dado en la elaboración de esta Tesis Doctoral; a la empresa ADP Adubos de Portugal, a Susana Antunes ingeniera en ADP, por haberme permitido el acceso a las instalaciones y así realizar los trabajos de campo.

A mis compañeros del curso de doctorado por el apoyo, sugerencias y revisión de algunas materias de este trabajo y a Miguel Carmo por la ayuda en los trabajos de medición.

A la Dra. Estrella Alonso y al Dr. Sergio Alonso Angüiano por su ayuda en la revisión de la traducción al español de este trabajo.

Finalmente, agradezco al Instituto Tecnológico e Nuclear (ITN) en la persona de su director el Dr. Júlio Martins Montalvão e Silva por la posibilidad de llevar a cabo en sus laboratorios los análisis radiológicos de la fosforita, la espectrometría gamma y la cesión de los detectores de trazas nucleares usados para medir la concentración de radón en los lugares de trabajo.

# Agradecimentos

Agradeço à Professora María Jesús Tuñón González e ao Professor Eurico José dos Santos Calado, pelo apoio e estímulo na elaboração desta Tese Doutoral, à empresa ADP Adubos de Portugal, à Eng.<sup>a</sup> Susana Antunes pela disponibilização das instalações para a realização dos trabalhos de campo.

Aos meus colegas do curso de doutoramento pelo apoio, sugestões e revisão de algumas matérias deste trabalho e ao Eng.<sup>o</sup> Miguel Carmo pelo apoio dado na realização dos trabalhos de campo.

À Dr.<sup>a</sup> Estrella Alonso e ao Dr. Sergio Alonso Angüiano pela sua ajuda na revisão da tradução para espanhol deste trabalho.

Agradeço ao Instituto Nuclear e Tecnológico (ITN) na pessoa do seu diretor Doutor Júlio Martins Montalvão e Silva pela possibilidade de realizar nos seus laboratórios as análises radiológicas das fosforites, designadamente, espectrometrias gama e pela cedência dos detetores usados para a determinação da concentração de radão nos locais de trabalho.

# Resumen

En este trabajo de investigación, se pretende desarrollar y aplicar un método para la evaluación de riesgos para la salud de los trabajadores debidos a la exposición ocupacional a radiaciones ionizantes en las industrias de fertilizantes que utilizan fosforita como materia prima.

Basado en la literatura disponible se identifican los efectos negativos para la salud de los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes, de acuerdo con los tipos y niveles de exposición a que están sometidos y se caracterizan las radiaciones ionizantes desde un punto de vista físico, energético y de capacidad de penetración. Además se analizan los métodos y los equipos de medición más adecuados para los trabajos de campo a realizar en el caso del estudio presentado.

Se analizan las implicaciones jurídicas derivadas de las directivas comunitarias y de la legislación portuguesa, en lo que respecta a la protección radiológica de los trabajadores, a la evaluación del riesgo de exposición y a las medidas de prevención y de protección más adecuadas.

Se aplica el método desarrollado en un estudio de un caso de una fábrica de fertilizantes, ADP - Adubos de Portugal, SA, donde se identifican y caracterizan las situaciones en las que se puedan producir importantes niveles de exposición a las radiaciones ionizantes debido a la manipulación de las materias primas con isótopos radiactivos naturales. Se miden los niveles de radiación alfa, beta y gamma y la presencia del gas radón en varios ambientes de trabajo. De igual forma se mide la concentración en el aire de polvo y en un laboratorio de espectrometría gama se determinan los radionúclidos presentes y los niveles de radioactividad existentes en muestras de fosforita y de cenizas.

Se evalúa la exposición laboral causada por la radiación ionizante externa y por la inhalación de gases y polvo radiactivo, y en función de los resultados obtenidos, se estudian y se proponen medidas de prevención y de protección que puedan minimizar el riesgo de exposición de los trabajadores. Esas acciones propuestas incluyen colocación de blindajes, ventilación localizada, extracción localizada de polvo, colocación de filtros y medidas de organización del trabajo y de protección individual de los trabajadores.

## **Protection of workers from exposure to ionizing radiation risks in the phosphate fertilizers industry in Portugal**

### **Abstract**

This work aims to develop and implement a methodology for evaluating health risks to workers due to occupational exposure to ionizing radiation in the phosphate industry of fertilizers.

Based on the available bibliography, this work identifies the negative effects to the health of workers exposed to ionizing radiation according to the types and levels of exposure to which they are subject.

The legal implications resulting from EU directives and Portuguese legislation concerning the radiological protection of workers, the evaluation of exposure risk and the most suitable prevention and protection measures are analyzed.

This study primarily identifies and characterizes situations at a single plant at the industry of fertilizers, "Adubos de Portugal", where significant levels of exposure to ionizing radiation can occur when handling raw materials containing natural radioactive isotopes.

The levels of alpha, beta and gamma radiation and the presence of radon gases at various workplaces were monitored. The concentration of dust particles susceptible to be inhaled is also measured. In laboratory conditions, it is determined which radionuclides are present as well as the radioactivity levels in the collected samples.

The occupational exposure to ionizing external radiation and radioactive gases and dust inhaled is also analyzed. Depending on the levels of observed results, some preventive and protection measures were studied and proposed in order to minimize the risk of workers' exposure throughout engineering techniques, work organization and individual protection measures.

# Resumo

Neste trabalho de investigação, pretende-se desenvolver e implementar uma metodologia específica para a avaliação dos riscos para a saúde, derivados da exposição ocupacional dos trabalhadores a radiações ionizantes na indústria de fertilizantes fosfatados.

Com base na bibliografia disponível identificam-se os efeitos negativos na saúde dos trabalhadores expostos a radiações ionizantes de acordo com os tipos e níveis de exposição a que estão sujeitos e caracterizam-se as radiações ionizantes do ponto de vista físico, energético, capacidade de penetração, métodos e equipamentos de medição.

Analisa-se as implicações legais, resultantes das diretivas comunitárias e da legislação portuguesa, no que respeita à proteção radiológica dos trabalhadores, à avaliação do risco de exposição e às medidas de prevenção e de proteção mais adequadas.

Aplica-se a metodologia desenvolvida num caso de estudo realizado numa indústria de fabrico de fertilizantes, Adubos de Portugal SA, no qual se identificam e se caracterizam situações onde podem ocorrer níveis de exposição significativos a radiações ionizantes devido ao manuseamento de matérias-primas com isótopos radioativos naturais e medem-se os níveis de radiação alfa, beta e gama e a presença do gás radão em vários locais de trabalho.

Mede-se a concentração no ar de poeiras inaláveis e em laboratório de espectrometria gama determinam-se, nas amostras recolhidas, quais os radionuclidos presentes e os níveis de radioatividade existentes nas fosforites e nas cinzas.

Avalia-se a exposição ocupacional às radiações ionizantes originada pela radiação externa e pela inalação de gases e de poeiras radioativas e, em função dos resultados obtidos, estudam-se e propõem-se medidas de prevenção e de proteção que possam minimizar o risco de exposição dos trabalhadores, através de medidas de engenharia, de organização do trabalho e de proteção individual.

# Índice (Castellano)

<i>Agradecimientos</i> .....	ii
<i>Agradecimientos (Portugués)</i> .....	iii
<i>Resumen</i> .....	iv
<i>Resumen (Inglés)</i> .....	v
<i>Resumen (Portugués)</i> .....	vi
<i>Índice (Castellano)</i> .....	vii
<i>Índice (Portugués)</i> .....	x
<i>Índice de Figuras</i> .....	xiii
<i>Índice de Tablas</i> .....	xvii
<i>Índice de Cuadros</i> .....	xviii
<i>Índice de Ecuaciones</i> .....	xix
<i>Lista de Abreviaturas Usadas</i> .....	xx
<b>RESUMEN DE LA TESIS EN LENGUA ESPAÑOLA</b> .....	<b>1</b>
A - INTRODUCCIÓN .....	1
B - ANTECEDENTES .....	16
C - MATERIALES Y MÉTODOS .....	18
D - RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	30
E - PREVENCIÓN Y MEDIDAS DE PROTECCIÓN .....	44
F - CONCLUSIONES .....	46
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 MOTIVACIÓN PARA LA ELECCIÓN DEL TEMA .....	2
1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO .....	4
1.3 HIPÓTESIS A DESARROLLAR .....	5
1.4 EFECTOS EN LA SALUD DEBIDOS A LAS RADIACIONES IONIZANTES.....	6
1.4.1 <i>Efectos de la Radiactividad sobre la Salud</i> .....	6
1.4.2 <i>Vías de Penetración</i> .....	14
1.5 CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN IONIZANTE .....	16
1.5.1 <i>Unidades de Medida</i> .....	18
1.5.2 <i>Capacidad de penetración de las diferentes radiaciones</i> .....	19
1.6 RADIACIÓN PROVENIENTE DEL RADÓN .....	21
1.7 FUENTES DE RADIACIÓN DE ORIGEN NATURAL.....	23
1.8 ACTIVIDADES CON EXPOSICIÓN A FUENTES DE RADIACIÓN IONIZANTE.....	26
1.8.1 <i>Minas en Portugal</i> .....	26
1.8.2 <i>Grutas Turísticas</i> .....	28
1.8.3 <i>Aguas mineromedicinales</i> .....	28
1.8.4 <i>Centrales Térmicas de Carbón</i> .....	28
1.8.5 <i>Procesamiento de fosfatos</i> .....	30
<b>2 ANTECEDENTES / REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>33</b>
2.1 TRABAJOS ANTERIORES .....	34

2.1.1	<i>Riesgo de cáncer inducido por dosis bajas de radiación</i>	34
2.1.2	<i>Morbilidad y mortalidad por cáncer en los trabajadores de los fosfatos</i>	35
2.1.3	<i>Aumento de la incidencia de cáncer por exposición al radón en minas</i>	36
2.1.4	<i>Impacto de la industria de los fertilizantes fosfatados en el medio ambiente</i>	36
2.2	SÍNTESIS DEL CONOCIMIENTO ACTUAL	39
2.3	LEGISLACIÓN Y REGLAMENTACIÓN	40
2.3.1	<i>Legislación comunitaria</i>	40
2.3.2	<i>Legislación portuguesa</i>	40
2.3.3	<i>Líneas orientadoras del Decreto-Lei 222/2008</i>	43
2.3.4	<i>Niveles de acción para el radón</i>	49
2.3.5	<i>Caracterización legal de las enfermedades originadas por radiaciones ionizantes</i>	50
<b>3</b>	<b>MATERIAL Y MÉTODOS</b>	<b>53</b>
3.1	METODOLOGÍA ESPECÍFICA DEL TRABAJO	54
3.2	PROCEDIMIENTOS OPERACIONALES	56
3.2.1	<i>Identificar los factores de riesgo resultantes de la exposición a las radiaciones ionizantes</i>	56
3.2.2	<i>Caracterizar en términos radiológicos los productos usados</i>	56
3.2.3	<i>Caracterizar y medir el campo radiactivo gamma</i>	58
3.2.4	<i>Identificar y medir los locales con mayor concentración de polvos radiactivos</i>	60
3.2.5	<i>Medir la concentración del gas radón</i>	62
3.2.6	<i>Estimar la dosis total de radiación ionizante</i>	67
3.2.7	<i>Evaluar el riesgo y la necesidad de medidas correctivas</i>	68
3.3	CARACTERIZACIÓN DE UN CASO DE ESTUDIO	70
3.4	CARACTERIZACIÓN DE LA UNIDAD INDUSTRIAL	72
3.4.1	<i>Unidad de producción de fertilizantes fosfatados - Superfosfatos</i>	75
3.4.2	<i>Unidad de producción de abonos compuestos granulados NPK</i>	78
3.4.3	<i>2ª Línea de Granulación - Granulación IV</i>	81
3.4.4	<i>Unidad de ensacado de abonos compuestos</i>	82
3.5	MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA RADIOACTIVIDAD	89
3.5.1	<i>Medición de la radiación</i>	89
3.5.2	<i>Medición de la concentración de radón</i>	92
3.6	TRABAJOS DE CAMPO Y MEDICIONES	95
3.6.1	<i>Identificación y caracterización de las fuentes de radiación</i>	95
3.6.2	<i>Medición de la dosis de radiación externa gamma</i>	96
3.6.3	<i>Medición de la concentración de polvos en el aire</i>	100
3.6.4	<i>Medición de la actividad del radón</i>	103
3.6.5	<i>Identificación y medición de los radionúclidos por espectrometría gamma</i>	107
3.7	CÁLCULO DE LA DOSIS DE RADIACIÓN POR SIMULACIÓN EN ORDENADOR	109
3.7.1	<i>Cálculo del nivel de radiación externa gamma</i>	109
3.7.2	<i>Cálculo del efecto de las protecciones introducidas</i>	113
3.8	MEDIDAS DE CONTROL DE LA EXPOSICIÓN	119
3.8.1	<i>Protección frente a la radiación interna</i>	119
3.8.2	<i>Protección de las vías respiratorias</i>	119
3.8.3	<i>Aparatos de protección filtrantes</i>	120
3.8.4	<i>Aparatos de protección aislantes</i>	123
3.8.5	<i>Señalización de las zonas de riesgo</i>	124

<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>127</b>
4.1	ACTIVIDAD RADIOLÓGICA DE LOS PRODUCTOS MANIPULADOS .....	128
4.2	POLVOS RADIATIVOS PRESENTES EN EL AIRE .....	133
4.3	RADIACIÓN EXTERNA GAMMA EN LOS LOCALES DE TRABAJO .....	139
4.4	EVALUACIÓN DE LA DOSIS DE RADIACIÓN PROCEDENTE DEL RADÓN .....	141
4.5	ESTIMACIÓN DE LA DOSIS TOTAL.....	150
4.6	DATOS EPIDEMIOLÓGICOS.....	153
4.7	MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y DE PROTECCIÓN .....	154
4.8	ACCIONES A IMPLEMENTAR .....	155
4.9	TRABAJOS FUTUROS.....	157
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>159</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>165</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>171</b>
	ANEXO A - ORGANIZACIONES INTERNACIONALES DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA.....	173
	ANEXO B - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS USADOS .....	177
	ANEXO C - REFERENCIAS NIOSH PARA LA MEDICIÓN DE POLVOS .....	189
	ANEXO D - PLANTAS DE LOCALIZACIÓN.....	201
	ANEXO E - RESULTADOS DE LAS MEDICIONES REALIZADAS .....	209

# Índice (Português)

<i>Agradecimientos</i> .....	ii
<i>Agradecimentos</i> .....	iii
<i>Resumen</i> .....	iv
<i>Abstract</i> .....	v
<i>Resumo</i> .....	vi
<i>Índice (Castellano)</i> .....	vii
<i>Índice (Português)</i> .....	x
<i>Índice de Figuras</i> .....	xiii
<i>Índice de Tabelas</i> .....	xvii
<i>Índice de Quadros</i> .....	xviii
<i>Índice de Equações</i> .....	xix
<i>Lista de Abreviaturas Usadas</i> .....	xx
<b>RESUMEN DE LA TESIS EN LENGUA ESPAÑOLA</b> .....	<b>1</b>
A - INTRODUCCIÓN .....	1
B - ANTECEDENTES .....	16
C - MATERIALES Y MÉTODOS .....	18
D - RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	30
E - PREVENCIÓN Y MEDIDAS DE PROTECCIÓN .....	44
F - CONCLUSIONES .....	46
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO PARA A ESCOLHA DO TEMA .....	2
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	4
1.3 HIPÓTESES A DESENVOLVER .....	5
1.4 EFEITOS NA SAÚDE DAS RADIAÇÕES IONIZANTES .....	6
1.4.1 <i>Efeitos da Radioatividade na Saúde</i> .....	6
1.4.2 <i>Vias de Penetração</i> .....	14
1.5 CARACTERIZAÇÃO DA RADIAÇÃO IONIZANTE .....	16
1.5.1 <i>Unidades de Medida</i> .....	18
1.5.2 <i>Capacidade de penetração das diversas radiações</i> .....	19
1.6 RADIAÇÃO PROVENIENTE DO RADÃO .....	21
1.7 FONTES DE RADIAÇÃO DE ORIGEM NATURAL .....	23
1.8 ATIVIDADES COM EXPOSIÇÃO A FONTES DE RADIAÇÃO IONIZANTE .....	26
1.8.1 <i>Minas em Portugal</i> .....	26
1.8.2 <i>Grutas Turísticas</i> .....	28
1.8.3 <i>Águas mineromedicinais</i> .....	28
1.8.4 <i>Centrais Térmicas a Carvão</i> .....	28
1.8.5 <i>Processamento de fosfatos</i> .....	30
<b>2 ANTECEDENTES / REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>33</b>
2.1 TRABALHOS ANTERIORES .....	34

2.1.1	<i>Risco de câncer induzido por doses baixas de radiação</i>	34
2.1.2	<i>Morbilidade e mortalidade por câncer nos trabalhadores dos fosfatos</i>	35
2.1.3	<i>Aumento da incidência de câncer por exposição ao radão em minas</i>	36
2.1.4	<i>Impacte da indústria dos fertilizantes fosfatados no ambiente</i>	36
2.2	SÍNTESE DO CONHECIMENTO ATUAL	39
2.3	LEGISLAÇÃO E REGULAMENTAÇÃO	40
2.3.1	<i>Legislação comunitária</i>	40
2.3.2	<i>Legislação portuguesa</i>	40
2.3.3	<i>Linhas orientadoras do Decreto-Lei 222/2008</i>	43
2.3.4	<i>Níveis de ação para o radão</i>	49
2.3.5	<i>Caracterização legal das doenças originadas por radiações ionizantes</i>	50
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>53</b>
3.1	METODOLOGIA ESPECÍFICA DE TRABALHO	54
3.2	PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS	56
3.2.1	<i>Identificar os fatores de risco resultantes da exposição a radiações ionizantes</i>	56
3.2.2	<i>Caracterizar em termos radiológicos os produtos usados</i>	56
3.2.3	<i>Caracterizar e medir o campo radioativo gama</i>	58
3.2.4	<i>Identificar e medir os locais com maior concentração de poeiras radioativas</i>	60
3.2.5	<i>Medir a concentração de gás radão</i>	62
3.2.6	<i>Estimar a dose total de radiação ionizante</i>	67
3.2.7	<i>Avaliar o risco e a necessidade de medidas corretivas</i>	68
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	70
3.4	CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE INDUSTRIAL	72
3.4.1	<i>Unidade de produção de fertilizantes fosfatados - Superfosfatos</i>	75
3.4.2	<i>Unidade de produção de adubos compostos granulados NPK</i>	78
3.4.3	<i>2ª Linha de Granulação - Granulação IV</i>	81
3.4.4	<i>Unidade de ensacamento de adubos compostos</i>	82
3.5	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RADIOATIVIDADE	89
3.5.1	<i>Medição da radiação</i>	89
3.5.2	<i>Medição da concentração de radão</i>	92
3.6	TRABALHOS DE CAMPO E MEDIÇÕES	95
3.6.1	<i>Identificação e caracterização das fontes de radiação</i>	95
3.6.2	<i>Medição da dose de radiação externa gama</i>	96
3.6.3	<i>Medição da concentração de poeiras no ar</i>	100
3.6.4	<i>Medição da atividade do radão</i>	103
3.6.5	<i>Identificação e medição dos radionuclídeos por espectrometria gama</i>	107
3.7	CÁLCULO DA DOSE DE RADIAÇÃO POR SIMULAÇÃO EM COMPUTADOR	109
3.7.1	<i>Cálculo do nível de radiação externa gama</i>	109
3.7.2	<i>Cálculo do efeito das proteções introduzidas</i>	113
3.8	MEDIDAS DE CONTROLO DA EXPOSIÇÃO	119
3.8.1	<i>Proteção face à radiação interna</i>	119
3.8.2	<i>Proteção das vias respiratórias</i>	119
3.8.3	<i>Aparelhos de proteção filtrantes</i>	120
3.8.4	<i>Aparelhos de proteção isolantes</i>	123
3.8.5	<i>Sinalização das zonas de risco</i>	124
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b>	<b>127</b>

4.1	ATIVIDADE RADIOLÓGICA DOS PRODUTOS MANIPULADOS .....	128
4.2	POEIRAS RADIOATIVAS PRESENTES NO AR .....	133
4.3	RADIAÇÃO EXTERNA GAMA NOS LOCAIS DE TRABALHO .....	139
4.4	AValiação DA DOSE DE RADIAÇÃO PROVENIENTE DO RADÃO .....	141
4.5	ESTIMATIVA DA DOSE TOTAL.....	150
4.6	DADOS EPIDEMIOLÓGICOS .....	153
4.7	MEDIDAS DE PREVENÇÃO E PROTEÇÃO .....	154
4.8	AÇÕES A IMPLEMENTAR .....	155
4.9	TRABALHOS FUTUROS .....	157
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>159</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>165</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>171</b>
	ANEXO A - ORGANIZAÇÕES INTERNACIONAIS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA .....	173
	ANEXO B - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS EQUIPAMENTOS USADOS .....	177
	ANEXO C - REFERÊNCIAS NIOSH PARA MEDIÇÃO DE POEIRAS.....	189
	ANEXO D - PLANTAS DE LOCALIZAÇÃO.....	201
	ANEXO E - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES EFETUADAS .....	209

# Índice de Figuras

Figura 1 - Lesão na coxa induzida por radiação cerca de 25 dias após a irradiação .....	11
Figura 2 - Extrapolações alternativas do risco de câncer versus radiação.....	12
Figura 3 - Penetração da radiação externa gama no corpo .....	14
Figura 4 - Vias de penetração da radiação alfa no corpo.....	14
Figura 5 - Via de Penetração do radão no corpo .....	15
Figura 6 - Exemplo da emissão de uma partícula alfa .....	17
Figura 7 - Exemplo da emissão de uma partícula beta .....	17
Figura 8 - Exemplo da emissão de uma radiação gama .....	18
Figura 9 - Capacidade de penetração dos diversos tipos de radiação.....	19
Figura 10 - Processo de criação dos descendentes do radão .....	21
Figura 11 - Forma de contaminação típica do radão .....	22
Figura 12 - Atividade do radão e descendentes .....	22
Figura 13 - Fontes de radiação ionizante de origem natural .....	23
Figura 14 - Conteúdo radioativo materiais naturais e artificiais (em Becquerel).....	23
Figura 15 - Minas de polimetálicos .....	26
Figura 16 - Minas de radioativos em Portugal .....	27
Figura 17 - Diagrama de funcionamento de uma central térmica a carvão .....	29
Figura 18 - Esquema simplificado do processamento dos fosfatos .....	30
Figura 19 - Depósitos de fosfatos no mundo. ....	31
Figura 20 - Depósito de fosfogesso localizado próximo de Fort Meade, Flórida .....	32
Figura 21 - Distribuição da dose cumulativa de radiação entre os trabalhadores .....	34
Figura 22 - Aumento do risco relativo por Sv para todos os cânceres excluindo leucemia ...	35
Figura 23 - Metodologia proposta para o presente estudo.....	55
Figura 24 - Sequência de procedimentos operacionais .....	69
Figura 25 - Medição da radiação externa gama durante trabalhos de limpeza de filtros.....	71

Figura 26 - Localização da empresa ADP - Adubos de Portugal .....	72
Figura 27 - Imagem satélite da zona envolvente da instalação industrial .....	73
Figura 28 - Imagem satélite da instalação industrial .....	73
Figura 29 - Fotografia satélite do depósito de fosfogesso da ADP (no centro) .....	74
Figura 30 - Diagrama geral de produção da ADP .....	75
Figura 31 - Moagem da fosforite.....	75
Figura 32 - Vista da zona de moagem da fosforite .....	76
Figura 33 - Diagrama de processo dos Fertilizantes Fosfatados .....	77
Figura 34 - Balanço de massas aos Superfosfatos.....	77
Figura 35 - Diagrama de processo dos Adubos Compostos NPK Granulados .....	78
Figura 36 - Diagrama de blocos - Granulação II .....	80
Figura 37 - Balanço de massa Granulação II.....	80
Figura 38 - Diagrama de blocos - Granulação IV.....	81
Figura 39 - Balanço de massa Granulação IV .....	81
Figura 40 - Diagrama de ensacamento - Moller´s 1 .....	82
Figura 41 - Diagrama de ensacamento - Moller´s 2.....	84
Figura 42 - Aproveitamento interno de águas industriais .....	86
Figura 43 - Localização do depósito de fosfogesso .....	87
Figura 44 - Estuário do Sado (Setúbal, Portugal) onde se situa a fábrica .....	88
Figura 45 - Esquema de um contador Geiger-Mueller .....	89
Figura 46 - Esquema de um detetor de cintilação.....	90
Figura 47 - Detetor típico de germânio e reservatório de nitrogénio líquido .....	91
Figura 48 - Medição da radiação gama numa amostra de fosforite .....	91
Figura 49 - Medidor de concentração de radão de leitura direta.....	93
Figura 50 - Princípio de funcionamento do dosímetro de radiação alfa .....	94
Figura 51 - Detetor de carvão ativo .....	94
Figura 52 - Medidor de radiação ionizante marca ALNOR.....	96
Figura 53 - Dosímetro pessoal de radiação gama marca AUTOMESS.....	97
Figura 54 - Autor efetuando medições da radiação externa no armazém dos superfosfatos	97

Figura 55 - Autor realizando medições da radiação gama proveniente dos superfosfatos....	98
Figura 56 - Autor realizando medições da radiação gama com dosímetro pessoal .....	99
Figura 57 - Autor realizando a medição da radiação gama em equipamentos.....	99
Figura 58 - Conjunto de amostragem bomba de aspiração e ciclone .....	100
Figura 59 - Autor colocando bombas de aspiração, ciclones e filtros de retenção das poeiras .....	101
Figura 60 - Autor efetuando a medição de poeiras com bomba de aspiração .....	102
Figura 61 - Frações inalável, torácica e respirável como percentagem do aerossol total....	102
Figura 62 - Autor efetuando a medição do radão com equipamento de leitura direta .....	104
Figura 63 - Equipamento de deteção de radão marca DURRIDGE .....	104
Figura 64 - Autor instalando um dosímetro para determinação da concentração de radão	105
Figura 65 - Detetores de traços nucleares usados para a monitorização do radão.....	106
Figura 66 - Película exposta à radiação alfa originada pelo radão.....	106
Figura 67 - Colocação pelo autor de uma amostra selada dentro da cabine de medição do ITN .....	107
Figura 68 - Detetor de germânio usado na espectrometria gama .....	108
Figura 69 - Campo radiante considerado no cálculo da exposição à radiação externa gama .....	111
Figura 70 - Geometria considerada para a simulação da exposição à fosforite .....	111
Figura 71 - Resultado da Simulação da exposição à fosforite (distância 1 cm) .....	112
Figura 72 - Nível de radiação em função da espessura da camada de fosforite .....	114
Figura 73 - Taxa de dose normalizada em função da espessura da fosforite .....	114
Figura 74 - Radiação gama em função da distância à fosforite .....	115
Figura 75 - Atenuação normalizada da radiação gama em função da distância à fosforite.	116
Figura 76 - Colocação de uma blindagem de proteção entre a fosforite e o trabalhador ....	117
Figura 77 - Atenuação da radiação gama em função da espessura da blindagem.....	117
Figura 78 - Tipos de aparelhos filtrantes .....	120
Figura 79 - Tipos de aparelhos filtrantes com ar forçado .....	123
Figura 80 - Tipos de aparelhos isolantes.....	123
Figura 81 - Pictogramas a usar na sinalização de zonas vigiadas.....	124

Figura 82 - Pictogramas a usar na sinalização de zonas controladas.....	125
Figura 83 - Pictogramas a usar na sinalização de zonas de permanência regulamentada .	125
Figura 84 - Pictogramas a usar na sinalização de zonas de acesso proibido .....	126
Figura 85 - Atividade dos radionuclídeos presentes na fosforite em função do país de proveniência.....	129
Figura 86 - Pórtico instalado na Siderurgia Nacional para deteção de radiação .....	130
Figura 87 - Atividade radiológica das cinzas recolhidas dos filtros de manga.....	131
Figura 88 - Operação de limpeza do filtro de mangas .....	132
Figura 89 - Remoção manual das cinzas nos filtros de mangas .....	132
Figura 90 - Comparação da exposição a poeiras com o VLE de poeiras inertes .....	135
Figura 91 - Comparação dos valores de exposição com o VLE de poeiras de carvão.....	136
Figura 92 - Comparação da concentração de poeiras no ar com o VLE de poeiras inertes	137
Figura 93 - Comparação da concentração de poeiras no ar com o VLE do carvão .....	138
Figura 94 - Dose anual de exposição a radiação gama para 2000 horas / ano .....	139
Figura 95 - Localização dos valores medidos de radiação externa.....	140
Figura 96 - Variação das concentrações de radão nos diversos locais de trabalho .....	143
Figura 97 - Correlação entre poeiras respiráveis e radão na atmosfera .....	144
Figura 98 - Resultados do programa de conversão de concentração em dose de radão....	146
Figura 99 - Dose anual de radão e valores de referência .....	147
Figura 100 - Operação de manutenção de um transportador de fosforite em espaço pouco ventilado.....	148
Figura 101 - Contributos de radiação para a Dose Efetiva Total Equivalente .....	151
Figura 102 - Dose anual estimada de radiação para as várias zonas da fábrica .....	152
Figura 103 - Aumento do risco de câncer ao longo da vida (%).....	154
Figura 104 - Proteção respiratória para zona de empoeiramento moderado .....	156
Figura 105 - Proteção respiratória para zona de empoeiramento elevado.....	157
Figura 106 - Proteção respiratória para zonas com empoeiramento elevado .....	157

# Índice de Tabelas

Tabela 1 - Contributo dos radionuclidos presentes na fosforite para a radiação gama .....	112
Tabela 2 - Atividade dos radionuclidos presentes na fosforite em função do país de proveniência .....	128
Tabela 3 - Valores de atividade radiológica medidos numa indústria de fertilizantes nos EUA .....	129
Tabela 4 - Atividade radiológica das cinzas recolhidas dos filtros de manga .....	131
Tabela 5 - Valores de exposição ocupacional a poeiras .....	134
Tabela 6 - Valores de concentração de poeiras no ar .....	137
Tabela 7- Valores de radiação externa gama nos locais de trabalho.....	139
Tabela 8 - Valores de dosimetria gama dos trabalhadores.....	140
Tabela 9 - Concentração do radão nos espaços avaliados .....	142
Tabela 10 - Cálculo da dose de radão e do fator de risco associado.....	147
Tabela 11 - Dose anual estimada de radiação para as várias zonas da fábrica .....	152
Tabela 12 - Aumento percentual do risco de câncer ao logo da vida.....	153

# Índice de Quadros

Quadro 1 - Efeitos da exposição a doses elevadas de radiação.....	10
Quadro 2- Unidades de medida de radiações .....	19
Quadro 3 - Cadeia natural de decaimento nuclear do $^{238}\text{U}$ .....	24
Quadro 4 - Legislação comunitária sobre radiações ionizantes .....	40
Quadro 5 - Legislação portuguesa sobre radiações ionizantes.....	41
Quadro 6 - Níveis de ação $^{222}\text{Rn}$ em países europeus para locais de trabalho .....	50
Quadro 7 - Doenças profissionais originadas por exposição a radiações ionizantes .....	51
Quadro 8 - Matérias-primas líquidas existentes na instalação industrial .....	85
Quadro 9 - Aplicabilidade dos detetores de radão mais usuais .....	94
Quadro 10 - Localização dos detetores de radão .....	105
Quadro 11 - Caracterização da fonte radioativa fosforite do Senegal .....	110

# Índice de Equações

Equação 1 .....	16
Equação 2 .....	16
Equação 3 .....	18
Equação 4 .....	59
Equação 5 .....	61
Equação 6 .....	64
Equação 7 .....	65
Equação 8 .....	112
Equação 9 .....	134
Equação 10 .....	145

# Lista de Abreviaturas Usadas

Ac	Actínio
ACGIH	American Conference of Industrial Hygienists
ADN	Ácido desoxirribonucleico
ADP	Adubos de Portugal, SA
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
APF	Assigned Protection Factor
AVAC	Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado
Bi	Bismuto
Bq	Becquerel
Bq/m <sup>3</sup>	Becquerel/metro cúbico
Ci	Curie
DNA	Ácido desoxirribonucleico
EDP	Energias de Portugal
ELCR	Excess Lifetime Cancer Risk (Aumento do Risco de Câncer ao Longo da Vida)
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Proteção do Ambiente)
eV	Eletrão-volt
IARC	International Agency for Research on Cancer
ITN	Instituto Tecnológico e Nuclear (Portugal)
keV	Kilo eletrão-volt
LD <sub>50/60</sub>	Dose com a qual 50% dos indivíduos expostos morrem em 60 dias
LET	Linear Energy Transfer (Transferência Linear de Energia).
LNT	Linear No-Threshold (linear sem limiar)
MeV/l	Mega eletrão-volt/l
MPS	Most Penetrating Size
mSv	mili Sievert
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
NORM	Naturally Occurring Radioactive Materials
NPK	Azoto, Fósforo, Potássio
OMS	Organização Mundial da Saúde
Pb	Chumbo
pCi/l	Pico Curie/litro
PNAAS	Plano Nacional de Ação Ambiente e Saúde (Portugal)
Po	Polónio
ppm	partes por milhão
Ra	Rádio
rad	Unidade de dose de radiação absorvida
rem	roentgen equivalent in man (100 rem = 1Sv)
Rn	Radão
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SSP	Superfosfato Simples
Sv	Sievert unidade de dose de radiação
Sv/h	Taxa de dose de radiação por hora (Sievert/hora)
TENORM	Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials
Th	Tório
TSP	Superfosfato Triplo
U	Urânio
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
VLE	Valor Limite de Exposição
VLE-MP	Valor Limite de Exposição - Média Ponderada
WL	Working Level
WLM	Working Level Month
W <sub>R</sub>	Fator de ponderação para o tipo de radiação
W <sub>T</sub>	Fator de ponderação para o tecido ou órgão

## A - Introducción

### Motivación para la elección del tema de la presente tesis

La elección de este tema de investigación "*Protección de los trabajadores frente al riesgo de exposición a radiaciones ionizantes en la industria de fosfatos en Portugal*", fue debido a la identificación por parte del autor de varias industrias en Portugal en las que se encuentran elementos radiactivos naturales que pueden causar daños en la salud de los trabajadores. Un ejemplo muy significativo es la elaboración de fertilizantes agrícolas a partir de fosfatos lo que será objeto de un estudio más detallado a lo largo de este trabajo con dos objetivos fundamentales: el primero valorar los riesgos presentes y el segundo adecuar medidas suficientes de prevención y protección frente a la exposición laboral a radiaciones ionizantes de origen natural.

Por un lado el problema de la exposición laboral a radiaciones ionizantes, aunque esté recientemente legislado en Portugal por el Decreto-Lei nº 222/2008 no es suficientemente conocido ni por industriales ni por trabajadores. Por otro lado, es un campo abierto para la investigación científica y el desarrollo de conocimientos técnicos que permitan la aplicación de medidas preventivas y de protección frente a las radiaciones ionizantes de origen natural.

Es internacionalmente conocido que la manipulación de fosfatos puede exponer a los trabajadores a dosis significativas de radiaciones ionizantes de origen natural. Muchos de los depósitos de fosfatos contienen altas concentraciones de uranio, por lo que su manipulación aumenta la acumulación de residuos radiactivos y por consiguiente la liberación de radón hacia la atmosfera, que cuando es inhalado puede causar daños significativos en la salud.

Las fosforitas utilizadas en Portugal provenientes generalmente de Marruecos, Túnez, Siria, Egipto y Senegal pueden contener concentraciones significativas de uranio dependiendo de su origen de extracción. Esta materia prima no es sistemáticamente controlada desde un punto de vista radiológico. Así pues son manipuladas, transformadas y almacenadas, generando enormes cantidades de residuos industriales (fosfoyeso) y todo esto sin tener en cuenta su radioactividad.

Los fertilizantes producidos a partir de estos fosfatos al ser utilizados en la agricultura contaminan las plantas, los alimentos e incluso a las personas y animales, como por ejemplo las plantas de tabaco abonadas con fosfatos. Los fertilizantes de esta naturaleza contienen potasio  $^{40}\text{K}$  y pequeñas cantidades de uranio y de sus descendientes radiactivos.

Además, los enormes depósitos de fosfoyeso generados (véase Figura 1 y Figura 2) pueden producir daños ambientales difícilmente recuperables ya que están impregnados de ácido fosfórico y de otras sustancias que normalmente acompañan al fosfato natural, como son el arsénico, el plomo, el mercurio y el cadmio además de elementos radiactivos como el uranio y sus descendientes debido a su decaimiento nuclear.



**Figura 1 - Depósito de fosfoyeso localizado cerca de Fort Meade, Florida**

(Fuente: foto de Harvey Henkelmann, 4/3/2007)



**Figura 2 - Fotografía satélite del depósito de fosfoyeso de ADP**

(Fuente: Google Earth, coordenadas: 38°30'25.79"N, 8°49'57.83"W)

La directiva de la UE 96/29 Euratom (European Council, 1996) obliga a todos sus estados miembros a identificar y evaluar la exposición laboral a fuentes naturales de radiación ionizante. En Portugal el Decreto-Lei nº 222/2008, que transpone parcialmente la directiva mencionada, y entró en vigor en 16 de marzo de 2009, prevé el establecimiento de normas básicas de seguridad para la protección de la salud de los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes incluidas las de origen natural.

Se constató que la exposición de los trabajadores a fuentes naturales de radiación ionizante no está suficientemente valorada, ni controlada, ni reglamentada en Portugal, todo lo contrario que la exposición a radiaciones artificiales. Los efectos sobre la salud resultantes de la exposición a radiaciones ionizantes de origen natural (dosis bajas de radiación) no son inmediatos sino que se pueden manifestar años más tarde siendo así muy difícil establecer una relación clara causa-efecto.

La manipulación de materias primas y productos finales que tengan concentraciones significativas de uranio originan la liberación de radón (gas radiactivo) en la atmósfera, que al ser inhalado produce daños en la salud de los seres humanos. Además, si los lugares de

trabajo no se mantienen libres de polvo y humo y bien aireados, los productos derivados de la desintegración nuclear del radón (polonio, plomo radiactivo y bismuto) se asocian a las partículas en suspensión en el aire, son inhaladas y se depositan en todo el sistema respiratorio. La radiación alfa, altamente energética, emitida por estos isótopos puede provocar daños irreparables en los tejidos pulmonares, incluso el desarrollo de neoplasmas.

En Portugal, la valoración y el control de la exposición radiactiva debida a la inhalación del radón y de sus descendientes no está suficientemente estudiado en ambiente laboral. Si bien está previsto en el ámbito del PNAAS (*Plano Nacional de Ação Ambiente e Saúde*) un conjunto de iniciativas para valorar y controlar la exposición de las personas al radón, todavía no se han puesto en práctica.

### **Objetivo de la tesis**

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar e implantar un método para evaluar los riesgos para la salud de los trabajadores debidos a su exposición ocupacional a las radiaciones ionizantes en la industria de los fertilizantes fosfatados y a la vez, desarrollar métodos adecuados para la prevención y protección y así poder reducir el nivel de exposición a que están sometidos.

Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Identificar las fuentes naturales de radiación ionizante presentes en la industria de los fertilizantes.
2. Estudiar los efectos en la salud debido a la exposición a radiaciones ionizantes basándonos en los estudios epidemiológicos existentes y en la bibliografía conocida.
3. Estudiar la legislación, las normas y las recomendaciones internacionales sobre la protección de los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes.
4. Recoger y estudiar información de actividades económicas en Portugal donde existan elementos radiactivos naturales con suficiente potencial para dañar la salud de los trabajadores.
5. Estudiar y medir los niveles de exposición a radiaciones alfa, beta y gamma en los lugares de trabajo en una fábrica de procesamiento de fosfatos (ácido fosfórico y fertilizantes).
6. Estudiar y medir los niveles de exposición al radón y a sus descendientes radiactivos en los lugares de trabajo y ver si hay relación entre el radón y la existencia de polvo en el aire en esos mismos lugares.
7. Identificar los residuos industriales de fosfatos con potencial radiactivo y estimar los niveles de radiactividad asociados y el riesgo potencial para los trabajadores que los manipulan.
8. Desarrollar e implementar un método de simulación en ordenador que permita, en fase de diseño de futuras instalaciones, predecir los niveles de radiaciones ionizantes que puedan ocurrir y así minimizar la exposición futura de los trabajadores a dichas radiaciones.
9. Proponer medidas de prevención y de protección, tanto colectivas como individuales y así minimizar el riesgo para la salud de los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes.

10. Ayudar a abrir nuevos caminos de investigación que permitan profundizar este tema donde existe un gran campo abierto para nuevas investigaciones científicas.

### **Hipótesis a desarrollar**

En este trabajo se parte de una propuesta inicial de que cualquier dosis de radiación ionizante, por baja que sea, puede provocar daños en la salud de los trabajadores expuestos a ellas.

Así, en términos de prevención de los riesgos para la salud de los trabajadores, se sigue el principio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) de que las exposiciones a radiaciones ionizantes deben ser lo más bajas posibles.

En ese sentido, se estudian las siguientes hipótesis de trabajo:

1. Existen niveles elevados de exposición a radiaciones ionizantes en muchos trabajadores de industrias de fertilizantes fosfatados.
2. En la industria de fertilizantes fosfatados siempre existen algunos trabajadores expuestos a niveles altos de radiación ionizante alfa y gamma.
3. Siempre hay un riesgo elevado para la salud de los trabajadores que estén expuestos a radiación alfa debido a la inhalación de radón y sus descendientes radiactivos (polonio, bismuto y plomo).
4. Hay una relación perfectamente demostrable entre la inhalación de radón y sus descendientes radiactivos y el aumento de la tasa de incidencia de cáncer pulmonar.
5. También existe una relación de los expuestos a la inhalación de radón, hábitos tabáquicos y exposición a otros contaminantes como el silicio y los asbestos que potencian significativamente el cáncer pulmonar.
6. Se pueden implantar medidas técnicas y organizativas eficaces para controlar la exposición laboral a radiaciones ionizantes en los locales de riesgo.
7. Por consiguiente, es necesario desarrollar y llevar a cabo políticas de prevención y de protección de los trabajadores expuestos a dosis de radiación de origen natural, ya sea por radiación externa gamma, inhalación, ingestión y absorción de polvo radiactivo o por exposición al radón y a sus descendientes radiactivos.
8. El método para la evaluación de los riesgos, aplicado en el caso del estudio realizado en Portugal, y las medidas de prevención y de protección desarrolladas podrán ser aplicados, con pocos ajustes, a otras industrias no nucleares y en todos los países.

### **Efectos de la radiactividad sobre la salud**

Las radiaciones ionizantes están constituidas tanto por radiaciones electromagnéticas de alta energía, de más de 10 keV, (rayos gamma y rayos X) como por radiación corpuscular o partículas (rayos alfa y beta) que son capaces de inducir, ya sea directa o indirectamente, la formación de iones. La ionización que resulta altera químicamente los átomos y las moléculas de los tejidos vivos, y así puede causar cambios celulares.

La legislación portuguesa (Decreto-Lei nº 222/2008) define como "radiación ionizante" la transferencia de energía en forma de partículas u ondas electromagnéticas con una longitud de onda igual o inferior a 100 nm o una frecuencia igual o mayor a  $3 \times 10^{15}$  Hz capaz de producir iones directa o indirectamente.

La misma ley indica, en lo que respecta a la exposición ocupacional a fuentes de radiación de origen natural, que los trabajadores que realicen trabajos que impliquen la exposición a fuentes naturales de radiación ionizante, con una dosis anual efectiva superior a 1 mSv, deben ser considerados trabajadores expuestos, aplicándoseles todos los requisitos de vigilancia, de seguimiento y de protección, indicados en la referida legislación, frente a las radiaciones ionizantes.

Algunos de los lugares de trabajo con riesgo de exposición, referidos en dicha legislación son los balnearios termales, las cuevas, las minas, los lugares de trabajo subterráneo y otros lugares en los que se pueda alcanzar una dosis efectiva anual superior a 1 mSv.

Además la misma legislación define la radiación ionizante como un agente físico que puede inducir daños en la salud humana, siendo los más frecuentes la muerte celular, la atrofia y daños en los tejidos, arrugas en la piel, cataratas, náuseas, alteraciones gástricas, hemorragias e incluso muerte. Los cambios en la estructura celular pueden dar lugar a la aparición de tumores, alteraciones a nivel celular, particularmente en las cadenas de ADN, con las consiguientes alteraciones cromosómicas

Los efectos de la exposición a dosis bajas de radiaciones ionizantes (efectos estocásticos) son, a menudo, observables sólo varios años después de la exposición, y por consiguiente es difícil establecer una relación clara de causa-efecto y definir los límites seguros de exposición.

Cabe señalar que el hombre está y ha estado, desde siempre, sometido a la radiación ionizante que proviene de diversas fuentes naturales. Llega desde el espacio exterior en forma de rayos cósmicos y está presente también en la atmósfera debido a las emisiones de radón, gas radiactivo, y de sus descendientes radiactivos (polonio, bismuto y plomo radiactivo).

Los isótopos radiactivos que ha lugar en la naturaleza penetran y permanecen en todos los seres vivos. El mismo hombre es una fuente de radiactividad, ya que, el cuerpo humano contiene potasio-40 ( $^{40}\text{K}$ ), un isótopo radiactivo que hace que en un adulto ocurran cerca de 3000 desintegraciones atómicas por segundo (60 Bq / kg). Del mismo modo, todos los seres vivientes de este planeta se adaptaron de forma natural a la presencia de radiación ionizante.

Los organismos vivos expuestos a pequeñas dosis de radiación pueden no mostrar, de inmediato, ningún efecto biológico visible, los cuales pueden aparecer mucho tiempo después de la exposición (efectos biológicos tardíos); estos efectos son conocidos como efectos estocásticos (probabilísticos) de la radiación. Sin embargo, cuando las dosis son altas, pueden aparecer de inmediato daños visibles en los tejidos y órganos, estos son conocidos como efectos deterministas o inmediatos de la radiación.

En este trabajo se recoge fundamentalmente información sobre los efectos observables en la salud derivados de la exposición a pequeñas dosis de radiactividad de origen natural, por lo que se examinaron los trabajos más importantes, como los realizados en el norte de Rusia, donde se investigaron áreas con una contaminación radioactiva significativa por radio y uranio.

En la República de Komi (Rusia) se observaron consecuencias negativas en los animales y en plantas presentes en las zonas con altos niveles de radiactividad natural. Los efectos observados, más significativos, fueron un aumento del nivel de las mutaciones

cromosómicas y genéticas, procesos destructivos en los tejidos internos de los animales, trastornos en la reproducción y posterior reducción de su viabilidad. Sin embargo, se observaron procesos de compensación que permiten a las plantas y a los animales sobrevivir en estas condiciones adversas, sin que se observasen signos de adaptación.

Por el contrario en la República de Saja (Yakutia), se observó en diferentes especies de plantas que habitan en una región con un alto nivel de radiactividad natural, la estimulación del proceso de crecimiento, la fotosíntesis, la síntesis de antioxidantes endógenos de bajo peso molecular y la respuesta adaptativa.

Las evidencias reflejan un escenario complejo en los cambios micro-evolutivos que se producen en poblaciones de plantas y de animales que viven en áreas con altos niveles de radiactividad natural.

### **Tipos de exposición**

La exposición a la radiación ionizante puede ser externa o interna. La exposición a la radiación externa se produce cuando la fuente de radiación está fuera o es exterior al cuerpo humano.

Un ejemplo de este tipo de exposición ocurre cuando una fuente de radiación externa como un generador de rayos X o un medidor de densidad del suelo (emisor de radiación gamma) irradia el cuerpo humano. Otro ejemplo, analizado con todo detalle en este trabajo, es la exposición a la radiación gamma causada por materias primas tales como la fosforita que contiene concentraciones significativas de uranio. En este tipo de exposición la irradiación cesa inmediatamente cuando la fuente de radiación se aleja o se antepone un blindaje.

La exposición a la radiación interna ocurre cuando el material radiactivo entra en el cuerpo a través de la piel lesionada, cuando se ingiere, se bebe o se inhala material contaminado. Un ejemplo de dicha exposición es la radiación alfa que se produce en el aparato respiratorio cuando hay una inhalación de gas radón y/o de polvos radiactivos con cantidades significativas de uranio o de radio.

Un ejemplo ilustrativo de envenenamiento por ingestión de una sustancia radiactiva es el caso del ex espía ruso Alexander Litvinenko, cuya muerte en 2006 estuvo relacionada con la ingestión de una pequeña dosis de polonio-210 ( $^{210}\text{Po}$ ). Es un elemento radiactivo que existe en la naturaleza en cantidades muy pequeñas y que emite partículas (radiación alfa) capaces de dañar los tejidos y órganos internos. Esta sustancia es muy difícil de identificar por los médicos cuando se ingiere pero la Agencia de Protección de la Salud de Gran Bretaña confirmó que fue encontrada en la orina de Litvinenko una emisión significativa de radiación alfa probablemente emitida por polonio-210.

### **Efectos de la radiactividad en el cuerpo humano**

La radiación ionizante tiene la capacidad de excitar y/o ionizar átomos y moléculas en los tejidos, desplazando electrones de sus órbitas. Los daños en los tejidos vivos expuestos resultan de la transferencia de energía hacia los átomos y las moléculas constituyentes de la estructura celular

De acuerdo con el conocimiento actual, la excitación y la ionización de las moléculas debido a la radiación ionizante puede dar lugar a los siguientes efectos en los tejidos biológicos:

- producir radicales libres;
- romper enlaces químicos;

- producir nuevas conexiones químicas y conexiones cruzadas entre macromoléculas;
- dañar las moléculas que regulan los procesos celulares vitales, tales como el ADN, ARN y las proteínas.

Se sabe que una célula puede reparar ciertos niveles de daño celular. En dosis bajas, como las recibidas todos los días, debidas por ejemplo al fondo radiactivo natural, los daños en las células se reparan rápidamente no provocando riesgo para la salud.

Niveles más altos de exposición, dan lugar a la muerte celular. En dosis extremadamente altas, las células muertas no pueden ser remplazadas con la suficiente rapidez, y los tejidos dejan de funcionar, con un gran riesgo para la salud.

### **Sensibilidad de los tejidos**

En general, la sensibilidad de los tejidos a la radiación ionizante presenta las siguientes características:

- es directamente proporcional a la tasa de proliferación de sus células;
- es inversamente proporcional al grado de diferenciación celular.

Por lo tanto, podemos ordenar los tejidos y órganos desde la perspectiva de su radio sensibilidad de los más sensibles a los menos sensibles de la siguiente manera: sangre, órganos reproductores, piel, huesos, dientes, músculos y sistema nervioso. De igual modo, un embrión en desarrollo es más sensible en las primeras etapas de diferenciación y un feto es más sensible a la radiación en la etapa inicial que en la etapa final. Esto requiere un cuidado especial en la prevención de la exposición en las mujeres embarazadas.

### **Efecto cancerígeno**

El efecto cancerígeno de la radiación se observa por primera vez en el siglo XX en los primeros trabajadores expuestos a altos niveles de radiación en los que se desarrolló cáncer de piel y leucemias (Upton et al., 1986). En términos laborales están bien documentados los casos de los pintores de esferas de relojes y de instrumentos de aviación que utilizaban pinturas radiactivas a base de torio<sup>2</sup> y los casos de mineros que trabajaron en las minas ricas en radio.

En el caso de los mineros, las consecuencias de la radiactividad sobre la salud de los trabajadores fueron observadas y estudiadas por Georgius Agricola<sup>3</sup> en 1556 (hace más de 450 años). Agricola, refiere en su libro "*De Re Metallica*", que ocurría una gran mortalidad entre los mineros que explotaban minas en la Europa central y dice literalmente "los mineros son a veces asesinados por el aire pestilente que respiran"<sup>4</sup>. Cuatro siglos después, se hace constancia que estas minas son muy ricas en radio que es el elemento progenitor del radón.

---

<sup>2</sup> Era una práctica muy común entre los pintores radioluminiscentes chupar los pinceles para afilarlos antes de sumergirlos en la tinta con radio y así pintar más fácilmente los pequeños detalles. Esto provocó una acumulación de radio radiactivo en la boca y la garganta de los pintores que más tarde llegaron a padecer de cánceres mortales.

<sup>3</sup> Su nombre original es Georg Pauer (1494-1555) fue un médico y erudito alemán conocido como el "padre de la mineralogía", nació en Glauchau en Sajonia y es conocido por su libro "*De Re Metallica*" (Sobre la naturaleza de los metales).

<sup>4</sup> "*De Re Metallica*" es el primer libro importante sobre minería, escrito en latín por Georgius Agricola, un médico de una comunidad próspera minera y de fundición de hierro en Bohemia, en el centro de Europa, publicado en 1556 y profusamente ilustrado. Fue traducido al inglés en 1912 por Herbert C.

Los tumores benignos y malignos inducidos por irradiación se caracterizan por tardar años o décadas en manifestarse y no presentan ninguna característica conocida que permita distinguirlos de los producidos por otras causas.

En general, sólo es posible detectar la inducción de tumores en las personas después de una exposición a dosis de radiación relativamente grande (más de 0,5 Sv). Las consecuencias y tipos de cáncer inducidos varían significativamente con la edad, el sexo de los expuestos y su susceptibilidad individual a la radiación (NAS (National Academy of Sciences), 1990).

Por otro lado, hay que tener en cuenta los efectos aditivos, sinérgicos o antagónicos de la radiación ionizante en la presencia de otras sustancias tóxicas, irritantes o carcinógenas (UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 1994). Un ejemplo de ello es la exposición ocupacional a la radiación ionizante en la presencia de sustancias como el amianto, sílice, lejías y compuestos orgánicos solubles.

### **Efectos inmediatos y retardados de la exposición.**

Los efectos de la radiación pueden ser clasificados en términos del tiempo de aparición de los síntomas de la enfermedad como sigue:

- efectos inmediatos o tempranos: efectos tales como quemaduras y enfermedades que se producen después de la exposición a altas dosis de radiación en un período corto de tiempo.
- efectos retardados o tardíos: efectos tales como la formación de cataratas y la inducción de cáncer que pueden aparecer meses o años después de la exposición a la radiación.

---

Hoover, un joven ingeniero de minas que se graduó de la Universidad de Stanford y se convirtió en presidente de los Estados Unidos en el período 1929-1933.

## Efectos inmediatos de la exposición

Dosis altas de radiación gamma, aplicadas durante cortos períodos de tiempo, en el cuerpo de adultos sanos puede producir efectos tales como el cambio de la composición de la sangre, fatiga, diarrea, náuseas e incluso la muerte. Estos efectos surgen en cuestión de horas, días o semanas, dependiendo de la dosis recibida. Los efectos de dosis más altas suelen producirse rápidamente como se puede observar el Cuadro 1 donde se muestran los efectos que resultan en la salud debido a las dosis de radiación recibidas.

**Cuadro 1- Efectos de la exposición a altas dosis de radiación**

Efecto	Dosis (Sv)	Dosis (rem)
Cambio en los recuentos sanguíneos	0,5	50
Vómito (umbral)	1	100
Mortalidad (umbral)	1,5	150
LD <sub>50/60</sub> (*) (con el apoyo médico mínimo)	3,2 - 3,6	320 - 360
LD <sub>50/60</sub> (*) (con apoyo médico adecuado)	4,8 - 5,4	480 - 540
100% Mortalidad (con el mejor tratamiento médico existente)	8	800

(\*) LD<sub>50/60</sub> es la dosis con la cual 50% de las personas expuestas mueren en 60 días

(Adaptado de NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements), 1989)

## Exposición parcial del cuerpo

Los efectos agudos anteriormente indicados se producen cuando se aplica una dosis alta de radiación en todo el cuerpo. Si sólo una parte del cuerpo es irradiada, como puede suceder en un tratamiento médico los efectos son significativamente diferentes. Por ejemplo, una dosis de 5 Sv aplicada en todo el cuerpo puede causar la muerte, mientras que la misma dosis aplicada a la piel sólo irá causar la pérdida del pelo y cambios en la piel.

A título de ejemplo, se presenta en la Figura 3 una fotografía de una lesión en el muslo inducida por una dosis elevada de radiación que se produjo en el accidente radiológico de Goiânia, Brasil (IAEA (International Atomic Energy Agency), 1988). El accidente radiológico de Goiânia fue un episodio grave de contaminación por radioactividad que ocurrió en Brasil en el año de 1987. La contaminación radiactiva comenzó el 13 de septiembre de 1987 cuando un aparato de radioterapia fue robado de las instalaciones de un hospital abandonado, ubicado en la parte central de la ciudad y posteriormente fue depositado en una chatarrería para reciclaje<sup>5</sup>.

<sup>5</sup>La contaminación en Goiânia fue causada por una cápsula que contenía clorato de cesio - una sal obtenida a partir del radioisótopo 137 del elemento cesio. La cápsula de cesio fue retirada del equipo médico y más tarde abierta en un depósito de chatarra para reciclaje de plomo.



**Figura 3- Lesión en el muslo inducida por radiación unos 25 días después de la irradiación**

(Fuente: The Radiological Accident in Goiânia (IAEA (International Atomic Energy Agency), 1988))

## **Efectos tardíos de la exposición a la radiación ionizante**

### **Cataratas**

La formación de cataratas es inducida cuando una dosis mayor que 2,3 Sv se aplica en la lente del ojo, las cataratas debidas a la radiación pueden tardar meses o años en producirse.

### **Cáncer**

Los estudios hechos en personas expuestas a dosis altas de radiación mostraron un riesgo significativo de cáncer inducido por esas dosis. Los cánceres asociados a la radiación incluyen la leucemia, el mieloma, el cáncer de mama, el cáncer de pulmón y el cáncer de piel. Los cánceres inducidos por la radiación pueden tardar 10-15 años o más en diagnosticarse.

El riesgo de la producción de cáncer en los trabajadores expuestos a radiación depende de varios factores como la cantidad y tipo de radiación, edad, sexo, susceptibilidad individual, si la exposición se produjo en corto o largo período de tiempo y la presencia de sustancias que puedan reforzar su efecto inductor.

En dosis bajas de radiación, existe igualmente un aumento mensurable del riesgo de padecer cáncer, confirmado por muchos estudios epidemiológicos publicados sobre este tema y que están indicados en la bibliografía.

Estudios recientes demuestran la existencia de un efecto colateral en células no directamente irradiadas (*Bystander effects in irradiated cell populations*) según el cual también pueden producirse alteraciones genéticas en células no directamente irradiadas por radiación alfa. Estas evidencias podrán ser de considerable importancia en este estudio debido a los posibles efectos carcinogénicos producidos por dosis muy bajas de radiación ionizante, como es la emisión de partículas alfa por el gas radón y por sus descendientes radiactivos (Little, 2000).

---

El propietario de la chatarrería expuso al medio ambiente 19,26 g de clorato de cesio-137 (CsCl), una sal muy similar a la sal de mesa (NaCl), pero que se ilumina de azul en la oscuridad. En total 112.800 personas fueron expuestas a los efectos de la radiación del cesio.

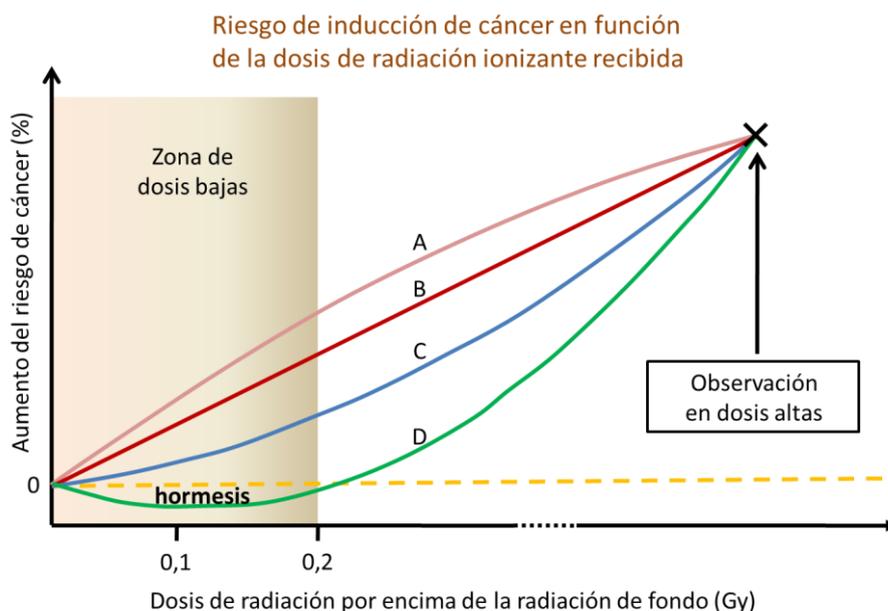
## Riesgo de inducción de cáncer con dosis bajas de radiación

La inducción de cáncer por acumulación de dosis bajas de radiación ionizante en los tejidos u órganos tiene una característica estocástica, con una probabilidad baja de ocurrir. Sin embargo, considerando la gravedad de la enfermedad inducida se puede concluir que el riesgo resultante de la exposición de los trabajadores a dosis bajas de radiación ionizante puede ser significativo.

Mucho de lo que se sabe sobre el efecto de la radiación sobre la salud humana se debe a los estudios efectuados en personas expuestas a tratamientos médicos con radiaciones; a los sobrevivientes del bombardeo atómico de Japón y más recientemente a las personas expuestas a la radiación en el accidente de la central nuclear de Chernóbil (Ucrania) en 1986. Del accidente en la central nuclear Fukushima que ocurrió en Japón en el año 2011, el peor que se ha vivido desde la catástrofe de Chernóbil, se podrá recoger en el futuro mucha información adicional.

El estudio ICRP (International Commission on Radiological Protection, 2005) trata de resumir las evidencias científicas relativas a la cuantificación del riesgo de cáncer asociado a exposiciones por debajo de los límites de dosis actualmente establecidos para la protección de los trabajadores (20 mSv/año), protección del público en general (1 mSv/año) y protección frente a la radiación de origen natural (1 mSv/año). Según este estudio, es adecuada la adopción de un modelo de dosis-respuesta lineal sin umbral LNT (*Linear No-Threshold*), representado en la curva B de la Figura 2, en términos de protección radiológica de los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes de origen natural.

Sin embargo, todavía existen muchas incertidumbres por lo que muchos investigadores (CPEP (Contemporary Physics Education Project), 2003) proponen otras curvas dosis-respuesta que intentan relacionar el riesgo de cáncer con la radiación recibida como se muestra para fines ilustrativos en la Figura 4.



**Figura 4 - Riesgo de inducción de cáncer en función de la dosis de radiación ionizante recibida**

(Ilustración por el autor)

donde,

La curva A - Riesgo en dosis bajas mayores de lo previsto en el modelo lineal.

La curva B - Se asume una relación lineal dosis-respuesta.

La curva C - Se supone una curva lineal-cuadrática en la cual el riesgo es menor para dosis bajas.

La curva D - proporciona un área donde el efecto de bajas dosis de radiación es beneficioso (designado como hormesis).

Los estudios epidemiológicos llevados a cabo para determinar cómo varía el riesgo de cáncer debido a la exposición a bajos niveles de radiación no han llegado todavía a conclusiones definitivas hasta la fecha.

No fue posible demostrar que las poblaciones que habitan en zonas donde hay niveles altos de radiación de fondo presenten aumentos en la incidencia de cáncer, que pueda ser asignada a ella (NAS (National Academy of Sciences), 1990 y UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 1994). Algunos estudios sugieren además, una relación inversa entre los niveles de radiación de fondo y las tasas de incidencia de cáncer, lo que algunos investigadores interpretan como una demostración de la existencia de efectos beneficiosos (horméticos) resultantes de la exposición a niveles muy bajos de radiación, que suelen ser explicados por las respuestas adaptativas de ciertos sistemas celulares (UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 1994).

Se puede concluir a partir de los datos disponibles que en la actualidad menos del 3% de los cánceres en la población son atribuibles a la radiación natural de fondo (NAS (National Academy of Sciences), 1990 e IARC (International Agency for Research on Cancer), 1994a). Por otro lado, aproximadamente el 10% de los cánceres de pulmón se pueden atribuir al radón en interiores (Lubin, et al., 1997). Este es precisamente uno de los temas importantes para profundizar en este trabajo.

### **La exposición prenatal a la radiación**

Los tejidos en fase de diferenciación y proliferación rápida son más susceptibles al daño provocado por radiación. En consecuencia, la exposición a la radiación puede causar problemas de desarrollo, especialmente en el desarrollo del cerebro cuando un embrión / feto sufre una exposición prenatal.

Las condiciones de desarrollo prenatal asociadas a la exposición a radiación, incluyen bajo peso al nacer, microcefalia, retraso mental y otros problemas neurológicos. Estos efectos están relacionados con la fase en que se produce la exposición. La dosis umbral capaz de desarrollar tales anomalías es de aproximadamente 10 rem (0,1 Sv).

Son todavía inconcluyentes las evidencias de que el embrión / feto en desarrollo es más sensible a los cánceres producidos por la radiación; sin embargo, es prudente asumir que hay una mayor sensibilidad.

## Vías de penetración de la radiación en el cuerpo

Teniendo en cuenta la capacidad de penetración de los varios tipos de radiación, gamma, alfa y beta como se indica en la Figura 5, se analizó las posibles vías de penetración de las radiaciones en el cuerpo humano para el caso específico de la contaminación debida a la exposición de los trabajadores a la fosforita, sus productos derivados y al radón.

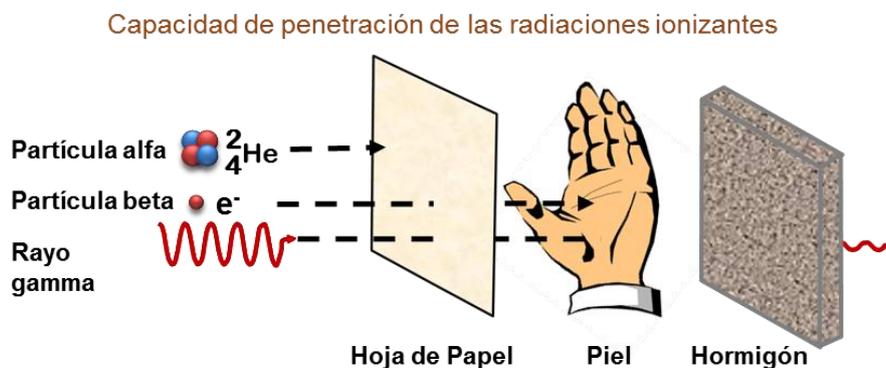


Figura 5 - Capacidad de penetración de las radiaciones ionizantes

(Ilustración del autor)

El cuerpo humano puede sufrir una contaminación radiactiva a través de la exposición de los tejidos u órganos a radiaciones ionizantes gamma o X provenientes del exterior. Para calcular la dosis de radiación absorbida por el cuerpo hay que tener en cuenta los factores de ponderación para cada tejido u órgano ( $w_T$ ) como se indica en la Figura 6.

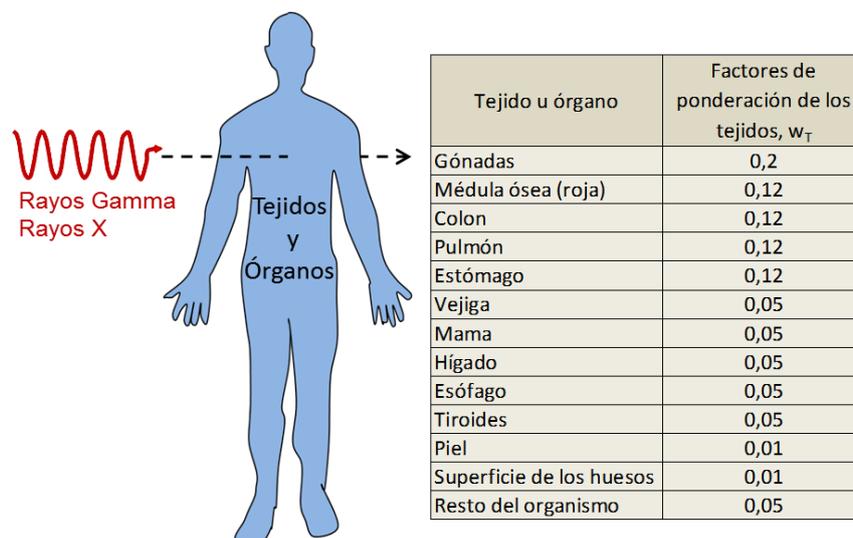
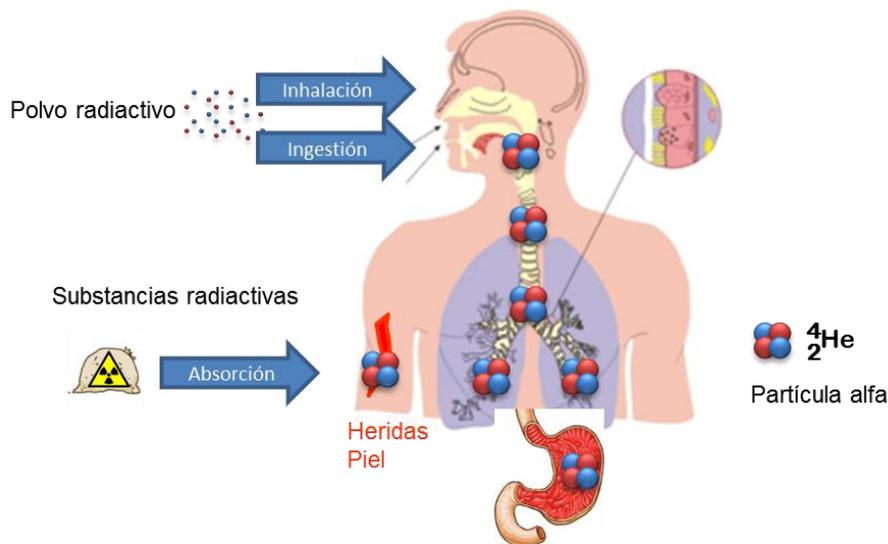


Figura 6 - Penetración de la radiación externa gamma en el cuerpo

(Ilustración del autor)

La penetración de la radiación alfa en el cuerpo puede tener lugar por inhalación de polvos y gases radiactivos, por ingestión de sustancias radiactivas o por absorción de sustancias radiactivas por la piel y heridas abiertas como se indica en la Figura 7.



**Figura 7 - Penetración de la radiación alfa en el cuerpo**

(Ilustración por el autor)

El riesgo de contaminación por inhalación de partículas radiactivas a través de las vías respiratorias puede ser muy significativo en ambientes contaminados con partículas radiactivas en forma de polvo fino, dependiendo, en gran medida, del tamaño de las partículas y de su concentración en el aire. El aparato respiratorio se divide en tres grandes regiones: la primera región superior incluye la nariz, la boca, la nasofaringe, orofaringe, laringe y la epiglotis en las cuales es posible el depósito de partículas, cuyo diámetro aerodinámico equivalente es de 10 a 50  $\mu\text{m}$ ; la segunda región que incluye la tráquea y los comienzos bronquiales, donde es posible el depósito de partículas entre 5 y 10  $\mu\text{m}$ ; y la tercera región que incluye los bronquios respiratorios, los conductos alveolares, las bolsas alveolares y alvéolos donde es posible el depósito de partículas menores de 2,5  $\mu\text{m}$ .

En el caso del radón, la penetración de la radiación en el cuerpo ocurre principalmente por inhalación del gas radiactivo en su proceso de decaimiento radiactivo. A medida que el radón experimenta decaimiento radioactivo, emite principalmente partículas alfa de alta energía, las que constituyen una amenaza para la salud de los trabajadores expuestos.

Debido a que los descendientes del radón (polonio, bismuto y plomo) a menudo se encuentran adheridos al polvo existente en el aire, el trabajador se expone principalmente al respirar el polvo; dependiendo del tamaño, las partículas radioactivas pueden depositarse en los pulmones y suministrar una dosis de radiación alfa de alta energía al tejido pulmonar como se indica en la Figura 8.

## Vía de penetración del radón en el cuerpo

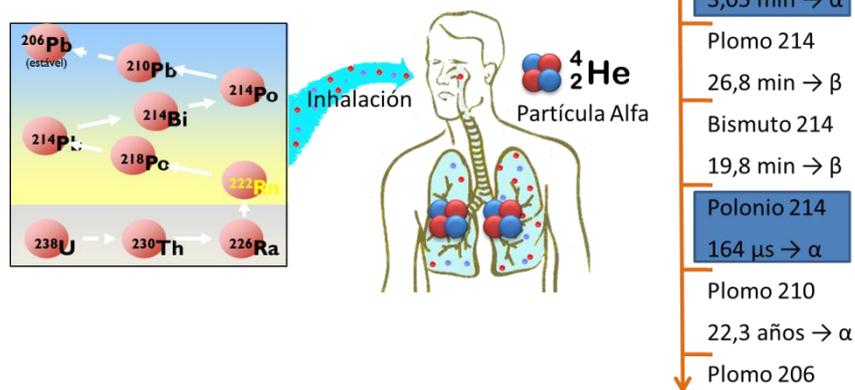


Figura 8 - Vía de penetración del radón en el cuerpo y su decaimiento

(Ilustración del autor)

En la misma figura se presenta una de las tres cadenas de decaimiento del radón donde se puede observar que el riesgo más importante se debe a la radiación alfa emitida por los productos del decaimiento del radón de vida corta, como son el  $^{218}\text{Po}$  con 3,5 s y el  $^{214}\text{Po}$  con 164 μs.

## **B - Antecedentes**

En este trabajo se analiza un conjunto de estudios epidemiológicos llevados a cabo por distintos autores, fundamentalmente el estudio realizado por la *International Agency for Research on Cancer* (IARC) en 15 países distintos, con un objetivo claro de estimar el riesgo de cáncer después de la exposición prolongada a bajas dosis de radiación ionizante y así revisar las bases científicas de las actuales normas de prevención y protección.

También se examina un estudio sobre la morbilidad y mortalidad por cáncer en los trabajadores de fosfatos en los Estados Unidos y el riesgo de cáncer de pulmón asociado a la industria de fosfatos.

Asimismo, se examina el impacto que la industria de fertilizantes fosfatados tiene en el medio ambiente, sobre todo en lo que respecta a gases tóxicos liberados al medio ambiente, contaminación de suelos por residuos de fosfoyeso y la liberación de radón hacia la atmósfera.

Se efectúa una síntesis del actual conocimiento sobre la exposición de los trabajadores a niveles bajos de radiación ionizante apoyándonos en los estudios epidemiológicos realizados a nivel internacional. Basados en la revisión bibliográfica se presentan algunos datos relativos a los efectos negativos que se detectan en la salud de los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes.

Se analizan las implicaciones legales de las directivas comunitarias y de la legislación portuguesa en lo que respeta a la protección radiológica de los trabajadores, a la evaluación del riesgo de exposición y a la definición de las medidas de prevención y de protección más adecuadas; al mismo tiempo, se indican algunos aspectos significativos del *Decreto-Lei* nº 222/2008 que actualmente es la referencia legislativa más importante en términos de protección radiológica de los trabajadores en Portugal.

Finalmente se mencionan los límites de exposición, actuales y futuros, aprobados en varios países europeos para limitar la exposición al radón en los locales de trabajo.

### **Trabajos Anteriores**

#### **Riesgo de cáncer inducido por dosis bajas de radiación**

El estudio realizado por la International Agency for Research on Cancer (IARC) "Risk of cancer after low dose of ionizing radiation: retrospective cohort study in 15 countries" (Cardis et al., 2005) tuvo como objetivo estimar directamente el riesgo de cáncer después de una exposición prolongada a dosis bajas de radiación ionizante, y así revisar las bases científicas en que se basan las normas de protección actuales. Es uno de los mayores estudios realizados, hasta la fecha, entre los trabajadores de la industria nuclear.

Se trata de un estudio internacional retrospectivo de mortalidad por cáncer. El estudio fue realizado en trabajadores de la industria nuclear de 15 países, con una participación de 407.391 trabajadores monitorizados para medir la radiación externa recibida.

El estudio muestra un aumento en la mortalidad por cáncer (excluida la leucemia) y para la leucemia (excluyendo la leucemia linfocítica crónica) por cada sievert (Sv) de radiación recibida. Los resultados de este estudio indican un riesgo excesivo de cáncer (excluyendo la

leucemia) de 0,97 por cada Sv de dosis de radiación ionizante recibida (95% de confianza en el intervalo de 0,14 a 1,97). El exceso de riesgo relativo de leucemia (excluyendo la leucemia linfocítica crónica) fue de 1,93 por Sv de dosis de radiación ionizante recibida.

Con base en este estudio, del 1 al 2% de las muertes por cáncer entre los trabajadores puede ser atribuido a la radiación. En conclusión el estudio muestra que hay un aumento del riesgo de cáncer incluso para dosis bajas de radiación ionizante.

### **Morbilidad y Mortalidad por cáncer en los trabajadores de fosfatos**

Los riesgos de cáncer pulmonar asociados a la manipulación de fosfatos han sido identificados y descritos en diversos estudios (Fleischer, 1981); (Scholten & Timmermans, 1996). Los trabajos de mineralización y todo el procesamiento de los fosfatos producen grandes cantidades de polvo y por consiguiente la exposición a la radiación externa gamma y a la radiación alfa proveniente de los descendientes radiactivos del gas radón.

Este estudio que fue realizado por el *Departments of Epidemiology and Environmental Health Sciences da Johns Hopkins School of Hygiene and Public Health, Baltimore, Maryland*, (Block et al., 1988), incluye 3451 trabajadores masculinos, que trabajaron en una empresa de fosfatos en Florida durante más de 6 meses, entre los años 1950 a 1979.

Se estudiaron solamente los trabajadores expuestos a niveles elevados de polvo, humos y radiación, localizados en las áreas de secado y expedición, producción de químicos, fertilizantes y mantenimiento.

## C - Materiales y métodos

En el capítulo materiales y métodos, se desarrolló una metodología de trabajo para evaluar los riesgos radiológicos presentes en la industria de fertilizantes y se definieron los procedimientos para la medición de la actividad radiactiva de la roca de fosfato y de sus productos derivados, para la medición de la radiación externa gamma, para la medición de la concentración de polvo en el aire, para la medición de la concentración de polvo radiactivo y para la medición de la concentración de radón en espacios poco ventilados.

Se estudió la planta de producción de fertilizantes fosfatados de la empresa ADP, donde se hicieron los trabajos de campo y se analizaron los riesgos radiológicos presentes en los procesos de fabricación en las unidades de producción de fosfatos, superfosfatos, fertilizantes compuestos granulados, líneas de granulación y la unidad de ensacado de fertilizantes compuestos. Se identifican los locales donde puede haber importantes niveles de exposición a la radiación ionizante, por la manipulación de materias primas naturales con isótopos radiactivos.

Un detalle de las mediciones de radiación gamma realizadas por el autor en las instalaciones industriales de ADP puede ser observado en la Figura 9.



**Figura 9 - Medición de la radiación gamma en el almacén de los superfosfatos**

(Fotografía del autor)

También se realizó una revisión de los equipos disponibles en el mercado para la medición de la radiación, sus principios de funcionamiento, limitaciones y su adecuación para llevar a cabo las mediciones necesarias. Se midieron los niveles de radiación alfa, beta y gamma y la concentración de radón en distintos lugares de trabajo y las concentraciones de polvo en el aire.

Fueron colocados 6 detectores en las instalaciones industriales de ADP para medir la concentración de radón. Un detalle de la instalación, realizada por el autor, de uno de los

detectores de trazas nucleares para medir la concentración de radón puede ser observado en la Figura 10.



**Figura 10 - Instalación de un detector de trazas nucleares para medir el radón**

(Foto do autor)

Para determinar el riesgo para la salud derivado de la inhalación de polvo radiactivo por los trabajadores y para identificar los lugares donde simultáneamente hay concentraciones elevadas de radón y de polvo se midió la concentración de polvo en el aire con recurso a una bomba de aspiración portátil. El método utilizado consistió en hacer pasar a través de un filtro un caudal de aire establecido. La concentración de partículas suspendidas ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en el lugar de trabajo, se calcula a partir del volumen de aire aspirado y de la cantidad de polvo recolectado en el filtro posteriormente pesado en laboratorio en una balanza de precisión.

La concentración de polvo en aire en función del caudal de aspiración y del tiempo de muestreo, fue calculada de acuerdo con la Ecuación 2.

$$C_i = 10^6(P_f - P_i)/(C_a T_e)$$

**Ecuación 1**

donde,

$C_i$  - Concentración de polvo en el aire [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]

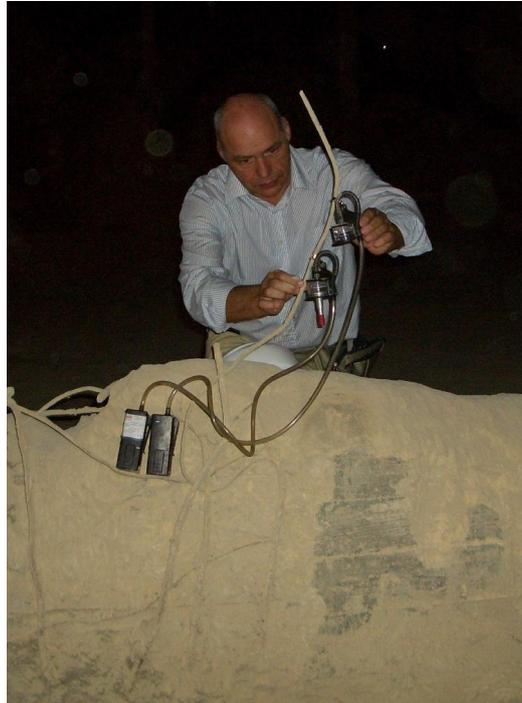
$P_f$  - Peso final del filtro [g]

$P_i$  - Peso inicial del filtro [g]

$C_a$  - Caudal de la bomba de aspiración [l/min]

$T_e$  - Tiempo de muestreo [min]

Para medir la concentración de polvo en el aire en los lugares de trabajo, fueron colocadas 6 bombas de aspiración en las instalaciones industriales de ADP. Un detalle de la instalación, realizada por el autor, de una de las bombas de aspiración puede ser observado en la Figura 11.



**Figura 11 - Colocación de una bomba de aspiración para medir la concentración de polvo**

(Fotografía del autor)

### **Metodología de trabajo**

La metodología de trabajo propuesta y seguida en este estudio consistió esencialmente de los siguientes pasos:

- a) Identificar todos los factores de riesgo radiológicos presentes en la industria de fabricación de fertilizantes fosfatados donde haya una significativa exposición a las radiaciones ionizantes de origen natural.
- b) Conocer con detalle todas las etapas del proceso de producción y así poder identificar los tipos de exposición a radiaciones que puedan estar presentes.
- c) Observar las condiciones de trabajo existentes en las operaciones normales de fabricación y también los trabajos de limpieza, mantenimiento y reparación de equipos.
- d) Identificar y caracterizar los factores de riesgos radiológicos más importantes en las distintas áreas de la fábrica.
- e) Evaluar la exposición de los trabajadores a la radiación gamma externa, al polvo radiactivo inhalado e ingerido y a la radiación de radón.
- f) Estimar la dosis total de radiación ionizante a que los trabajadores puedan estar expuestos correspondiente a la suma de la dosis de radiación externa gamma, de la dosis de radiación proveniente del polvo radiactivo inhalado e ingerido y de la dosis de radiación proveniente del radón y de sus descendientes radiactivos.
- g) Comparar los resultados de las mediciones realizadas con los valores máximos de exposición admisibles referidos en la legislación, normas y bibliografía.

- h) Identificar los trabajadores que puedan ser o estar especialmente sensibilizados y con peligro a pequeñas dosis de radiación ionizante como por ejemplo mujeres embarazadas o trabajadores con problemas de salud anteriores.
- i) Elaborar medidas de prevención eficaces para la protección de la salud de los trabajadores contra los distintos tipos de radiaciones ionizantes.

En el caso del estudio presentado, como esta industria se encuentra en una zona muy sensible a la contaminación desde el punto de vista ambiental y con una gran concentración de personas, se intentó también identificar los impactos negativos de la industria sobre el medio ambiente y sobre la salud pública.

### **Procedimientos operacionales**

Se desarrolló un conjunto de procedimientos operacionales para evaluar los riesgos radiológicos existentes en la industria de fabricación de fertilizantes fosfatados y así alcanzar los objetivos específicos mencionados anteriormente. Los procedimientos operacionales desarrollados en este trabajo fueron los siguientes:

#### **1. Identificar los factores de riesgo derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes**

Este procedimiento consiste en identificar los factores de riesgo para la salud de los trabajadores resultante de la exposición a la radiación ionizante asociada con la actividad industrial de fabricación de fertilizantes fosfatados.

#### **2. Caracterizar en términos radiológicos los productos utilizados (fosforitas y cenizas en los filtros)**

Este procedimiento consiste en medir y analizar en un laboratorio de radiología la actividad radiológica de las materias primas que se manejan y la actividad radiológica de los residuos resultantes del proceso de fabricación. En el caso del estudio presentado los análisis de espectrometría gamma se realizaron en el laboratorio del ITN (Instituto Tecnológico e Nuclear).

#### **3. Caracterizar y medir el campo radiactivo gamma presente**

Este procedimiento consiste en caracterizar y medir el campo radiactivo gamma presente en las instalaciones industriales utilizando un medidor de radiación sensible a la radiación gamma.

#### **4. Identificar y medir los lugares con mayor concentración de polvo radiactivo**

Este procedimiento consiste en medir en los lugares de trabajo la concentración de polvo en el aire, resultante del procesamiento de la roca fosfática, utilizando bombas de succión de aire y posterior pesaje del polvo depositado en los filtros de retención.

#### **5. Medición de la concentración de radón**

Este procedimiento consiste en identificar y medir los lugares donde se pueda hallar concentraciones significativas de gas radiactivo radón, peligroso para la salud de los trabajadores. Se pueden hacer mediciones de corto plazo (que tardan cerca de 5 minutos) con aparatos de medición directa, o mediciones de largo plazo (que tardan de 1 a 3 meses) con detectores de trazas nucleares sensibles a la radiación alfa.

## 6. Estimar la dosis total de radiación ionizante

Este procedimiento consiste en calcular la dosis total de radiación ionizante a la que los trabajadores están expuestos debido al efecto acumulativo de la exposición a la radiación gamma externa, de la absorción de polvo radiactivo por inhalación, ingestión y absorción y de la exposición al radón.

## 7. Evaluar el riesgo y la necesidad de medidas correctivas

Este procedimiento consiste en evaluar el riesgo resultante de la exposición a la radiación ionizante, comparando los valores obtenidos con los valores de referencia recomendados por las organizaciones internacionales y la legislación existente y estableciendo una relación entre los valores de exposición y los riesgos para la salud de los trabajadores.

### Simulación de modelos en ordenador

La protección radiológica frente a la radiación externa puede conseguirse reduciendo la cantidad de material radiactivo presente, colocando blindajes entre la fuente radiactiva y los trabajadores expuestos y alejando tanto como sea posible a los trabajadores de las fuentes radiactivas. Puede también reducirse la exposición, a través de medidas de organización laboral, como minimizando el tiempo de exposición de los trabajadores a las fuentes radiactivas y así limitar la dosis total de radiación recibida por los mismos.

Para la simulación realizada se consideró un trabajador situado en la proximidad de una cantidad significativa de fosforita y expuesto a un campo de radiación gamma como está indicado de forma esquematizada en la Figura 12.

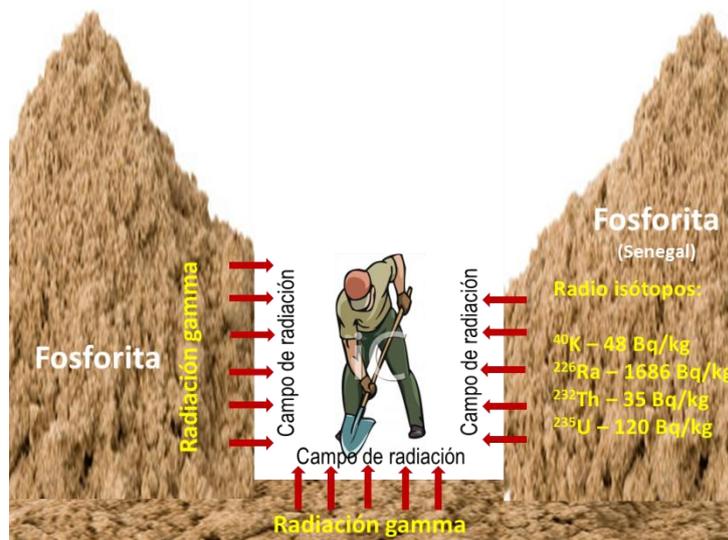


Figura 12 - Campo de radiación considerado para calcular la exposición a la radiación

(Esquema del autor)

Estas variables pueden ser simuladas en ordenador a través de un programa informático que incorpore un modelo adecuado de propagación de la radiación externa gamma, que tenga en consideración las distancias entre las fuentes radiactivas y los trabajadores expuestos, los blindajes (materiales y espesores) y el tiempo previsto de exposición de los trabajadores a esas radiaciones. Se puede de este modo predecir los niveles de exposición a que los trabajadores van a estar expuestos en una hipotética situación futura, simulando

diversos escenarios posibles. Por ejemplo, en una fase de proyecto o remodelación de una instalación fabril se puede minimizar los niveles de exposición, simulando diversos *layouts* y tipos de protección y de este modo escoger las mejores opciones que garanticen la máxima protección de los trabajadores frente a las radiaciones ionizantes gamma.

Para determinar el comportamiento de los factores de protección anteriormente descritos se realizaron las siguientes simulaciones en ordenador:

- Radiación externa gamma recibida en función de la cantidad de fosforita presente y de la forma de almacenamiento de la misma.
- Reducción de la radiación externa gamma recibida en función de la distancia entre la fuente radiactiva y el receptor.
- Reducción de la radiación externa gamma recibida en función del blindaje aplicado y de su espesor.

### Dosis de radiación recibida por los trabajadores

Para estimar la dosis de radiación gamma recibida por los trabajadores, en la simulación realizada en ordenador se consideraron las áreas, distancias y espesores de las capas de fosforita indicados en la Figura 13.



Figura 13 - Dibujo esquemático para simular la exposición del trabajador a la fosforita

(Esquema del autor)

Donde,

$A$  = área de la camada de fosforita con radiación gamma en la dirección del trabajador

$d$  = espesor de la camada de fosforita almacenada

$y$  = distancia entre el trabajador y la capa de fosforita

$A_t$  = Actividad radiactiva - número de núcleos atómicos presentes en la fosforita que se desintegran por segundo; este parámetro fue medido en laboratorio nuclear por espectrometría gamma.

En este estudio se consideró la presencia de fosforita procedente de Senegal su actividad radiactiva fue medida en el laboratorio nuclear del ITN, obteniéndose los valores indicados en la Tabla 1:

Radionuclido	Actividad (mBq/g)	Tasa de dosis (nSv/h)
<sup>40</sup> K	48	134,1
<sup>226</sup> Ra	1686	278,1
<sup>232</sup> Th	35	18,12
<sup>235</sup> U	120	541,4
<b>Total</b>		<b>971,8</b>

**Tabla 1 - Aporte de los radionuclidos presentes en la fosforita para la radiación gamma**

Para el cálculo de la dosis de radiación total presente es necesario sumar la radiación proveniente de cada una de las seis superficies existentes de acuerdo con la expresión indicada en la Ecuación 2.

$$Td_T = \sum_{i=1}^6 Td_i \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

$Td_T$ - Tasa de dosis total [Sv/h]

$Td_i$ - Tasa de dosis de cada una de las caras consideradas [Sv/h]

$i$ - número de superficies consideradas (de 1 a 6)

En el ejemplo presentado se consideró como significativo los aportes de radiación gamma provenientes del suelo y de las superficies laterales (Figura 13), ya que este modelo representa aproximadamente las situaciones prácticas de exposición observadas.

Para el cálculo de la componente de radiación que viene del suelo, se consideró el trabajador en contacto con la fosforita (distancia de 1 cm entre la fuente radioactiva y el receptor), obteniéndose una tasa de dosis de 0,97  $\mu$ Sv/h.

Para el cálculo de la componente de radiación que viene de las superficies laterales de fosforita, se ha considerado el trabajador situado a una distancia de 1 m de la fosforita (distancia de 100 cm entre la fuente radioactiva y el receptor), obteniéndose una tasa de dosis de 0,63  $\mu$ Sv/h.

Sumando los aportes de radiación gamma proveniente de las tres superficies consideradas en el ejemplo se obtuvo,

$$\begin{aligned} \text{Tasa de dosis total} &= \text{componente del suelo} + 2 \times \text{componentes de la pared} \\ &= 0,97 + 2 \times 0,63 = 2,23 \mu\text{Sv/h} \end{aligned}$$

Multiplicando ese resultado por 2000 horas de exposición, se obtiene una dosis anual de unos 4,5 mSv/año, lo que sobrepasa el límite máximo de exposición a radiaciones de origen natural indicada en la legislación (1 mSv/año). Este cálculo es meramente ilustrativo, se

refiere a un caso extremo tanto en términos del número de horas de exposición anual del trabajador como de la distancia del mismo a la fuente radioactiva.

Los valores de tasa de dosis encontrados en la simulación del modelo por ordenador fueran muy semejantes a los valores medidos, por lo que se concluye que el modelo usado para la previsión de la tasa de dosis de radiación externa gamma da resultados adecuados y así su utilización como una herramienta de previsión en fase de concepción de nuevas instalaciones donde esté presente el riesgo de contaminación radioactiva es lógica y adecuada.

### Cantidad de materia-prima almacenada y su almacenamiento

Para calcular la tasa de dosis recibida por los trabajadores expuestos en función del almacenamiento de la fosforita (espesor de la camada de fosforita y área de exposición) y de la cantidad de fosforita almacenada (volumen y peso), se llevo a cabo un conjunto de simulaciones utilizando el programa anteriormente referido. Así, fijando el parámetro área de exposición en  $10 \text{ m}^2$ ,  $100 \text{ m}^2$ ,  $500 \text{ m}^2$  y de  $1000 \text{ m}^2$  se hizo variar el valor del espesor de la pila de fosforita desde 0 a 30 m obteniéndose un conjunto de valores de tasa de dosis usada para construir el gráfico presentado en la Figura 14.

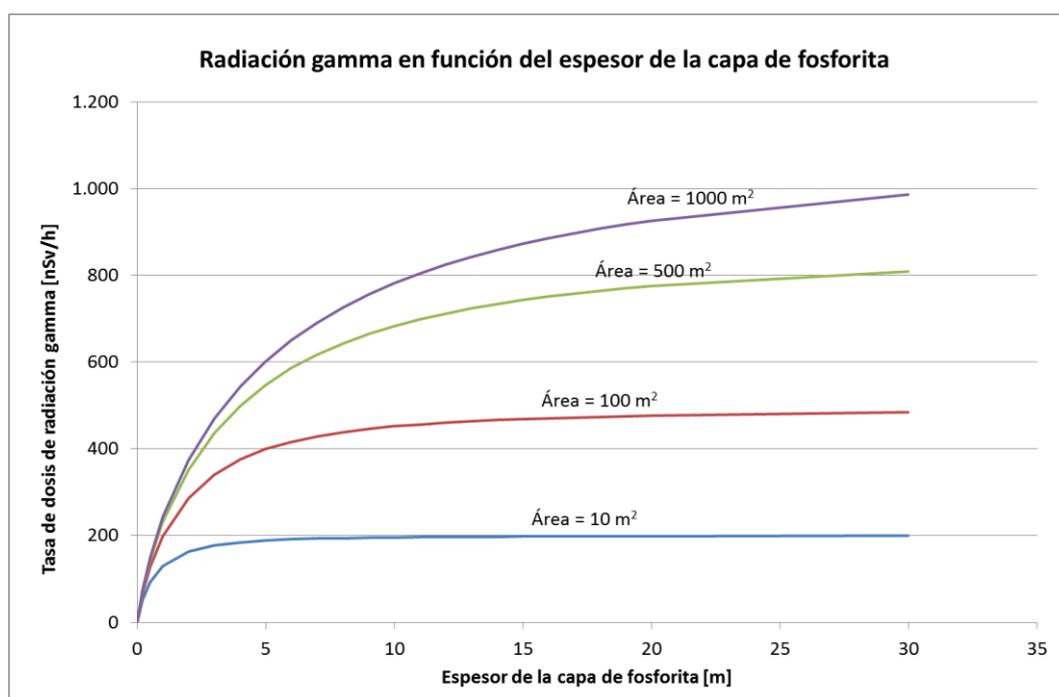


Figura 14 - Radiación gamma en función del espesor de la camada de fosforita

Observando el gráfico, se deduce que para un almacenamiento con una pequeña área de exposición, por ejemplo  $10 \text{ m}^2$ , el nivel de radiación alcanza el 90% de su valor máximo con unos 3 m de espesor de fosforita, aumentando poco para espesores mayores, fundamentalmente debido al efecto blindaje creada por la propia capa de fosforita y por el aumento de la distancia entre la fuente radioactiva y el receptor.

Este efecto puede ser observado con más detalle en el gráfico presentado en la Figura 15, donde se puede observar la variación de la tasa de radiación (normalizada en relación al

valor máximo alcanzable) en función del espesor de la capa de fosforita, con el parámetro área de exposición fijado en 10 m<sup>2</sup>, 100 m<sup>2</sup>, 500 m<sup>2</sup> y 1000 m<sup>2</sup>.

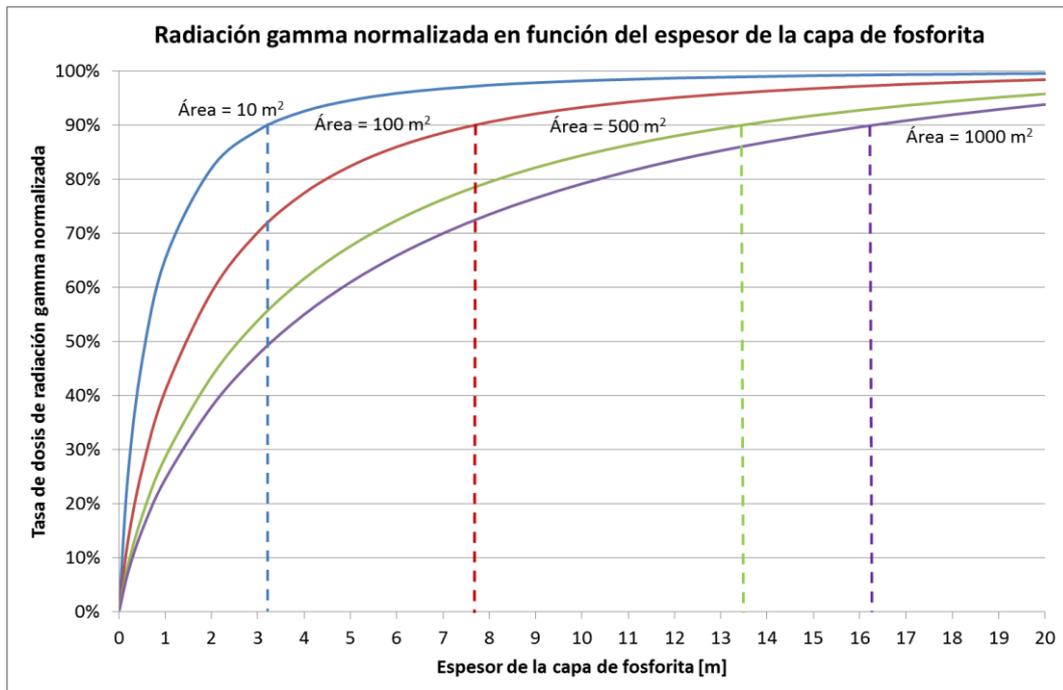


Figura 15 - Radiación gamma normalizada en función del espesor de la capa de fosforita

Puede igualmente observarse que para un almacenamiento con una área de exposición grande, por ejemplo 1000 m<sup>2</sup>, el nivel de radiación gamma alcanza el 90% de su valor máximo con un espesor de la capa de fosforita de unos 16 m; a partir de ese valor, aumentando el espesor de la capa de fosforita la radiación poco aumenta debido al efecto blindaje provocado por la propia fosforita y al aumento de la distancia entre la fosforita y el receptor.

Se observa igualmente, viendo el gráfico de la Figura 14, que el nivel de radiación gamma aumenta significativamente con el aumento del área de exposición de la fosforita. De este modo puede concluirse que es preferible almacenar la misma cantidad de fosforita en pilas de menor altura y mayor profundidad, para así reducir el nivel de radiación gamma emitida.

También se concluye que cuanto mayor es la cantidad de fosforita almacenada mayores serán los niveles de radiación gamma esperados, por lo que es recomendable mantener los niveles de almacenamiento de fosforita tan bajos cuanto sea posible, para así reducir la exposición de los trabajadores a la radiación externa gamma.

### Distancia entre la fuente radioactiva y el receptor

Se intentó igualmente determinar la disminución de la tasa de dosis recibida, originada por el aumento de la distancia entre el trabajador (receptor) y la fuente radioactiva (pila de fosforita) según las diferentes maneras de almacenamiento de la fosforita.

Así, fijando el parámetro área de exposición en 10 m<sup>2</sup>, 100 m<sup>2</sup>, 500 m<sup>2</sup> y 1000 m<sup>2</sup>, para un espesor de la capa de fosforita de 20 m, se varió el valor de la distancia entre el

trabajador y la pila de fosforita desde 0 a 30 m, obteniéndose un conjunto de valores de tasa de dosis (nSv/h) que fueron usados para construir el gráfico de la Figura 16.

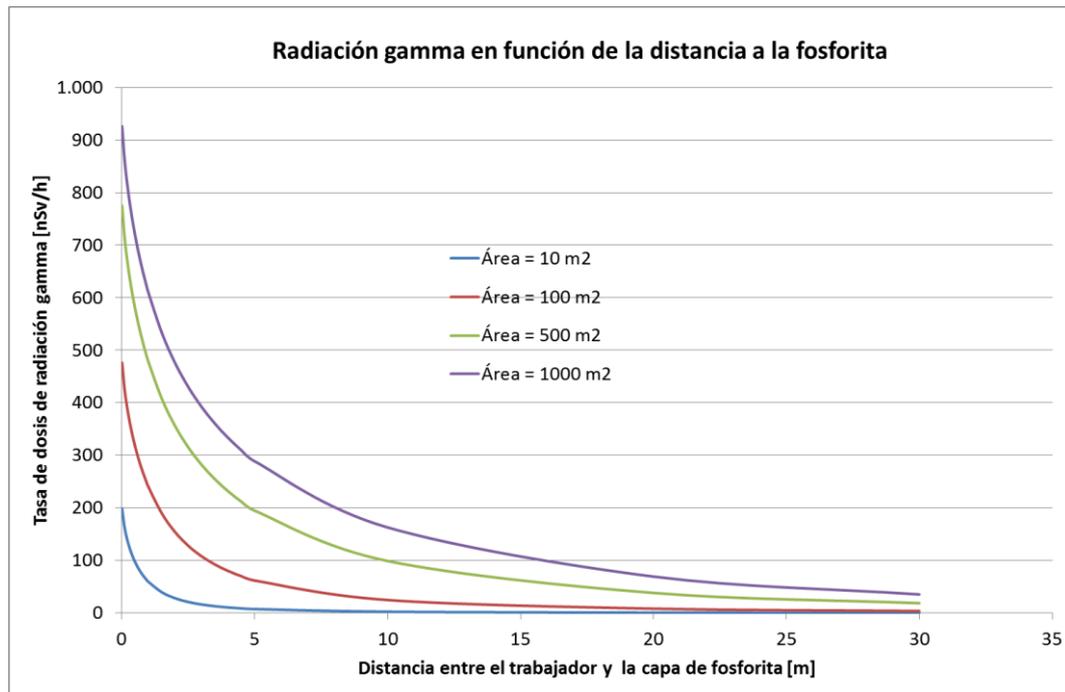
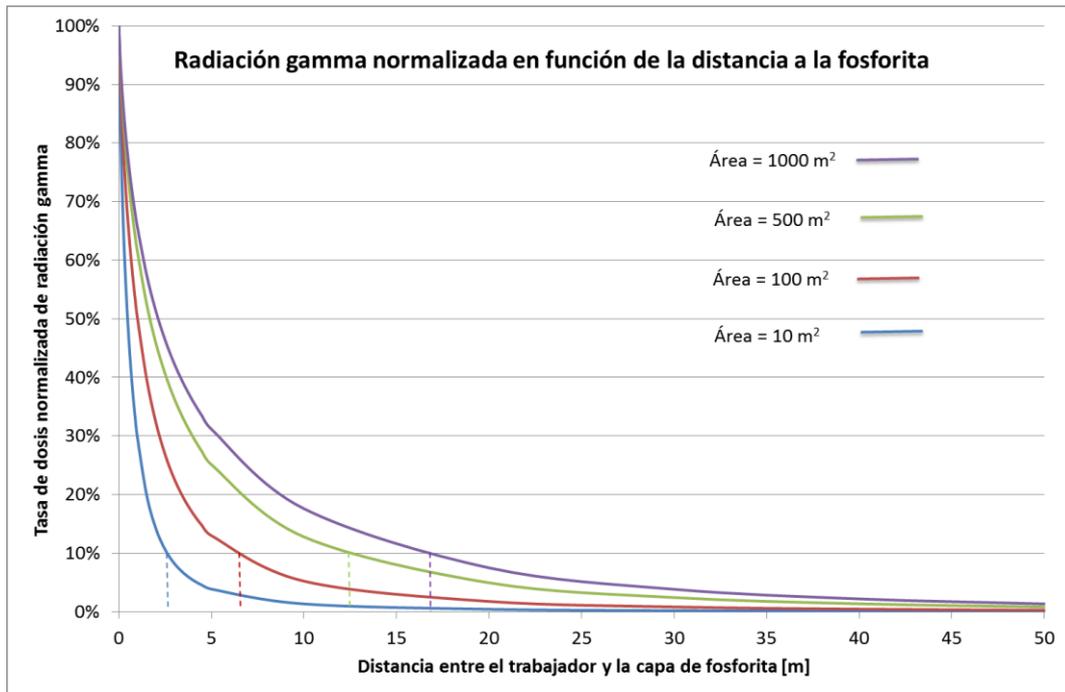


Figura 16 - Radiación gamma en función de la distancia a la fosforita

Para áreas de exposición muy grandes, del orden de los 1000 m<sup>2</sup>, los resultados obtenidos en la simulación indican que la tasa de dosis disminuye significativamente para valores del orden de los 100 nSv/h, a partir de una distancia de unos 16 m. Para esta distancia, la radiación gamma emitida por la fosforita deja de constituir un peligro significativo para los trabajadores expuestos.

Este factor puede ser estudiado de forma más pormenorizada, normalizando la curva de atenuación de la radiación con la distancia entre la fosforita y el receptor (Figura 16), obteniéndose el gráfico indicado en la Figura 17, donde se puede observar que la atenuación de la radiación en función de la distancia entre el receptor y la fosforita va a variar también con el parámetro área de exposición. De este modo se verifica que se consigue una reducción de la tasa de dosis para el 10% de su valor máximo con un distanciamiento de cerca de 2,5 m para una área de 10 m<sup>2</sup>, 6,5 m para una área de 100 m<sup>2</sup>, 12,5 m para una área de 500 m<sup>2</sup> y 17 m para una área de 1000 m<sup>2</sup>.

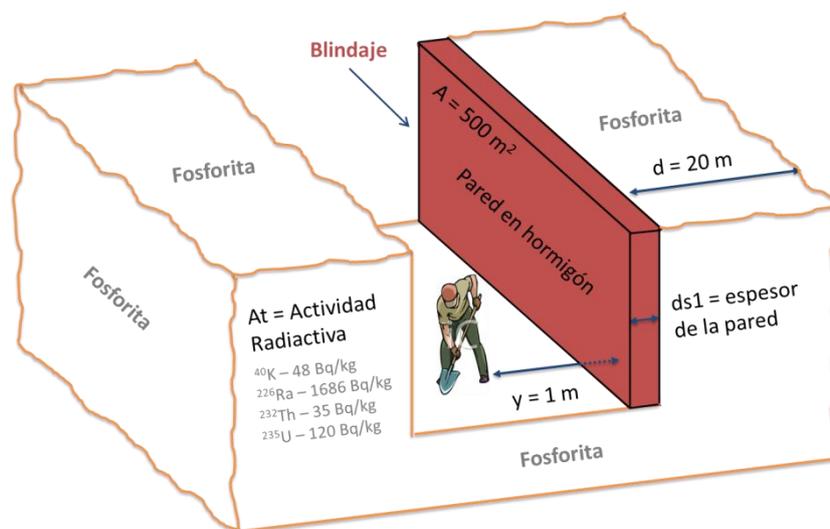


**Figura 17 - Radiación gamma normalizada en función de la distancia a la fosforita**

Puede concluirse así que alejando a los trabajadores de la fosforita se consigue una buena protección radiológica de los mismos, debiendo este factor ser considerado como una medida importante para la prevención y protección de los trabajadores expuestos a la radiación gamma proveniente de la fosforita o de otros productos con actividad radiológica significativa.

### Espesor del blindaje

Con el objetivo de proteger a los trabajadores de la radiación externa gamma se puede anteponer entre la fosforita y los trabajadores un blindaje con un espesor adecuado ( $ds_1$ ) como se indica en la Figura 18.

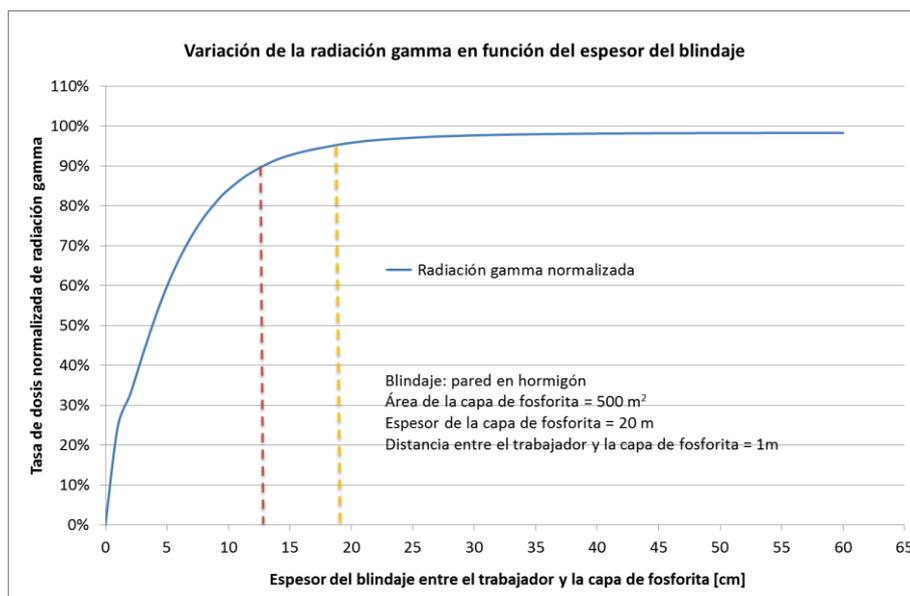


**Figura 18- Colocación del blindaje de protección entre la fosforita y el trabajador**

(Esquema del autor)

A título ilustrativo, para concretar el blindaje indicado, se consideró la construcción de una pared en hormigón, por ser una estructura muy adecuada desde el punto de vista de la protección radiológica, de la facilidad de construcción y de los costes asociados. Seguidamente, se realizó un conjunto de simulaciones en ordenador para calcular la eficacia de este blindaje, o sea, la disminución de la dosis recibida por los trabajadores en función del espesor de la pared.

Así, para un área de exposición de 500 m<sup>2</sup>, una distancia entre la fuente radioactiva y el receptor de 1 m y un espesor de la capa de fosforita de 20 m se hizo variar el espesor de la pared de hormigón de 0 a 60 cm, obteniéndose un conjunto de resultados presentados en la Figura 19.



**Figura 19- Variación de la radiación gamma en función del espesor del blindaje**

En este gráfico, se observa que se alcanza una protección del 90% con un espesor de pared de hormigón de aproximadamente 13 cm y una protección del 95% con un espesor de pared de aproximadamente 19 cm, siendo así posible, desde el punto de vista técnico y económico, construir este tipo de blindaje.

De este modo, se concluye que colocando una pared de hormigón de reducido espesor entre los trabajadores y la fosforita se consigue una buena protección radiológica de los mismos, debiendo este factor ser considerado como una importante medida técnica para la prevención y protección de los trabajadores expuestos a la radiación gamma proveniente de la fosforita y de otros productos que tengan una actividad radiológica significativa.

## **D - Resultados y discusión de resultados**

En el capítulo 4, Resultados y discusión de resultados, se presentan los resultados de los análisis realizados en el laboratorio de radiología del ITN (Instituto Tecnológico e Nuclear): los valores de la actividad radiológica de las muestras de polvo de fosforita y de cenizas de distintos orígenes y se comparan los valores obtenidos con los valores de actividad radiológica de la roca fosfórica en la literatura revisada.

Se presentan los valores de concentración de polvo en el aire, de la tasa de dosis externa de radiación gamma y de concentración de radón en espacios cerrados y de poca ventilación, realizados en diversos lugares de trabajo de la fábrica de ADP.

Se presentan los valores obtenidos de exposición a la radiación externa y de inhalación de polvo en un grupo de trabajadores a lo largo de una jornada de trabajo. Estos valores fueron obtenidos recurriendo a medidores de radiación y a bombas de aspiración de aire. Posteriormente se calculó la dosis total de radiación a la que los trabajadores habían sido expuestos y se hizo un breve análisis epidemiológico de los mismos.

Se analiza y se discute los resultados obtenidos en el estudio; y con base a estos resultados, se estudia y se propone una serie de acciones de prevención y protección que puedan minimizar los efectos negativos que existen en la salud de los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes procedentes de las materias primas y de los productos manejados en la industria de fosfatos.

Se estudian las ventajas y las limitaciones del uso de herramientas de simulación en ordenador para predecir los niveles de radiaciones ionizantes existentes. A título ilustrativo se aplica la simulación en ordenador en el diseño de nuevas instalaciones afectadas por la radiación, estimando los niveles de radiaciones ionizantes a los que ha lugar y de esta forma minimizar los riesgos en la salud de los trabajadores.

Finalmente, se presentan las medidas de prevención y de protección que se consideran más eficaces para los trabajadores, que incluyen la aplicación de medidas de ingeniería, de organización del trabajo y de protección individual de los mismos.

### **Medición de la actividad radiológica de la fosforita (materia-prima)**

Con el propósito de demostrar y evidenciar que hay una actividad radiactiva significativa procedente de la fosforita, se realizó la medición, en el laboratorio radiológico del ITN, de la actividad radiológica de muestras de fosforita utilizadas en la fabricación de fertilizantes. Así, recurriendo a la espectrometría gamma se determinó en muestras de fosforita provenientes de Túnez, Siria, Marruecos y Senegal los radionúclidos presentes y su actividad, estando sus respectivos valores indicados en la Tabla 2.

País de procedencia da fosforita	Grandeza Medida	Actividad de los radionúclidos presentes			
		<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>235</sup> U (Bq/kg)
Túnez	Ae - Actividad específica	30	381	52	22
	U - Incertidumbre expandida	8	21	4	4
	<b>Total</b>	<b>38</b>	<b>402</b>	<b>56</b>	<b>26</b>
Siria	Ae - Actividad específica	24	845	15	49
	U - - Incertidumbre expandida	14	49	4	6
	<b>Total</b>	<b>38</b>	<b>894</b>	<b>19</b>	<b>55</b>
Marruecos	Ae - Actividad específica	13	1254	19	77
	U - - Incertidumbre expandida	10	62	3	8
	<b>Total</b>	<b>23</b>	<b>1316</b>	<b>22</b>	<b>85</b>
Senegal	Ae - Actividad específica	34	1604	26	106
	U - - Incertidumbre expandida	14	82	9	14
	<b>Total</b>	<b>48</b>	<b>1686</b>	<b>35</b>	<b>120</b>

Tabla 2 - Actividad de los radionúclidos presentes en la fosforita por país de procedencia

Estos mismos valores son presentados en forma de gráfico en la Figura 20.

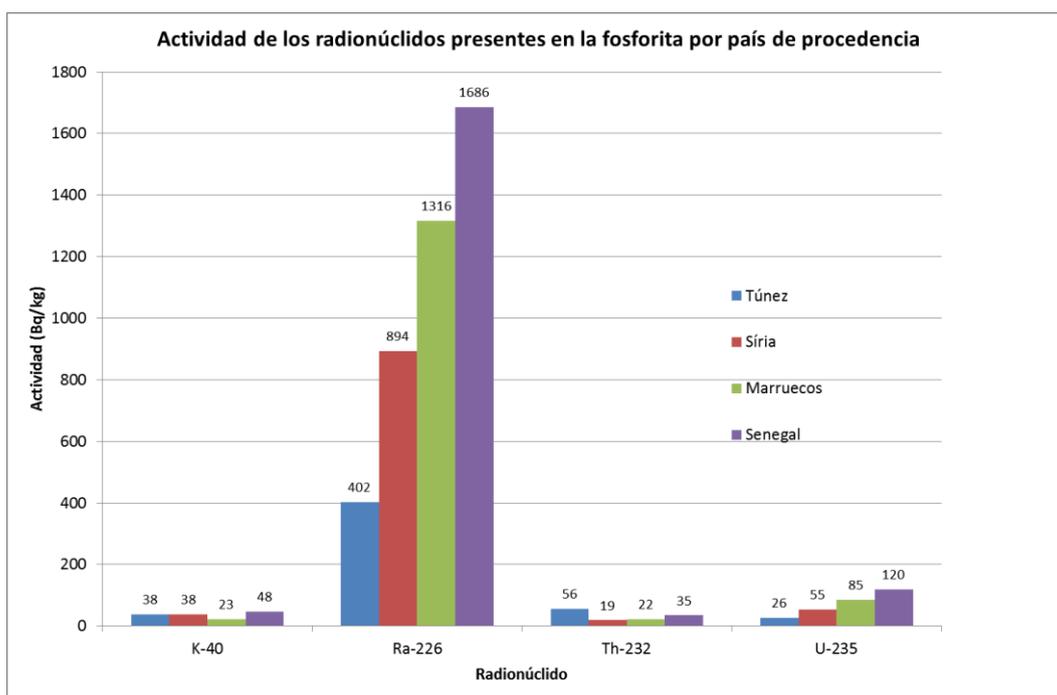


Figura 20 - Actividad de los radionúclidos presentes en la fosforita por país de procedencia

Se constató, a través de los valores medidos, que las muestras de fosforita tienen una actividad radiológica significativa y que su actividad radiológica varía considerablemente en función del origen de la misma. Y así, la fosforita proveniente de Senegal tiene una actividad radiológica más de cuatro veces superior que la proveniente de Túnez, debido al radionúclido <sup>226</sup>Ra y al radionúclido <sup>235</sup>U.

Se comprobó que los valores de la actividad radiológica medidos en laboratorio para los radionúclidos son comparables con los indicados en la literatura (Birky et al., 1998).

Además se pudo comprobar que la actividad radiológica de la fosforita es capaz de contaminar todo el proceso de fabricación, particularmente en los tanques de recepción, filtros, tuberías y transportadores. Se encontraron altas concentraciones de  $^{226}\text{Ra}$  en los equipos retirados de las instalaciones de procesamiento de ácido fosfórico lo que sugiere la posibilidad de un impacto negativo en la salud de los trabajadores encargados de las tareas de mantenimiento, transporte y tratamiento de residuos.

### Medición de la actividad radiológica de las cenizas recogidas en los filtros

La determinación de la actividad radiológica de las cenizas recogidas en los filtros de bolsa fue importante para evaluar su peligrosidad, ya que es necesario limpiar periódicamente estos filtros y esta operación es realizada generalmente por trabajadores externos que no tienen preparación ni formación adecuadas para su auto-protección.

Con este propósito se midió, en el laboratorio radiológico del ITN, la actividad radiológica de muestras de cenizas recogidas en los filtros ubicados en las áreas de producción de los fertilizantes obteniéndose los valores que se muestran en la Tabla 3.

Grandeza Medida	Actividad de los radionúclidos presentes en las cenizas de los filtros			
	$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/kg)	$^{235}\text{U}$ (Bq/kg)
Ae - Actividad específica	1098	155	12	39
U - Incertidumbre expandida	231	19	4	8
<b>Total</b>	<b>1329</b>	<b>174</b>	<b>16</b>	<b>47</b>

Tabla 3 - Actividad radiológica de las cenizas recogidas en los filtros

Estos mismos valores son presentados en forma de gráfico en la Figura 21.

Se comprobó que las cenizas presentes en los filtros de bolsa tienen una actividad radiológica significativa, superior a 1500 Bq / kg, constituyendo así un peligro para los trabajadores encargados de la limpieza de esos filtros y para el ambiente. Tanto más que esta operación es llevada a cabo por trabajadores externos a la empresa que no suelen llevar las protecciones adecuadas al riesgo al que están expuestos, como se puede observar en la Figura 89, situada en la página 132.

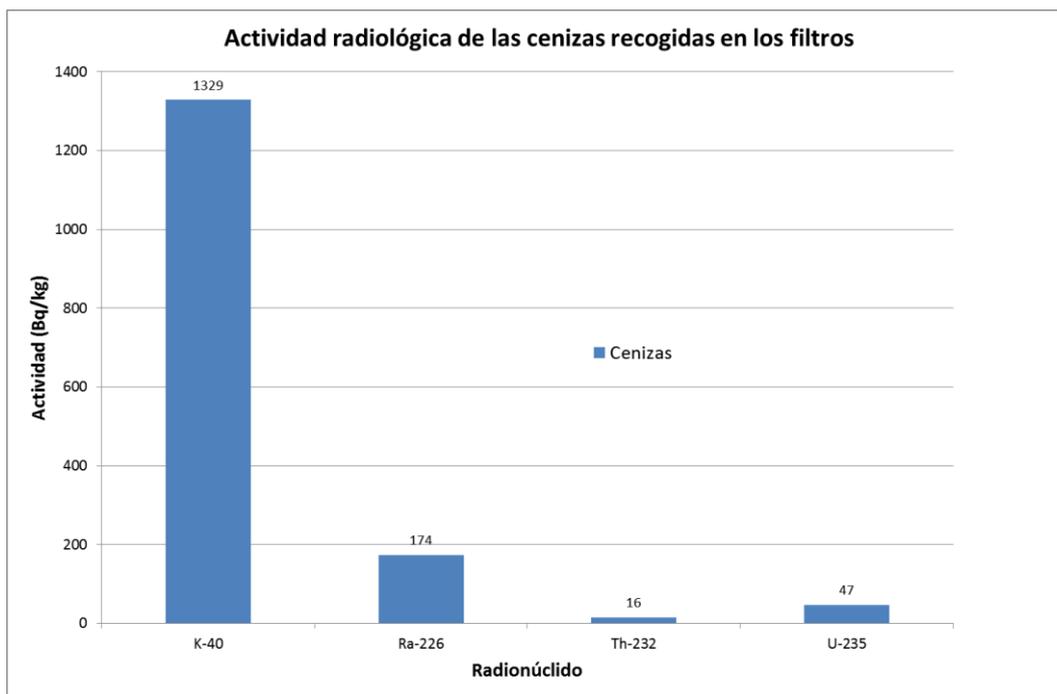


Figura 21 - Actividad radiológica de las cenizas recogidas en los filtros

### Exposición a polvo radiactivo

Los valores de concentración de polvo, medidos en varios puntos de la fábrica y presentados en la Tabla 4, fueron aproximadamente 5 veces mayores que el VLE-MP indicado, como por ejemplo, para el polvo de carbón ( $0,4 \text{ mg/m}^3$ ) como se puede observar en la Figura 22.

Local de Trabajo	Función del trabajador	Polvo Total ( $\text{mg/m}^3$ )	Polvo Respirable ( $\text{mg/m}^3$ )
Granulación 4	Operador del Granulador	7,22	2,26
Granulación 4	Operador de Líquidos	29,4	1,24
Granulación 4	Jefe de Turno	2,42	1,56
Granulación 4	Operador da Pala	12,30	0,97
Granulación 2/4	Encargado	2,26	0,97
Granulación 2	Operador Fabril	1,73	0,87
Granulación 2/4	Responsable Producción	0,94	0,82
Ensaque	Operador Responsable Mollers	1,19	0,89
Ensaque	Operador Granéis	2,66	0,99
Ensaque	Operador Big bags	4,61	1,15

Tabla 4 - Valores de exposición ocupacional a polvos

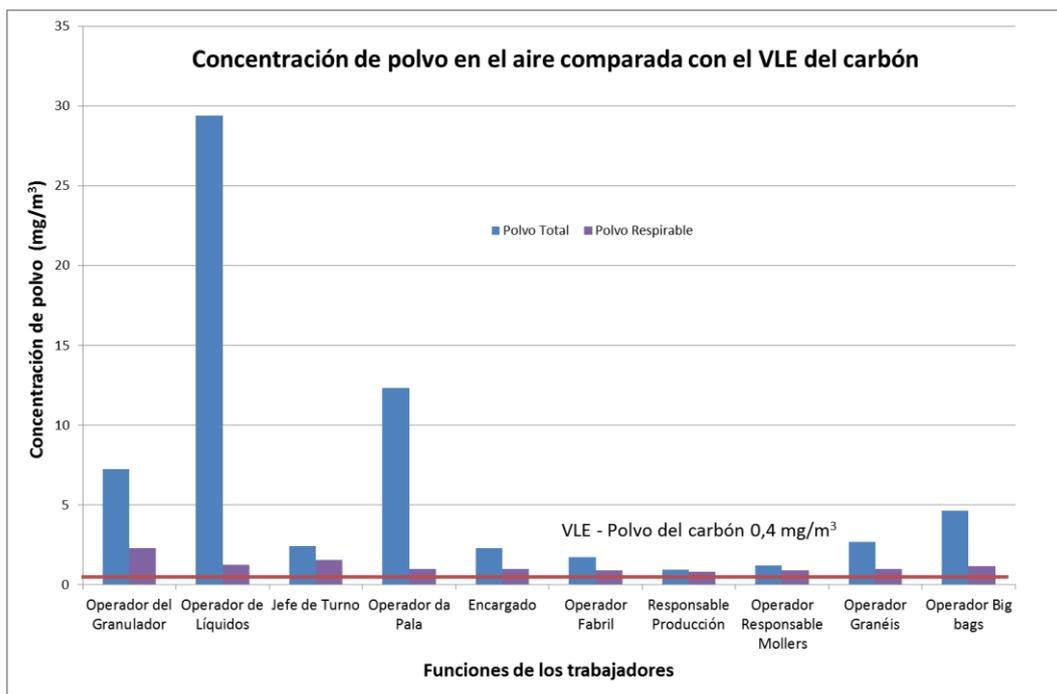


Figura 22 - Concentración de polvo en el aire comparada con el VLE del carbón

Así, de acuerdo con los valores indicados en la Tabla 2 y en la Tabla 3, estos polvos existentes en el aire poseen una actividad radiológica significativa y pueden constituir un riesgo importante para la salud de los trabajadores expuestos que los inhalen o los ingieran.

### Evaluación de la radiación externa gamma presente

Se evaluó la radiación externa gamma presente en los locales de trabajo midiendo el campo radiactivo con un medidor de radiación gamma; los valores obtenidos se indican en la Tabla 5.

Local de medición	Valor medido ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Desviación estándar ( $\sigma$ )	Valor medido $+2\sigma$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Dosis anual 2000 horas ( $\text{mSv/año}$ )
Almacén materia-prima	0,89	0,20	1,29	2,57
Transportadores	0,60	0,22	1,03	2,28
Molienda	0,89	0,30	1,49	2,97
Almacén producto final	0,99	0,32	1,62	3,24

Tabla 5 - Valores de radiación externa gamma medidos en los locales de trabajo

Estos mismos valores se presentan en forma de gráfico en la Figura 29, donde pueden ser comparados con el valor de referencia indicado en la legislación portuguesa (*Decreto-Lei 222/2008*); se puede ver que hay zonas donde la dosis anual de exposición a la radiación alcanza el valor 2,97 mSv/año, excediendo el valor límite anual de dosis de 1 mSv/año. En consecuencia, todos los trabajadores que reciban esas dosis, superiores 1 mSv/año, deben ser considerados como trabajadores ocupacionalmente expuestos a las radiaciones ionizantes y deben beneficiar de la protección radiológica indicada en la referida legislación.

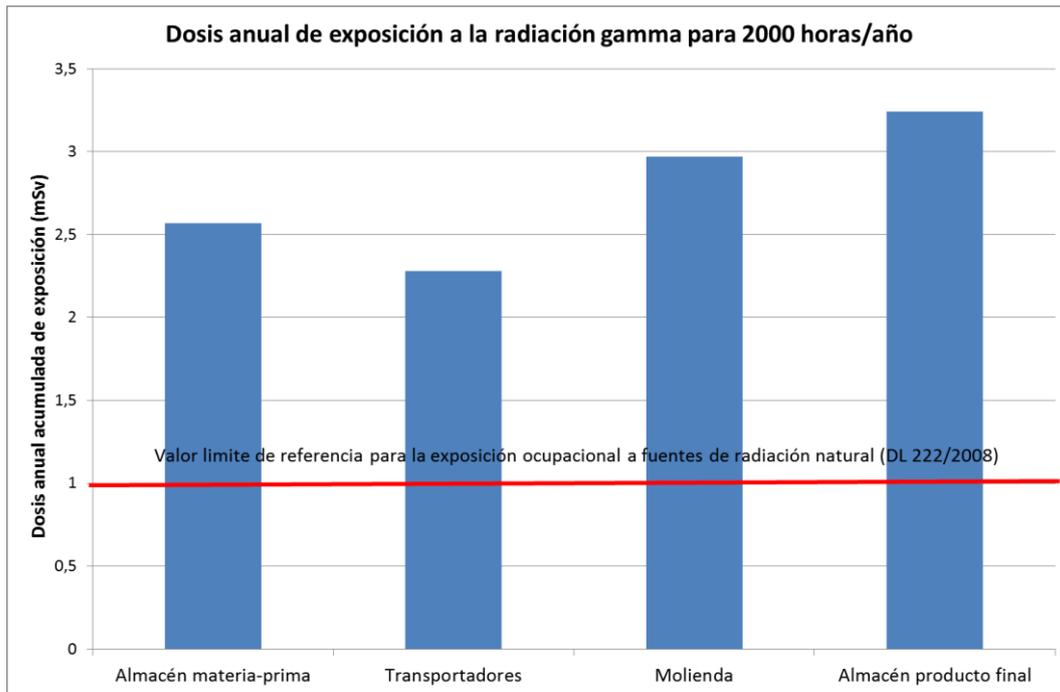


Figura 23 - Dosis anual acumulada de exposición a la radiación gamma para 2000 horas/año

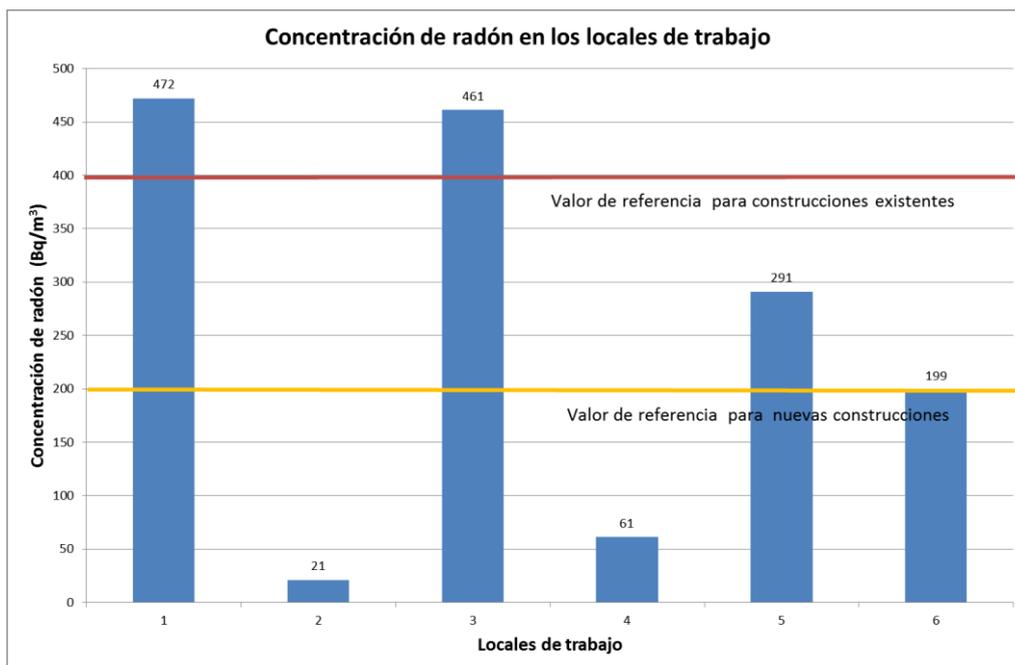
### Medición de la concentración de radón en los lugares de trabajo

Para determinar la concentración de radón en las áreas evaluadas se han instalado detectores de trazas nucleares. Los detectores fueron retirados después de 29 días de exposición y posteriormente enviados al laboratorio de radón del ITN. Los resultados obtenidos se indican en la Tabla 6.

Nº	Zona de fabricación	Tipo de permanencia de los trabajadores	Valor (Bq/m <sup>3</sup> )
1	Túnel del transportador de entrada de la fosforita	20 entradas por día (3 turnos - mantenimiento)	472
2	Almacén de la fosforita	6 horas por día	21
3	Sala de control del proceso industrial	24 horas por día en 3 turnos	461
4	Transportador - Piso 1	2 horas diarias	61
5	Elevador de la fosforita gruesa - Piso 1	2 horas diarias	291
6	Transportador de alimentación del almacén de la fosforita - Piso 2	2 horas diarias	199

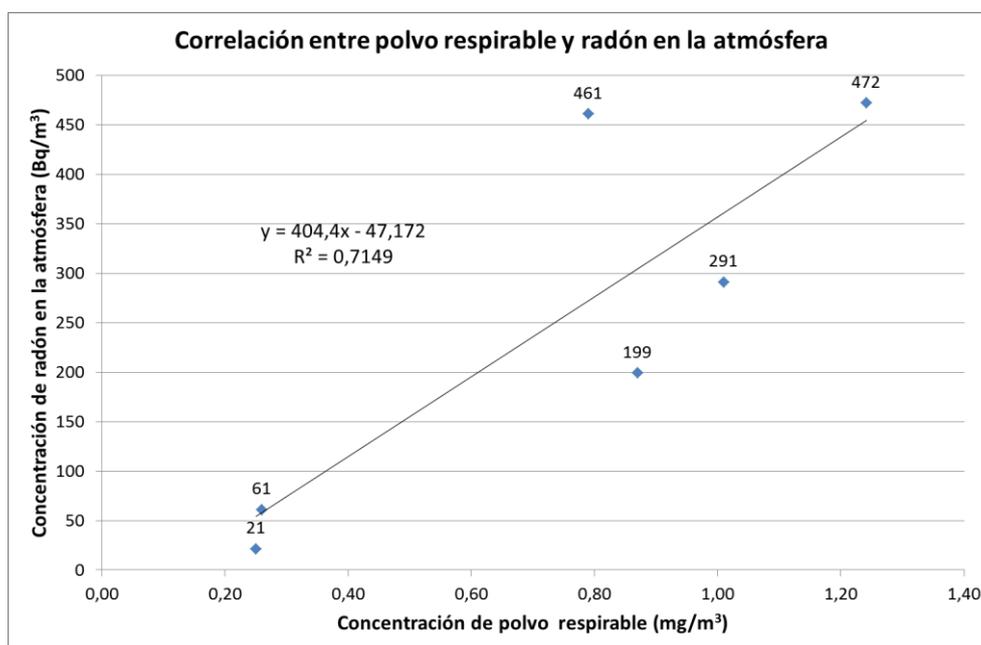
Tabla 6 - Concentración de radón en las estancias evaluadas

Esos mismos valores se presentan en forma de gráfico en la Figura 24 donde pueden ser comparados con los valores de referencia indicados en la legislación portuguesa, comprobándose así que en varios lugares de trabajo los niveles de radón medidos superan los límites máximos establecidos en la legislación.



**Figura 24 - Concentración de radón en los locales de trabajo**

Como la existencia de polvo y de radón en el aire aumenta significativamente el riesgo de cáncer pulmonar se analizó la coincidencia espacial en los distintos locales entre la presencia de radón y la presencia de polvo en el aire, obteniéndose el gráfico presentado en la Figura 25.



**Figura 25 - Correlación entre polvo respirable y radón en la atmósfera**

El R-cuadrado de la regresión ( $R^2$ ) es una medida de la relación lineal entre las variables concentración de radón y concentración de polvo; un valor próximo a uno indica una fuerte relación entre las dos variables. En el caso estudiado, siendo el valor de  $R^2$  igual a 0,71 (indicado en la Figura 25), se puede concluir que existe una coincidencia espacial significativa entre la presencia de radón y de polvo en el aire, y en consecuencia, existe un

riesgo importante para la salud de los trabajadores debido a la posibilidad de inhalación de radón y de sus descendientes radiactivos (bismuto, polonio y plomo) que se agregan a las partículas de polvo presentes en el aire.

### Conversión de la concentración de radón en dosis radón

Para tener en cuenta los efectos aditivos de la radiación externa gamma y de la radiación proveniente del radón, fue necesario convertir la concentración de radón ( $Bq/m^3$ ) en valores de dosis efectiva de radón (Sv). Todavía, aun hay algunas dudas en lo que respecta al valor del factor de conversión a usar, con valores de conversión dados por el análisis epidemiológico y por el análisis dosimétrico, significativamente diferentes. El valor indicado en la legislación portuguesa (*Decreto-Lei* nº 222/2008) es de 1,4 Sv por  $J.h.m^3$  que convertido corresponde a cerca de 6,7 nSv por  $Bq.h.m^{-3}$ .

Utilizando este factor de conversión para el cálculo de la dosis anual de radiación recibida, se obtienen niveles de exposición del orden de 6,9 mSv/año. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 26 donde se pueden comparar con los niveles de referencia indicados en la legislación portuguesa anteriormente referida. Como puede verse, la dosis de radiación recibida por los trabajadores sobrepasa con creces los límites legales establecidos en el *Decreto-Lei* nº 222/2008.

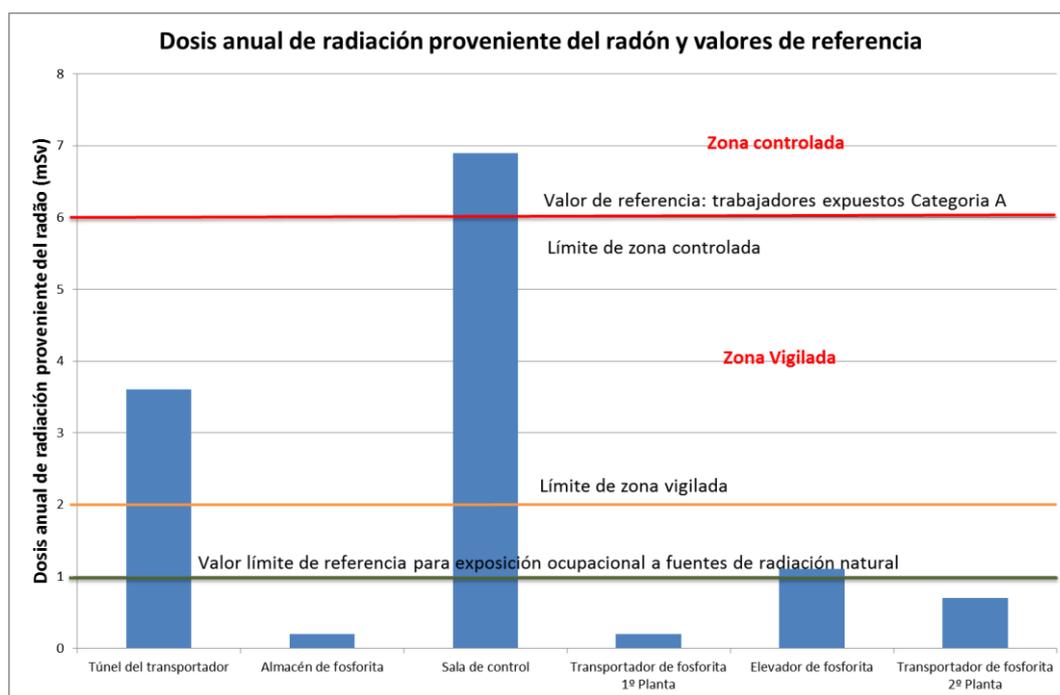


Figura 26 - Dosis anual de radiación proveniente del radón y valores de referencia

De acuerdo con esos resultados concluyó que hay trabajadores que pueden estar expuestos a valores de dosis efectivas superiores a 6 mSv/año, incluso teniendo en cuenta sólo el efecto de la exposición al radón. De acuerdo con la legislación portuguesa los trabajadores expuestos a estos niveles de radiación deben ser considerados trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes de la categoría A (la más alta exposición) y el área debe ser clasificada como zona radiológicamente controlada.

Aún se pudo verificar a través de los resultados obtenidos en el programa de cálculo, que un trabajador con este nivel de exposición puede recibir, a lo largo de 40 años de vida activa, una dosis acumulada de 278 mSv. Esta dosis da lugar a un aumento de la probabilidad de padecer de cáncer de aproximadamente 1,2% (1: 86,34).

Para esos valores de dosis, la empresa deberá promover un control una vez al mes de la dosis a que están sometidos los trabajadores y la vigilancia médica que permita determinar su capacidad para desempeñar sus funciones.

### **Exposición al radón en operaciones de mantenimiento**

Se verificó que en trabajos de mantenimiento, reparación y limpieza llevada a cabo en varios equipos por lo general en espacios cerrados, los niveles de radón aumentan de manera significativa debido a la falta de aireación. Puesto que la exposición es intensa, pero de corta duración no es posible hacer las mediciones por el método de detección de trazas nucleares, para los cuales es necesario un tiempo de exposición típicamente de 1 a 3 meses,

### **Estimación de la dosis total recibida**

Se estimó la dosis de radiación total correspondiente a los efectos acumulados de la radiación externa gamma y de la exposición al radón. Para estimar el riesgo total resultante de la exposición a la radiación ionizante a que podrán estar expuestos los trabajadores fueron tenidos en cuenta los siguientes factores:

1. Actividad de los radionúclidos presentes en el polvo existente en el aire (valores medidos).
2. Concentración de polvo existente en los locales de trabajo (valores medidos).
3. Cantidad media de aire inhalada por los trabajadores y respectivo factor de conversión (obtenidos en la literatura).
4. Dosis externa de radiación gamma presente en los locales de trabajo (valores medidos).
5. Concentración de radón en las zonas de trabajo (valores medidos).
6. Número de horas de exposición a los varios tipos de contaminación (obtenido por entrevistas a los trabajadores y por observación directa).
7. Protección de las vías respiratorias usada (mascarilla respiratoria, tipo de filtro, eficiencia, estado de funcionamiento, ajuste adecuado de la mascarilla, tiempo de utilización, etc.).

Las mediciones efectuadas en los locales de trabajo permitieron estimar la actividad radiactiva del polvo existente en el aire, la exposición ocupacional a la radiación externa gamma y la exposición ocupacional al gas radón. Para estimar la dosis de radiación, por inhalación de polvo radiactivo, a que pueden estar expuestos los trabajadores se podrá asumir un valor medio de aire ventilado por los trabajadores de 35 l/min, con un valor máximo para un trabajo pesado de 85 l/min y de 13 l/min para un trabajo leve (Birky et al., 1998).

Es también necesario tener en cuenta el factor de protección introducido con la utilización de los equipos de protección respiratoria; típicamente, se puede considerar un factor de protección de 10 (APF=10) para los equipos filtrantes de protección respiratoria del tipo

indicado en la Figura 27 a) y b) y de 50 (APF=50) para el tipo indicado en la Figura 27 c) (REMM (Radiation Emergency Medical Management), 2011).

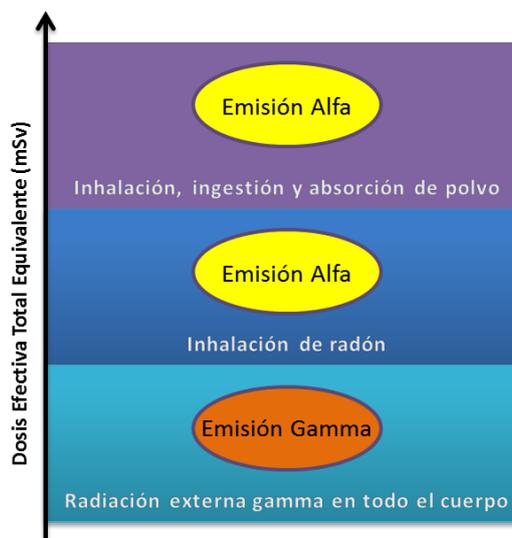


a) Filtro de partículas      b) Semimáscara con filtro      c) Máscara integral con filtro

**Figura 27 - Tipos de equipos filtrantes de protección respiratoria**

(Ilustración original de Attilis & Associates publicada en REMM (Radiation Emergency Medical Management, 2011))

La dosis total de radiación a que el trabajador está expuesto puede ser calculada a partir de la suma de las diferentes dosis recibidas: por inhalación, ingestión y absorción por heridas de polvo radiactivo, inhalación de radón y de sus descendientes de semivida corta y la radiación externa, como está representado esquemáticamente en la Figura 28.



**Figura 28 - Contribuciones para el cálculo de la dosis efectiva total equivalente**

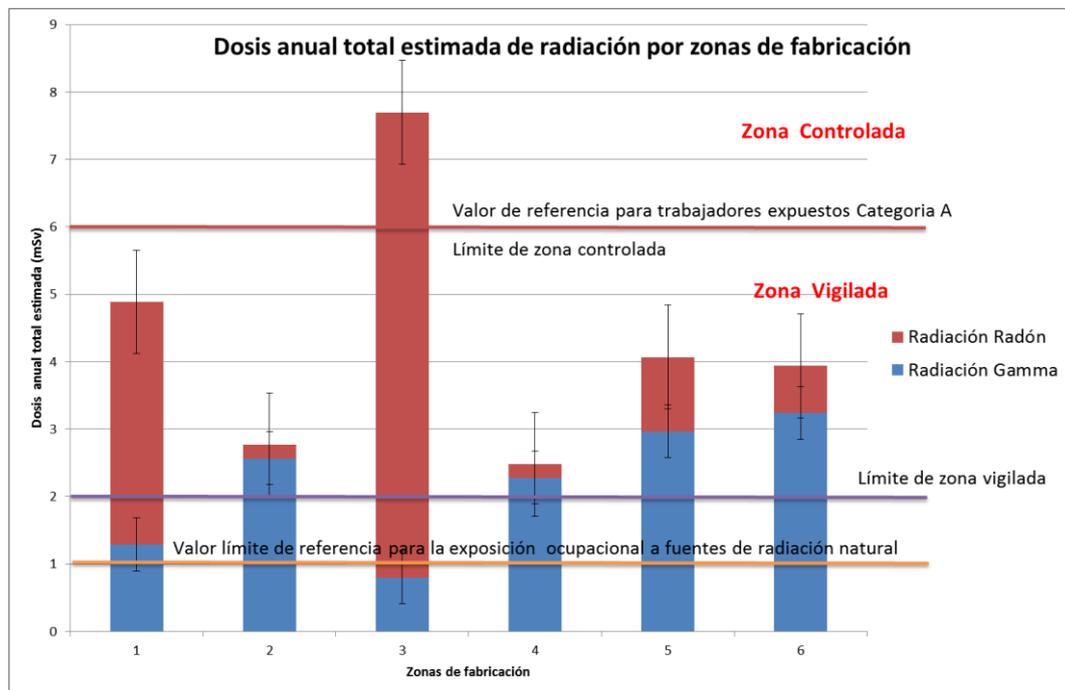
Como la dosis total de radiación a que cada trabajador va a estar expuesto, varía mucho en función de los locales de trabajo, del tiempo de permanencia en cada local, del tipo de trabajo a realizar y de las protecciones individuales usadas, solo se consideró la aportación de las dosis de radiación recibidas por radiación externa gamma y por inhalación de radón, ya que se supone en este estudio que las dosis de radiación recibidas por inhalación de polvo, absorción a través de la piel y absorción a través de heridas sea poco significativa para el cálculo de la dosis total. Sin embargo, como esa contaminación radiactiva por ingestión y a través de heridas puede estar presente, debe aconsejarse a los trabajadores que no coman ni beban en las zonas con polvo en el aire y mantengan las heridas convenientemente protegidas de los productos que manipulan.

Considerando solo las dosis recibidas debidas a la radiación gamma y a la exposición al radón se obtuvieron los resultados que se indican en la Tabla 7.

Zona de fabricación	Dosis de radiación gamma (mS/año)	Dosis de radón (mS/año)	Dosis total de radiación (mS/año)
Túnel del transportador	1,29	3,6	4,89
Almacén de la fosforita	2,57	0,2	2,77
Sala de control	0,8	6,9	7,7
Transportadores de la fosforita	2,28	0,2	2,48
Elevador de la fosforita / Molienda	2,97	1,1	4,07
Almacén producto final /Transportador	3,24	0,7	3,94

**Tabla 7 - Dosis anual estimada de radiación en las diferentes zonas de la fábrica**

Esos resultados muestran que el nivel de radiación presente en los locales de trabajo indicados puede ser significativamente peligroso para la salud de los trabajadores, pudiendo alcanzar un valor máximo de 7,7 mSv/año. Esos mismos valores se presentan en forma de un gráfico en la Figura 29, donde pueden ser comparados con los valores de referencia indicados en la legislación portuguesa (*Decreto-Lei* nº 222/2008).



**Figura 29 - Dosis anual estimada de radiación en las diferentes zonas de fabricación**

Están incluidas en el gráfico presentado las barras de error correspondientes a la incertidumbre presente en los resultados. En este caso se asumió, a título meramente ilustrativo, un error estándar en el cálculo de la dosis total.

Teniendo en cuenta la suma de la dosis debida a la radiación gamma y la dosis debida al radón, es posible recibir, en las 6 zonas analizadas, dosis superiores a 1 mSv/año, es decir, se supera fácilmente el valor límite de referencia para la exposición ocupacional a fuentes de radiación natural indicado en el *Decreto-Ley 222/2008*. En consecuencia, los trabajadores expuestos a estos valores de dosis deben ser considerados trabajadores profesionalmente expuestos de acuerdo con la referida legislación.

Además como también se supera el límite de 2 mSv/año, esas zonas deben ser consideradas zonas vigiladas en términos radiológicos. Como existe el riesgo de contaminación por polvo radiactivo y de irradiación debido a la radiación gamma esas zonas deben ser señalizadas con el pictograma indicado en la Figura 30 c).

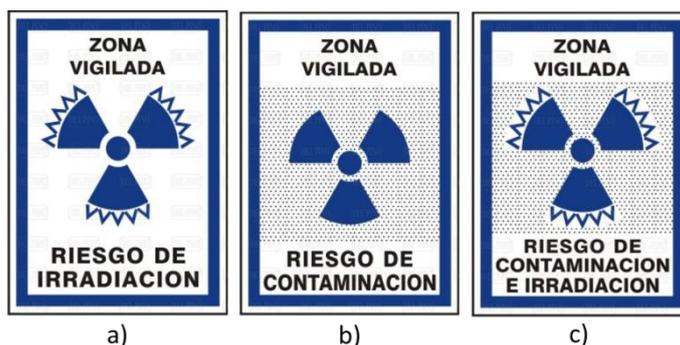


Figura 30 - Pictogramas para señalar zonas vigiladas

En la zona 3, la sala de control, es posible superar el límite de 6 mSv/año, debiendo ser considerada zona controlada en términos radiológicos. Como existe el riesgo de contaminación por polvo radiactivo y de irradiación debido a la radiación gamma esa zona debe ser señalizada con el pictograma indicado en la Figura 31 c).

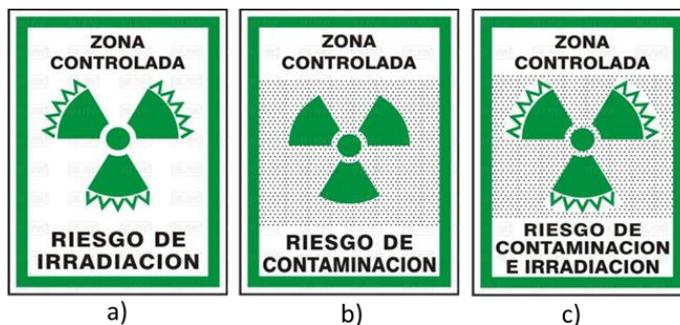


Figura 31 - Pictogramas para señalar zonas controladas

A título ilustrativo, se presenta una estimativa del aumento de riesgo de cáncer a lo largo de la vida de 40 años (*ELCR - Excess Lifetime Cancer Risk*) debido a la dosis de radiación ionizante recibida por los trabajadores. De acuerdo con la ICRP (International Commission on Radiological Protection, 1990) para efectos estocásticos, el aumento de riesgo de cáncer fatal es de 0,04 por Sievert por año para los trabajadores. Así por ejemplo, en el caso de la sala de control con una dosis de radiación ionizante de 7,7 mSv/año y para 40 años de exposición obtenemos un aumento de riesgo de cáncer de,

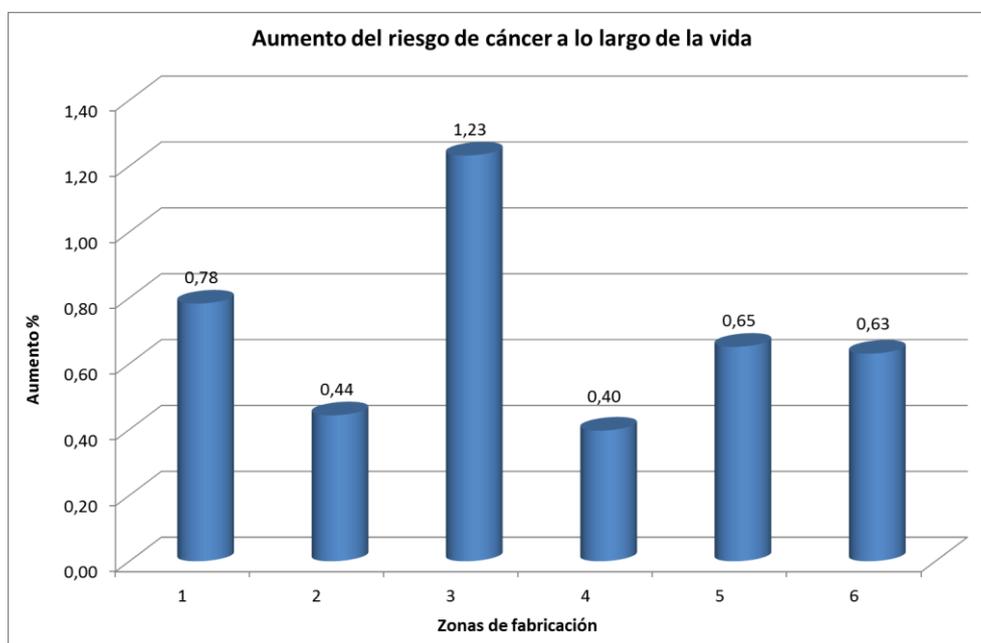
$$ELCR = 7,7 \times 10^{-3} \times 0,04 \times 40 = 1.23 \%$$

Efectuando el mismo cálculo para todos los valores de dosis se obtiene la Tabla 8.

Local de fabricación	Dosis total de radiación (mS/año)	Aumento del riesgo de cáncer a lo largo de la vida (%)
Túnel del transportador	4,89	0,78
Almacén de la materia-prima fosforita	2,77	0,44
Sala de control	7,7	1,23
Transportadores de la fosforita	2,48	0,40
Elevador de la fosforita / Molienda	4,07	0,65
Almacén producto final /Transportador	3,94	0,63

**Tabla 8 - Aumento del riesgo de cáncer a lo largo de la vida (%)**

Esos mismos valores se presentan en forma de gráfico en la Figura 32, donde se puede observar que los locales de trabajo de mayor riesgo son la sala de control, transportadores de fosforita y la molienda y que coinciden con las zonas de mayor concentración de polvo.



**Figura 32 - Aumento del riesgo de cáncer a lo largo de la vida (%)**

### Datos epidemiológicos

Los datos epidemiológicos recogidos en la literatura sugieren también un mayor riesgo de cáncer pulmonar en los trabajadores que trabajan en las zonas de recepción y secado de las materias-primas, locales donde fueron encontrados valores mas elevados de radiación y de concentración de polvo.

De acuerdo con los datos recogidos en la medicina del trabajo de la empresa, no existe registro, en los últimos cinco años, de tasas de incidencia anormales de enfermedades graves del aparato respiratorio; no obstante, si existen tasas de incidencia elevadas de cáncer del estomago entre los trabajadores de la empresa. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los trabajos de limpieza, reparación, mantenimiento de los equipos y de las instalaciones industriales son generalmente realizados por personal externo a la

empresa. Esos trabajadores hacen trabajos con riesgos radiológicos importantes, quedando muy expuestos a la inhalación, ingestión y absorción de polvo radiactivo y también a la inhalación de los descendientes radiactivos del radón; como no pertenecen a los cuadros de la empresa no son seguidos ni observados por la medicina ocupacional de la empresa.

Así, cualquier estudio epidemiológico que sea realizado solamente con los datos de la empresa podrá conducir a resultados poco significativos, ya que los datos médicos de los trabajadores involucrados en los trabajos de mayor riesgo no están incluidos. Además estos trabajadores por lo general no están convenientemente educados sobre los riesgos a que están expuestos y consecuentemente no usan las protecciones adecuadas.

## **E - Prevención y medidas de protección**

Las medidas a desarrollar para el control de las radiaciones ionizantes tienen como principal objetivo mantener el nivel de exposición "tan bajo como sea razonablemente posible", siguiendo el principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Por lo tanto, en todas las actividades donde haya exposición a radiaciones ionizantes deben ser introducidas estas medidas:

1. Las actividades que impliquen la exposición a radiaciones ionizantes deben estar justificadas por los beneficios obtenidos.
2. Cualquier exposición o contaminación de personas o del medio ambiente debe ser evitada al máximo.
3. Los niveles de exposición deben ser siempre los más bajos posibles en cada momento y deberán siempre ser inferiores a los valores límite legislados o recomendados por las organizaciones internacionales de protección radiológica.
4. Es esencial la vigilancia de la salud de los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes, tanto en los exámenes de ingreso y periódicos como en los ocasionales, sobre todo después de exposiciones accidentales.
5. La protección de los trabajadores contra la radiación interna se puede lograr evitando la inhalación y la ingestión de gases o polvos radiactivos. Los lugares de trabajo deben mantenerse libres de polvo y de humo, deben estar bien ventilados y libres de fuentes radiactivas que puedan producir radón.
6. También se debe reducir tanto como sea posible el tiempo de exposición de los trabajadores al polvo radiactivo y así se reduce la dosis total recibida.
7. Los trabajadores no deben comer ni beber en las zonas contaminadas por polvo radiactivo y deben mantener las heridas adecuadamente protegidos de los productos manejados. También deben utilizar guantes cuando manejan sustancias radiactivas para evitar la posibilidad de absorción de radiación a través de heridas abiertas.
8. En cuanto a la protección individual de los trabajadores es conveniente utilizar mascarillas con filtros de protección respiratoria y en casos extremos el uso de equipos de respiración autónomos. Es muy importante educar a los trabajadores en el uso adecuado de los filtros de protección respiratoria a través de acciones de sensibilización y de formación y fomentar su uso.
9. La protección radiológica contra la radiación externa puede lograrse mediante la colocación de blindajes entre la fuente de radiación y los trabajadores expuestos y tanto como sea posible alejar a los trabajadores de las fuentes radiactivas. También se debe reducir tanto como sea posible el tiempo de exposición de los trabajadores a las fuentes radiactivas para reducir la dosis total recibida.

De acuerdo con los conocimientos científicos existentes y con la realidad observada en la industria es posible aplicar medidas preventivas y de protección con cierta facilidad y así, reducir mucho o incluso eliminar los riesgos presentes derivados de la exposición de los trabajadores a las radiaciones ionizantes.

## Acciones a implementar

Las acciones a implementar para la prevención y protección contra la exposición a la radiación ionizante deben incluir las siguientes:

1. Hacer controles radiológicos midiendo, en laboratorio, la actividad de las materias (fosforitas) recibidas de diversos orígenes y evitando siempre que sea posible, el uso de materias primas con niveles excesivos de radiactividad.
2. Aplicar técnicas de ingeniería en el diseño de las instalaciones y en los procesos de fabricación que permitan reducir la concentración de polvo en el aire, facilitar la ventilación y la renovación del aire.
3. Asegurar el mantenimiento adecuado de los filtros de CVAA (calefacción, ventilación y aire acondicionado) y tener un cuidado especial en su posterior manipulación ya que pueden contener contaminación radiactiva.
4. Poner en práctica medidas organizativas que reduzcan la duración de la estancia innecesaria de los trabajadores en las áreas de mayor riesgo de exposición a la radiación.
5. Promover la utilización de máscaras de filtro para la protección de las vías respiratorias de los trabajadores, convenientemente ajustadas, del tipo indicado en la Figura 104, siempre que haya una concentración significativa de polvo radiactivo, ya sea por el trabajo realizado, ya sea debido a las condiciones meteorológicas como el viento. Este tipo de máscara filtrante, por lo general, proporciona un grado de protección de las vías respiratorias de 10 (APF = 10) pero no protege los ojos contra el polvo (ver 3.8.3 - Aparelhos de proteção filtrantes, página 120).
6. En situaciones de alto riesgo, como las de mantenimiento y limpieza en espacios confinados donde hay niveles muy altos de polvo, posible falta de oxígeno y la presencia de otros contaminantes, es necesario ventilar artificialmente el área de trabajo antes y durante la ejecución de los trabajos y deben ser utilizados aparatos autónomos de respiración del tipo indicado en la Figura 106. El suministro de aire fresco del exterior a través de una tubería y de sistema de protección de fugas (Figura 106, imagen a)) o a través de un aparato de respiración autónoma (Figura 106, imagen b)) suelen conferir un grado de protección de las vías respiratorias de 10000 y protección adicional de los ojos contra el polvo (ver apartado 3.8.4 - Aparelhos de proteção isolantes, página 123).
7. Señalar adecuadamente el riesgo radiológico en los lugares de trabajo en función del riesgo radiológico presente (conforme a lo indicado en el apartado 3.8.5 - Sinalização das zonas de risco, página 124).
8. Informar a los trabajadores expuestos de los riesgos radiológicos que puedan tener; desarrollar un plan de capacitación y de formación adecuados para que los mismos puedan promover su propia protección.

## **F - Conclusiones**

### **1 - Metodología**

La metodología, desarrollada y propuesta en este trabajo, permitió llevar a cabo la identificación y la evaluación de los riesgos para la salud de los trabajadores, debido a su exposición a las radiaciones ionizantes de origen natural. Al mismo tiempo, fue posible definir un conjunto de medidas eficaces para prevenir y proteger la salud de los trabajadores expuestos.

En el caso del estudio presentado, esta metodología permitió evaluar adecuadamente el efecto acumulativo de los distintos tipos de contaminación radiactiva presentes: la exposición a la radiación externa gamma, la exposición al polvo, la inhalación, ingestión y absorción de polvo con isótopos radiactivos y la exposición al radón en ambientes muy contaminados por polvo en el aire.

También se puede concluir que la metodología desarrollada en este trabajo es aplicable, con pocos ajustes, a otras actividades donde haya exposición a radiaciones ionizantes de origen natural, en particular, balnearios, cuevas, minas, centrales eléctricas de carbón y lugares de trabajo subterráneos.

### **2 - Revisión de la literatura**

Fueron identificados en la literatura muchos casos donde se encontraron niveles muy significativos de radiación ionizante en la industria de fertilizantes basados en el fosfato.

En el caso del estudio presentado, estos valores fueron confirmados por mediciones realizadas en laboratorio radiológico, por lo que se puede afirmar que la fosforita tiene una actividad radiológica importante y que esta actividad radiológica de la fosforita puede variar mucho dependiendo de su origen.

De acuerdo con las recomendaciones internacionales de protección radiológica, los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes de origen natural deben respetar los límites de dosis establecidos para el público en general (1 mSv/año).

La legislación portuguesa (*Decreto-Lei* Nº 222/2008) incorpora debidamente este principio, al indicar que todos los trabajadores que superen una dosis anual de radiación mayor a 1mSv deben ser considerados trabajadores expuestos. En esta situación, debe aplicarse al trabajador todos los requisitos de vigilancia médica, de supervisión de los lugares de trabajo y de protección radiológica previstas en dicha legislación.

### **3 - Revisión de los estudios epidemiológicos**

Los estudios epidemiológicos analizados, muestran un ligero aumento en la tasa de incidencia de cáncer, incluso para niveles bajos de exposición a la radiación externa gamma, incluso menos de 20 mSv/año. Estos resultados, asociados a situaciones de mayor sensibilidad individual de algunos trabajadores, indican la posibilidad de que la exposición a dosis bajas de radiación ionizante pueda inducir graves daños en la salud de los trabajadores expuestos.

Los estudios epidemiológicos, sobre la exposición al radón y sus descendientes radiactivos, muestran un aumento significativo en la tasa de cáncer de pulmón, incluso para niveles bajos de exposición, menor de 400 Bq/m<sup>3</sup>. Este efecto aumenta en los trabajadores que fuman, o cuando hay una exposición simultánea a otras sustancias inhaladas como el polvo y el humo.

Al evaluar el riesgo para la salud de los trabajadores expuestos también se debe tener en cuenta que hay situaciones de mayor sensibilidad individual en trabajadores, así como los efectos acumulativos y sinérgicos de los diferentes tipos de radiación presentes.

#### **4 - Simulación por ordenador**

Los valores de tasa de dosis obtenidos a través de las mediciones realizadas fueron similares a los valores proporcionados por el modelo, pudiendo por lo tanto ser aceptada la validez de la aplicación del modelo utilizado para la previsión de la tasa de dosis de radiación externa gamma.

#### **5 - Resultados obtenidos y análisis de los resultados**

##### a) Falta de percepción del riesgo por todas las partes interesadas

En las observaciones realizadas, se encontró que los trabajadores expuestos a las radiaciones ionizantes procedentes de fuentes naturales no son conscientes de los riesgos para su salud y no están informados sobre las medidas preventivas ni sobre las de protección radiológica adecuadas, es decir, el peligro es generalmente ignorado por trabajadores, empresa, técnicos de prevención de riesgos laborales y por la medicina de trabajo.

Además, se identificaron trabajos de alto riesgo tales como la limpieza de los filtros y tanques, mantenimiento de equipos, donde los niveles de exposición pueden ser muy significativos bien por radiación externa y/o interna. En general, estos trabajos se llevan a cabo por los trabajadores que no pertenecen a la empresa y como tal no son acompañados en materia de medicina del trabajo ni están incluidos en los registros epidemiológicos de la empresa.

##### b) Fosforita y residuos con altos niveles de radiactividad

Por medio de las mediciones realizadas se encontró que las fosforitas tienen altos niveles de radiactividad y que su valor varía mucho dependiendo de su origen. Así la fosforita que proviene del Senegal puede tener una actividad radiactiva, originada por los radionuclidos  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{235}\text{U}$ , más de cuatro veces superior a la fosforita procedente de Túnez.

Las mediciones realizadas demostraron que las cenizas presentes en los filtros tienen una importante actividad radiológica, por encima de 1500 Bq / kg, lo que constituye un peligro para los trabajadores que tienen a su cargo la limpieza, transporte y almacenamiento de esas cenizas, que así constituyen también un peligro para el medio ambiente.

##### c) Concentraciones elevadas de polvo en las zonas de trabajo

Se observó en las mediciones realizadas concentraciones de polvo de fosforita muy importantes, que no deben ser consideradas simplemente como de polvo inerte. En este caso particular de polvo de fosforita, con un importante contenido de isótopos radiactivos que emiten radiación ionizante, se identifican riesgos significativos para la salud de los trabajadores asociados a la inhalación, ingestión o absorción por la piel y por heridas no protegidas.

##### d) Dosis significativas de radiación en la industria de fertilizantes de fosfato

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que algunos trabajadores pueden recibir una dosis anual superior a 6 mSv/año. Ese valor resulta del efecto acumulativo de la exposición debido a: radiación externa gamma, radiación interna alfa

proveniente del radón y radiación interna alfa proveniente del polvo radiactivo que puede penetrar en el cuerpo por inhalación, ingestión, absorción a través de la piel y a través de heridas.

Se identificaron riesgos importantes para los trabajadores que participan en trabajos de mantenimiento, limpieza y recuperación ambiental de residuos de fosfoyeso que a menudo se acumulan en grandes pilas fuera de las instalaciones industriales.

Al mismo tiempo, hay riesgos importantes para el medio ambiente, que resultan de la contaminación del suelo, aguas subterráneas, lagos, arroyos y ríos, debidos a los depósitos de fosfoyeso acumulados por las industrias de fertilizantes fosfatados.

En los lugares de trabajo donde coinciden niveles elevados de polvo y poca ventilación, el componente más significativo de dosis de radiación observada corresponde al radón y sus descendientes radiactivos. Es el caso particular de las áreas técnicas, túneles y subterráneos de transporte de materia prima (fosforita).

Un aumento significativo del riesgo se encontró en las operaciones de mantenimiento que implican la exposición a partículas de polvo, limpieza de equipos y filtros de mangas de los sistemas de aspiración situada en la fábrica. Estos trabajos conducen a una mayor exposición ocupacional por inhalación e ingestión de polvo por los trabajadores y a una posible absorción de sustancias con niveles significativos de radiactividad a través de la piel y de heridas sin protección.

## **5 - Recomendaciones para la prevención y protección**

En el desarrollo de las recomendaciones debe tenerse en cuenta el principio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), según el cual todas las exposiciones a las radiaciones ionizantes deben mantenerse tan bajas como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta factores sociales y económicos.

Dentro de ese principio, es posible adoptar medidas de protección y prevención fáciles de implementar y efectivas como las siguientes:

- a) Formar e informar a los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes de origen natural de los riesgos para la salud derivados de esa exposición y qué medidas de prevención y protección radiológica deben observarse.
- b) Identificar y marcar convenientemente los lugares de trabajo donde existan peligros radiológicos, poniendo las señales adecuadas a los riesgos radiológicos identificados.
- c) Vigilar la salud de los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes a través de los exámenes médicos de admisión y periódicos adecuados al riesgo identificado.
- d) Controlar desde el punto de vista radiológico las materias primas recibidas de diversas fuentes para asegurarse de que no sobrepasan los niveles aceptables de radiactividad.
- e) No permitir que los trabajadores ingieran alimentos o bebidas en las zonas contaminadas por la radiación ionizante y así evitar la ingestión de polvo radiactivo.
- f) Colocar protección entre las fuentes de radiación y los trabajadores siempre que esto que sea posible.

- g) Aplicar las técnicas de ingeniería en el diseño de las instalaciones y el proceso de fabricación para reducir el polvo, facilitar la ventilación y renovación del aire.
- h) Mantener adecuadamente los filtros de los equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado y observar un cuidado especial en su posterior manipulación y limpieza después de la contaminación radiactiva.
- i) Ventilar los locales de trabajo que tienen poca ventilación natural, mantenerlos tanto como sea posible libres de polvo y de materiales que puedan producir la liberación y la acumulación de radón.
- j) Reducir lo más posible la estancia de los trabajadores en los lugares de mayor riesgo radiológico para así reducir la dosis total recibida.
- k) Promover el uso de guantes al manipular ácidos con radiactividad significativa, y así se impide la absorción de sustancias radiactivas a través de la piel y heridas abiertas.
- l) Usar máscaras de filtro y/o equipos de protección respiratoria y en casos extremos de contaminación utilizar equipos de respiración autónoma.
- m) Formar a los trabajadores en el uso adecuado de mascarillas y filtros de protección respiratoria y fomentar su uso en los trabajos con riesgo de contaminación.
- n) Ventilar artificialmente los espacios confinados donde se llevan a cabo trabajos de mantenimiento y de limpieza de equipos contaminados, tanto antes como durante la ejecución de esos trabajos; asegurar el uso de protección respiratoria bien ajustada y en situaciones de mayor riesgo usar dispositivos autónomos de respiración.
- o) Usar mascarillas de protección respiratoria, convenientemente ajustadas, siempre que haya formación de grandes cantidades de polvo, ya sea debido a trabajos de rutina, como sea la descarga de fosforita de los navíos o debido a condiciones climáticas adversas, como vientos fuertes.
- p) Tener en cuenta el impacto ambiental del proceso de fabricación y de los residuos producidos, como es el caso del fosfoyeso que es muy ácido, con muchos contaminantes tóxicos, como el fluoruro, arsénico, cadmio, cromo, plomo, mercurio y diversos productos de la desintegración nuclear del uranio. El fosfoyeso se encuentran entre los residuos, de origen natural, con más alta concentración de radiactividad.
- q) Minimizar el impacto ambiental y el riesgo para la salud de las poblaciones cercanas, a través de la reducción de:
  - La liberación de gases tóxicos en el medio ambiente porque se observa que los fluoruros de gases se emiten en grandes cantidades en las comunidades vecinas, causando graves daños ambientales y de salud pública.
  - La contaminación del suelo, aguas subterráneas, lagos, arroyos y ríos con residuos de yeso.
  - La liberación de gas radón de los depósitos de yeso hacia la atmósfera. El radón al ser transportado por vía aérea, siguiendo el régimen de vientos

locales, se puede acumular con concentraciones elevadas en áreas residenciales cercanas.

Debido a la intensidad y dedicación con que fue hecho este trabajo, el autor de esta tesis espera que este estudio ayude a la mejora de las condiciones laborales de todos los que de alguna forma están implicados en estos trabajos industriales con contaminantes radiactivos y especialmente, los trabajadores de mineralización y/o transformación de materias primas y sus derivados radiactivos.

Así todos ayudaremos a contribuir a que trabajos futuros en estas actividades sean menos peligrosos, tanto para los trabajadores, como para el medio ambiente.

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo introdutório explicam-se as razões da escolha do tema abordado neste trabalho de investigação e enumeram-se de forma sistemática os objetivos gerais e específicos que se pretendem atingir com o mesmo. São ainda formuladas as hipóteses de trabalho iniciais a desenvolver ao longo do presente estudo.

Prossegue-se com o estudo da exposição ocupacional às radiações ionizantes devidas a fontes naturais de radiação, caracterizando o efeito tóxico da radiação ionizante, os possíveis efeitos na saúde dos trabalhadores e as suas vias de penetração no corpo.

Caracteriza-se igualmente a radiação ionizante do ponto de vista físico, unidades de medida, poder energético e capacidade de penetração na matéria.

Analisa-se em Portugal algumas indústrias tradicionais capazes de potenciar o aparecimento de fontes radioativas de origem natural, que possam expor os trabalhadores a doses significativas de radiações ionizantes.

Como exemplos mais significativos, são abordados os casos das indústrias de processamento de fosfatos, as centrais térmicas a carvão, as minas e grutas turísticas e a exploração de águas mineromedicinais.

Estuda-se o impacto do radão no sistema respiratório dos trabalhadores provocado pela sua inalação, quando os locais de trabalho não são mantidos livres de poeiras e de fumos nem convenientemente arejados. Desenvolvem-se os princípios gerais da proteção radiológica face à radiação externa e face à radiação interna.

## 1.1 Motivação para a escolha do tema

A escolha do tema para este trabalho de investigação, “*Protección de los trabajadores frente al riesgo de exposición a radiaciones ionizantes en la industria de fosfatos en Portugal*”, foi motivada pela tomada de consciência, por parte do autor, de que indústrias em cujos processos se encontram elementos radioativos naturais, são susceptíveis de provocarem danos na saúde dos trabalhadores devido à sua exposição a radiações ionizantes. Um exemplo muito significativo desse tipo de indústrias é o caso do processamento dos fosfatos para o fabrico de fertilizantes para a agricultura que será objeto de estudo detalhado ao longo deste trabalho.

O problema da exposição laboral a fontes naturais de radiação ionizante, se bem que recentemente legislada em Portugal pelo Decreto-Lei 222/2008, não é ainda do conhecimento generalizado de empregadores e trabalhadores. Por outro lado, existe ainda um campo aberto para pesquisa e desenvolvimento científico nesta área, para encontrar bases técnicas sólidas que permitam a implementação de medidas de prevenção e de proteção contra a exposição laboral a fontes de radiação ionizante de origem natural.

É conhecido a nível internacional que a exploração, processamento e manipulação de fosfatos potencia o aparecimento de fontes de radioatividade de origem natural, que podem causar uma exposição dos trabalhadores a doses significativas de radiações ionizantes. A maioria dos depósitos de fosfatos em exploração contém altas concentrações de urânio, pelo que durante o processo de extração e de processamento da matéria-prima ocorre uma acumulação de resíduos radioativos e a conseqüente libertação de radão que, ao ser inalado, pode causar danos significativos na saúde dos trabalhadores expostos.

Os fosfatos usados em Portugal provenientes geralmente de Marrocos, da Tunísia e do Egipto, podem conter concentrações significativas de urânio que dependem muito dos locais específicos de onde são extraídos e não são sistematicamente controlados do ponto de vista radiológico à sua chegada. São manipulados, processados, transformados, armazenados e ainda geram enormes quantidades de resíduos industriais (fosfogesso) que contém concentrações elevadas de isótopos radioativos.

Por outro lado, os depósitos de fosfogesso (ver Figura 20 e Figura 29) gerados pelas indústrias de fabrico de fertilizantes podem também produzir danos no ambiente de difícil recuperação, porque estão impregnados com ácido fosfórico e outras substâncias que normalmente acompanham o fosfato natural como o arsénio, o chumbo, o mercúrio e o cádmio, e de elementos radioativos, como o urânio e os seus descendentes originados pelo decaimento nuclear.

Os fertilizantes produzidos a partir desses fosfatos contêm potássio-40 e pequenas quantidades de urânio e dos seus descendentes radioativos, quando usados na agricultura são incorporados em plantas e através destas nos alimentos e noutros produtos de consumo, pessoas e animais, como por exemplo nas plantas de tabaco adubadas com fosfatos.

A diretiva da EU 96/29 Euratom (European Council, 1996) obriga os Estados Membros a identificar e avaliar a exposição laboral a fontes naturais de radiação ionizante. Em Portugal, o Decreto-lei 222/2008 de 17 de Novembro, que transpõe parcialmente a referida diretiva, e que entrou em vigor em 16 de Março de 2009, prevê o estabelecimento de normas básicas

de segurança relativas à proteção da saúde, dos trabalhadores profissionalmente expostos contra os perigos resultantes das radiações ionizantes, incluindo as fontes de radiação natural.

Constatou-se igualmente a nível nacional que a exposição dos trabalhadores a fontes naturais de radiação ionizante não está convenientemente avaliada, controlada e regulamentada, ao contrário da exposição a radiações artificiais, e que o impacto da exposição laboral a níveis baixos de radiação ionizante é geralmente pouco avaliado em termos de saúde ocupacional. Os seus efeitos não são imediatos, podendo as consequências de uma exposição a doses pequenas de radiação ionizante manifestarem-se apenas muitos anos mais tarde, tornando difícil estabelecer uma relação clara causa efeito.

A manipulação de matérias-primas e produtos finais com concentrações significativas de urânio, origina forçosamente a libertação para a atmosfera de radão, gás radioativo que, quando inalado, tem um potencial elevado para produzir danos significativos na saúde dos seres humanos.

Se os locais de trabalho não forem mantidos livres de poeiras e fumos nem convenientemente arejados, os produtos do decaimento radioativo do radão (polónio, bismuto e chumbo radioativos) associados às poeiras e fumos do ar são inalados e depositam-se ao longo do aparelho respiratório. A radiação alfa associada a esses isótopos pode provocar danos irreparáveis nos tecidos dos pulmões, incluindo o desenvolvimento de neoplasmas.

Em Portugal, a identificação, a avaliação e o controlo da exposição à radioatividade, proveniente da inalação de radão e dos seus descendentes radioativos em ambiente laboral, não estão suficientemente estudados. Se bem que esteja previsto, no âmbito do Plano Nacional de Ação Ambiente e Saúde (PNAAS), um conjunto de iniciativas de avaliação e controlo da exposição das populações ao radão, estas ações ainda não foram iniciadas até à data e também não incidem particularmente na exposição dos trabalhadores ao radão em ambiente laboral.

## **1.2 Objetivos do trabalho**

O objetivo geral deste trabalho centra-se no desenvolvimento e implementação de uma metodologia padronizada para avaliar os riscos na saúde dos trabalhadores expostos à radiação ionizante na indústria de fertilizantes fosfatados e no desenvolvimento de métodos adequados de prevenção e de proteção que permitam reduzir o nível de exposição com vista à proteção da saúde.

Procura-se atingir esse objetivo geral proposto através da concretização dos seguintes objetivos específicos:

1. Identificar as fontes naturais de radiação ionizante e caracterizar os riscos derivados da exposição a essas radiações em locais de trabalho.
2. Estudar os efeitos na saúde derivados da exposição a radiações ionizantes com base na literatura, designadamente, em estudos epidemiológicos existente.
3. Recolher e compilar informação sobre legislação, normas e recomendações internacionais aplicáveis para a proteção dos trabalhadores face à exposição a radiações ionizante.
4. Recolher informação sobre indústrias portuguesas, em cujos processos se encontram elementos radioativos naturais com potencial para provocarem danos na saúde dos trabalhadores.
5. Realizar um trabalho de campo numa unidade de processamento de fosfatos (ácido fosfórico e fertilizantes) com vista a medir os níveis de exposição a radiações alfa, beta e gama em locais de trabalho característicos.
6. Identificar e medir os locais de trabalho com níveis de exposição elevados ao radão e seus descendentes e verificar a correlação entre o radão e o empoeiramento nesses mesmos locais.
7. Identificar os resíduos provenientes da indústria dos fosfatos com potencial radioativo e estimar os níveis de atividade e o risco potencial para a saúde dos trabalhadores.
8. Propor e aplicar um método de simulação digital em computador que permita, em fase de projeto de futuras instalações que possam estar sujeitas a estes riscos, prever os níveis de radiação ionizante que poderão ocorrer e assim minimizar a futura exposição dos trabalhadores a essas radiações.
9. Propor medidas de prevenção e de proteção coletivas e individuais para minimizar o risco da exposição a radiações provenientes das fontes radioativas naturais.
10. Indicar caminhos de investigação para futuros desenvolvimentos nesta área que permitam aprofundar este tema, onde existe ainda um campo aberto para pesquisa e produção de conhecimento científico.

### 1.3 Hipóteses a desenvolver

Neste trabalho, parte-se do pressuposto inicial de que a proteção dos trabalhadores contra a exposição a radiações ionizantes fundamenta-se na hipótese mais conservativa de que qualquer dose de radiação, por mais baixa que seja, pode provocar efeitos negativos na saúde.

Assim, segue-se o princípio ALARA *As Low As Reasonably Achievable*, segundo o qual, todas as exposições às radiações ionizantes devem ser mantidas tão baixas como seja razoavelmente possível, tendo em consideração fatores sociais e económicos.

Neste contexto, pretende-se desenvolver as seguintes hipóteses de trabalho:

- Em indústrias de fertilizantes fosfatados existem níveis elevados de exposição a radiações ionizantes com perigo potencial para a saúde dos trabalhadores expostos.
- Na indústria dos fosfatos existem trabalhadores expostos a níveis de radiações ionizantes gama de origem natural significativos.
- Existe um risco particularmente elevado para a saúde dos trabalhadores, derivado da exposição a radiações alfa provenientes da inalação de radão e dos seus descendentes radioativos (polónio, bismuto e chumbo radioativo) em locais de trabalho.
- Existe uma relação causa efeito demonstrável entre a inalação de radão e dos seus descendentes radioativos e o desenvolvimento de câncer pulmonar em trabalhadores expostos.
- A exposição ao radão associada a hábitos tabagistas e à exposição a outros contaminantes, como sejam o silício e os asbestos, pode potenciar significativamente o desenvolvimento de câncer pulmonar nos trabalhadores.
- Podem ser desenvolvidos e implementados mecanismos simples e eficazes de monitorização e controlo da exposição laboral a radiações ionizantes de origem natural em locais de risco elevado.
- É possível desenvolver em Portugal uma cultura de sensibilização para os riscos resultantes da exposição a radiações ionizantes de origem natural e promover as bases científicas que permitam a implementação de políticas adequadas de prevenção e de proteção dos trabalhadores.

## **1.4 Efeitos na Saúde das Radiações Ionizantes**

### **1.4.1 Efeitos da Radioatividade na Saúde**

As radiações ionizantes são constituídas por radiações eletromagnéticas de elevada energia, superior a 10 keV, (raios gama e raios X), ou por radiações corpusculares ou partículas (raios alfa e beta) que são capazes de provocar, direta ou indiretamente, a formação de iões (CSN (Consejo de Seguridad Nuclear), 1989). A ionização, daí decorrente, altera quimicamente os átomos e as moléculas dos tecidos vivos, podendo originar alterações celulares (Clarke & Southwood, 1989).

A legislação portuguesa (Decreto-Lei 222/2008) define «Radiação ionizante», como a transferência de energia sob a forma de partículas ou ondas eletromagnéticas com um comprimento de onda igual ou inferior a 100 nm (nanómetros) ou com uma frequência igual ou superior a  $3 \times 10^{15}$  Hz e capaz de produzir iões direta ou indiretamente.

A mesma legislação indica no que respeita à exposição ocupacional a fontes de radiação de origem natural, que sempre que a realização de trabalhos implique uma exposição a fontes de radiação natural da qual possa resultar uma dose efetiva anual superior a 1 mSv para os trabalhadores, estes devem ser considerados trabalhadores expostos, aplicando-se todos os requisitos de vigilância, monitorização e proteção radiológica referidos no referido decreto-lei e demais legislação aplicável.

Os locais de trabalho, com risco de exposição a radiações naturais, indicados na referida legislação incluem estabelecimentos termais, grutas, minas, locais de trabalho subterrâneos ou outros cujas condições ambientais tenham relevância para a dose de radiação anual.

É referido na literatura que as radiações ionizantes são um agente físico tóxico que pode induzir efeitos negativos na saúde, sendo os mais referenciados a morte celular, atrofia e lesões nos tecidos, enrugamento da pele, cataratas, náuseas, alterações gástricas, hemorragias e morte. As alterações a nível da estrutura celular poderão dar origem ao aparecimento de neoplasias, modificações a nível celular, nomeadamente nas cadeias do ADN com consequentes alterações cromossómicas.

Os efeitos das radiações ionizantes em doses baixas são frequentemente observáveis, apenas vários anos depois da exposição, sendo assim difícil de estabelecer uma relação clara causa-efeito e consequentemente determinar valores limite de exposição que sejam seguros (Snashall & Patel, 2003).

Importa referir que o homem está e sempre esteve submetido à radiação ionizante que chega de várias proveniências. Chega desde o espaço exterior na forma de raios cósmicos e existe também na atmosfera devido às emissões de radão, gás radioativo, e da sua descendência radioativa (polónio, bismuto e chumbo radioativos).

Os isótopos radioativos que surgem na natureza de forma natural penetram e permanecem em todos os seres vivos. O próprio homem é uma fonte de radioatividade, já que contém no seu corpo potássio-40 ( $^{40}\text{K}$ ) que é um isótopo radioativo, produzindo um adulto cerca de 3000 desintegrações atómicas por segundo (60 Bq/Kg). De igual modo, todas as espécies neste planeta evoluíram naturalmente na presença da radiação ionizante.

Os seres vivos, quando expostos a doses pequenas de radiação, podem não apresentar, de imediato, nenhum efeito biológico visível, os quais podem aparecer muito tempo depois da exposição, designados por efeitos estocásticos das radiações. No entanto quando as doses

administradas são elevadas, podem aparecer de imediato danos visíveis nos tecidos e nos órgãos, designados por efeitos determinísticos ou imediatos das radiações.

Este trabalho recolhe informação sobre os efeitos na saúde resultantes da exposição a pequenas doses de radioatividade de origem natural, pelo que se pesquisou na literatura exemplos de estudos significativos, como os que foram realizados no norte da Rússia onde se estudaram zonas com contaminações significativas por rádio e urânio.

Na República de Komi (Rússia) observaram-se efeitos negativos em animais e em plantas presentes em áreas com níveis elevados de radioatividade natural. Os efeitos observados mais significativos foram um aumento do nível de mutações cromossómicas e genéticas, processos destrutivos nos tecidos internos de animais, distúrbios ao nível da reprodução e redução da viabilidade posterior. Foram no entanto observados processos compensatórios, que permitem que animais e plantas possam sobreviver nessas condições adversas, não tendo sido observados sinais de adaptação.

Em contraste, na República Sakha (Yakutia) foram revelados em diferentes espécies vegetais que habitam uma região com maior nível de radioatividade natural, a estimulação do processo de crescimento, da fotossíntese, da síntese de antioxidantes endógenos de baixo peso molecular e da resposta adaptativa.

As evidências encontradas refletem um cenário complexo nas mudanças microevolutivas que ocorrem em populações de plantas e de animais que habitam as áreas com maior nível de radioatividade natural.

Relativamente à exposição dos seres humanos à radiação de fundo natural, com valores um pouco acima dos valores usuais, não foi detetado um aumento estatisticamente significativo da taxa de incidência de câncer pulmonar (Forastiere et al., 1985).

A exposição à radiação ionizante pode ser externa ou interna. A exposição à radiação externa ocorre quando a fonte de radiação está fora ou é externa ao corpo humano.

Um exemplo deste tipo de exposição ocorre quando uma fonte de radiação externa como um gerador de raios X ou um medidor de densidade de solos emissor de raios gama irradia o corpo humano. Outro exemplo, mais detalhadamente analisado neste trabalho, é a exposição a radiação gama originada por matérias-primas como a fosforite que contem concentrações significativas de urânio. Neste tipo de exposição a irradiação cessa imediatamente quando a fonte de radiação é afastada ou blindada.

A exposição à radiação interna ocorre quando um material radioativo entra no corpo humano através de fissuras na pele, quando é ingerido, bebido, ou inalado. Um exemplo deste tipo de exposição é a radiação alfa produzida dentro dos pulmões aquando da inalação de gases e de poeiras radioativas, como as produzidas pelo radão, torão e seus descendentes radioativos.

Um exemplo ilustrativo de intoxicação por ingestão de uma substância radioativa é o caso do ex-espião russo Alexander Litvinenko, cuja morte em 2006 foi relacionada com a ingestão de uma dose de Polónio-210. Trata-se de um elemento radioativo que existe na natureza em quantidades muito pequenas e que emite partículas alfa muito perigosas para os tecidos e órgãos interiores. É uma substância muito difícil de identificar pelos médicos, quando ingerida, mas a Agência de Proteção da Saúde Britânica confirmou que foi encontrada na urina de Litvinenko uma grande quantidade de radiação alfa provavelmente emitida por Polónio-210.

## **Efeitos da Radioatividade no Corpo Humano**

A radiação ionizante tem capacidade para excitar ou ionizar átomos e moléculas nos tecidos, deslocando eletrões das suas órbitas. As lesões nos tecidos vivos expostos resultam da transferência de energia para os átomos e moléculas constituintes da estrutura celular (Nunes, 2010).

A excitação e a ionização das moléculas por radiações ionizantes pode ter os seguintes efeitos nos tecidos biológicos (ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry), 1999):

- Produzir radicais livres;
- Quebrar ligações químicas;
- Produzir novas ligações químicas e ligação cruzada entre macromoléculas;
- Danificar moléculas que regulam processos celulares vitais como por exemplo, ADN (ácido desoxirribonucleico), ARN (ácido ribonucleico), proteínas.

É conhecido que a célula pode reparar determinados níveis de danos celulares. Em doses baixas, como as recebidas diariamente provenientes do fundo radioativo natural, o dano celular é rapidamente reparado não existindo risco para a saúde.

Em níveis mais altos de exposição resulta a morte celular. Em doses extremamente elevadas, as células mortas não podem ser substituídas com suficiente rapidez e os tecidos deixam de funcionar com riscos muito elevados para a saúde (Clarke & Southwood, 1989).

### **Sensibilidade dos Tecidos**

Em geral, a sensibilidade à radiação dos tecidos apresenta as seguintes características:

- É diretamente proporcional à taxa de proliferação das suas células;
- É inversamente proporcional ao grau de diferenciação celular.

Assim, podemos ordenar os tecidos e órgãos do ponto de vista da sua rádio sensibilidade, dos mais sensíveis para os menos sensíveis: sangue, órgãos reprodutivos, pele, ossos e dentes, músculos e sistema nervoso. Um embrião em desenvolvimento é mais sensível nas fases iniciais de diferenciação e um feto é mais sensível à radiação na fase inicial do que na fase final. Isto obriga a cuidados adicionais na prevenção da exposição de mulheres grávidas (ATSDR, 1999).

### **Efeitos cancerígenos resultantes de doses elevadas no corpo humano**

O efeito cancerígeno das radiações foi observado pela primeira vez no início do século XX nos primeiros trabalhadores que foram expostos a níveis de radiação elevados, tendo desenvolvido cânceres de pele e leucemias (Upton et al., 1986). Em termos laborais estão bem documentados os casos dos pintores de ponteiros de relógios e mostradores de instrumentos para a aviação com tintas radioativas à base de tório<sup>6</sup> e dos mineiros que trabalhavam em minas ricas em rádio (ATSDR, 1999).

---

<sup>6</sup> Foi uma prática muito comum entre pintores de tintas radioluminescentes lambar os pincéis para os afiar antes de os imergir na tinta de rádio e assim poderem pintar mais facilmente os pequenos detalhes. Isto causou uma acumulação de rádio radioativo na boca e garganta dos pintores que posteriormente sucumbiram com cânceres fatais.

No caso dos mineiros, os efeitos negativos da radioatividade na saúde foram já observados por Georgius Agricola<sup>7</sup> em 1556 (há cerca de 450 anos). Agricola refere na sua obra "*De re metallica*" que ocorria uma grande mortalidade entre os mineiros que na Europa Central exploravam jazidas. Refere textualmente "os mineiros são, por vezes, mortos pelo ar pestilento que respiram".<sup>8</sup> Quatro séculos mais tarde verifica-se serem muito ricas em rádio, elemento progenitor do radão.

Os tumores benignos e malignos induzidos pela irradiação caracterizam-se por demorar anos ou dezenas de anos a manifestar-se e não apresentam nenhuma característica conhecida que permita distingui-los dos produzidos por outras causas (Hornung & Meinhardt, 1987).

Em geral, só foi possível detetar a indução de tumores em pessoas, após exposições relativamente grandes a radiações superiores a 0,5 Sv. As consequências e tipos de neoplasias variam significativamente com a idade, sexo das pessoas expostas e com a sua suscetibilidade individual às radiações (NAS (National Academy of Sciences), 1990).

Por outro lado, devem ser tidos em conta os efeitos aditivos, sinérgicos ou antagónicos das radiações ionizantes na presença de outras substâncias tóxicas, irritantes ou cancerígenas (UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 1994). Um exemplo significativo é a exposição laboral a radiações ionizantes na presença de substâncias como os asbestos, sílica, lixívia e compostos orgânicos solúveis com efeitos muito negativos na saúde dos trabalhadores (Mc Laughlin et al., 1992).

### **Efeitos imediatos e efeitos retardados à exposição.**

Os efeitos da radiação ionizante podem ser classificados em termos do tempo de aparecimento dos sintomas de doença da seguinte forma:

Efeitos imediatos: doenças e queimaduras que ocorrem logo após a exposição a doses de radiação elevadas, durante um período de tempo curto.

Efeitos retardados: formação de cataratas e indução de cânceres que podem aparecer meses ou anos após a exposição a doses baixas de radiação.

---

<sup>7</sup>O seu nome original é Georg Pauer (1494-1555), foi um estudioso e médico alemão conhecido como "o pai da mineralogia", nasceu em Glauchau na Saxónia e é conhecido pelo seu livro *De Re Metallica* (Sobre a Natureza dos Metais).

<sup>8</sup>"*De Re Metallica*" é o primeiro grande livro sobre a mineração, foi escrito em latim por Georgius Agricola, médico de uma próspera comunidade de mineração e fundição de minério de ferro na Boémia na Europa Central, produzido em 1556, está profusamente ilustrado. Foi traduzido para inglês em 1912 por Herbert C. Hoover, um jovem engenheiro de minas que se formou na Universidade de Stanford e veio a ser presidente dos Estados Unidos no período 1929-1933.

## Efeitos imediatos à exposição

Doses elevadas de radiação aplicadas a todo corpo de adultos saudáveis, durante curtos períodos de tempo, podem produzir efeitos tais como alteração da composição do sangue, fadiga, diarreia, náuseas e morte. Esses efeitos aparecem dentro de horas, dias ou semanas dependendo da dose recebida. Quanto maior for a dose mais rapidamente surgem os efeitos. O Quadro 1 relaciona os efeitos com as doses recebidas.

Quadro 1 - Efeitos da exposição a doses elevadas de radiação

Efeito	Dose (Sv)	Dose (rem)
Alteração de contagens no sangue	0,5	50
Vômitos (limiar)	1	100
Mortalidade (limiar)	1,5	150
LD <sub>50/60</sub> (*) (com apoio médico mínimo)	3,2 - 3,6	320 - 360
LD <sub>50/60</sub> (com apoio médico adequado)	4,8 - 5,4	480 - 540
100% Mortalidade (com o melhor tratamento médico existente)	8	800

(\*) LD<sub>50/60</sub> é a dose com a qual 50% das pessoas expostas morre em 60 dias

(Adaptado de NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements), 1989)

## Exposição parcial do corpo

Os efeitos agudos anteriormente indicados acontecem quando uma dose elevada de radiação é aplicada ao corpo inteiro. Se só uma parte do corpo ou órgão é irradiado, como pode acontecer num tratamento médico, os efeitos são significativamente diferentes. Por exemplo, uma dose de 5 Sv aplicada a todo o corpo pode causar a morte, sendo que a mesma dose aplicada só na pele pode apenas causar perda de cabelo e alterações na pele.

Como exemplo, apresenta-se na Figura 1 uma fotografia de uma lesão na coxa induzida por uma irradiação elevada que ocorreu no acidente radiológico de Goiânia, Brasil (IAEA (International Atomic Energy Agency), 1988). O acidente radiológico de Goiânia foi um grave episódio de contaminação por radioatividade ocorrido no Brasil. A contaminação teve início em 13 de Setembro de 1987, quando um aparelho utilizado em radioterapias foi furtado das instalações de um hospital abandonado, na zona central de Goiânia<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> A contaminação em Goiânia foi originada por uma cápsula que continha cloreto de céσιο - um sal obtido do radioisótopo 137 do elemento químico céσιο. A cápsula de céσιο foi retirada do equipamento médico e posteriormente aberta num ferro-velho para o reaproveitamento do chumbo. O dono do ferro-velho expôs ao ambiente 19,26 g de cloreto de céσιο-137 (CsCl), um sal muito parecido com o sal de cozinha (NaCl), mas que emite um brilho azulado quando em local desprovido de luz. No total 112.800 pessoas foram expostas aos efeitos do céσιο, muitas com contaminação corporal externa revertida a tempo.



**Figura 1 - Lesão na coxa induzida por radiação cerca de 25 dias após a irradiação**

(Fonte: The Radiological Accident in Goiânia (IAEA (International Atomic Energy Agency), 1988))

## **Efeitos retardados à exposição**

### **a) Cataratas**

A formação de cataratas é induzida quando uma dose de radiação é aplicada na lente do olho, sendo que as cataratas provocadas pela radiação podem levar de meses a anos a aparecer (ATSDR, 1999).

### **b) Câncer**

O estudo de pessoas expostas a doses elevadas de radiação mostrou que existe um risco de câncer induzido associado a essa exposição. Os cânceres associados à radiação incluem leucemia, mieloma, câncer de mama, câncer de pulmão e câncer de pele. Cânceres induzidos pela radiação podem demorar 10 - 15 anos ou mais a surgir.

O risco da exposição à radiação poder causar câncer depende de vários fatores, designadamente, da quantidade e do tipo de radiação, das doses individuais recebidas, da idade e do sexo da pessoa, da sua suscetibilidade individual, se a exposição ocorreu durante um curto ou um longo período de tempo e da presença de outras substâncias que possam reforçar o efeito indutor (ATSDR, 1999).

Para doses baixas de radiação também existe o risco de indução de câncer, confirmado por muitos estudos epidemiológicos publicados nesta área, tal como indicado na bibliografia incluída. Estudos recentes demonstram a existência de um efeito colateral em células não irradiadas diretamente (*Bystander effects in irradiated cell populations*) segundo o qual também podem produzir-se alterações genéticas em células não diretamente irradiadas por radiação ionizante. Estas evidências poderão ser importantes neste estudo devido aos possíveis efeitos carcinogênicos provocados por doses muito baixas de radiação ionizante, como seja a emissão de partículas alfa pelo gás radão e pelos seus descendentes radiativos (Little, 2000).

## Risco de indução de câncer com doses baixas de radiação

Muito do que é conhecido sobre o efeito das radiações na saúde humana resulta dos estudos realizados em pessoas sujeitas a utilizações médicas das radiações, em sobreviventes do bombardeamento atômico do Japão e, mais recentemente, em pessoas expostas à radiação no acidente da central nuclear de Chernobyl.

O estudo (ICRP (International Commission on Radiological Protection), 2005) resume as evidências científicas relevantes para a quantificação do risco de câncer associado a doses baixas de radiação. De acordo com esse estudo, a adoção de um modelo dose-resposta LNT (Modelo Linear sem Limiar), representado na Curva B da Figura 2 é adequada em termos da proteção radiológica dos trabalhadores expostos a radiações ionizantes de origem natural.

Neste trabalho para estimar o risco de desenvolvimento de câncer devido à exposição a doses baixas de radiações ionizantes (efeitos estocásticos) considera-se que existe um aumento de risco de câncer fatal de 0,04 por Sievert por ano para os trabalhadores (ICRP (International Commission on Radiological Protection), 1990).

No entanto permanecem ainda muitas incertezas, pelo que são propostas por muitos investigadores curvas dose-resposta de radiação versus risco de câncer não lineares e com limiar como se apresenta a título meramente ilustrativo na Figura 2 (CPEP (Contemporary Physics Education Project), 2003).

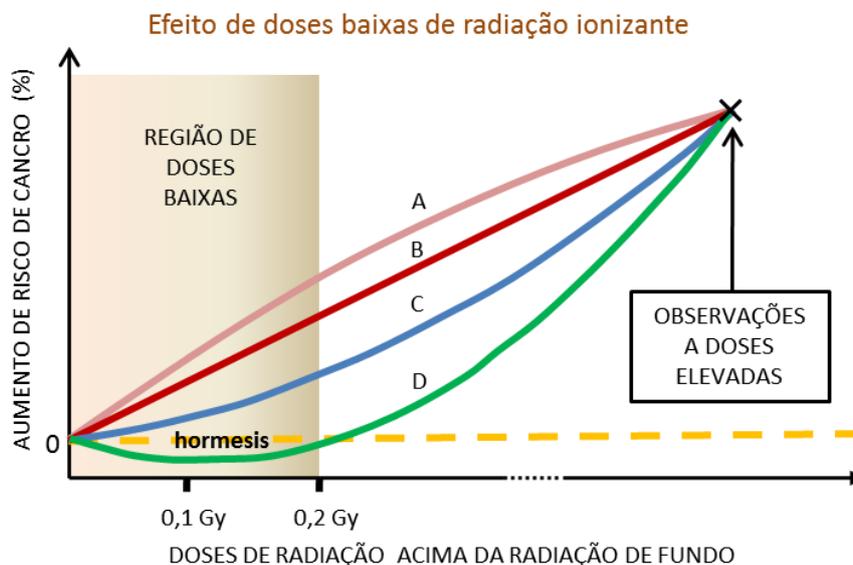


Figura 2 - Extrapolações alternativas do risco de câncer versus radiação

(Ilustração do autor)

Onde,

Curva A - Risco maior a baixas doses do que previsto pelo modelo linear.

Curva B - É assumida a linearidade dose-resposta.

Curva C - É assumida uma curva linear-quadrática na qual o risco é mais reduzido para baixas doses.

Curva D - Prevê uma zona a baixas doses onde o efeito da radiação pode ser benéfico, designado por hormesis<sup>10</sup>.

Os estudos epidemiológicos realizados para determinar como pode variar o risco de câncer em função da exposição a baixos níveis de radiação não chegaram até à data a conclusões definitivas.

Não foi possível demonstrar que populações que habitam zonas onde existem níveis elevados de radiação de fundo apresentem aumentos nas taxas de incidência de câncer que lhe possam ser atribuídos (NAS (National Academy of Sciences), 1990; UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 1994).

Alguns estudos sugerem pelo contrário, uma relação inversa entre os níveis de radiação de fundo e as taxas de incidência de câncer, o que alguns investigadores interpretam como uma demonstração da existência de efeitos benéficos (horméticos) da irradiação em doses muito baixas, de acordo com as respostas adaptativas de determinados sistemas celulares (UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 1994).

Pode concluir-se a partir dos dados atualmente disponíveis que menos de 3 % dos casos de câncer na população são atribuíveis a radiação natural de fundo (NAS (National Academy of Sciences), 1990; IARC (International Agency for Research on Cancer), 1994a). Por outro lado, até cerca de 10 % dos cânceres pulmonares podem atribuir-se à radiação proveniente do radão em recintos fechados (Lubin, et al., 1997). Este é precisamente um dos temas mais significativos a aprofundar neste trabalho.

Relativamente à exposição ao radão, está bem documentado na literatura um aumento da taxa de incidência de câncer pulmonar, observado em estudos epidemiológicos levados a cabo com mineiros que trabalharam em minas onde existiam concentrações elevadas de radão (Darby et al., 1995; Hornung & Meinhardt, 1987; Hnizdo et al., 1997).

### **Exposição Pré-natal à Radiação**

Os tecidos em diferenciação e proliferação rápida são mais sensíveis a danos devidos à radiação. Consequentemente, a exposição às radiações pode provocar problemas de desenvolvimento, especialmente no desenvolvimento cerebral, quando um embrião / feto sofre uma exposição pré-natal. As condições de desenvolvimento pré-natal geralmente associadas à exposição a radiações incluem baixo peso ao nascer, microcefalia, atraso mental e outros problemas neurológicos. Estes efeitos são relacionados com o tempo fetal em que ocorre a exposição. A dose limiar para efeitos do desenvolvimento dessas anomalias é de cerca de 10 rem (0,1 Sv) (ATSDR, 1999).

São ainda inconclusivas as evidências de que o embrião / feto em desenvolvimento é mais sensível ao câncer induzido por radiação, no entanto, é prudente assumir que pode existir algum aumento de sensibilidade.

---

<sup>10</sup> Hormesis da radiação é a hipótese (ainda não demonstrada) de que baixas doses de radiação ionizante, pouco acima dos níveis de radiação de fundo natural, podem produzir efeitos benéficos, estimulando a ativação dos mecanismos de reparação que protegem contra as doenças, que não são ativados normalmente na ausência da ionizante radiação.

### 1.4.2 Vias de Penetração

A penetração das radiações no corpo humano pode ocorrer através da pele, por inalação de radão e de poeiras radioativas, por ingestão de substâncias radioativas e através de feridas abertas. A penetração da radiação gama no corpo humano está ilustrada na Figura 3.

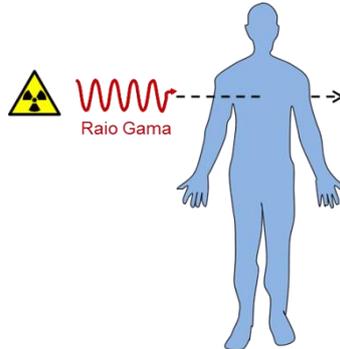


Figura 3 - Penetração da radiação externa gama no corpo

(Ilustração do autor)

A penetração da radiação alfa no corpo humano pode acontecer por inalação, ingestão e absorção pela pele e por feridas de substâncias e poeiras que contenham radionuclídeos emissores de radiação alfa, como se indica na Figura 4.

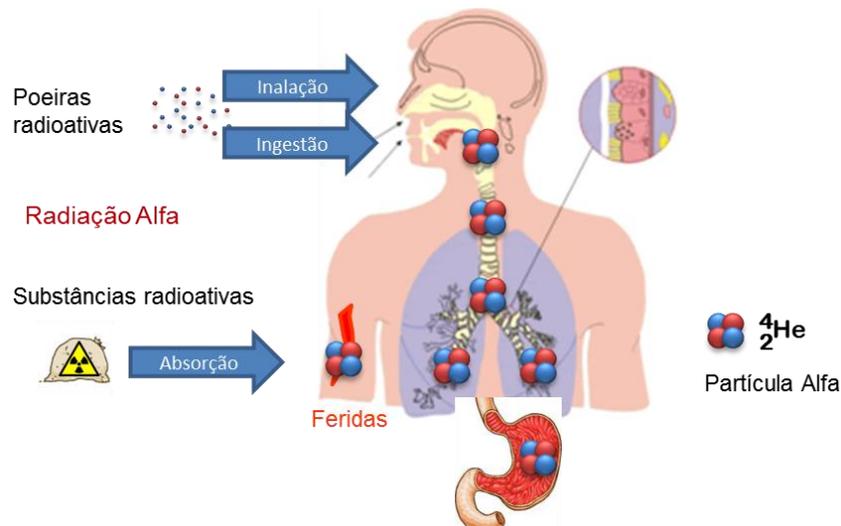


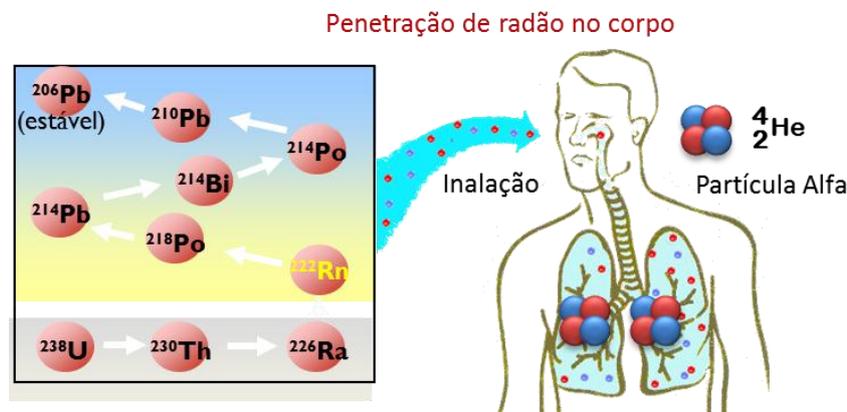
Figura 4 - Vias de penetração da radiação alfa no corpo

(Ilustração do autor)

A penetração da radiação alfa através das vias respiratórias pode ser muito significativa em ambientes empoeirados com partículas radioativas, o risco resultante depende muito da dimensão e da quantidade de partículas em suspensão no ar.

O sistema respiratório está dividido em três grandes regiões: a primeira região superior inclui o nariz, a boca, nasofaringe, orofaringe, laringe e epiglote nas quais é possível a deposição de partículas cujo diâmetro aerodinâmico equivalente seja de 10 a 50  $\mu\text{m}$ ; a segunda região inclui as vias respiratórias da traqueia através dos brônquios terminais (partículas entre 5 e 10  $\mu\text{m}$ ); a terceira região pulmonar inclui os brônquios respiratórios, ductos alveolares, sacos alveolares e alvéolos (partículas menores que 2,5  $\mu\text{m}$ ).

A penetração do radão no corpo humano dá-se principalmente através da inalação do gás como se indica na Figura 5, podendo também ocorrer por ingestão de líquidos que contenham radão diluído.



**Figura 5 - Via de Penetração do radão no corpo**

(Ilustração do autor)

Uma concentração elevada de radão no ar gera um perigo significativo para a saúde dos seres humanos. Os descendentes do decaimento nuclear do radão (polônio, bismuto e chumbo) ao associarem-se a partículas de pó entram no sistema respiratório, onde emitem partículas alfa altamente energéticas. Estando esses radionuclídeos aderidos às poeiras existente no ar, o trabalhador expõe-se principalmente ao respirar essas poeiras; dependendo do tamanho das poeiras, esses radionuclídeos podem depositar-se nos pulmões e aplicar uma dose de radiação alfa de alta energia a esse tecido pulmonar.

Sabe-se que o aumento da taxa de incidência de câncer pulmonar está relacionado com a inalação de radão e dos seus descendentes radioativos de semivida curta. Esta relação causa efeito está igualmente bem estabelecida nos estudos epidemiológicos levados a cabo em mineiros (Kusniak et al., 1993). Quanto à exposição doméstica ao radão em doses baixas, a magnitude do risco e a sua dependência de fatores fisiológicos e ambientais ainda não esta bem definida, quer experimentalmente ou quer epidemiologicamente (Quindó et al., 1991).

No entanto, um estudo epidemiológico levado a cabo nos EUA evidencia um aumento da taxa de incidência de câncer pulmonar na população branca de ambos os sexos residentes em zonas graníticas (onde existe uma maior libertação de radão pela crosta terrestre) em comparação com populações residentes em outras zonas não graníticas (Archer, 1987).

A concentração dos descendentes radioativos do radão na atmosfera pode ser influenciada pela existência de campos eletromagnéticos produzidos por linhas de energia de 50 Hz, traduzindo-se numa maior emissão de radiação alfa na sua proximidade. Foi observada uma deposição dos radionuclídeos  $^{218}\text{Po}$  e  $^{214}\text{Po}$  de cerca de 18 vezes superiores junto a linhas de energia e junto a aparelhos elétricos domésticos (Henshaw et al., 1996). Este efeito menos conhecido também deve ser considerado na avaliação dos riscos resultantes da exposição ao radão dos trabalhadores que estão junto de máquinas ou outros aparelhos elétricos, onde a concentração de radionuclídeos pode ser significativamente mais elevada do que no ar ambiente.

## 1.5 Caracterização da Radiação Ionizante

Os tipos de radiação ionizante estudados neste trabalho são: **emissão alfa, emissão beta e radiação gama.**

### **Emissão Alfa**

A **emissão alfa, desintegração alfa** ou **decaimento alfa** é uma forma de decaimento radioativo que ocorre quando um núcleo atômico instável emite uma partícula alfa transformando-se num outro núcleo atômico com número atômico duas unidades menor e número de massa 4 unidades menor.

Por exemplo a desintegração alfa do urânio  $^{238}_{92}\text{U}$  a tório  $^{234}_{90}\text{Th}$  está apresentada na Equação 1:



que também pode ser escrita como indicado na Equação 2:



O índice superior à esquerda indica o número mássico (número de prótons mais o número de nêutrons), o índice inferior à esquerda indica o número atômico (número de prótons).

A partícula alfa consiste num núcleo de um átomo de hélio corresponde a um ião de carga 2+ com dois nêutrons e dois prótons.

As partículas alfa possuem uma energia muito elevada devido à sua massa e à sua elevada velocidade, de aproximadamente 20.000 km/s no ar, pelo que podem provocar sérios danos nos tecidos dos organismos vivos, principalmente no caso de inalação ou de ingestão de substâncias emissoras de partículas alfa (caso dos descendentes do radão).

No entanto, o seu poder de penetração no corpo humano é muito inferior ao das partículas beta, dos raios-X e dos raios gama, podendo ser paradas por uma simples folha de papel. Os emissores alfa geralmente emitem partículas alfa com energias cinéticas entre 4 e 5,5 MeV (ATSDR, 1999).

Os radionuclídeos emissores de partículas alfa têm geralmente núcleos relativamente pesados. Assim, quase todos os emissores de radiação alfa possuem números atômicos iguais ou superiores ao do chumbo ( $^{82}\text{Pb}$ ).

Os emissores de partículas alfa não oferecem geralmente perigo significativo em termos de radiação externa, já que não têm capacidade de penetrar na pele exterior. Só são perigosos quando se instalam no interior do corpo humano, principalmente no sistema respiratório onde podem depositar a sua energia a curta distância. As partículas alfa constituem uma radiação de alta transferência linear de energia (TLE) com um fator de ponderação radiológica elevado, cujo valor típico é  $w_R = 20$  (Decreto-Lei nº 222/2008).

Na Figura 6 apresenta-se de uma forma esquematizada o processo de emissão de uma partícula alfa a partir da desintegração nuclear de um átomo pesado de urânio ( $^{235}\text{U}$ ).

Radiação alfa

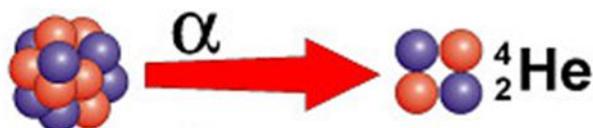


Figura 6 - Exemplo da emissão de uma partícula alfa

(Ilustração do autor)

A radiação alfa tem uma importância muito significativa neste estudo e representa um perigo elevado para os trabalhadores, quando as substâncias radioativas emissoras destas partículas (poeiras e radão) penetram no corpo humano por inalação, ingestão ou através de feridas na pele (irradiação interna).

### Emissão Beta

Uma emissão beta consiste na emissão de uma partícula beta por um núcleo instável. A partícula beta consiste num eletrão ou num positrão, sendo que o positrão é a antipartícula do eletrão. O positrão tem a mesma massa e a maioria das outras propriedades dos eletrões, exceto a carga cuja magnitude é exatamente a mesma que o eletrão mas de sinal positivo.

O percurso das partículas beta no ar é de cerca de 3,65 m por MeV de energia cinética. É necessário que a partícula beta tenha pelo menos 70 keV de energia para poder atravessar a epiderme (ATSDR, 1999). As partículas beta constituem uma radiação de baixa transferência linear de energia (TLE) e têm um fator de ponderação radiológica baixo, cujo valor é  $w_R = 1$  (Decreto-Lei 222/2008).

Neste estudo, a radiação beta não será abordada em detalhe pois não representa um perigo significativo para a saúde dos trabalhadores nos casos analisados.

Na Figura 7 apresenta-se de uma forma esquematizada o processo de emissão de uma partícula beta a partir da transformação de um átomo de potássio (K-40) a cálcio (Ca-40) ( $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca}$ ).

Radiação beta



Figura 7 - Exemplo da emissão de uma partícula beta

(Ilustração do autor)

### Radiação Gama

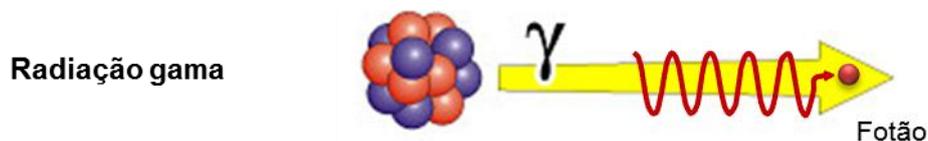
A radiação gama é uma radiação eletromagnética emitida por um núcleo quando este sofre uma transição de um estado de maior energia para outro estado de menor energia. O número de prótons e de neutrões no núcleo permanecem inalterados nessas transições. Geralmente ocorrem também emissões de radiação gama associadas a emissões de radiação alfa ou beta de núcleos.

Exemplos típicos de emissores gama são o cobalto-60, zinco-65, céσιο-137, e rádio-226. Os raios gama mais energéticos têm sido observados em raios cósmicos. Podem viajar no ar

dezenas a centenas de metros (dependendo da sua energia inicial) e têm uma atenuação exponencial à medida que atravessam a matéria. Constitui uma radiação de baixa transferência linear de energia (TLE) e têm um fator de ponderação radiológica baixo, cujo valor é  $w_R = 1$  (Decreto-Lei 222/2008).

A radiação gama tem uma importância muito significativa neste estudo pois representa um perigo para os trabalhadores quando as substâncias radioativas emissoras de partículas gama se encontram na proximidade do corpo humano (irradiação externa). É o caso da exposição profissional a matérias-primas como a fosforite que contém concentrações significativas de isótopos de urânio e de rádio e que será estudada detalhadamente ao longo deste trabalho.

Na Figura 8 apresenta-se de uma forma esquematizada o processo de emissão de uma radiação gama a partir da transformação de um átomo de cobalto (Co-60) a níquel (Ni-60) ( $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}$ ).



**Figura 8 - Exemplo da emissão de uma radiação gama**

(Ilustração do autor)

A energia presente numa onda eletromagnética depende de uma forma direta da sua frequência de acordo com as fórmulas,

$$E = h \times f \quad \text{Equação 3}$$

onde,

$E$  - energia em eV

$h$  - constante de Planck  $6,62606896(33) \times 10^{-34}$  J.s

$f$  - frequência da onda eletromagnética em Hz

No caso específico de uma radiação gama com uma frequência da ordem de 300 EHz ( $300 \cdot 10^{18}$  Hz) ao qual corresponde um comprimento de onda de 1 pm ( $10^{-12}$  m) a sua energia é igual a  $1,98782 \times 10^{-13}$  joules. Com  $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19}$  joules a energia de uma radiação gama pode chegar a 1,24 MeV.

### 1.5.1 Unidades de Medida

As unidades de medida para radiações ionizantes do sistema internacional utilizadas neste estudo, bem como as unidades tradicionais estão indicadas no Quadro 2. Para conversão entre unidades dos dois sistemas 1 Rem equivale a 10 mSv e 1 Sv equivale a 100 Rem.

Quadro 2- Unidades de medida de radiações

	GRANDEZA	UNIDADES SI		UNIDADES TRADICIONAL	
A	CATIVIDADE RADIOATIVA	becquerel	Bq	curie	Ci
D	DOSE ABSORVIDA	gray	Gy	roentgen absorbed dose	rad
H	DOSE EQUIVALENTE	sievert	Sv	roentgen equivalent man	Rem (R)
E	DOSE EFETIVA	sievert	Sv	roentgen equivalent man	Rem (R)

### 1.5.2 Capacidade de penetração das diversas radiações

A capacidade de penetração das diversas radiações está ilustrada graficamente na Figura 9, onde se pode observar que as partículas alfa (núcleos de hélio) têm uma capacidade de penetração muito baixa não atravessando uma folha de papel. No ar têm uma capacidade de propagação de poucos centímetros.

Esta radiação não apresenta perigo significativo para o ser humano, que se encontra protegido pela camada de pele, no entanto, se esta radiação entrar no corpo humano através de feridas abertas, por ingestão ou por inalação de gases ou poeiras emissoras de radiação alfa, torna-se muito perigosa devido a sua grande capacidade energética de ionização dos tecidos biológicos.

As partículas beta constituídas por eletrões têm já uma maior capacidade de penetração no corpo humano, sendo no entanto paradas por matérias leves como o alumínio.

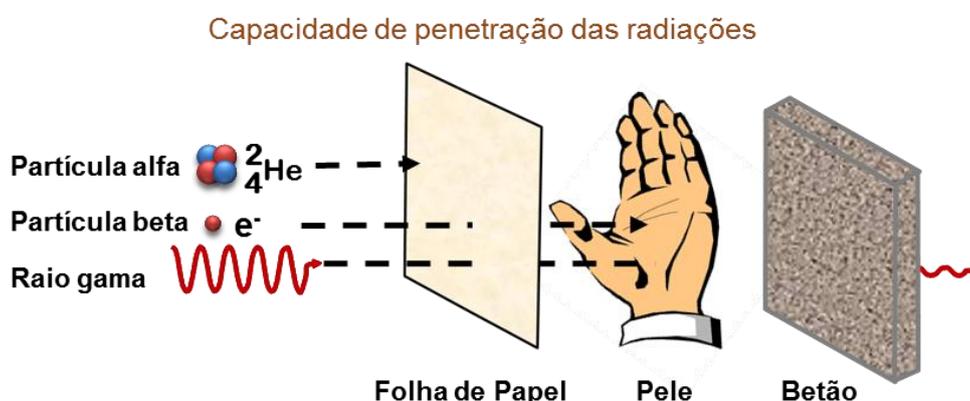


Figura 9 - Capacidade de penetração dos diversos tipos de radiação

(Ilustração do autor)

A radiação gama tem uma grande capacidade de atravessar o corpo humano, tecidos e órgãos, podendo causar danos importantes devido à sua capacidade de ionizar a matéria a

uma distância considerável. É um agente físico tóxico que pode induzir efeitos negativos na saúde, sendo os mais referenciados a morte celular, atrofia e lesões nos tecidos, enrugamento da pele, cataratas, náuseas, alterações gástricas, hemorragias e morte (ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry), 1999). Estas radiações só podem ser paradas com materiais pesados, como por exemplo, placas de chumbo e de betão com espessuras consideráveis.

## 1.6 Radiação proveniente do radão

O radão é um gás radioativo de origem natural, procedente da desintegração do rádio ( $^{226}\text{Ra}$ ) existindo sob a forma de 3 isótopos: o actinão ( $^{219}\text{Rn}$ ), o torão ( $^{220}\text{Rn}$ ) e o radão ( $^{222}\text{Rn}$ ) como se indica na Figura 10. Encontra-se numa pequena proporção no ar que se respira e é o responsável por cerca de 50% da radiação ionizante natural que o homem recebe.

A principal fonte de radão na atmosfera é o urânio existente na crosta terrestre que se transforma, por decaimento nuclear, em rádio e este por sua vez dá lugar ao radão, o qual por ser um gás pode deslocar-se atravessando a crosta terrestre através de poros e fendas e sair para atmosfera onde se dilui no ar. Neste caso a concentração no ar é pequena, mas se a libertação do radão se dá em locais de trabalho mal ventilados a sua concentração pode ser muito elevada, constituindo um perigo muito significativo para a saúde dos trabalhadores e do público em geral.

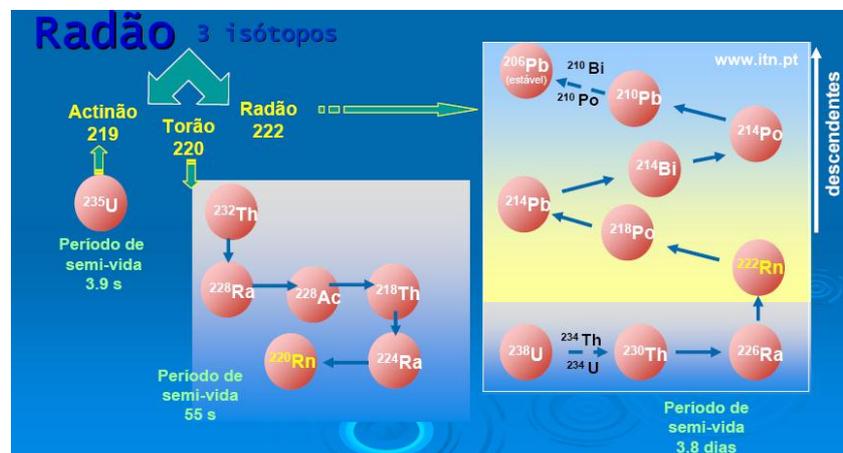


Figura 10 - Processo de criação dos descendentes do radão

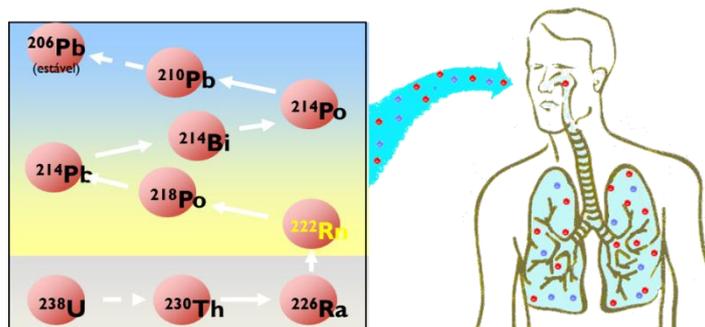
(Fonte: ITN)

O problema do radão é referido na Recomendação da Comissão (90/143/Euratom, de 21 de Fevereiro de 1990), relativamente à proteção das populações contra a sua exposição interior, nos seguintes termos:

*“A exposição ao radão não é um fenómeno novo, e estudos epidemiológicos revelaram um excesso significativo de óbitos devidos a câncer do pulmão, em vários grupos de mineiros expostos a elevadas concentrações no local de trabalho.”*

Georgius Agricola refere na sua obra "*De Re Metallica*" que ocorria uma grande mortalidade entre os mineiros que na Europa Central exploravam jazidas e que quatro séculos mais tarde verificou-se serem muito ricas em rádio, elemento do qual resulta o radão por decaimento radioativo ( $^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn}$ ).

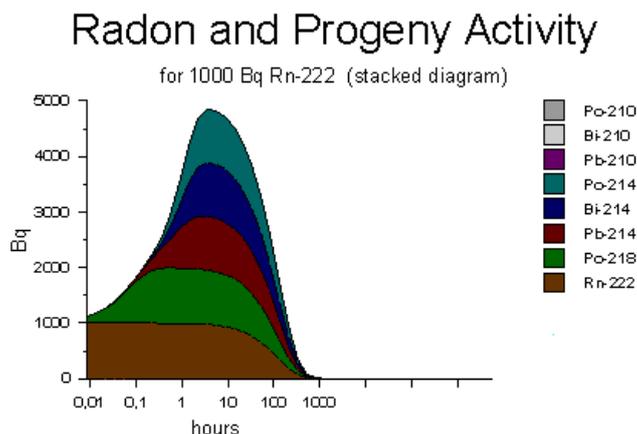
Agricola chegou a sugerir que fossem utilizadas máscaras protetoras para se minimizarem as doenças do pulmão e chegou a propor que fossem utilizados dispositivos de ventilação no interior das minas.



**Figura 11 - Forma de contaminação típica do radão**

(Fonte: ITN)

Os danos importantes causados pelo radão resultam da inalação dos seus descendentes de semivida curta ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{214}\text{Po}$ ). O radão por si só não representa um problema importante, já que a quase totalidade do radão inalado é exalado, mas sim quando os seus descendentes associados a poeiras penetram no sistema respiratório (Figura 11).



**Figura 12 - Atividade do radão e descendentes**

(Fonte: ITN)

Como já foi referido anteriormente, o problema principal do radão resulta da inalação ou da ingestão dos seus descendentes radioativos de vida curta, já que possuem uma atividade radiológica importante como se pode observar na Figura 12. Se os locais de trabalho não são mantidos livres de poeiras e de fumos e convenientemente arejados os produtos do decaimento radioativo referidos associam-se a poeiras e a fumos do ar, são inalados e depositam-se ao longo do sistema respiratório. A radiação alfa associada pode provocar danos irreparáveis nos tecidos dos pulmões, incluindo o desenvolvimento de neoplasmas (Hnizdo et al., 1997).

Este fenómeno pode ser agravado se o trabalhador estiver igualmente exposto a outros contaminantes, originando efeitos sinérgicos resultantes da exposição a dois ou mais contaminantes. É referido frequentemente na literatura científica o efeito sinérgico entre a exposição às radiações ionizantes e a exposição a agentes químicos tóxicos como sejam, o fumo de tabaco, o amianto, os fumos, os vapores e as lixívias (IARC (International Agency for Research on Cancer), 1993).

## 1.7 Fontes de Radiação de Origem Natural

As fontes de radiação ionizante são diversas, incluindo a exposição médica, a exposição ocupacional, a radiação gama terrestre, radiação cósmica e o radão nas proporções indicadas na Figura 13 (Fonte: ITN).

A fonte de radiação ionizante natural mais significativa é o radão 56,7 %, seguida da radiação gama terrestre 18,2% e da radiação cósmica 6,2%.

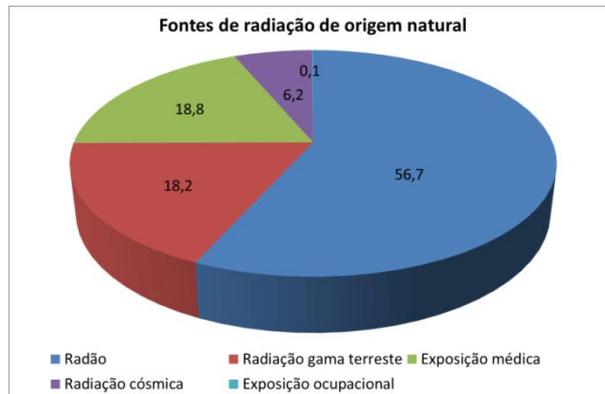


Figura 13 - Fontes de radiação ionizante de origem natural

(Gráfico do autor com base em dados do ITN)

Com base no conhecimento existente sobre os níveis de radiação de algumas matérias-primas de uso corrente em indústrias não nucleares, procura-se neste trabalho identificar as atividades ou processos industriais que coloquem riscos significativos de exposição dos trabalhadores a radiações ionizantes de origem natural.

Algumas matérias-primas apresentam uma atividade radiológica significativa, como por exemplo os fertilizantes (1000 Bq/kg) e o carvão (2000 Bq/kg) como se indica na Figura 14.

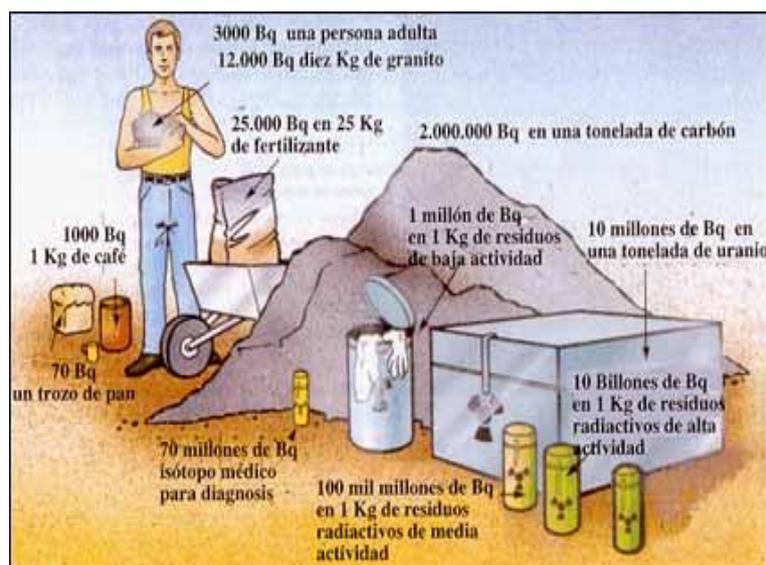


Figura 14 - Conteúdo radioativo materiais naturais e artificiais (em Becquerel)

Fonte: (Sollet & Velasco, 1997)

Uma das fontes de radioatividade natural é o urânio. O urânio é um metal ligeiramente radioativo que está presente na crosta terrestre, encontra-se em rochas, solos, rios e nos oceanos e é cerca de 500 vezes mais abundante que o ouro, e tão comum como o estanho. Tal como ocorre na natureza consiste numa mistura de três variedades isotópicas:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{234}\text{U}$ ; a contribuição dada para a radiação externa da cisão espontânea dos isótopos de urânio referidos é relativamente pequena.

A concentração média na crosta terrestre é cerca de 4 ppm (4 gramas de urânio por tonelada). Nos granitos, que formam 60% da crosta terrestre, pode existir concentrações de 4 ppm, enquanto nos fertilizantes pode atingir concentrações de 400 ppm (0.04%) e em minas de carvão pode atingir concentrações de 100 ppm (0.01%) (Fonte: World Nuclear Association).

Grande parte da radioatividade associada ao urânio na natureza é devida aos produtos resultantes do seu decaimento radioativo, onde se pode incluir o radão. A título ilustrativo, indica-se no Quadro 3 a cadeia natural de decaimento do  $^{238}\text{U}$ .

O tempo de semivida indicado corresponde ao tempo necessário para que a atividade radioativa da substância referida seja reduzida a metade, ou seja o tempo necessário para que metade dos radionuclidos decaia para os seus descendentes.

**Quadro 3 - Cadeia natural de decaimento nuclear do  $^{238}\text{U}$**

Elemento Progenitor	Forma de Decaimento Nuclear	Tempo de semivida	Elemento Descendente
$^{238}\text{U}$	emissão alfa	4,5 bilhões de anos	$^{234}\text{Th}$
$^{234}\text{Th}$	emissão beta	24 dias	$^{234}\text{Pa}$
$^{234}\text{Pa}$	emissão beta	1,2 minutos	$^{234}\text{U}$
$^{234}\text{U}$	emissão alfa	240 mil anos	$^{230}\text{Th}$
$^{230}\text{Th}$	emissão alfa	77 mil anos	$^{226}\text{Rd}$
$^{226}\text{Rd}$	emissão alfa	1,6 mil anos	$^{222}\text{Rn}$
$^{222}\text{Rn}$	emissão alfa	3,8 dias	$^{218}\text{Po}$
$^{218}\text{Po}$	emissão alfa	3,1 minutos	$^{214}\text{Pb}$
$^{214}\text{Pb}$	emissão beta	27 minutos	$^{214}\text{Bi}$
$^{214}\text{Bi}$	emissão beta	20 minutos	$^{214}\text{Po}$
$^{214}\text{Po}$	emissão alfa	160 microssegundos	$^{210}\text{Pb}$
$^{210}\text{Pb}$	emissão beta	22 anos	$^{210}\text{Bi}$
$^{210}\text{Bi}$	emissão beta	5 dias	$^{210}\text{Po}$
$^{210}\text{Po}$	emissão alfa	140 dias	$^{206}\text{Pb}$
$^{206}\text{Pb}$	Núcleo estável		

(Fonte: adaptado de ATSDR, 1999)

Existem várias zonas em todo o mundo onde a concentração de minério de U é suficientemente elevada para justificar em termos económicos a sua exploração comercial. Os principais produtores mundiais são: Canada, Austrália, Cazaquistão, Rússia, Nigéria, Namíbia, Uzbequistão, USA, Ucrânia, China, África do Sul, Republica Checa, Brasil, Índia, Roménia, Paquistão, Alemanha e França. Portugal possui também um potencial elevado de minério de urânio na região norte do país (Figura 16).

Como base de partida deste trabalho identificaram-se os seguintes processos industriais, onde existe manipulação de isótopos naturais radioativos ou a presença de radão:

- Indústrias de processamento de fosfatos (ácido fosfórico e fertilizantes).
- Indústrias de extração mineira e processamento de minerais metálicos (estanho, alumínio, cobre).
- Centrais térmicas de carvão.
- Indústrias cerâmicas e de materiais refratários que utilizam areias de zircónio.
- Indústrias de extração e fabricação de materiais de construção.
- Indústrias de processamento de terras raras.
- Indústrias de pigmentos de dióxido de titânio.
- Indústrias de extração de gás e petróleo.
- Fabricação e utilização de compostos de tório. Varetas de tungsténio-tório.

## 1.8 Atividades com exposição a fontes de radiação ionizante

Pretende-se nesta seção identificar algumas atividades que implicam a exposição de trabalhadores a fontes de radiação ionizante de origem natural.

O Decreto-Lei 222/2008 transpõe para o ordenamento jurídico português os limites de dose previstos na Diretiva n.º 96/29/EURATOM, do Conselho, de 13 de Maio (European Council, 1996). Aplica-se à exposição dos trabalhadores e dos membros do público às radiações ionizantes de origem artificial. Identifica locais de trabalho suscetíveis de terem níveis de radiação natural significativos, designadamente: estabelecimentos termais, grutas, minas, locais de trabalho subterrâneos ou outros cujas condições ambientais tenham relevância para a dose efetiva anual. Alguns desses locais são analisados seguidamente com vista a determinar o seu potencial em termos de risco de exposição profissional a radiações ionizantes de origem natural.

### 1.8.1 Minas em Portugal

A indústria de extração de minérios em Portugal tem vindo a ser abandonada nas últimas décadas, estando no entanto a renascer nos últimos anos beneficiando do progressivo aumento do custo das matérias-primas, o que tem viabilizado novos investimentos na área da mineração. Esta atividade económica necessária e geradora de postos de trabalho, aumenta também os riscos para a saúde e segurança dos trabalhadores envolvidos na extração de minérios, designadamente o risco de exposição a materiais radioativos.

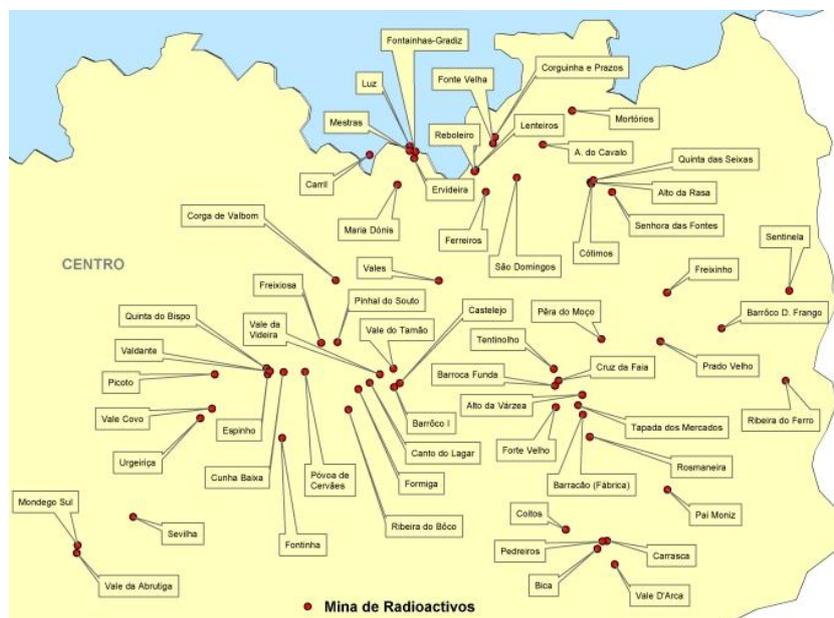
A potencialidade geológica portuguesa é muito boa, estando o país bem posicionado em termos de recursos minerais, com um território dotado de jazigos de classe mundial, tais como Neves Corvo e Panasqueira. Aljustrel é também um grande depósito de sulfuretos maciços polimetálicos à escala mundial. Existem ainda recursos geológicos interessantes aguardando melhor oportunidade para a sua exploração e potencialidade para novas descobertas. Indica-se na Figura 15 a localização das minas de polimetálicos em Portugal.



**Figura 15 - Minas de polimetálicos**

(Fonte: EDM - Empresa de Desenvolvimento Mineiro, SA)

Os jazigos de urânio tidos como mais importantes em Portugal, estão localizados na sua região central (Zona das Beiras) dispostos na parte ocidental do Maciço Hespérico abrangendo a Cordilheira Central (Serra da Estrela, Lousã, S. Pedro de Açor, Gardunha) e estendendo-se para a parte poente até às Serras do Buçaco, Caramulo e Montemuro. Na Figura 16 indica-se a localização das minas de radioativos em Portugal.



**Figura 16 - Minas de radioativos em Portugal**

(Fonte: EDM - Empresa de Desenvolvimento Mineiro, SA)

Com o aumento dos preços, nos últimos anos, das cotações da generalidade dos metais, designadamente cobre, níquel, ouro, prata, volfrâmio, estanho, urânio, e, mais recentemente, zinco e chumbo (alguns deles atingindo valores máximos históricos) aumentou o interesse pela prospeção de novas minas. Isto devido ao grande crescimento da procura na China e na Índia, países muito populosos e com baixo nível de desenvolvimento, que ao aumentarem o seu consumo *per capita* de metais provocam um aumento na procura e no aprovisionamento com reflexos nas respetivas cotações. Acontece que a somar a tudo isto há que contar com a nítida quebra no ritmo de descobertas de grandes jazigos à escala mundial.

Com estas novas perspetivas de desenvolvimento do sector da mineração em Portugal, torna-se necessário um programa adequado de avaliação e de controlo radiológico face às radiações de origem natural para os trabalhadores e para a população em geral.

Toda a atividade mineira tem maior ou menor impacto ambiental e o urânio é um caso particular por razões óbvias. A sua exploração exige, em comparação com os outros casos, medidas adicionais de remediação e de rigor no controlo ambiental durante e após a exploração, podendo, inclusive, arrastar-se por muitos anos.

As minas de urânio têm adicionalmente o problema da radioatividade e dos efluentes, que exigem neutralização, monitorização e controlo para evitar a contaminação do meio envolvente, em particular dos aquíferos. Nestes trabalhos de recuperação ambiental é também necessário um programa adequado de avaliação e controlo radiológico face às radiações de origem natural para os trabalhadores e para a população em geral.

### 1.8.2 Grutas Turísticas

São de considerar apenas as grutas de interesse turístico para o público em geral, porque são geralmente aquelas que têm mais trabalhadores profissionalmente expostos às radiações ionizantes com tempos de exposição muitas vezes elevados. Nestas grutas, alguns trabalhadores exercem funções de guias turísticos, sendo muitas vezes mulheres jovens em idade reprodutiva ou em estado de gravidez, com possíveis riscos adicionais em termos de saúde quer para o sistema reprodutor quer para o feto. Em trabalhos de manutenção, reparação e limpeza também podem ocorrer concentrações mais elevadas de radiação e tempos de exposição significativos.

Os resultados de medições de radão em grutas com detetores de partículas alfa apresentam concentrações médias a nível mundial que variam entre 0,1 e 20 kBqm<sup>-3</sup> com uma média aritmética de 2,8 kBqm<sup>-3</sup> (Hakl et al., 1997). Com esta diversidade tão grande de valores, só com uma avaliação individual com base em medições pode determinar qual o nível de perigosidade presente.

### 1.8.3 Águas mineromedicinais

Algumas das águas mineromedicinais identificadas com propriedades radioativas são a seguir indicadas:

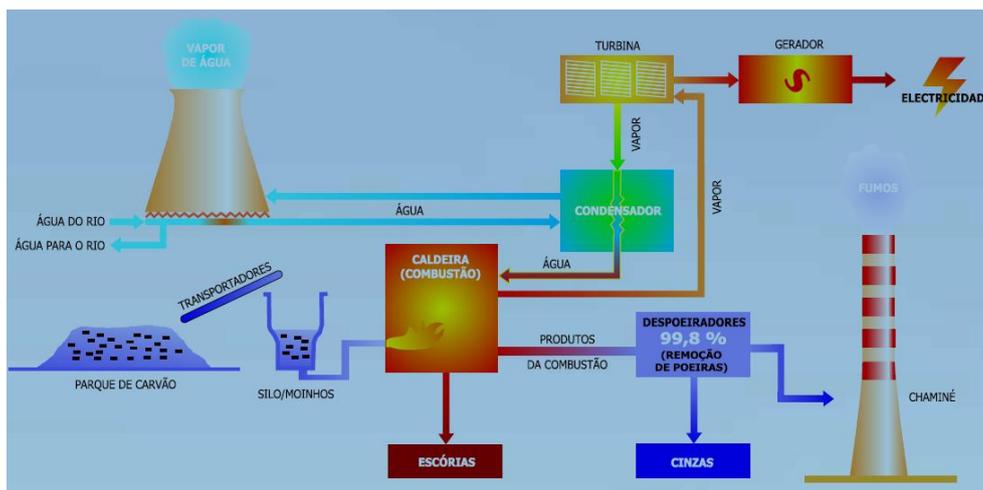
- Fonte dos Casais da Charneca (Caparica - Almada) - Água hipotermal (17,7°), cloretada sódica e bicarbonatada cálcica, levemente sulfatada e radioativa.
- Fonte do Monte Jesus (Quinta do Monte Jesus-Setúbal) - Água bicarbonatada cálcica e cloretada sódica, sulfatada, potássica, levemente magnesiana, férrea e com propriedades radioativas, que brota de tufos calcários e margosos.

### 1.8.4 Centrais Térmicas a Carvão

Uma central térmica a carvão queima carvão como combustível para a produção de energia elétrica de acordo com o esquema indicado na Figura 17.

Existem em Portugal duas centrais termelétricas com funcionamento por queima de carvão. Uma situada em Sines, propriedade da EDP - Energias de Portugal SA, com um consumo anual de 3 664 500 toneladas de carvão para uma produção líquida de eletricidade de 9 694 232 MWh.

Outra é a Central Termoelétrica do Pego, a 8 km da cidade de Abrantes, propriedade da empresa Tejo Energia SA, com um consumo de 1 376 000 toneladas de carvão para a produção de 3 901 000 MWh (esta encontra-se em fase de conversão para gás natural).



**Figura 17 - Diagrama de funcionamento de uma central térmica a carvão**

(Fonte: Tejo Energia, SA)

A título ilustrativo, indicam-se as emissões atmosféricas na central de Sines declaradas pela EDP - Energias de Portugal, SA:

SO <sub>2</sub>	53 140 toneladas
NO <sub>x</sub>	27 480 toneladas
CO <sub>2</sub>	8 723,27 toneladas
Partículas	1 800 toneladas

Não é referido pelos operadores das centrais térmicas a carvão a existência de outros contaminantes. No entanto, é conhecido que os efluentes transportados por via aérea resultantes da combustão do carvão contêm elementos radioativos, nomeadamente urânio e tório (<sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>232</sup>Th). Podemos assumir um conteúdo de 1 parte por milhão de urânio e 2 partes por milhão de tório no carvão (aproximadamente a média nos EUA) podendo no entanto ser estes valores de uma ordem superior para determinadas origens do carvão (Mcbride et al., 1977). Nestas circunstâncias a dose de radiação ionizante recebida por trabalhadores e populações próximas de uma central térmica pode ser superior à recebida em consequência das emissões de uma central nuclear.

De acordo com os dados da EDP são enviados para a atmosfera por ano 1800 toneladas de partículas o que corresponde no mínimo ao envio de 1800 kg de urânio e 3200 kg de tório para a atmosfera por ano sobre a forma de cinzas. Estes cálculos foram efetuados de acordo com o método indicado em (Mcbride et al., 1977) considerando uma concentração de 1ppm de urânio e 2 ppm de tório.

Se considerarmos o valor típico de 1 % de cinzas lançadas para a atmosfera para um consumo de carvão, indicado pela EDP, de 1 376 000 toneladas de carvão os totais de urânio e tório lançados para a atmosfera poderiam ser de 13 760 kg e 27520 kg respetivamente.

Existe uma intenção de instalação de novas centrais a carvão em Portugal, como por exemplo a da companhia elétrica italiana ENEL, que quer construir de raiz uma central térmica a carvão limpo (com tecnologia de sequestração de carbono) com 800 Megawatts de potência, um investimento da ordem dos mil milhões de euros (em Diário de Notícias, 26 de Março 1997). Nesta perspetiva de crescimento das centrais a carvão em Portugal, deverá

ser levado em consideração o seu impacto radiológico nos trabalhadores e nas populações afetadas pelos contaminantes resultantes da combustão do carvão transportados por via aérea.

### 1.8.5 Processamento de fosfatos

Nesta secção pretende-se caracterizar a exposição aos designados NORMs “Naturally Occurring Radioactive Materials” presentes nos produtos de rocha fosfórica que constituem a matéria-prima que está na base dos fosfatos.

Em linhas gerais a indústria de processamento de fosfatos estudada em Portugal (ADP Adubos de Portugal) tem o esquema de funcionamento indicado na Figura 18, que é semelhante ao de outras indústrias de fosfatos existentes em todo o mundo.

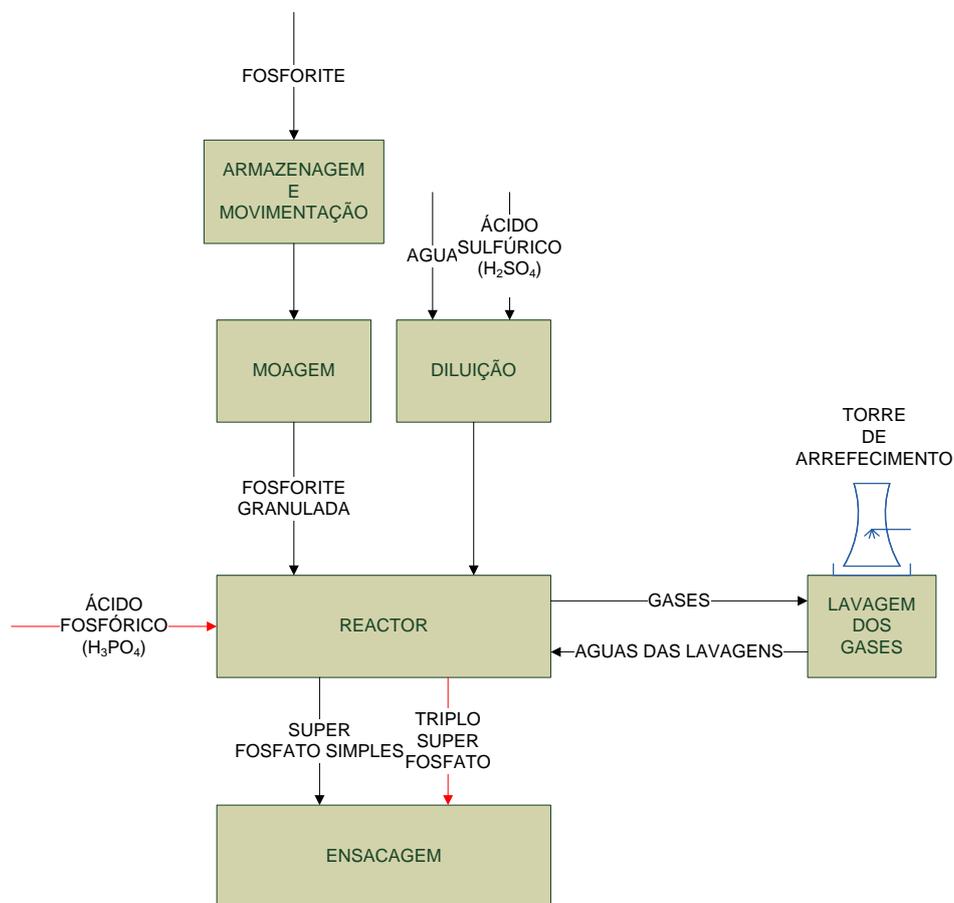


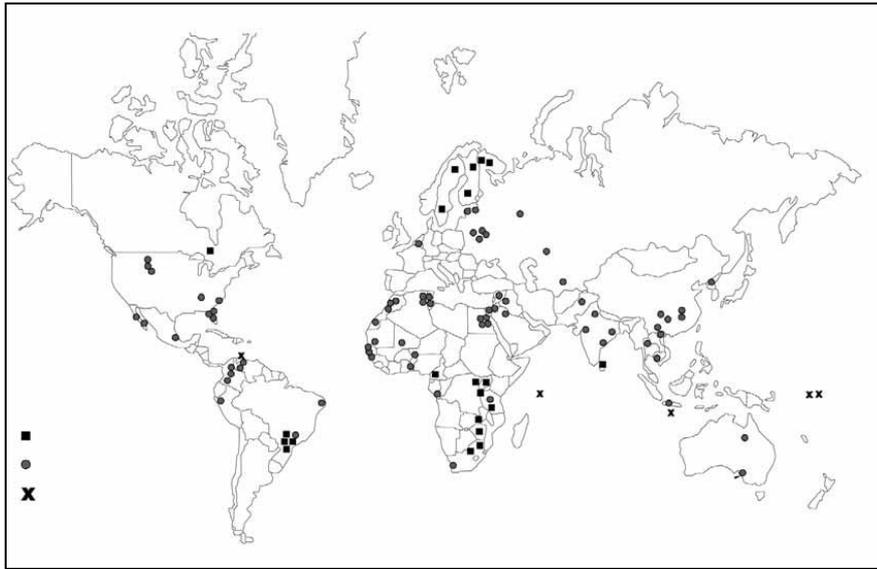
Figura 18 - Esquema simplificado do processamento dos fosfatos

(Fonte: Ilustração do autor)

A rocha fosfórica (designada também por rocha fosfatada), que constitui a matéria-prima dos fertilizantes, é extraída a uma taxa de 130 milhões de toneladas/ano em todo o mundo. O uso mundial de fertilizantes está estimado em 30 milhões de toneladas/ano e constitui a maior fonte de mobilidade de <sup>40</sup>K e <sup>226</sup>Ra. Nos Estados Unidos a taxa de utilização dos fertilizantes situa-se entre 30 kg/hectare e os 150 kg/hectare no caso das batatas e tabaco (ATSDR, 1999).

A concentração de  $^{40}\text{K}$  e de  $^{232}\text{Th}$  nas rochas fosfatadas é semelhante à existente no solo, na ordem de poucos gramas por centenas de gramas para o  $^{40}\text{K}$  e poucos gramas por milhões de grama para o  $^{232}\text{Th}$ . Por outro lado, a concentração de  $^{238}\text{U}$  e dos seus descendentes é muito mais elevada na rocha fosfórica do que no solo sendo da ordem dos 1.500 Bq/kg (ATSDR, 1999).

Os minérios de fosfatos originados em sedimentos marinhos estão localizados nos Estados Unidos, sudeste do México, Marrocos, noroeste do Sahara e no Médio Oriente (Zapata & Roy, 2004). Outras fontes de fosfatos de estão indicadas na Figura 19.



**Figura 19 - Depósitos de fosfatos no mundo.**

Fonte: (Zapata & Roy, 2004)

Os fosfatos usados em Portugal provêm geralmente de Marrocos, Tunísia, Sahara, Síria, Senegal e Egito (Fonte ADP).

A exposição dos trabalhadores ocorre nas zonas das minas, no transporte, carga e descarga da matéria-prima, nas indústrias de transformação e nos resíduos produzidos e acumulados junto às unidades industriais. Na Figura 20 apresenta-se um exemplo de um depósito de fosfogesso localizado próximo do Fort Meade, Flórida, EUA formado por resíduos da indústria de fertilizantes à base de fosfatos.

No processamento dos fosfatos resultam fosfogessos e silicato de cálcio que são usados como fertilizantes, material para enchimento de estradas, aditivos para betão. O fosfogesso é também usado no fabrico de cimento, gesso e estuque. O principal elemento radioativo contido é o  $^{226}\text{Ra}$  com concentrações de 900 Bq/kg. Elevados níveis de radão têm sido detetados em edifícios construídos sobre terrenos recuperados de minas e depósitos de fosfatos (ATSDR, 1999).



**Figura 20 - Depósito de fosfogesso localizado próximo de Fort Meade, Flórida**

(Fonte: foto de Harvey Henkelmann, 4/3/2007)

O urânio é um minério associado ao fosfato e em algumas minas a proporção é de mil quilos de rocha fosfórica para um quilo de urânio (Mina de Santa Quitéria - Brasil). Como exemplo do conteúdo radioativo dos fertilizantes fosfatados, foi identificada uma patente referente a um processo químico para a recuperação de urânio em lixívia de rocha fosfórica. Este processo visa a recuperação de urânio como subproduto na fabricação por via húmida de fertilizantes fosfatados (Patente número: PI8506619-2, 1985 - Brasil).

A presença de produtos radioativos no fosfogesso, derivados do decaimento radioativo do urânio, abriu uma oportunidade de negócio na produção de urânio na indústria dos fosfatos. É conhecido que nos EUA a indústria dos fosfatos tem vindo a produzir e vender grandes quantidades de urânio.

Em 1997, apenas duas instalações de fosfato na Louisiana produziram 950.000 quilos de urânio comercial, que correspondem a cerca de 16% do urânio produzido internamente nos EUA. O Department of Energy (DOE) designa estas instalações como "Nonconventional Uranium Plants" (Connett, 2003).

Nos EUA, durante a Guerra Fria, o potencial de fabrico de urânio na indústria dos fosfatos não foi publicamente divulgado, nem mesmo junto dos trabalhadores que foram inconscientemente expostos a grandes quantidades de material radioativo. Foi recentemente divulgado que nos anos 1952 a 1962 em Joliet, Illinois foi produzido cerca de 1 milhão de kg de urânio para o governo dos EUA. Segundo relatórios publicados num jornal local, as taxas de incidência de câncer em antigos trabalhadores da fábrica, especialmente do "Building 55" onde o urânio era processado, são anormalmente elevados (Connett, 2003).

No relatório EUR 15448 de 1995 da Comissão Europeia (European Commission, 1995) é referido textualmente:

*"O processamento e tratamento dos resíduos na indústria dos fosfatos estão associados a níveis de radiação preocupantes para os trabalhadores e para o público. O nível de proteção para estes grupos deve ser mais semelhante ao nível de proteção que corresponde ao estado da arte em outras indústrias, designadamente as indústrias nucleares."* (Schmidts & Krüppers, 1995).

## 2 ANTECEDENTES / REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, analisa-se um conjunto de estudos epidemiológicos feitos por vários autores, designadamente, o estudo realizado pela *International Agency for Research on Cancer* (IARC) que envolveu 15 países e que teve como objetivo fornecer uma estimativa direta do risco de câncer após a exposição prolongada a doses baixas de radiações ionizante, e assim rever as bases científicas que estão na origem das atuais normas de proteção.

Analisa-se igualmente vários estudos sobre a morbilidade e mortalidade por câncer nos trabalhadores dos fosfatos nos EUA, o risco de câncer pulmonar associado à indústria de extração e de processamento de fosfatos e o risco de câncer pulmonar associado à indústria de mineração.

Examina-se também o impacto ambiental da indústria dos fertilizantes fosfatados no que respeita a gases tóxicos lançados no ambiente, contaminação de solos por resíduos de fosfogesso e libertação de radão na atmosfera.

Procura-se efetuar uma síntese do conhecimento atual no que respeita às consequências da exposição dos trabalhadores a níveis baixos de radiação ionizante, com base na revisão de estudos epidemiológicos realizados a nível internacional. De acordo com essa revisão bibliográfica, apresentam-se alguns dados relativos aos possíveis efeitos negativos na saúde dos trabalhadores derivados da exposição a radiações ionizantes.

Analisa-se as implicações legais, resultantes das diretivas comunitárias e da legislação portuguesa, no que respeita à proteção radiológica dos trabalhadores, à avaliação do risco de exposição e às medidas de prevenção e de proteção mais adequadas.

Indicam-se os limites de exposição a radiações ionizantes estabelecidos na legislação portuguesa e transcrevem-se alguns dos aspetos mais significativos do Decreto-Lei 222/2008, que é presentemente a referência legislativa mais importante em termos de proteção radiológica dos trabalhadores.

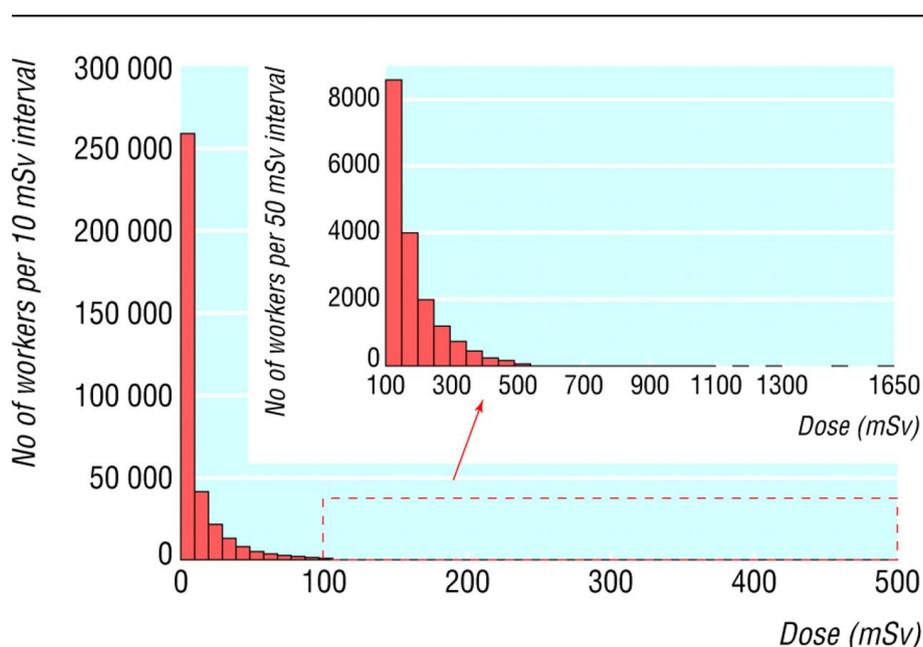
Termina-se o capítulo mencionando os níveis de ação, atuais e futuros, adotados em vários países europeus para a limitação da exposição ao radão nos locais de trabalho.

## 2.1 Trabalhos Anteriores

### 2.1.1 Risco de câncer induzido por doses baixas de radiação

O estudo realizado pela International Agency for Research on Cancer (IARC) “Risk of cancer after low dose of ionizing radiation: retrospective cohort study in 15 countries” (Cardis et al., 2005) teve como objetivo fornecer uma estimativa direta do risco de câncer após a exposição prolongada a doses baixas de radiações ionizante, e rever as bases científicas que estão na origem das normas de proteção atuais. É o maior estudo realizado até à data com trabalhadores da indústria nuclear.

Trata-se de um estudo multinacional de coorte retrospectivo da mortalidade por câncer. O coorte foi constituído por trabalhadores da indústria nuclear localizados em 15 países. Teve a participação de 407.391 trabalhadores que foram monitorizados em termos de exposição a radiação externa recebida, com um seguimento equivalente a 5,2 milhões de pessoas / ano. A distribuição da dose cumulativa de radiação entre os trabalhadores incluídos na análise está indicada na Figura 21.



**Figura 21 - Distribuição da dose cumulativa de radiação entre os trabalhadores**

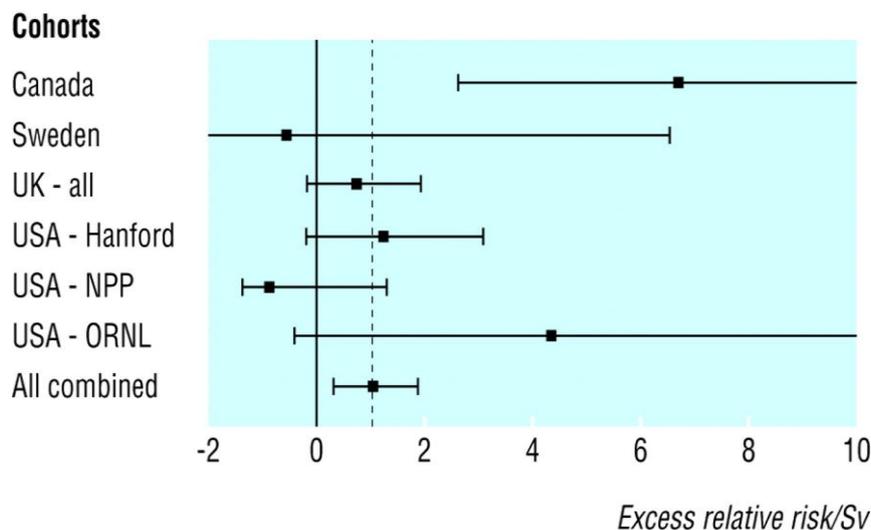
(Fonte: Cardis et al., 2005)

O estudo estima o aumento relativo de risco referente à mortalidade por câncer (excluindo a leucemia) e para a leucemia excluindo a leucemia linfocítica crónica, resultante da dose de radiação recebida.

Os resultados indicam um excesso de risco relativo de câncer (com exceção da leucemia) de 0,97 por cada Sv de dose de radiação ionizante recebida (95% de confiança no intervalo de 0,14 a 1,97). O excesso de risco relativo de leucemia (excluindo leucemia linfocítica crónica) encontrado foi de 1,93 por Sv de dose de radiação ionizante recebida.

Com base nestas estimativas, 1-2% das mortes por câncer entre os trabalhadores neste coorte podem ser atribuíveis à radiação. Os resultados mais detalhados do estudo estão

indicados na Figura 22, onde se pode observar o aumento do risco relativo por Sv para todos os cânceres excluindo leucemia em coortes com mais do que 100 mortes.



(Legenda: NPP=nuclear power plants, ORNL=Oak Ridge National Laboratory)

**Figura 22 - Aumento do risco relativo por Sv para todos os cânceres excluindo leucemia**

(Fonte: Cardis et al., 2005)

Os resultados apresentados indicam que existe um aumento do risco de câncer, mesmo para doses e taxas de doses baixas de exposição a radiação.

### 2.1.2 Morbidade e mortalidade por câncer nos trabalhadores dos fosfatos

As operações de mineração e de processamento de minério de fosfato são associadas a condições de empoeiramento e exposição potencial à radiação externa gama e à radiação alfa proveniente dos descendentes radioativos do radão. Vários autores identificaram e estimam os riscos de câncer pulmonar associado à extração e ao processamento de fosfatos (Fleischer, 1981; Scholten & Timmermans, 1996).

Um estudo, realizado pelo *Departments of Epidemiology and Environmental Health Sciences da Johns Hopkins School of Hygiene and Public Health, Baltimore, Maryland*, (Block et al., 1988), englobou 3451 trabalhadores do sexo masculino, que trabalharam numa empresa de fosfatos na Flórida durante mais do que 6 meses entre 1950 e 1979.

Nesse estudo foram analisados apenas os trabalhadores potencialmente expostos a níveis elevados de poeiras, fumos ou radiação, localizados nas áreas de secagem e expedição, produção de químicos, fertilizantes e manutenção. Nas áreas de secagem e expedição foram identificados trabalhadores expostos a condições severas de empoeiramento e confinamento, níveis mais elevados de radiação gama e de exposição ao radão duas vezes superiores aos indicados nas normas OSHA. Este estudo encontrou um aumento do risco do câncer do pulmão entre os trabalhadores brancos (Block et al., 1988).

### **2.1.3 Aumento da incidência de câncer por exposição ao radão em minas**

O aumento da incidência de câncer pulmonar por exposição ao radão em minas está bem estabelecido na literatura, suportado por estudos epidemiológicos levados a cabo com mineiros que trabalharam em minas onde existiam concentrações elevadas de radão (Roscoe et al., 1989).

Nas minas de urânio de Ontário a mortalidade dos mineiros por câncer pulmonar é significativamente superior à esperada para a população (observada=152, esperada=67). A mortalidade devida a câncer pulmonar está claramente associada à exposição dos trabalhadores aos descendentes de vida curta do radão (Kusiak et al., 1993).

O hábito de fumar e a exposição simultânea ao radão estão geralmente associados a um aumento significativo da taxa de incidência de câncer pulmonar, no entanto, estudos epidemiológicos levados a cabo nos mineiros das minas de urânio em Beaverlodge indicam que o aumento de risco se deve quase exclusivamente à exposição aos descendentes radioativos de vida curta do radão (L'Abbé et al., 1991). Por outro lado, outro estudo mostra que a exposição conjunta ao radão e ao fumo de tabaco não aumenta o risco numa fase inicial de proliferação de células, mas esse risco vai aumentar em fases mais avançadas podendo-se estimar o risco de câncer pulmonar devido à exposição ao radão para não fumadores e para fumadores (Moolgavkar et al., 1993).

Num estudo realizado com 2574 ex-trabalhadores da mina de urânio Radium Hill, que operou no leste da Austrália do Sul de 1952 a 1961, foram estimados os níveis de exposição aos descendentes do radão a partir de registos históricos de concentrações de gás radão e de trabalho realizado na mina. Apesar dos níveis de concentração de radão serem mais baixos que noutras minas semelhantes (média 7,0 *Working Level Months* (WLM), mediana 3,0 WLM), a mortalidade por câncer pulmonar foi significativamente maior nos trabalhadores subterrâneos que nos trabalhadores de superfície, não podendo atribuir-se este aumento a hábitos de tabagismo ou outros fatores (Woodward et al., 1991).

Mineiros de estanho na Província de Yunnan, no sul da China mostraram uma taxa extremamente alta de câncer pulmonar, mais de 1% ao ano entre os que estão em "alto risco" (mais de 40 anos de idade, com mais de 10 anos de mineração subterrânea e/ou experiência de fundição). Neste caso, o aumento da taxa de incidência de câncer pulmonar está também associado a taxas elevadas de exposição ao radão, arsênio e hábitos de tabagismo (Xuan et al., 1991).

Os fatores idade do trabalhador, tempo de exposição e dose recebida devem ser levados em conta para determinar o risco associado à exposição ao radão. Num estudo realizado com 1743 mineiros de uma mina de fluorite em Newfoundland verificou-se um aumento de risco significativamente maior para trabalhadores com menos de 50 anos (0,025) e um risco menor para trabalhadores mais idosos (aumento de risco de 0.002 para trabalhadores com mais de 70 anos). Também se constatou que exposições altas de curta duração são menos perigosas que exposições mais baixas e de longa duração (Morrison et al., 1998).

### **2.1.4 Impacte da indústria dos fertilizantes fosfatados no ambiente**

O estudo (Connett, 2003) aborda diversos aspetos do impacte da indústria de fertilizantes no ambiente sendo os mais significativos para este trabalho os seguintes:

## **1 - Gases tóxicos lançados no ambiente**

Quando o minério é transformado em fosfatos solúveis em água, através da adição de ácido sulfúrico, os fluoretos são vaporizados, formando compostos altamente tóxicos gasosos designadamente, ácido fluorídrico e tetrafluoreto de silício.

Os fluoretos têm sido, e continuam a ser até hoje, um dos maiores problemas ambientais da indústria dos fosfatos. A origem do problema reside no facto do minério bruto do fosfato conter uma concentração elevada de fluoretos, geralmente entre 20.000 a 40.000 partes por milhão (equivalente a 2 a 4% do minério).

Quando na indústria dos fosfatos existe pouco ou nenhum controlo da poluição, os gases dos fluoretos são frequentemente emitidos em grandes quantidades nas comunidades vizinhas, causando sérios danos ambientais e de saúde pública.

## **2 - Contaminação pelos resíduos de fosfogesso**

Um segundo problema, resulta dos resíduos de fosfogesso produzidos, com valores elevados de radioatividade, devido ao urânio e a outros produtos do decaimento radioativo do urânio, como por exemplo o rádio. Para produzir 1 quilo de fertilizantes comerciais, a indústria dos fosfatos cria 5 quilos de lamas contaminadas de fosfogesso (sulfato de cálcio).

Por ação das chuvas, estes depósitos de fosfogesso altamente ácidos, cheios de contaminantes tóxicos, incluindo flúor, arsénio, cádmio, crómio, chumbo, mercúrio e vários produtos do decaimento do urânio podem contaminar águas subterrâneas, lagoas, linhas de água e rios. Exemplos de depósitos de fosfogesso podem ser observados na Figura 20 e na Figura 29.

Segundo a EPA (*Environmental Protection Agency*), só na Florida Central são criados em cada ano 32 milhões de toneladas de novos resíduos de fosfogesso pelas indústrias dos fosfatos (a Florida Central é o centro da indústria dos fosfato nos EUA). A EPA estima que o *stock* atual de resíduos de fosfogesso na Florida Central atingiu "quase mil milhões de toneladas."

Existe uma ligação natural e inevitável entre a mineração de fosfato e de materiais radioativos, porque o fosfato e o urânio foram estabelecidos ao mesmo tempo e no mesmo local pelos mesmos processos geológicos de milhões de anos atrás. Apesar do urânio, e dos seus produtos de decaimento, ocorrem naturalmente no minério de fosfato, as suas concentrações nos resíduos de gesso, após a extração de fosfato solúvel, são até 60 vezes maiores. Por isso o fosfogesso é classificado como um resíduo NORM (*Naturally Occurring Radioactive Material*), embora alguns, incluindo a EPA, questionem se esta classificação não subavalia o problema, já que o fosfogesso está entre os resíduos com maior concentração de radioatividade que provém de materiais naturais.

### **3 - Libertação de radão na atmosfera**

Um terceiro problema resulta da libertação de grandes quantidades de gás radão para a atmosfera nos depósitos de fosfogesso. O decaimento do  $^{226}\text{Ra}$  existente no fosfogesso produz radão. Este é transportado por via aérea, conforme o regime de ventos locais, podendo acumular-se em determinadas zonas, podendo atingir valores de concentração elevados noutras instalações industriais ou zonas habitacionais mais ou menos próximas. Segundo a EPA, a exposição ao radão é a segunda causa de câncer pulmonar nos EUA.

## **2.2 Síntese do conhecimento atual**

De acordo com a revisão bibliográfica realizada, apresentam-se alguns dados relativos aos possíveis efeitos negativos na saúde dos trabalhadores derivados da exposição a doses de radiações ionizantes.

### 1. Relação dose-efeito para a exposição doméstica e profissional ao radão.

Os resultados de estudos efetuados com mineiros de urânio (Axelson & Sundell, 1978) indicam:

- Um excesso de risco relativo de câncer pulmão estimado em 0,16 por 100 Bq por m<sup>3</sup>.

### 2. Relação dose efeito para a radiação externa gama.

Os resultados dos estudos efetuados com os habitantes das aldeias próximas do local de ensaio de armas nucleares (Semipalatinsk, Kazakhstan) onde ocorreram 122 explosões nucleares aéreas entre 1949 e 1962 indicam:

- Um excesso de risco relativo nessas populações de 0,81 Sv<sup>-1</sup> para o conjunto de cânceres sólidos, de 0,95 Sv<sup>-1</sup> para cânceres do estômago e de 1,76 Sv<sup>-1</sup> para o câncer do pulmão.

Os estudos realizados com um cohorte de 407391 trabalhadores empregados na indústria nuclear civil expostos a um nível médio de radiação de 19,4 mSv, com uma distribuição de dose acumulada em que 90 % dos trabalhadores receberam menos de 50 mSv e menos de 1 % dos trabalhadores receberam mais de 500 mSv indicam:

- Um excesso de risco relativo de 0,97 Sv<sup>-1</sup> para os cânceres de órgãos sólidos e de 1,93 Sv<sup>-1</sup> para a leucemia, sendo a taxa de cânceres em órgãos sólidos fortemente influenciada pelo do câncer do pulmão de 1,86 Sv<sup>-1</sup> (IARC (International Agency for Research on Cancer), 1994b).

### 3. Relação dose-efeito para a exposição a doses baixas de radiação cósmica.

Os trabalhadores de bordo na navegação aérea estão submetidos a doses de radiação ionizante que chegam aos 6 mSv/ano, mas que não ultrapassam os 80 mSv ao longo de toda a vida (Langner, et al., 2004) e a radiação recebida tem uma componente de neutrões significativa (25 a 50 %). Os estudos realizados com esses trabalhadores para doses de exposição superiores à 25 mSv indicam:

- Um excesso de risco relativo para todos os cânceres de 0,74, e que aumenta com a dose recebida (IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2006).

### 4. Outras doenças induzidas pela radiação ionizante

Os estudos relativos a doenças cardiovasculares e a outras doenças não cancerígenas induzidas pela exposição a radiação ionizante indicam:

- Para doses inferiores a 1Sv não existe nenhum estudo conclusivo que possa indicar um aumento na taxa de incidência nessas doenças derivado da exposição a radiações ionizantes.

## 2.3 Legislação e regulamentação

O Tratado EURATOM que institui a Comunidade Europeia de Energia Atómica (Comissão Europeia, 2010) prevê o estabelecimento de normas básicas de segurança relativas à proteção da saúde dos trabalhadores e da população em geral, contra os perigos resultantes das radiações ionizantes. Deste Tratado deriva um conjunto de diplomas legais e de regulamentos que se analisam de seguida.

### 2.3.1 **Legislação comunitária**

De acordo com a pesquisa efetuada, a legislação comunitária publicada sobre radiações ionizantes até ao ano de 2011 está indicada no Quadro 4.

**Quadro 4 - Legislação comunitária sobre radiações ionizantes**

Ano	Diploma	Número	Conteúdo
2003	2003/C 133/15	15	Parecer do Comité Económico e Social Europeu sobre a Proposta de diretiva (Boratos) do Conselho que define as obrigações de base e os princípios gerais no domínio da segurança das instalações nucleares e a Proposta de diretiva (Boratos) do Conselho sobre a gestão do combustível nuclear usado e dos resíduos radioativos.
1998	COM/98/0087	87	Comunicação da Comissão sobre a aplicação da Diretiva 96/29/Boratos do Conselho, de 13 de Maio de 1996, que fixa as normas de segurança de base relativas à proteção sanitária da população e dos trabalhadores contra os perigos resultantes das radiações ionizantes
1997	DIR 97/43/Boratos	43	Relativa à proteção da saúde das pessoas contra os perigos resultantes de radiações ionizantes em exposições radiológicas médicas e que revoga a DIR 84/466/Boratos
1996	DIR 96/29/Boratos	29	Fixa as normas de segurança de base relativas à proteção sanitária da população e dos trabalhadores contra os perigos resultantes das radiações ionizantes
1993	DIR 93/552/Boratos	552	Decisão da comissão que estabelece o documento uniforme para a fiscalização e controlo das transferências de resíduos radioativos especificados na DIR 92/3/Boratos
1992	DIR 92/3/Boratos	3	Relativa à fiscalização e ao controlo das transferências de resíduos radioativos entre Estados-membros e para dentro e fora da Comunidade
1990	Boratos	641	Relativa à proteção dos trabalhadores externos sujeitos ao risco de radiações ionizantes durante a intervenção numa zona controlada
1989	DIR 89/618/Boratos	618	Relativa à informação da população sobre medidas de proteção sanitária aplicáveis e sobre o comportamento a adotar em caso de emergência radiológica

### 2.3.2 **Legislação portuguesa**

De acordo com a pesquisa efetuada, a legislação portuguesa publicada até ao ano de 2011 sobre radiações ionizantes está indicada no Quadro 5.

**Quadro 5 - Legislação portuguesa sobre radiações ionizantes**

Ano	Diploma	Número	Conteúdo
2008	Decreto-Lei	227	Define o regime jurídico aplicável à qualificação profissional em proteção radiológica, transpondo para a ordem jurídica interna as disposições da Diretiva n.º 96/29/EURATOM, que fixa as normas de segurança de base relativas à proteção sanitária da população e dos trabalhadores contra os perigos resultantes das radiações ionizantes
2008	Decreto-Lei	222	Transpõe parcialmente para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 96/29/EURATOM, do Conselho, de 13 de Maio, que fixa as normas de segurança de base relativas à proteção sanitária da população e dos trabalhadores contra os perigos resultantes das radiações ionizantes
2007	Decreto-Lei	38	Transpõe para a ordem jurídica interna a DIR 2003/122/Boratos, relativa ao controlo de fontes radioativas seladas, incluindo as fontes de atividade elevada e de fontes órfãs, e estabelece o regime de proteção das pessoas e do ambiente contra os riscos associados à perda de controlo, extravio, acidente ou eliminação resultantes de um inadequado controlo regulamentar das fontes radioativas
2005	Decreto-Lei	140	Estabelece os valores de dispensa de declaração do exercício de práticas que impliquem risco resultante das radiações ionizantes e, bem assim, os valores de dispensa de autorização prévia para o exercício das mesmas atividades, transpondo as correspondentes disposições da Diretiva n.º 96/29/EURATOM, do Conselho, de 13 de Maio
2005	Decreto-Lei	138	Aprova o sistema de monitorização ambiental do grau de radioatividade
2002	Decreto-Lei	180	Estabelece as regras relativas à proteção da saúde das pessoas contra os perigos resultantes de radiações ionizantes em exposições radiológicas médicas e transpõe para o ordenamento jurídico interno a Diretiva n.º 97/43/EURATOM, do Conselho, de 30 de Junho, que aproxima as disposições dos Estados-Membros sobre a matéria
2002	Decreto-Lei	174	Estabelece as regras aplicáveis à intervenção em caso de emergência radiológica, transpondo para a ordem jurídica interna as disposições do título IX, «Intervenção», da Diretiva n.º 96/29/EURATOM, do Conselho, de 13 de Maio, que fixa as normas de base de segurança relativas à proteção sanitária da população e dos trabalhadores contra os perigos resultantes das radiações ionizantes
2002	Decreto-Lei	167	Estabelece o regime jurídico relativo ao licenciamento e ao funcionamento das entidades que desenvolvem atividades nas áreas de proteção radiológica e transpõe para a ordem jurídica interna disposições relativas às matérias de dosimetria e formação, da Diretiva n.º 96/29/EURATOM, do Conselho, de 13 de Maio de 1996, que fixa as normas de base de segurança relativas à proteção sanitária da população e dos trabalhadores contra os perigos resultantes das radiações ionizantes

Ano	Diploma	Número	Conteúdo
2002	Decreto-Lei	165	Estabelece as competências dos organismos intervenientes na área da proteção contra radiações ionizantes, bem como os princípios gerais de proteção, e transpõe para a ordem jurídica interna as disposições correspondentes da Diretiva n.º 96/29/EURATOM, do Conselho, de 13 de Maio, que fixa as normas de base de segurança relativas à proteção sanitária da população e dos trabalhadores contra os perigos resultantes das radiações ionizantes
2000	Decreto-Lei	240	Altera o Decreto-Lei n.º 492/99 de 17 de Novembro, que aprova o regime jurídico do licenciamento e fiscalização das unidades de saúde privadas que desenvolvem atividades de radiodiagnóstico, de radioterapia e de medicina nuclear
1999	Decreto-Lei	492	Aprova o regime jurídico do licenciamento e da fiscalização do exercício das atividades desenvolvidas em unidades de saúde privadas que utilizem, com fins de diagnóstico, terapêutica e de prevenção, radiações ionizantes, ultrassons ou campos magnéticos
1998	Decreto-Lei	311	Estabelece normas relativas à orgânica do sector da proteção radiológica e segurança nuclear
1997	Decreto Regulamentar	29	Transpõe para o ordenamento jurídico interno a Diretiva n.º 90/641/EURATOM, do Conselho, de 4 de Dezembro, e estabelece o regime de proteção dos trabalhadores de empresas externas que intervêm em zonas sujeitas a regulamentação com vista à proteção contra radiações ionizantes
1997	Declaração Retificação	14-M	De ter sido retificado o Decreto Regulamentar n.º 29/97 do Ministério da Saúde, que transpõe para o ordenamento jurídico interno a Diretiva n.º 90/641/EURATOM, do Conselho, de 4 de Dezembro, e estabelece o regime de proteção dos trabalhadores de empresas externas que intervêm em zonas sujeitas a regulamentação com vista à proteção contra radiações ionizantes Devem ser suprimidos os anexos I e II do Decreto Regulamentar n.º 29/97
1996	Decreto-Lei	153	Cria regras destinadas à proteção das pessoas e do ambiente contra os riscos derivados da utilização de fontes radioativas seladas
1996	Decreto-Lei	138	Transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 92/3/EURATOM, do Conselho, de 3 de Fevereiro de 1992, e estabelece as regras a que devem obedecer a transferência e o reenvio de resíduos radioativos entre Portugal e os restantes Estados membros da Comunidade e entre Portugal e Estados terceiros, bem como o trânsito por Portugal dos resíduos dessa natureza, desde que os mesmos excedam, em quantidade e concentração, os valores fixados no anexo II do Decreto Regulamentar n.º 9/90 de 19 de Abril
1995	Decreto-Lei	36	Transpõe para o direito interno a Diretiva n.º 89/618/EURATOM relativa à informação da população sobre medidas de proteção sanitária aplicáveis em caso de emergência radiológica
1993	Decreto	26	Aprova, para ratificação, a Convenção n.º 115 da Organização Internacional do Trabalho

Ano	Diploma	Número	Conteúdo
1992	Decreto Regulamentar	34	Estabelece normas sobre segurança e proteção radiológica aplicáveis na extração e tratamento de minérios radioativos
1992	Decreto Regulamentar	3	Altera o Decreto Regulamentar n.º 9/90 de 19 de Abril, relativo à proteção contra radiações ionizantes
1992	Decreto Regulamentar	3	Altera o Decreto Regulamentar n.º 9/90 de 19 de Abril, relativo à proteção contra radiações ionizantes
1990	Decreto Regulamentar	9	Estabelece a regulamentação das normas e diretivas de proteção contra as radiações ionizantes
1989	Decreto-Lei	348	Estabelece normas e diretivas de proteção contra as radiações ionizantes
1983	Decreto-Lei	426	Aprova o regulamento de proteção e segurança radiológica nas minas e anexos de tratamento de minério e de recuperação de urânio

### 2.3.3 Linhas orientadoras do Decreto-Lei 222/2008

O Decreto-Lei 222/2008 é a legislação mais recente publicada em Portugal sobre exposição a radiações ionizantes no âmbito laboral. Este diploma transpõe parcialmente para a ordem jurídica portuguesa a Diretiva n.º 96/29/EURATOM, do Conselho, de 13 de Maio, que fixa as normas de segurança de base relativas à proteção sanitária da população e dos trabalhadores contra os perigos resultantes das radiações ionizantes.

Transpõe igualmente para o ordenamento jurídico português, os limites de dose previstos na Diretiva n.º 96/29/EURATOM, do Conselho, de 13 de Maio, e aplica-se à exposição dos membros do público às radiações ionizantes de origem artificial, bem como aos trabalhadores profissionalmente expostos e aprendizes, sendo estabelecidos uma série de critérios específicos para a proteção dos mesmos.

Devido à sua elevada importância na contextualização do problema em estudo são em seguida transcritos alguns dos aspetos mais significativos.

#### 2.3.3.1 Trabalhadores expostos

A referida legislação define «trabalhadores expostos», pessoas submetidas durante o trabalho, por conta própria ou de outrem, a uma exposição decorrente de práticas abrangidas no decreto-lei, suscetíveis de resultar numa dose superior a qualquer um dos limites de dose fixados para os membros do público (1 mSv/ano).

#### 2.3.3.2 Cálculo da dose efetiva

1 - No que respeita à radiação externa, são utilizados os valores e relações que constam do anexo I do referido Decreto-Lei para calcular as doses equivalentes e efetivas pertinentes.

#### 2.3.3.3 Exposição ocupacional a fontes de radiação ionizante de origem natural

O Artigo 15.º refere no que respeita à exposição ocupacional a fontes de radiação ionizante de origem natural:

1 - Sempre que a realização de trabalhos implique uma exposição a fontes de radiação natural da qual possa resultar uma dose efetiva anual superior a 1 mSv para os

trabalhadores, estes devem ser considerados trabalhadores expostos, aplicando-se todos os respetivos requisitos de vigilância, monitorização e proteção radiológica referidos no presente decreto-lei e demais legislação aplicável.

2 - Compete aos titulares das instalações realizar uma avaliação prévia das condições de trabalho e, caso seja aplicável o disposto no número anterior, devem ser seguidos os preceitos de autorização enumerados no Decreto-Lei n.º 165/2002, de 17 de Julho.

3 - Os locais de trabalho implicados nos números anteriores, incluem também, mas não só, estabelecimentos termais, grutas, minas, locais de trabalho subterrâneos ou outros cujas condições ambientais tenham relevância para a dose efetiva anual.

#### *2.3.3.4 Limites de dose para os trabalhadores expostos*

1 - O limite de dose efetiva para os trabalhadores expostos é fixado em 100 mSv por um período de cinco anos consecutivos, na condição de esse valor não ultrapassar uma dose efetiva máxima de 50 mSv em cada ano.

2 - Sem prejuízo do limite disposto no número anterior, são ainda fixados os seguintes:

- a) O limite de dose equivalente para o cristalino é fixado em 150 mSv por ano;
- b) O limite de dose equivalente para a pele é fixado em 500 mSv por ano;
- c) O limite de dose equivalente para as extremidades é fixado em 500 mSv por ano.

#### *2.3.3.5 Limites de dose para membros do público*

1 - Sem prejuízo do disposto no n.º 3 do artigo 4.º do Decreto-Lei n.º 165/2002, de 17 de Julho, o limite de dose efetiva para membros do público é fixado em 1 mSv por ano.

2 - Sem prejuízo do disposto no número anterior, são fixados os seguintes limites:

- a) O limite de dose equivalente para o cristalino é fixado em 15 mSv por ano;
- b) O limite de dose equivalente para a pele é fixado em 50 mSv por ano.

3 - O limite referido no n.º 1 pode ser excedido num determinado ano, desde que a dose média ao longo de cinco anos consecutivos não exceda 1 mSv por ano.

#### *2.3.3.6 Proteção especial durante a gravidez e a amamentação*

1 - A mulher profissionalmente exposta deve declarar de imediato ao titular da instalação em que trabalha que se encontra grávida, com vista a garantir a proteção do feto.

2 - A partir do momento em que uma mulher grávida informe a empresa do seu estado, deve ser concedida ao nascituro uma proteção equivalente à dispensada a qualquer membro do público em geral, garantindo que a dose equivalente recebida pela criança em gestação seja tão reduzida quanto possível e que não exceda 1 mSv durante o período da gravidez.

3 - Logo que informe o titular da instalação do seu estado, a mulher lactante não desempenha funções que envolvam um risco significativo de contaminação radioativa do organismo.

### *2.3.3.7 Classificação dos trabalhadores, aprendizes e estudantes*

1 - Para efeitos de monitorização e vigilância dos trabalhadores, devem considerar -se duas categorias diferentes de trabalhadores expostos:

- a) Categoria A - aqueles trabalhadores expostos que são suscetíveis de receber uma dose efetiva superior a 6 mSv por ano, ou uma dose equivalente superior a três décimas de um dos limites anuais de dose efetiva para os trabalhadores expostos, para o cristalino, para a pele ou para as extremidades;
- b) Categoria B - todos os restantes trabalhadores expostos não classificados como sendo de categoria A.

### *2.3.3.8 Monitorização individual dos trabalhadores*

1 - Para trabalhadores de categoria A, a monitorização por dosimetria individual deve ter uma periodicidade mensal e ser realizada por entidades licenciadas, nos termos do Decreto-Lei n.º 167/2002, de 18 de Julho.

2 - Para trabalhadores de categoria B, a monitorização por dosimetria individual deve ter uma periodicidade trimestral e ser realizada por entidades licenciadas, nos termos do Decreto -Lei n.º 167/2002, de 18 de Julho.

3 - Caso seja apropriado, a monitorização por dosimetria individual pode ser substituída pela monitorização prevista na alínea a) do n.º 5 do artigo 12.º, sem prejuízo de, em qualquer dos casos, a monitorização dever demonstrar a correta classificação dos trabalhadores.

4 - No caso de ser impossível e inoportuno proceder à monitorização por dosimetria individual, podem ser utilizadas estimativas calculadas com base nos resultados de outros trabalhadores ou nos resultados da monitorização do local de trabalho.

### *2.3.3.9 Monitorização dos locais de trabalho*

1 - Para efeitos da proteção contra radiações, devem ser tomadas medidas relativamente a todos os locais de trabalho onde a exposição a radiações ionizantes resulte na possibilidade de os trabalhadores receberem uma dose efetiva superior a 1 mSv por ano, ou uma dose equivalente superior a uma décima dos limites de dose para o cristalino, para a pele e para as extremidades estabelecidos para os trabalhadores expostos.

2 - As medidas a que se refere o número anterior devem ser apropriadas às instalações em causa, às fontes de radiação utilizadas e à magnitude e natureza dos riscos associados à exposição ocupacional.

3 - Devem ser definidas zonas controladas e zonas vigiadas, de acordo com a seguinte classificação:

- a) Zona controlada - área em que, por virtude das condições de trabalho existentes, seja possível que a exposição a que os trabalhadores estão sujeitos durante um ano possa ultrapassar três décimas de um dos limites de dose fixados para os trabalhadores expostos;

b) Zona vigiada - área em que, por virtude das condições de trabalho existentes, seja provável que a exposição a que os trabalhadores estão sujeitos durante um ano possa ultrapassar uma décima dos limites de dose fixados para os trabalhadores expostos, mas que não ultrapasse as três décimas desses limites.

4 - Às zonas controladas, aplicam -se os seguintes requisitos:

- a) São classificadas áreas de acesso reservado, devidamente delimitadas, e cujo controlo de acesso deve ser objeto de regulamento interno;
- b) No caso de haver risco significativo de dispersão de contaminação radioativa, devem ser tomadas medidas de monitorização radiológica de controlo à entrada e saída de pessoas e de mercadorias;
- c) Sempre que necessário, tendo em conta a importância dos riscos radiológicos associados, deve ser efetuada monitorização dos débitos de dose externos, com indicação da natureza e da qualidade das radiações em causa;
- d) Sempre que a prática envolver a manipulação de fontes radioativas não-seladas, tendo em conta a importância dos riscos radiológicos associados, deve ser efetuada medição da concentração da atividade atmosférica e da densidade superficial das substâncias radioativas contaminantes, com indicação da sua natureza e respetivos estados físico e químico;
- e) Os resultados de todas as monitorizações devem ser registados e utilizados para estimativa da dose efetiva recebida pelos trabalhadores, devendo ser comunicados trimestralmente ao registo central de doses;
- f) Deve haver sinalização indicativa do tipo de área, da natureza das fontes de radiação presentes, e dos riscos que lhes são inerentes.
- g) Devem existir instruções de trabalho escritas, adaptadas ao risco radiológico associado às fontes e às práticas desenvolvidas;
- h) A utilização de dosímetros individuais é obrigatória.

5 - Às zonas vigiadas, aplicam -se os seguintes requisitos:

- a) Deve existir uma monitorização do local, à semelhança do descrito nas alíneas c), d) e e) do n.º 3, devidamente adaptada tendo em conta a natureza e a importância dos riscos radiológicos associados;
- b) Se for considerado adequado, deve haver sinalização indicativa do tipo de área, da natureza das fontes de radiação presentes, e dos riscos que lhes são inerentes.

6 - O titular da instalação deve promover, anualmente, uma revisão da classificação das áreas.

7 - A Direcção-Geral da Saúde emite recomendações sobre a classificação das zonas para as várias práticas.

8 - Para efeitos de monitorização dos locais de trabalho, o titular da instalação radiológica deve consultar peritos qualificados em proteção radiológica, ou os serviços de medicina ocupacional, no que diz respeito ao exame e ensaio dos dispositivos de proteção e dos instrumentos de medição, os quais incluem:

- a) Um exame crítico prévio dos projetos de instalações, do ponto de vista da proteção contra radiações;

- b) A receção, antes da entrada em serviço, de fontes novas ou modificadas, do ponto de vista da protecção contra radiações;
- c) Uma verificação periódica da eficácia dos dispositivos e técnicas de protecção;
- d) Uma calibragem periódica dos instrumentos de medição e a verificação periódica do seu estado de funcionamento e correta utilização.

#### *2.3.3.10 Protecção das tripulações de voo e passageiros frequentes relativamente à exposição à radiação cósmica*

1 - As empresas de aviação civil devem realizar a cada cinco anos uma avaliação dos níveis de radiação cósmica recebida pelas tripulações de voo para cada rota que operam.

2 - Os resultados da avaliação devem ser considerados no escalonamento de serviços, que deve procurar manter as exposições dos tripulantes abaixo dos limites anuais para membros do público.

3 - A eficácia do escalonamento na protecção da saúde dos tripulantes deve ser demonstrada mediante um relatório, aprovado pelo serviço de saúde ocupacional respetivo, a apresentar anualmente à Direcção-Geral da Saúde.

4 - Sempre que for estimado que, apesar do escalonamento, podem ser superados os limites de dose para membros do público, aplicar-se-á às tripulações de voo o disposto no n.º 1 do artigo 15.º

5 - Às tripulações de voo e aos passageiros frequentes, devem ser facultadas todas as informações relativas aos efeitos deletérios da exposição à radiação cósmica.

6 - São aplicáveis aos membros femininos das tripulações de voo as disposições do artigo 7.º.

#### *2.3.3.11 Avaliação das doses recebidas pela população*

1 - O titular da instalação que desenvolva práticas em que sejam manipulados ou produzidos materiais radioativos em quantidades superiores às previstas pelo Decreto-Lei n.º 140/2005, de 17 de Agosto, deve assegurar que sejam feitos cálculos tão realistas quanto possível das doses resultantes das práticas desenvolvidas para os membros do público.

2 - As avaliações referidas no número anterior devem ser repetidas a cada dois anos e devem ter em conta todas as medidas necessárias para a identificação dos grupos de referência da população, tendo em conta as vias de transmissão das substâncias radioativas.

3 - Os cálculos das doses recebidas pela população devem incluir:

- a) A avaliação das doses decorrentes da radiação externa, com indicação, segundo o caso, da qualidade das radiações em causa;
- b) A avaliação da incorporação de radionuclidos, com indicação da natureza dos mesmos e, se necessário, dos seus estados físico e químico, bem como a determinação da atividade e concentrações desses radionuclidos;

c) A avaliação das doses que os grupos de referência da população são suscetíveis de receber e a especificação das características desses grupos.

4 - Os documentos relativos a medição da exposição externa, aos cálculos das incorporações de radionuclídeos e da contaminação radioativa, bem como os resultados da avaliação das doses recebidas pelos grupos de referência e pela população devem ser conservados.

5 - São enviadas cópias da avaliação periódica à Direção-Geral da Saúde e ao Instituto Tecnológico e Nuclear, que devem realizar um relatório bianual conjunto da exposição da totalidade da população.

### 2.3.3.12 *Vigilância médica dos trabalhadores expostos*

1 - Não obstante a responsabilidade geral da empresa, a vigilância médica dos trabalhadores expostos deve ser efetuada por serviços especializados, devidamente aprovados pela Direção-Geral da Saúde, segundo critérios a publicar em portaria do membro do Governo responsável pela área da saúde, de acordo com os princípios da medicina ocupacional.

2 - A vigilância médica deve permitir a determinação do estado de saúde dos trabalhadores relativamente à sua aptidão para desempenhar as suas funções, devendo o titular da instalação fornecer ao serviço de saúde ocupacional toda a informação relevante, incluindo as condições ambientais existentes no local de trabalho, e tendo o serviço de saúde ocupacional acesso, para estes efeitos, ao registo dosimétrico central, sendo-lhe analogamente aplicáveis as condições de confidencialidade previstas no artigo 25.º do Decreto-Lei n.º 167/2002, de 18 de Julho.

3 - A vigilância médica deve incluir:

- a) Exame médico anterior ao início de funções ou anterior à classificação do trabalhador na categoria A, com vista à determinação da sua aptidão para o desempenho das funções;
- b) Exames médicos realizados anualmente, para trabalhadores de categoria A, com vista à determinação da sua aptidão para continuar a desempenhar funções, sem prejuízo da realização de semelhantes exames sempre que os serviços de saúde ocupacional o entendam necessário, a natureza destes exames podendo variar consoante o tipo de trabalho e estado de saúde de cada trabalhador.

4 - Os serviços de saúde ocupacional devem ter em conta os possíveis efeitos estocásticos da exposição do trabalhador a radiações ionizantes, pelo que podem aconselhar a necessidade de a vigilância médica ser prolongada após a cessação do trabalho, durante o período considerado necessário para salvaguardar a saúde do indivíduo.

5 - No caso de serem excedidos os limites de dose previstos no artigo 4.º, deve ser realizado de imediato um exame médico do trabalhador exposto, devendo o mesmo ficar sujeito a um regime de vigilância médica especial durante o período considerado necessário pelo serviço de saúde ocupacional.

6 - Dos resultados do exame a que se refere o número anterior, deve ser dado conhecimento à Direção-Geral da Saúde, no prazo de 10 dias úteis após a sua realização.

7 - Durante o regime de vigilância médica especial, as condições de trabalho do trabalhador devem ser aprovadas pelo serviço de saúde ocupacional.

8 - Os serviços de saúde ocupacional podem, sempre que necessário, tomar medidas adicionais de proteção da saúde do trabalhador, nomeadamente, a realização de exames adicionais, aplicação de medidas de descontaminação ou terapêutica de urgência.

#### **2.3.3.13** *Fiscalização*

1 - Nos termos do artigo 90.º do Decreto-Lei n.º 180/2002, de 8 de Agosto, compete à administração regional de saúde territorialmente competente proceder à fiscalização do cumprimento do disposto no presente decreto -lei em instalações que prossigam práticas médicas.

2 - Nos termos do artigo 14.º do Decreto-Lei n.º 165/2002, de 17 de Julho, compete ao Instituto Tecnológico e Nuclear proceder à fiscalização do cumprimento do disposto no presente Decreto-Lei em instalações que prossigam práticas com fins de investigação e ensino.

3 - Nos termos do artigo 20.º do Decreto-Lei n.º 165/2002, de 17 de Julho, compete às direções regionais de economia proceder à fiscalização do cumprimento do disposto no presente Decreto-Lei em instalações que prossigam práticas para fins industriais.

4 - Sem prejuízo das competências previstas no Decreto-Lei n.º 165/2002, de 17 de Julho, compete às autoridades de saúde zelar para que sejam cumpridas as disposições relativas à exposição de membros do público.

#### **2.3.3.14** *Entrada em vigor*

O referido Decreto-Lei entrou em vigor 120 dias após a data da sua publicação, ou seja, tendo sido publicado em 17 de Novembro de 2008 entrou em vigor a 16 de Maio de 2009.

### **2.3.4 Níveis de ação para o radão**

Os níveis atuais de ação para o radão em Bq/m<sup>3</sup>, nos países europeus, para locais de trabalho estão indicados no Quadro 6. Neste trabalho de forma prudente será considerado como nível de ação de referência o valor de 200 Bq/m<sup>3</sup>.

**Quadro 6 - Níveis de ação  $^{222}\text{Rn}$  em países europeus para locais de trabalho**

<b>PAÍS</b>	<b>EXISTENTES (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>FUTUROS (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
Alemanha	---	---
Áustria	400	200
Bélgica	---	---
Dinamarca	400	400
Espanha	---	--
Finlândia	400	
França	---	---
Grécia	400	200
Holanda	--	---
Irlanda	200	200
Itália	--	----
Luxemburgo	---	---
Portugal	---	---
Reino Unido	400	400
Suécia	400	400

### **2.3.5 Caracterização legal das doenças originadas por radiações ionizantes**

O Decreto Regulamentar n.º 76/2007 indica a lista de doenças que podem ser consideradas de origem profissional bem como um índice codificado para as mesmas.

No capítulo referente às doenças provocadas por agentes físicos constam com o código 41.01 as doenças profissionais originadas por exposição a radiações ionizantes como indicado no Quadro 7.

O fator de risco considerado para este grupo de doenças profissionais é a exposição a radiações ionizantes.

As doenças indicadas são: anemia, leucopenia, trombopenia ou diátese hemorrágica consecutivas a irradiação aguda, anemia, leucopenia, trombopenia ou diátese hemorrágica consecutivas a irradiação crónica, radiodermites agudas e radiepitelites agudas das mucosas, radiodermites crónicas, radiolesões crónicas das mucosas, blefarite ou conjuntivite, queratite, catarata, radionecrose óssea, tumores malignos da pele, estados leucemóides, leucemia, sarcoma ósseo e carcinoma bronco-pulmonar por inalação.

O prazo indicativo para o desenvolvimento destas doenças está igualmente indicado, podendo atingir 30 anos para o carcinoma bronco-pulmonar por inalação, sarcoma ósseo e tumores malignos da pele.

A referida legislação inclui também uma lista exemplificativa dos trabalhos suscetíveis de provocar a doença por exposição a radiações ionizantes, designadamente, extração e tratamento de minerais radioativos, produção e emprego de substâncias radioativas, fabrico de aparelhos produtores de radiações ionizantes e seu emprego, fabrico e aplicação de produtos luminescentes por meio de substâncias radioativas, trabalhos com isótopos radioativos, aparelhos geradores de radiações ou outras fontes radioativas e trabalhos

realizados na proximidade de substâncias radioativas ou fontes emissoras de radiações ionizantes.

#### Quadro 7 - Doenças profissionais originadas por exposição a radiações ionizantes

#### 4 - Doenças provocadas por agentes físicos

Código	41.01	
Fatores de risco	Radiações ionizantes	
Doenças ou outras manifestações clínicas e caracterização (prazo indicativo)	Anemia, leucopenia, trombopenia ou diátese hemorrágica consecutivas a irradiação aguda	1 ano
	Anemia, leucopenia, trombopenia ou diátese hemorrágica consecutivas a irradiação crónica	1 ano
	Radiodermites agudas e radiepitelites agudas das mucosas	2 meses
	Radiodermites crónicas	10 anos
	Radiolesões crónicas das mucosas	5 anos
	Blefarite ou conjuntivite	1 ano
	Queratite	10 anos
	Catarata	10 anos
	Radionecrose óssea	5 anos
	Tumores malignos da pele	30 anos
	Estados leucemóides	10 anos
	Leucemia	18 anos
	Sarcoma ósseo	30 anos
	Carcinoma bronco-pulmonar por inalação	30 anos
Lista exemplificativa dos trabalhos suscetíveis de provocar a doença	<p>Todos os trabalhos que impliquem exposição a radiações ionizantes, como por exemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Extração e tratamento de minerais radioativos</li> <li>- Produção e emprego de substâncias radioativas</li> <li>- Fabrico de aparelhos produtores de radiações ionizantes e seu emprego</li> <li>- Fabrico e aplicação de produtos luminescentes por meio de substâncias radioativas</li> <li>- Trabalhos com isótopos radioativos, aparelhos geradores de radiações ou outras fontes radioativas</li> <li>- Trabalhos realizados na proximidade de substâncias radioativas ou fontes emissoras de radiações ionizantes</li> </ul>	

(Fonte: adaptado do Decreto Regulamentar n.º 76/2007)

Importa referir que o Código do Trabalho (Lei n.º 7/2009, n.º 3 do art. 283.º) também considera que a lesão corporal, a perturbação funcional ou a doença não incluídas na lista de doenças profissionais serão indemnizáveis, desde que se provem serem consequência, necessária e direta, da atividade exercida e não representem normal desgaste do organismo.



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, desenvolve-se e implementa-se uma metodologia de trabalho que permita avaliar os riscos radiológicos presentes numa unidade industrial de fabrico de fertilizantes, definem-se os procedimentos de medição da atividade radiológica da fosforite e de produtos derivados, mede-se a radiação externa gama, a concentração no ar de poeiras radioativas e a concentração de radão em espaços pouco ventilados.

Caracterizam-se as instalações onde serão efetuadas as medições e estudam-se os processos de fabrico da unidade de produção de fertilizantes fosfatados, dos superfosfatos, da unidade de produção de adubos compostos granulados, das linhas de granulação e da unidade de ensacamento de adubos compostos.

Identificam-se as diversas situações onde podem ocorrer níveis de exposição significativos a radiações ionizantes, originadas pelo manuseamento de matérias-primas com isótopos radioativos naturais.

Efetua-se uma revisão dos equipamentos de medição de radiações disponíveis no mercado, dos princípios de funcionamento e a sua adequabilidade para a realização das medições previstas.

Descrevem-se e caracterizam-se os equipamentos de medição usados nos trabalhos de campo e medem-se no terreno os níveis de radiação gama, a concentração do gás radão em vários locais de trabalho e a concentração no ar de poeiras totais e inaláveis.

### **3.1 Metodologia específica de trabalho**

Tendo presente o objetivo geral enunciado para o trabalho a desenvolver, apresenta-se agora uma proposta de metodologia para a avaliação dos riscos para a saúde dos trabalhadores, resultantes da exposição ocupacional à radiação ionizante na indústria de fertilizantes fosfatados e desenvolvem-se os procedimentos operacionais necessários para a sua implementação. Com os procedimentos operacionais apresentados, pretende-se conseguir a concretização dos objetivos específicos enunciados, designadamente, a realização dos trabalhos de campo e o desenvolvimento de ações de prevenção e de proteção que permitam reduzir o nível de exposição dos trabalhadores a radiações ionizantes, com vista à proteção da sua saúde.

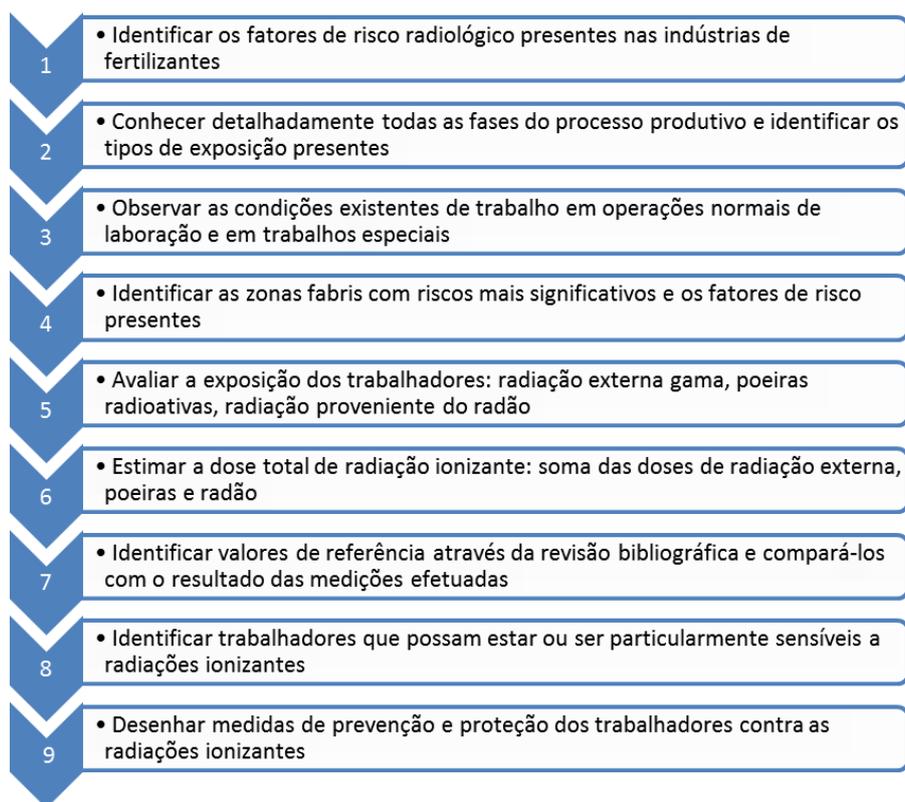
A metodologia específica proposta consiste essencialmente nos seguintes passos:

- a) Identificar os fatores de risco radiológico presentes nas indústrias de fertilizantes onde exista uma exposição significativa a radiações ionizantes de origem natural.
- b) Conhecer detalhadamente todas as fases do processo produtivo para identificar os tipos de exposição presentes.
- c) Observar as condições de trabalho existentes em operações normais de laboração e em trabalhos especiais de limpeza, manutenção e reparação de equipamentos.
- d) Identificar as zonas fabris com riscos radiológicos mais significativos e os fatores de risco presentes.
- e) Avaliar a exposição dos trabalhadores à radiação externa gama, poeiras radioativas inaladas e ingeridas, radiação proveniente do radão.
- f) Estimar a dose total previsível de radiação ionizante a que os trabalhadores podem estar expostos resultante da soma da dose de radiação externa gama, da dose de poeiras radioativas inaladas e ingeridas e da dose de radiação proveniente do radão.
- g) Identificar valores de referência através da revisão bibliográfica e compará-los com o resultado das medições efetuadas.
- h) Identificar trabalhadores que possam ser ou estar particularmente sensíveis a doses pequenas de radiação ionizante.
- i) Desenhar medidas de prevenção e de proteção dos trabalhadores contra as radiações ionizantes.

No caso de estudo apresentado, estando esta indústria situada numa zona muito sensível do ponto de vista ambiental e com grande concentração de pessoas, procura-se também identificar algum impacto da indústria no meio ambiente e na saúde pública.

De forma mais sistematizada é apresentada na Figura 23 a metodologia proposta para desenvolver este estudo. Esta metodologia será implementada ao longo deste projeto de investigação no caso de estudo realizado na indústria de fertilizantes fosfatados ADP - Adubos de Portugal SA. A ADP possui uma unidade industrial em Portugal na zona industrial de Setúbal, para produção de superfosfatos e de adubos compostos, convencionais e específicos.

### Metodologia proposta



**Figura 23 - Metodologia proposta para o presente estudo**

Os procedimentos operacionais para a implementação da metodologia proposta são desenvolvidos na próxima seção.

## **3.2 Procedimentos operacionais**

Para implementar a metodologia proposta de avaliação de riscos radiológicos, de modo a concretizar os objetivos específicos atrás enunciados, são agora desenvolvidos e detalhados os seguintes procedimentos operacionais:

### **3.2.1 Identificar os fatores de risco resultantes da exposição a radiações ionizantes**

#### **Descrição do procedimento**

Este procedimento consiste em identificar os fatores de risco para a saúde dos trabalhadores, resultantes da sua exposição a radiações ionizantes relacionadas com a atividade industrial de fabrico de fertilizantes fosfatados.

#### **Objetivos específicos**

Analisar os diversos processos de fabrico presentes e identificar os locais de trabalho e as operações que apresentem um risco radiológico mais significativo para os trabalhadores.

#### **Ações específicas a desenvolver**

Analisar os diversos trabalhos realizados pelos trabalhadores em operações de rotina, de manutenção, de reparação de equipamentos e de instalações de modo a identificar e avaliar os fatores de risco radiológico presentes, designadamente os seguintes:

- a) Possíveis vias de contaminação dos trabalhadores por radiação ionizante, designadamente: radiação externa gama, radiação alfa proveniente do radão, inalação, ingestão e absorção de poeiras radioativas
- b) Matérias-primas, produtos derivados e resíduos com atividade radiológica significativa.
- c) Zonas e processos de fabrico com exposição significativa a radiação gama.
- d) Zonas e processos de fabrico com exposição significativa a poeiras radioativas.
- e) Locais de trabalho com concentração elevada de radão, pouca ventilação e concentração significativa de poeiras.
- f) Operações de limpeza, manutenção e reparação de equipamentos de trabalho e instalações com exposição significativa a radiação ionizante.

### **3.2.2 Caracterizar em termos radiológicos os produtos usados**

#### **Descrição do procedimento**

Consiste em analisar e medir em laboratório de radiologia a atividade radiológica das matérias-primas manipuladas e dos resíduos resultantes do processo de fabrico. As análises laboratoriais de radioquímica, espectrometria alfa e gama podem ser efetuadas num laboratório de espectrometria gama, sendo que no caso de estudo foram realizadas no laboratório do ITN (Instituto Tecnológico e Nuclear).

A presença de uma atividade radiológica significativa na fosforite, nos produtos derivados e nos resíduos pode sugerir a existência de níveis de contaminação radioativa ao longo de todo o processo de fabrico, designadamente, em tanques de receção, equipamento de filtragem, tubagens e transportadores.

No caso de estudo apresentado, constatou-se que vários equipamentos obsoletos removidos das instalações de processamento do ácido fosfórico continham concentrações elevadas de Ra-226, potenciando uma contaminação radioativa dos trabalhadores envolvidos nas tarefas de manutenção, transporte e tratamento desses resíduos.

A determinação da atividade radiológica das cinzas recolhidas nos filtros de mangas afigura-se igualmente importante para uma avaliação rigorosa da sua perigosidade. A operação de limpeza dos filtros de mangas é obrigatoriamente realizada com regularidade e essa operação é geralmente efetuada por trabalhadores externos sem preparação ou formação adequadas para a sua autoproteção face às radiações ionizantes.

### **Objetivos específicos**

Efetuar a medição da atividade radiológica de amostras da fosforite e de cinzas usadas no processo de fabrico dos fertilizantes, com o propósito de verificar se existe uma emissão radioativa significativa proveniente desta matéria-prima e comparar esses valores com os valores de referência estabelecidos a partir da literatura anteriormente revista.

### **Grandezas a medir**

Pretende-se medir a atividade radiológica, em Bq/m<sup>3</sup>, da fosforite e das cinzas presentes nos filtros de manga das instalações.

### **Valores de referência**

Os valores de referência encontrados na literatura indicam uma atividade radiológica significativa na fosforite, nos seus derivados e cinzas, devido principalmente à presença dos radioisótopos K-40, Ra-226, Th-232 e U-235. Considerando esses valores de referência da atividade radiológica das fosforites podemos identificar casos de atividade radiológica acima dos valores usuais.

### **Ações específicas a desenvolver**

Medir através de espectrometria gama a atividade radioativa presente nas amostras das diversas fosforites usadas no processo de fabrico dos fertilizantes. Medir e escalonar, em particular, a atividade radiológica de amostras de fosforite oriundas de diversas proveniências, por exemplo, Tunísia, Síria, Marrocos e Senegal e comparar esses valores com os valores de referência. Para a avaliação do risco presente é importante atender às grandes diferenças de atividade radioativa em fosforites de distintas proveniências.

### **Descrição dos equipamentos a usar**

A atividade radiológica em amostras de cinzas recolhidas dos filtros de manga provenientes do processo de produção dos fertilizantes pode ser medida em laboratórios radiológicos através da medição da emissão gama.

No caso de estudo desenvolvido, a medição da atividade radiológica da fosforite foi efetuada no laboratório do ITN sendo os valores medidos apresentados no Capítulo Resultados e Discussão de Resultados, Tabela 2, página 128.

A medição da atividade radiológica em amostras de cinzas recolhidas dos filtros de manga foi igualmente efetuada no laboratório do ITN sendo os valores medidos apresentados no Capítulo Resultados e Discussão de Resultados, Tabela 4, página 131.

### **3.2.3 Caracterizar e medir o campo radioativo gama**

#### **Descrição do procedimento**

Consiste em caracterizar e medir o campo radioativo presente nas instalações em termos de radiação gama com recurso a medidores de radiação.

Esta medição afigura-se importante já que se trata de um perigo menos visível pois os efeitos das radiações ionizantes em doses baixas são frequentemente observáveis apenas vários anos após a exposição, sendo assim geralmente difícil estabelecer uma relação clara causa-efeito.

A radiação gama é capaz de provocar, direta ou indiretamente, a formação de iões. A ionização daí decorrente altera quimicamente os átomos e moléculas dos tecidos vivos, podendo originar alterações celulares. Sempre que a realização de trabalhos implique uma exposição a fontes de radiação natural da qual possa resultar uma dose efetiva anual superior a 1 mSv para os trabalhadores, estes devem ser considerados trabalhadores expostos, aplicando-se todos os respetivos requisitos de vigilância, monitorização e proteção radiológica referidos no Decreto-Lei nº 222/2008, de 17 de Novembro e demais legislação aplicável.

#### **Objetivos específicos**

Avaliar os níveis de radiação externa gama existentes nos locais de trabalho devido a fontes naturais de radiação, designadamente a fosforite, produtos derivados e cinzas depositadas em filtros. Colocar os valores medidos em planta e elaborar um mapa de taxa de dose de radiação gama.

#### **Grandezas a medir**

A grandeza a medir é a taxa de dose da radiação externa gama (Sv/h), sendo geralmente mais usado o submúltiplo ( $\mu\text{Sv/h}$ ).

#### **Valores de referência**

Para trabalhadores não treinados e para o público em geral o valor de referência a considerar é de 1  $\mu\text{Sv}$  / ano de acordo com o indicado no Decreto-Lei nº 222/2008, de 17 de Novembro.

### **Ações específicas a desenvolver**

Medir a taxa de dose da radiação externa gama, em  $\mu\text{Sv/h}$ , no interior das instalações em vários locais de trabalho com recurso a um medidor de radiação ionizante. Em cada local de trabalho devem ser efetuadas várias medições em dias diferentes.

Os resultados obtidos devem ser processados em termos estatísticos, em termos de valores médios e desvios padrão e posteriormente devem ser apresentados em planta de localização.

Em alternativa, pode também caracterizar-se o campo radioativo medindo a dose de radiação externa gama, através de um dosímetro digital sensível às radiações gama. Esta dosimetria deve ser realizada ao longo de um período de tempo significativo (algumas horas ou dias). A dose total medida durante esse período de tempo permite calcular a taxa de dose de acordo com a Equação 4.

$$T_d = D/T_e \quad \text{Equação 4}$$

onde,

$T_d$  - Taxa de dose (Sv/hora),

$D$  - Dose (Sv),

$T_e$  - Tempo de exposição (hora)

A medição da radiação externa gama deverá ser repetida em vários períodos do ano (por exemplo verão / inverno) e deve ser realizada à distância de 1 metro e também à distância de contato com a fonte de radiação (fosforite).

### **Descrição dos equipamentos a usar**

O equipamento a usar nas medições é o seguinte:

- a) Medidor de radiação ionizante marca ALNOR, modelo RDS 120
- b) Dosímetro individual de radiação gama Marca AUTOMESS Modelo ADOS

No caso de estudo desenvolvido, a medição dos níveis de radiação externa gama conduziu aos valores apresentados no Capítulo Resultados e Discussão de Resultados, Tabela 7, página 139.

### **3.2.4 Identificar e medir os locais com maior concentração de poeiras radioativas**

#### **Descrição do procedimento**

Este procedimento consiste em medir a concentração de poeiras no ar, provenientes da fosforite, nos diversos locais de trabalho com recurso a bombas de aspiração de ar, utilizando o método gravimétrico para pesar as poeiras depositadas nos filtros. Deve ser medida a concentração de partículas respiráveis e partículas totais em vários períodos do ano (por exemplo verão / inverno).

Considera-se importante neste estudo a determinação do nível de concentração de poeiras existentes no ar, porque nos pode fornecer uma indicação aproximada da quantidade de radionuclídeos derivados da fosforite presentes no ar. As poeiras existentes no ar podem constituir um perigo para a saúde dos trabalhadores devido a possibilidade de inalação, ingestão e absorção pela pele de elementos radioativos presentes nessas poeiras. Um perigo significativo para a saúde dos trabalhadores expostos resulta da emissão de radiação alfa por essas poeiras radioativas, altamente energética, capaz de destruir os tecidos internos não protegidos pela pele humana.

Além disso, se os locais de trabalho tiverem concentrações elevadas de poeiras, o radão presente no ar vai gerando outros elementos radioativos no seu processo natural de decaimento radioativo, designadamente polónio, bismuto e chumbo. Estes elementos radioativos associam-se às poeiras respiráveis existentes no ar e são inalados podendo-se depositar ao longo do sistema respiratório. A radiação alfa associada a esses elementos radioativos pode provocar danos irreparáveis nos tecidos dos pulmões, incluindo o desenvolvimento de neoplasmas.

#### **Objetivos específicos**

Medir a concentração de poeiras totais e de poeiras respiráveis no ar que tenham uma atividade radiológica significativa e medir a exposição individual dos trabalhadores a essas poeiras. Comparar os valores obtidos com os níveis de referência conhecidos.

#### **Grandezas a medir**

Concentração de poeiras totais e poeiras respiráveis no ar em  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

#### **Valores de referência**

A ACGIH (*American Conference of Industrial Hygienists*) indica que mesmo partículas biologicamente inertes, insolúveis, ou fracamente solúveis podem originar efeitos adversos e recomenda que as suas concentrações no ar devem ser mantidas abaixo de  $3 \text{ mg}/\text{m}^3$  para partículas respiráveis e de  $10 \text{ mg}/\text{m}^3$  para partículas inaláveis até que se verifique o estabelecimento de um VLE (Valor Limite de Exposição) para uma dada substância.

A Norma NP1796-2007 não indica qual o valor VLE-MP (Valor Limite de Exposição - Média Ponderada) admissível para poeiras que emitam radiações ionizantes, no entanto, pode-se assumir por precaução, que o valor de VLE-MP para poeiras provenientes da fosforite com uma forte presença de isótopos radioativos deverá ser muito inferior aos valores acima indicados.

Por exemplo, para poeiras do carvão o VLE-MP indicado na referida Norma é de apenas 0,4 mg/m<sup>3</sup>. São referidas a lesão pulmonar e a fibrose pulmonar como efeitos negativos na saúde dos trabalhadores derivados da exposição a poeiras de carvão.

### **Ações específicas a desenvolver**

Atendendo a que existe um efeito nocivo mais intenso provocado pelas partículas de poeira de pequena dimensão (até cerca de 5 µm) já que conseguem penetrar na região dos alvéolos pulmonares onde ocorrem as trocas gasosas, considera-se importante determinar essa concentração de poeiras respiráveis no ar. As poeiras respiráveis correspondem a uma fração das poeiras totais e podem ser separadas com recurso a um ciclone, como indicado na Figura 58, página 100.

O método utilizado para determinar a concentração de poeiras no ar baseia-se na análise gravimétrica (determinação da massa por pesagem) dos filtros de poeiras antes e após a recolha. A diferença de peso do filtro, antes e depois da recolha das poeiras, dá-nos o peso das poeiras retidas no filtro e indiretamente uma medida da concentração de poeiras no ar.

As poeiras respiráveis existentes no ar são separadas das poeiras totais num ciclone intercalado no tubo de aspiração, devido à diferença das suas massas. Deste modo, com a utilização do ciclone apenas chegam ao filtro as poeiras respiráveis (mais leves) enquanto que as poeiras mais pesadas precipitam no depósito existente na base do ciclone.

O processo de medição inicia-se no laboratório com a pesagem do filtro limpo numa balança com seis casas decimais para calcular a sua massa inicial. Após a exposição às poeiras o filtro volta a ser pesado para determinar a massa das partículas que ficaram retidas no filtro e assim estimar indiretamente a concentração das poeiras no ar em mg/m<sup>3</sup>.

Para realizar a avaliação da exposição ocupacional às partículas totais as bombas de aspiração de ar devem ser calibradas para 1 l de ar/min com 2 horas de medição. Para as partículas respiráveis (separadas por um ciclone em alumínio) as bombas de aspiração devem ser calibradas para 2,5 l de ar/min com 2,5 horas de medição, de acordo com os métodos de medição e de quantificação NIOSH 500 e NIOSH 600 apresentadas no Anexo C.

Para determinar a exposição ocupacional a poeiras totais e a poeiras respiráveis podem ser colocadas bombas de aspiração e filtros nos trabalhadores selecionados como se pode observar na Figura 60, página 102.

Posteriormente em laboratório pesa-se a quantidade de poeiras presentes nos filtros determinando-se assim a concentração de poeiras no ar em função do valor do caudal de aspiração e do tempo de amostragem, de acordo com a Equação 5.

$$C_i = 10^6(P_f - P_i)/(C_a T_e) \quad \text{Equação 5}$$

em que,

$C_i$  - Concentração de poeiras no ar [mg/m<sup>3</sup>]

$P_f$  - Peso final do filtro [g]

$P_i$  - Peso inicial do filtro [g]

$C_a$  - Caudal da bomba de aspiração [l/min]

$T_e$  - Tempo da amostragem [min]

### **Descrição dos equipamentos a usar**

Para determinar a concentração de poeiras no ar, foram medidas as poeiras totais e as poeiras respiráveis nas zonas de trabalho com recurso a 4 bombas de aspiração de ar, marca SIDEKICK, de aspiração elétrica com caudal de ar calibrado, ciclone de separação de partículas por tamanhos e filtro de papel para recolha das poeiras. O equipamento usado pode ser visto na Figura 59, página 101. Os métodos de medição e de quantificação utilizados estão de acordo com as técnicas NIOSH 500 e NIOSH 600 apresentadas no Anexo C.

Envolve a colocação e operação de amostradores totais, amostradores de poeiras fracionadas (*cascade impactor*), para amostragem das poeiras em suspensão.

Para a análise radiológica os filtros de poeiras podem ser analisados por radioquímica, cromatografia de troca iónica, eletrodeposição dos radionuclidos em porta-amostras de inox e prata, quantificação por espectrometria alfa com detetores de silício de barreira.

Equipamento a usar:

- a) Sistema amostrador de poeiras com bomba elétrica de aspiração.

No caso de estudo desenvolvido, a medição da exposição ocupacional a poeiras e a medição dos níveis de poeiras existentes no ar conduziu aos valores apresentados no Capítulo Resultados e Discussão de Resultados, Tabela 5, página 134 e Tabela 6 página 137, respetivamente.

### **3.2.5 Medir a concentração de gás radão**

#### **Descrição do procedimento**

Este procedimento consiste em identificar e medir os locais onde possam existir concentrações significativas de gás radioativo radão, capazes de constituir um perigo para a saúde dos trabalhadores.

O radão é um gás inerte radioativo, produzido pelo decaimento do urânio natural que está presente na fosforite, sendo responsável por uma dose significativa de radiação a que os trabalhadores poderão estar expostos. Geralmente, o radão escapa-se para o ar livre e é diluído rapidamente na atmosfera, permanecendo em concentrações baixas, não sendo por isso fonte de grande preocupação. No entanto, em espaços fechados ou pouco ventilados, como os existentes na indústria estudada, o radão poderá acumular-se atingindo concentrações elevadas que poderão ser prejudiciais para a saúde dos trabalhadores.

O radão interior foi indicado pela EPA (como sendo a segunda principal causa de câncer de pulmão depois do hábito fumar tabaco. Está estabelecida claramente na literatura, uma relação causa efeito entre a inalação de radão e seus descendentes radioativos e o desenvolvimento de câncer pulmonar em trabalhadores expostos.

Também a ingestão de partículas de poeira associadas aos produtos do decaimento radioativo do radão pode provocar a deposição dessas poeiras ao longo do sistema digestivo com o consequente bombardeamento dos tecidos sensíveis do estômago por partículas alfa altamente energéticas.

O radão é um emissor de radiação alfa com uma semivida de 3,8 dias, que decai numa série de descendentes de curta duração, nomeadamente Polónio ( $^{218}\text{Po}$ ), Chumbo ( $^{214}\text{Pb}$ ), Bismuto ( $^{214}\text{Bi}$ ) e Polónio ( $^{214}\text{Po}$ ) conforme ilustrado no Quadro 3, página 24).

O problema principal do radão na saúde resulta da inalação dos seus descendentes radioativos de vida curta ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{214}\text{Po}$ ) já que possuem uma atividade radiológica importante. Se os locais de trabalho não são mantidos livres de poeiras, os produtos do decaimento radioativo referidos (polónio, bismuto e chumbo radioativo) associam-se às poeiras existentes no ar e são inalados e depositam-se ao longo do sistema respiratório. A radiação alfa associada pode provocar danos irreparáveis nos tecidos dos pulmões, incluindo o desenvolvimento de neoplasmas.

### **Objetivos específicos**

Consiste, numa primeira fase, em identificar zonas com concentrações elevadas de gás radioativo radão através de medições rápidas com recurso a um aparelho de leitura direta e contínua.

Numa segunda fase, medir a concentração de radão no ar em períodos alargados de tempo com recurso a detetores de radão (detetores de traços nucleares) com um período de permanência de cerca de 30 dias. Pretende-se igualmente avaliar a concentração de radão no ar em espaços pouco ventilados ocupados por períodos de tempo curtos em operações de limpeza, manutenção e reparação de equipamentos e instalações.

Com base nas medições efetuadas, comparar os valores obtidos com os valores de referência adotados e estimar o risco para a saúde dos trabalhadores nos locais avaliados.

### **Grandezas a medir**

Pretende-se medir a concentração de radão na atmosfera em ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) que nos vai indicar a atividade radioativa (número de desintegrações nucleares por segundo) presente num metro cúbico dessa atmosfera.

Pretende-se igualmente obter o valor de exposição a radiações ionizantes na unidade **sievert** (Sv), que mede a dose equivalente de radiação que tem o mesmo efeito destruidor em tecidos biológicos que uma dose igual de radiação gama. Conhecendo a dose de radiação proveniente do radão (em Sv) pode-se somar a dose proveniente de outras fontes de radiação, por exemplo radiação externa gama, calculando assim a dose total de radiação.

### **Valores de referência**

Os valores de referência estão indicados no Decreto-Lei nº 79/2006 (Governo Português - Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, 2006) e na Diretiva 90/143/EURATOM (Commission of the European Communities, 1990). Os níveis de ação para o radão em locais de trabalho nos diferentes países europeus, indicados no Quadro 6,

apontam no sentido de que não deva ser excedido o valor 200 Bq/m<sup>3</sup>. A União Europeia na Diretiva 90/143/EURATOM recomenda que para habitações já construídas (antes de 1996) as concentrações médias anuais não ultrapassem os 400 Bq/m<sup>3</sup> e que para futuras construções os níveis de radão sejam mantidos abaixo dos 200 Bq/m<sup>3</sup> (Commission of the European Communities, 1990).

### **Ações específicas a desenvolver**

- a) Identificar as zonas de maior concentração de radão

Realizar numa primeira fase medições rápidas da concentração de radão na atmosfera em zonas onde se prevejam concentrações significativas do gás radioativo e simultaneamente estejam ocupadas por trabalhadores, quer em trabalhos de rotina quer em trabalhos de manutenção.

- b) Medir a concentração de radão em Bq/m<sup>3</sup>

Numa segunda fase medir a concentração de radão no ar em períodos alargados de tempo com recurso a detetores de traços nucleares para o radão com um período de medição de cerca de 30 dias. Avaliar igualmente a concentração de radão no ar em espaços pouco ventilados ocupados por períodos de tempo curtos para operações de limpeza, manutenção e reparação de equipamentos e de instalações.

Os detetores de traços nucleares devem ser instalados e recolhidos após vários dias de exposição nos locais de avaliação sendo posteriormente enviados para um laboratório para determinação da concentração do radão, através da contagem em microscópio do número de traços nucleares (orifícios) criados na película pela radiação alfa emitida pelo radão.

A concentração de radão pode ser calculada através da Equação 6,

$$R_n = D_t \times f_c / T_e \quad \text{Equação 6}$$

onde,

$R_n$  - concentração de radão (Bq/m<sup>3</sup>)

$D_t$  - densidade de traços (número de traços/m<sup>2</sup>)

$f_c$  - fator de calibração (densidade de traços correspondente a uma exposição de 1 dia a uma concentração de 1 Bq/m<sup>3</sup>; esta informação é dada pelo fornecedor)

$T_e$  - tempo de exposição (dias)

- c) Converter a concentração de radão em dose de radão

Pretende-se obter o valor de exposição a radiações ionizantes na unidade sievert (Sv). Este valor mede a dose equivalente de radiação que tem o mesmo efeito biológico destruidor que uma dose igual de radiação gama. Ou seja, pretende-se conhecer qual a dose de radiação proveniente do radão (em sievert), ponderando o fator de qualidade da radiação (20 para partículas alfa) e o tecido afetado pela radiação (pulmões 0,12). Sendo a concentração de radão e a dose de radão duas grandezas físicas diferentes, é necessário usar um fator de conversão para determinar a dose de radão, conhecida a sua concentração numa determinada atmosfera.

Para contabilizar os efeitos da soma da radiação externa gama e da radiação proveniente do radão no trabalhador, torna-se necessário, como já referido, efetuar a conversão dos valores de concentração de radão ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) para os valores de dose efetiva de radão (Sv).

Relativamente ao fator de conversão a utilizar, existem ainda algumas incertezas, com valores de conversão significativamente diferentes dados quer pela análise epidemiológica e quer pela análise dosimétrica. O valor indicado na legislação portuguesa (Decreto-Lei nº 222/2008) é de 1,4 Sv por ( $\text{J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ) que convertido corresponde a cerca de 6,7 nSv por ( $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

O fator de conversão recomendado no relatório (UNSCEAR, 2000) é de 9 nSv por  $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$  e leva em consideração o fator de qualidade da radiação alfa de  $W_r=20$  e a ponderação da dose para os tecidos do pulmão de  $W_T=0,12$ .

Por exemplo, para um valor de concentração de radão de  $400 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , supondo uma exposição ocupacional anual dos trabalhadores de 2.000 horas, um fator de equilíbrio do radão de 0.4 e um fator de conversão de 9 nSv por  $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ , a dose efetiva estimada para um ano de exposição ao radão seria de 2,88 mSv/ano, de acordo com a Equação 7.

$$D_e = C_i \times F_c \times F_e \times N_{ex} \quad \text{Equação 7}$$

onde,

$D_e$  - Dose Efetiva

$C_i$  - Concentração de Radão ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )

$F_c$  - Fator de Conversão = 9 nSv por ( $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ )

$F_e$  - Fator de Equilíbrio do radão = 0.4 (valor assumido para ambientes interiores)

$N_{EX}$  - Nº Horas de exposição (h)

Para o cálculo da dose de radiação proveniente do radão (mSv), conhecida a sua concentração no ar em  $\text{Bq}/\text{m}^3$ , também poderá ser usado um programa de cálculo disponibilizado em (Wise Uranium Project, 2011).

#### **d) Identificar a existência de radão e poeiras no ar nos mesmos espaços**

Pretende-se identificar e avaliar a existência de concentrações elevadas de radão e de poeiras no ar nos mesmos espaços físicos. Para avaliar a presença desse risco pode analisar-se a correlação entre os níveis de concentração de poeiras e os níveis de concentração de radão na atmosfera. Obtém-se um  $R^2$  da regressão que representa uma função direta da correlação entre as duas variáveis, sendo que um valor próximo de um indica uma forte relação entre as duas variáveis. No caso de estudo, obteve-se o gráfico indicado na Figura 90 no qual o valor de  $R^2$  é igual a 0,71 levando a concluir que existem zonas com uma coincidência muito significativa entre radão na atmosfera e níveis elevados de empoeiramento com partículas respiráveis, aumentando significativamente o risco para a saúde dos trabalhadores expostos.

#### **e) Identificar e caracterizar outros trabalhos pontuais de elevada exposição**

##### Exposição ao radão em operações de manutenção

Em operações de manutenção, reparação e limpeza realizadas no interior de vários equipamentos, designadamente dentro do reator e dos moinhos, onde existem espaços muito confinados, os níveis de radão podem aumentar de forma muito significativa devido a falta de arejamento. Tratando-se de exposições intensas, mas de curta duração não é possível efetuar medições pelo método dos detetores de traços nucleares passivos, para os quais é necessário um tempo acumulado de exposição de 1 a 3 meses, tipicamente.

O efeito da concentração elevada do radão, combinado com uma forte concentração de poeiras no ar, aumenta exponencialmente o risco para os trabalhadores envolvidos nas tarefas de limpeza. Como já foi referido anteriormente, é sabido que o risco radiológico associado ao radão deve-se sobretudo aos seus descendentes sólidos (polónio, bismuto e chumbo) formados no ar e que se associam às partículas de pó, que sendo posteriormente inaladas irradiam os tecidos internos do pulmão com radiação alfa.

##### Exposição ao radão em operações de remoção do fosfogesso

Tipicamente o fosfogesso apresenta níveis de radiação elevados que importa identificar e avaliar, pois representam um risco significativo para os trabalhadores envolvidos nas tarefas de manutenção, remoção e limpeza, assim como um perigo para as populações e para o ambiente.

No caso de estudo, existe no exterior das instalações um aterro de resíduos de fosfogesso (Figura 29, página 74) onde os níveis de radiação gama são também significativos, pelo que qualquer trabalho de manipulação desse resíduo origina um risco elevado de exposição para os trabalhadores envolvidos. Existe igualmente uma libertação significativa de radão proveniente da pilha de fosfogesso, especialmente quando manipulado mecanicamente, pelo que a permanência no local e a conseqüente inalação de poeiras ou gases libertados na zona pode envolver um risco acrescido de exposição a radiação ionizante.

### **Descrição dos equipamentos a usar**

- a) Equipamento de deteção de radão, marca DURRIDGE, modelo RAD7, de leitura direta e equipado com filtro de secagem do ar, com períodos de amostragem de 5 minutos.
- b) Detetores de traços nucleares para determinação de radão (Modelo fornecido pelo ITN).

### **3.2.6 Estimar a dose total de radiação ionizante**

#### **Descrição do procedimento**

Consiste em estimar a dose total de radiação ionizante a que poderão estar expostos os trabalhadores, devido ao efeito acumulativo da exposição à radiação externa gama, inalação, ingestão e absorção de poeiras radioativas e exposição ao radão.

Importa também caracterizar a exposição laboral e avaliar o risco radiológico nas zonas identificadas como de risco mais elevado: nos locais de carga / descarga de matérias-primas transportadas a granel em navios, nos postos / áreas de trabalho, nas operações de transporte, processamento, ensacamento e armazenamento do produto. É igualmente importante identificar e avaliar a exposição a outros contaminantes nos locais de trabalho e os possíveis efeitos sinérgicos e avaliar a exposição dos trabalhadores externos em operações de manutenção das instalações.

Em todos os casos torna-se necessário observar e medir os tempos de exposição dos trabalhadores aos diversos agentes contaminantes.

#### **Objetivos específicos**

Pretende-se com este procedimento estimar a dose de radiação correspondente aos efeitos acumulados da radiação externa gama e da exposição ao radão. Para estimar a dose de radiação total a que poderão estar expostos os trabalhadores devem ser considerados os seguintes fatores:

1. Atividade dos radionuclidos presentes nas poeiras existentes no ar.
2. Concentração de poeiras existentes no ar nos locais de trabalho.
3. Quantidade média de ar inalada pelos trabalhadores e respetivo fator de conversão.
4. Dose externa de radiação gama presente nos locais de trabalho.
5. Concentração de radão nas zonas de trabalho.
6. Número de horas de exposição aos vários tipos de contaminação.
7. Tipo de proteção usada para as vias respiratórias (tipo de máscara respiratória, tipo de filtro, eficiência, estado de funcionamento, colocação adequada, tempo de utilização).

### **Grandezas a medir**

Dose total de radiação ionizante em mSv / ano e tempo de exposição em horas.

### **Valores de referência**

Para trabalhadores não treinados e para o público em geral o valor de referência a considerar é de 1  $\mu$ Sv / anos de acordo com o indicado no Decreto-Lei nº 222/2008, de 17 de Novembro.

### **Ações específicas a desenvolver**

Calcular a dose total de radiação a que o trabalhador está exposto a partir da soma das diferentes doses recebidas: por inalação, ingestão e absorção por feridas de poeiras com radionuclídeos, inalação de radão e dos seus descendentes de semivida curta e radiação externa.

De acordo com (Birky, et al., 1998), para estimar a dose de radiação por inalação de poeiras radioativas a que podem estar expostos os trabalhadores poderá assumir-se que o valor médio de ar ventilado pelos trabalhadores é de 35 l/min, com um valor máximo para um trabalho pesado de 85 l / min e de 13 l / min para um trabalho leve.

É igualmente necessário levar em consideração o fator de proteção introduzido pela utilização de máscaras contra poeiras.

## **3.2.7 Avaliar o risco e a necessidade de medidas corretivas**

### **Descrição do procedimento**

Consiste em avaliar o risco presente de exposição as radiações ionizantes, comparar os valores obtidos com os valores de referência recomendados por entidades internacionais e pela legislação, quando existente. Estabelecer uma relação entre os valores de exposição e os riscos para a saúde.

### **Objetivos específicos**

Quantificar o risco presente para a saúde dos trabalhadores e avaliar a necessidade de adotar ações de prevenção e proteção dos trabalhadores.

### **Grandezas a medir**

Dose total de exposição a radiações ionizantes em mSv / ano e o aumento do risco de câncer ao longo da vida em percentagem.

### **Valores de referência**

Para trabalhadores não treinados e para o público em geral o valor de referência a considerar é de 1  $\mu$ Sv / anos de acordo com o indicado no Decreto-Lei nº 222/2008, de 17 de Novembro de 2008.

### **Ações específicas a desenvolver**

Comparar os valores com os valores de referência e propor medidas de prevenção e de proteção da saúde dos trabalhadores expostos a radiações ionizantes de origem natural.

A sequência de procedimentos a executar para efetuar a avaliação do risco de exposição a radiações ionizantes na indústria de fertilizantes está indicada na Figura 24.



**Figura 24 - Sequência de procedimentos operacionais**

### **3.3 Caracterização do caso de estudo**

O trabalho de campo foi realizado durante os anos de 2009 e 2010, nas instalações industriais da empresa portuguesa ADP - Adubos de Portugal, situada em Setúbal (Mitrena), onde se observaram condições de empoeiramento, exposição à radiação gama, exposição à radiação alfa proveniente de poeiras radioativas e exposição à radiação alfa originada pelos descendentes radioativos do radão presentes no ar.

O estudo foi conduzido em duas situações distintas, uma com a fábrica a trabalhar normalmente, sendo o trabalho realizado por trabalhadores da empresa e uma outra, com a fábrica parcialmente parada para operações de manutenção com o trabalho efetuado por cerca de 60 trabalhadores externos à fábrica, recrutados através de empresas de trabalho temporário.

Foi efetuado trabalho de campo em três épocas diferentes, com campanhas de medições realizadas em maio de 2009, agosto de 2010 e novembro de 2010.

#### **Exposição à radiação externa gama em fase normal de laboração da fábrica**

Foi inicialmente efetuada uma avaliação das condições de higiene industrial em fase normal de laboração da fábrica que levou a que fossem estudados apenas os locais de trabalho potencialmente expostos a níveis elevados de poeiras ou de radiação ionizante, localizados nas áreas de secagem e expedição, produção de fertilizantes e áreas de manutenção.

Nas áreas de armazenamento, secagem, processamento e expedição foram identificados, através de medições rápidas, trabalhadores expostos a condições de empoeiramento, a níveis significativos de radiação gama e a níveis significativos de radão.

#### **Exposição a poeiras radioativas em operações de manutenção**

Posteriormente foi efetuada uma avaliação das condições de higiene industrial em operações de manutenção, designadamente limpeza de filtros, equipamentos, reatores, moinhos, transportadores, zonas de armazenamento e instalações em geral.

Todos os anos a unidade industrial encerra total ou parcialmente para operações de limpeza, manutenção e reparação de máquinas, equipamentos e instalações. Estas operações envolvem geralmente a exposição a poeiras finas resultantes da limpeza de equipamentos e filtros de mangas dos sistemas de aspiração localizada existentes na fábrica. Estes trabalhos conduzem à inalação e à ingestão de poeiras pelos trabalhadores bem como à possível absorção de substâncias, com níveis significativos de radioatividade, através da pele ou de feridas não protegidas.

Este trabalho de manutenção e limpeza é efetuado por cerca de 60 trabalhadores externos à empresa, contratados através de empresas de trabalho temporário. Estes trabalhadores têm geralmente uma formação em higiene e segurança do trabalho muito baixa ou inexistente.

A título ilustrativo, mostra-se na Figura 25 uma medição da radiação externa gama realizada pelo autor durante trabalhos de manutenção (limpeza de filtros de mangas) levados a cabo por trabalhadores externos à empresa.



**Figura 25 - Medição da radiação externa gama durante trabalhos de limpeza de filtros**

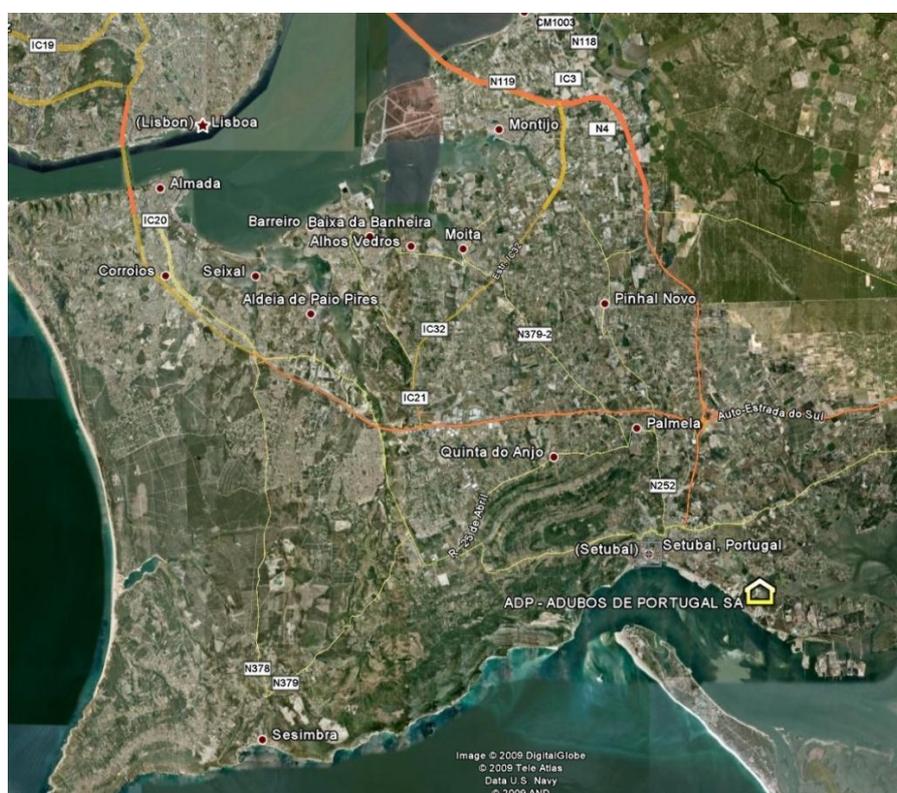
(foto do autor)

### 3.4 Caracterização da unidade industrial

A ADP - Adubos de Portugal SA possui uma unidade industrial para produção de superfosfatos e de adubos compostos, convencionais e específicos. A ADP foi adquirida em 2008 pela empresa espanhola produtora de fertilizantes Fertiberia.

A unidade industrial conta com 98 trabalhadores, dos quais 50 estão afetos às áreas de produção (dados relativos a 2010). A fábrica realiza uma paragem anual de cerca de 3 semanas para reparações nas instalações, manutenção de equipamentos e limpeza de filtros, recorrendo a cerca de 60 trabalhadores externos. Na sua grande maioria, são trabalhadores não especializados com pouca formação em higiene e segurança do trabalho e que realizam os trabalhos de maior risco, designadamente, a limpeza dos filtros de mangas e a remoção do fosfogesso, o que origina uma exposição elevada a poeiras finas e a substâncias com níveis de radioatividade apreciáveis.

Esta unidade de produção de fosfatos está situada no parque industrial da SAPEC na península de Setúbal a cerca de 50 km de Lisboa, como se indica na Figura 26.



**Figura 26 - Localização da empresa ADP - Adubos de Portugal**

(Fonte: Google Earth)

Para melhor caracterização da unidade industrial inclui-se fotografia satélite da zona envolvente das instalações indicada na Figura 27. Esta fábrica confina com o rio Sado, uma zona ambientalmente muito sensível do ponto de vista da proteção do meio aquático, onde por exemplo se pode encontrar uma boa variedade de peixes e grupos de golfinhos.



**Figura 27 - Imagem satélite da zona envolvente da instalação industrial**

(Fonte: Google Earth)

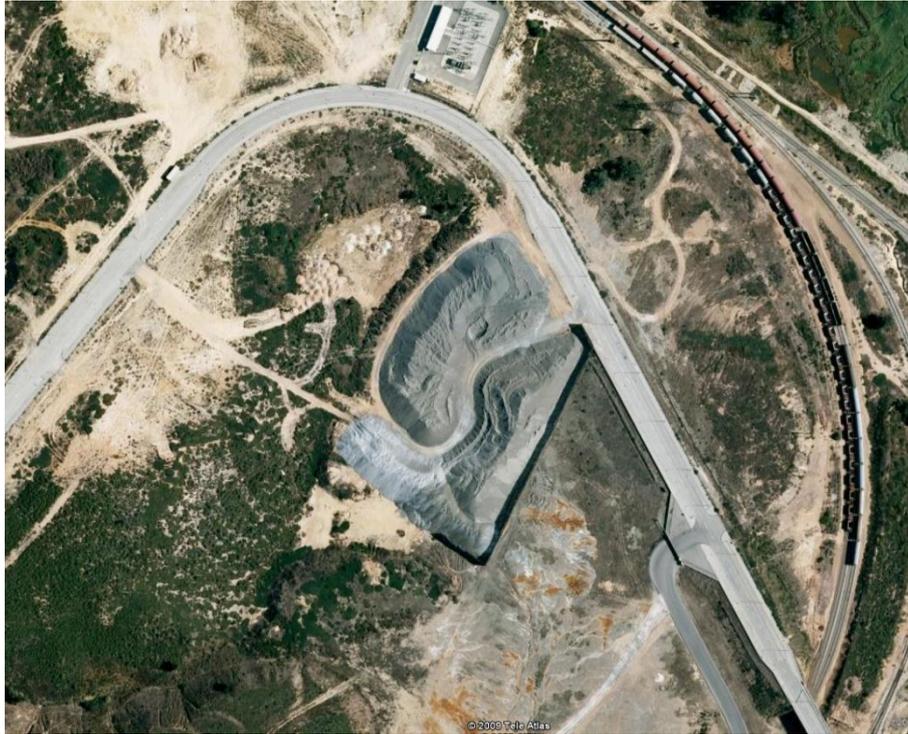
Na Figura 28 podemos ver uma fotografia satélite das instalações industriais das ADP.



**Figura 28 - Imagem satélite da instalação industrial**

(Fonte: Google Earth)

Na Figura 29 está indicada a localização do depósito de resíduos de fosfogesso resultantes do processo industrial.



**Figura 29 - Fotografia satélite do depósito de fosfogesso da ADP (no centro)**

(Fonte: Google Earth)

A ADP produz o superfosfato de cálcio, que é um dos adubos minerais mais antigos utilizados pelo homem, na unidade de produção de fertilizantes fosfatados - superfosfatos. O superfosfato é uma das principais matérias-primas para a produção de adubos compostos granulados NPK (Azoto, Fósforo, Potássio), podendo também ser vendido a granel, normalmente para exportação. Os adubos granulados podem ser expedidos a granel ou ensacados.

A atividade principal da empresa é a produção de adubos compostos granulados NPK com capacidade instalada de 70 toneladas/hora, ou seja 1680 toneladas/dia. Existe outra atividade secundária, a produção de Superfosfatos com uma capacidade instalada de 46 toneladas/hora. O diagrama geral de produção da ADP está indicado na Figura 30.

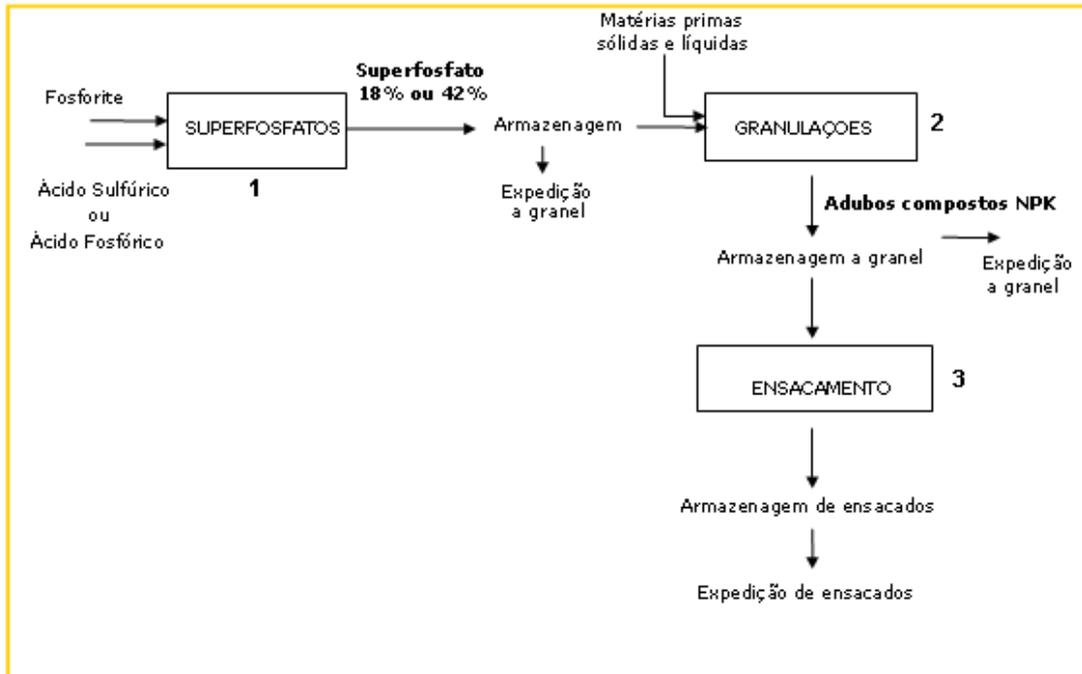


Figura 30 - Diagrama geral de produção da ADP

(Fonte: ADP)

### 3.4.1 Unidade de produção de fertilizantes fosfatados - Superfosfatos

A fosforite a usar na produção de superfosfatos é moída em 5 moinhos Poitemill com as seguintes capacidades:

- Moagens 1 a 4: 8 ton/h
- Moagem 5: 16 ton/h

O produto moído é transportado através de uma corrente de ar, insuflada por um ventilador, para um ciclone onde o ar é despoeirado, para ser reintroduzido no moinho. A fosforite moída descarregada do ciclone segue por um tapete transportador, para o reator de Superfosfatos (Figura 31).

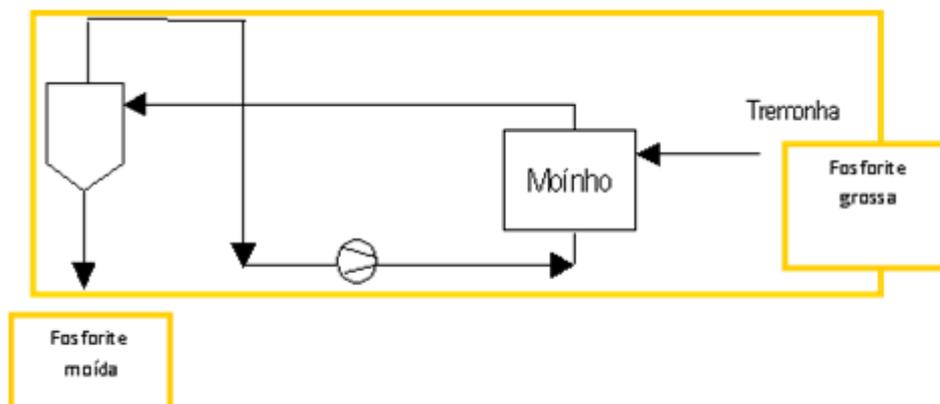
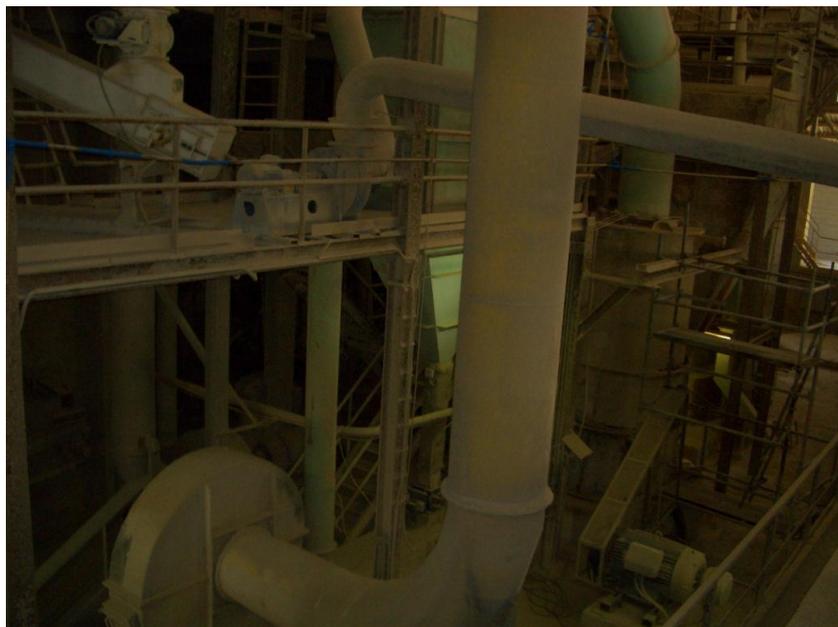


Figura 31 - Moagem da fosforite

(Fonte: ADP)

Na Figura 32 apresenta-se uma foto com uma vista geral da zona de moagem onde é visível a tremonha de alimentação da moagem da fosforite (matéria-prima).

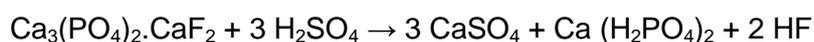


**Figura 32 - Vista da zona de moagem da fosforite**

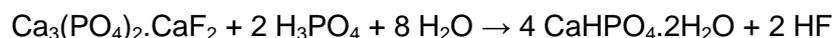
(Foto do autor)

Nesta unidade produz-se superfosfato simples (18% em  $P_2O_5$ ) em pó, denominado SSP e superfosfato triplo (42% em  $P_2O_5$ ) em pó, denominado TSP, com uma capacidade entre 700 a 1100 toneladas por dia.

O superfosfato simples resulta da reação da fosforite moída com ácido sulfúrico a 75%, de acordo com:

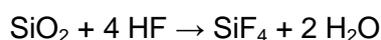


O superfosfato triplo resulta da reação da fosforite com ácido fosfórico a 52%, de acordo com:



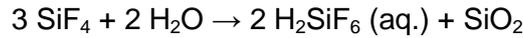
Paralelamente a estas reações dão-se muitas outras reações laterais, pois a fosforite é uma matéria prima de composição muito complexa, contendo para além de fluorapatite,  $Ca_3(PO_4)_2 \cdot CaF_2$ , quantidades apreciáveis de carbonatos de cálcio, magnésio, sílica e quantidades menores de muitos outros elementos.

Predominam entre estas reações o ataque dos carbonatos, que origina  $CaSO_4$  e  $CO_2$ , libertado conjuntamente com HF, que, dependendo da relação F/ $SiO_2$  na fosforite, reage com a sílica de acordo com a equação:

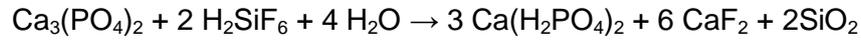


O "slurry" formado nas reações cai sobre uma correia transportadora, que roda a velocidade reduzida, de tal modo que, quando o adubo chega ao fim dessa correia já é um sólido manipulável, podendo ser armazenado numa pilha onde as reações anteriores continuam a prosseguir.

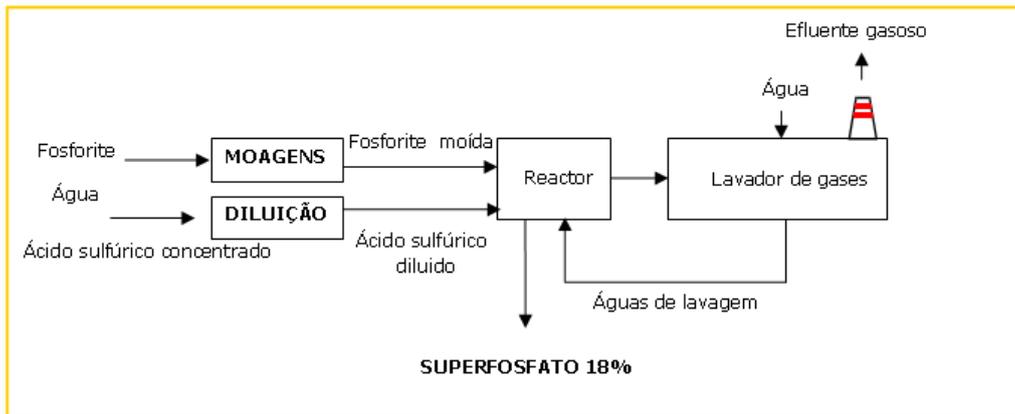
Os gases libertados tais como CO<sub>2</sub>, SiF<sub>4</sub>, HF, H<sub>2</sub>O, são encaminhados para três torres de lavagem onde os compostos de flúor são absorvidos segundo:



Este ácido é recirculado ao processo, e reage com a fosforite de acordo com:



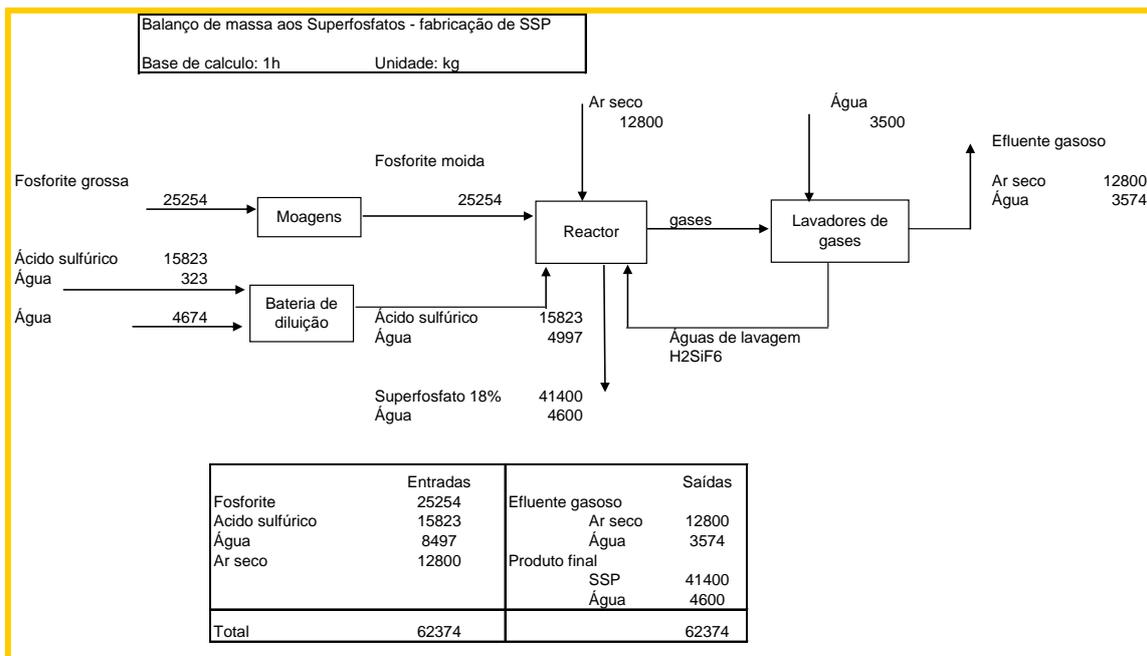
resultando numa diminuição do consumo de ácido sulfúrico e num aproveitamento de água (Figura 33).



**Figura 33 - Diagrama de processo dos Fertilizantes Fosfatados**

(Fonte: ADP)

Na Figura 34 está indicado o balanço de massas aos superfosfatos referente ao produto mais produzido em 2005.



**Figura 34 - Balanço de massas aos Superfosfatos**

(Fonte: ADP)

### 3.4.2 Unidade de produção de adubos compostos granulados NPK

A ADP dispõe de uma unidade de produção de adubos compostos com duas linhas de produção: a Granulação II e a Granulação IV. A capacidade de produção depende muito do tipo de adubo a produzir e das matérias-primas a utilizar. Deste modo, a capacidade de produção de adubos compostos granulados é de 1100 a 1680 toneladas por dia. Esta unidade produz adubos granulados cujos nutrientes principais são: azoto, fósforo e potássio, chamados adubos compostos ternários NPK. Além disso pode produzir adubos granulados binários NP, PK e elementares N ou P como o caso dos superfosfatos granulados (Figura 35).

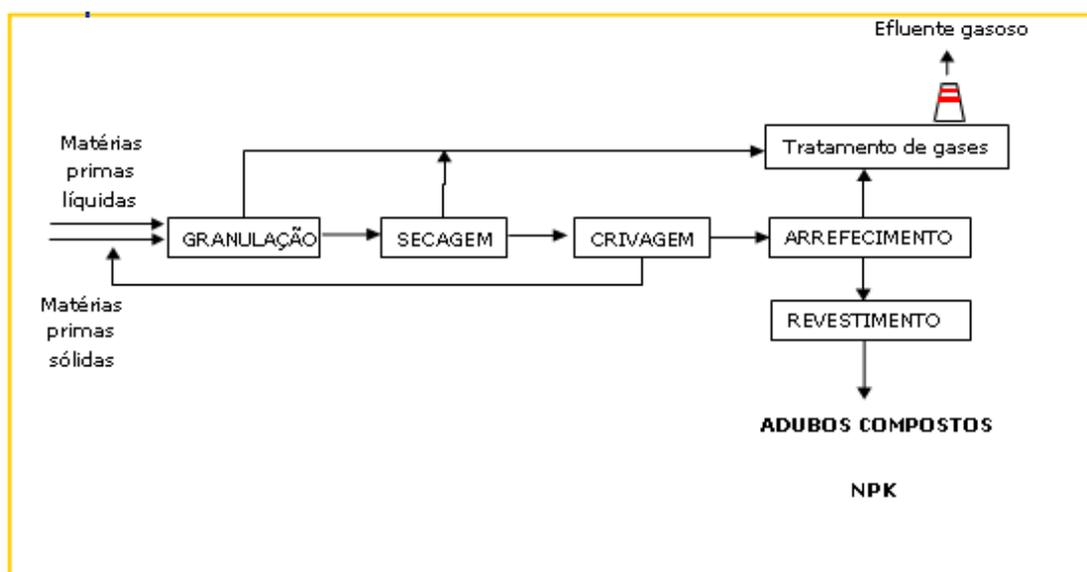


Figura 35 - Diagrama de processo dos Adubos Compostos NPK Granulados

(Fonte: ADP)

#### 3.4.2.1 1ª Linha de Granulação - Granulação II

A Granulação II é uma granulação em tambor rotativo tipo TVA de 1972. Esta unidade dispõe de um pré-granulador destinado à granulação de fosfatos naturais ou fosfatos naturais semi-atacados. O processo de fabrico indicado na Figura 35, inclui as seguintes etapas:

- Alimentação de matérias-primas
- Dosagem de matérias-primas
- Granulação
- Secagem
- Crivagem e moagem de grossos
- Arrefecimento, revestimento e pesagem
- Armazenagem a granel

## Alimentação de matérias-primas

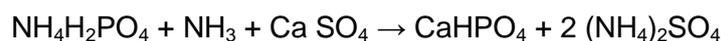
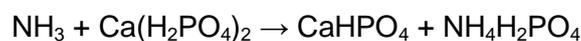
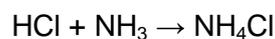
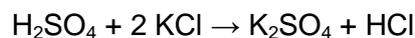
Existe um armazém com uma capacidade total de 4500 toneladas repartidas por 3 tulas de 700 toneladas e 8 tulas de 350 toneladas. As matérias-primas são alimentadas deste para os silos através de uma pá mecânica. A alimentação de fosforite moída ao pré-granulador é efetuada através de um silo de 60 toneladas que é abastecido por camião cisterna. Estas matérias-primas juntamente com o reciclo proveniente de peneiros e moinhos constituem a alimentação ao granulador.

## Dosagem de matérias-primas

Determina-se a fórmula ótima para a produção de determinado adubo recorrendo a um programa de otimização de custos. Esta fórmula é introduzida num computador na sala de controlo que vai comandar o arranque e a paragem dos transportadores dos silos para as balanças.

## Granulação

Consegue formar-se grão de adubo adicionando a esta mistura de sólidos uma fase líquida constituída por amoníaco, ácido sulfúrico ou fosfórico e água proveniente da lavagem de gases e da rede (água de *make-up*). As reações químicas são complexas, mas predominam as seguintes:



Estas reações são exotérmicas e o calor que libertam serve para vaporizar parte da água utilizada na granulação, o que constitui uma vantagem adicional em termos de economia de energia. Os gases e partículas gerados no granulador são encaminhados para o secador.

## Secagem

A secagem é efetuada num tambor rotativo. O adubo é seco com ar quente em co-corrente, obtido através de queima de gás natural na câmara de combustão. Os gases gerados no secador são enviados para um filtro de mangas.

## Crivagem

A crivagem é efetuada em dois crivos de um andar cada, montados um sobre o outro, destinando-se o primeiro a remover a fração grossa (>4,75 mm) que é enviada para a moagem. O produto que fica retido entre os dois crivos é enviado para o arrefecimento e o produto que passa o crivo inferior (< 2 mm) é recirculado à alimentação do granulador.

## Arrefecimento

O arrefecimento é feito em dois arrefecedores de leito fluidizado. Os gases resultantes de cada arrefecedor são enviados respetivamente para 2 ciclones de alta eficiência para remoção das poeiras.

## Revestimento

O revestimento é feito num tambor rotativo com um anti aglomerante mineral que vai evitar o enterroamento do adubo na armazenagem.

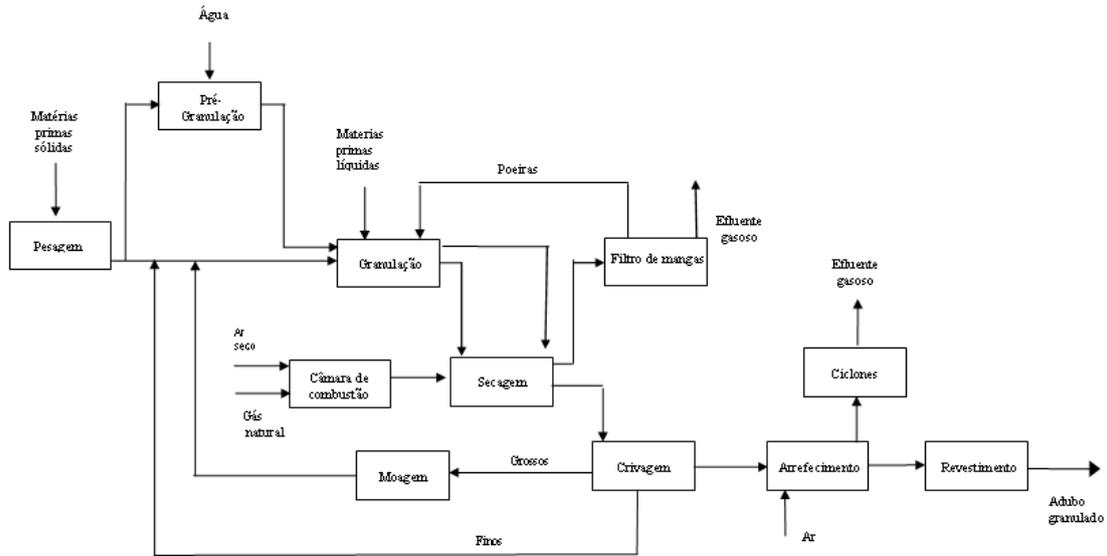


Figura 36 - Diagrama de blocos - Granulação II

(Fonte: ADP)

O balanço de massas da Granulação II está indicado na Figura 37.

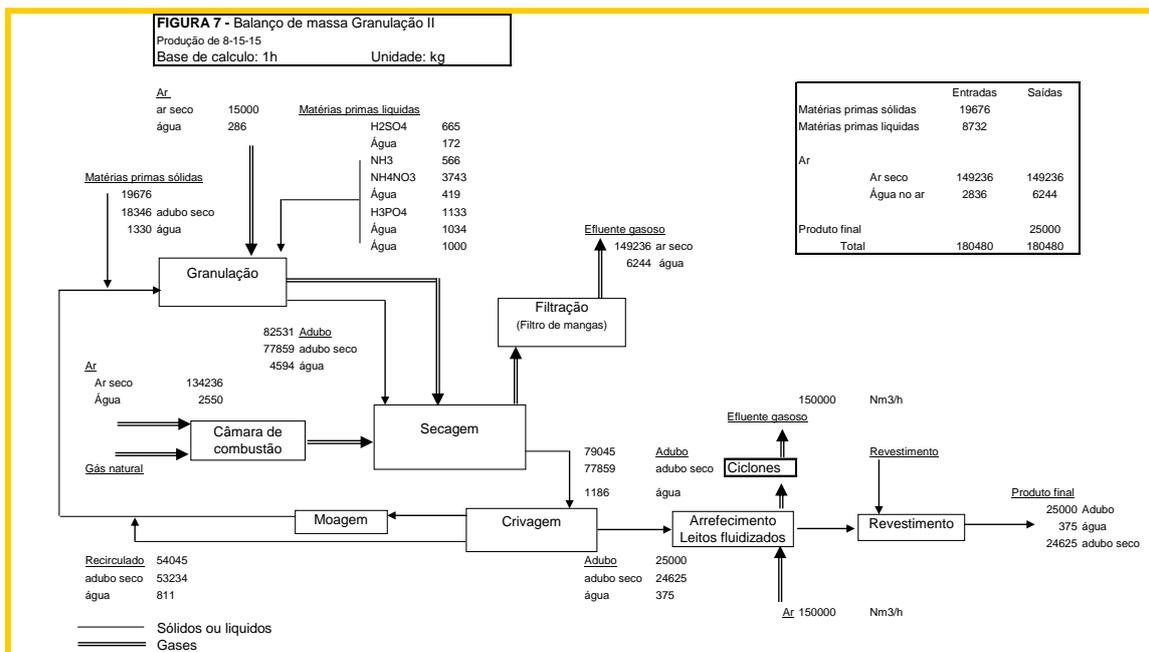


Figura 37 - Balanço de massa Granulação II

(Fonte: ADP)

### 3.4.3 2ª Linha de Granulação - Granulação IV

Esta unidade também é do tipo TVA. O processo de granulação é semelhante ao descrito para a Granulação II e está indicado na Figura 38. Esta instalação não tem um pré-granulador. O arrefecedor é um tambor rotativo com entrada de ar em contracorrente.

Existe a possibilidade de para além do filtro de mangas existente no circuito dos gases do granulador e do secador, se poder acionar, em caso de necessidade, um lavador via húmida.

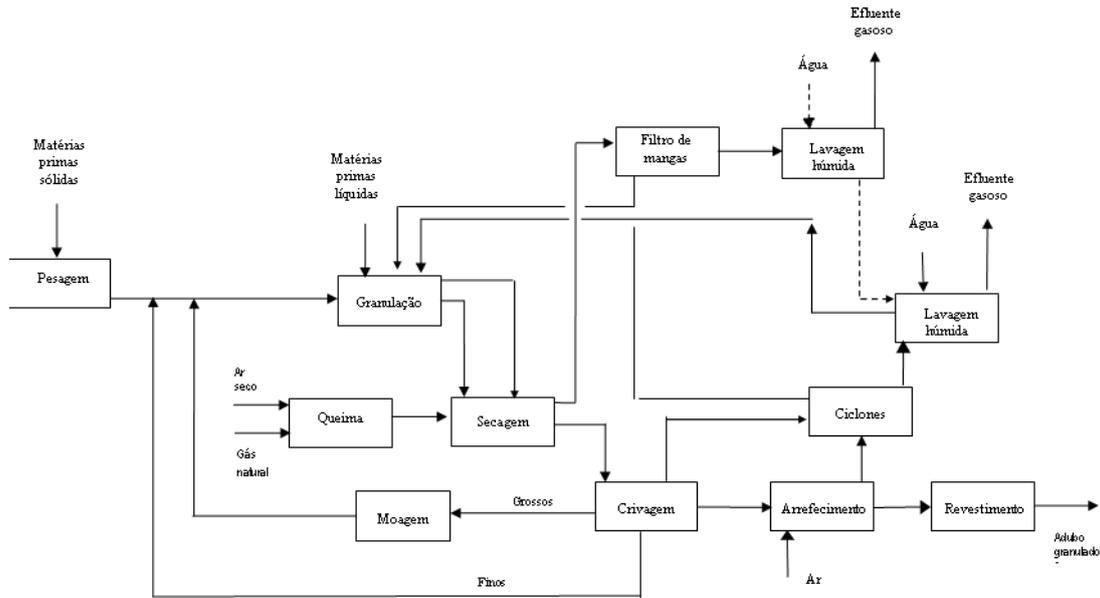


Figura 38 - Diagrama de blocos - Granulação IV

(Fonte: ADP)

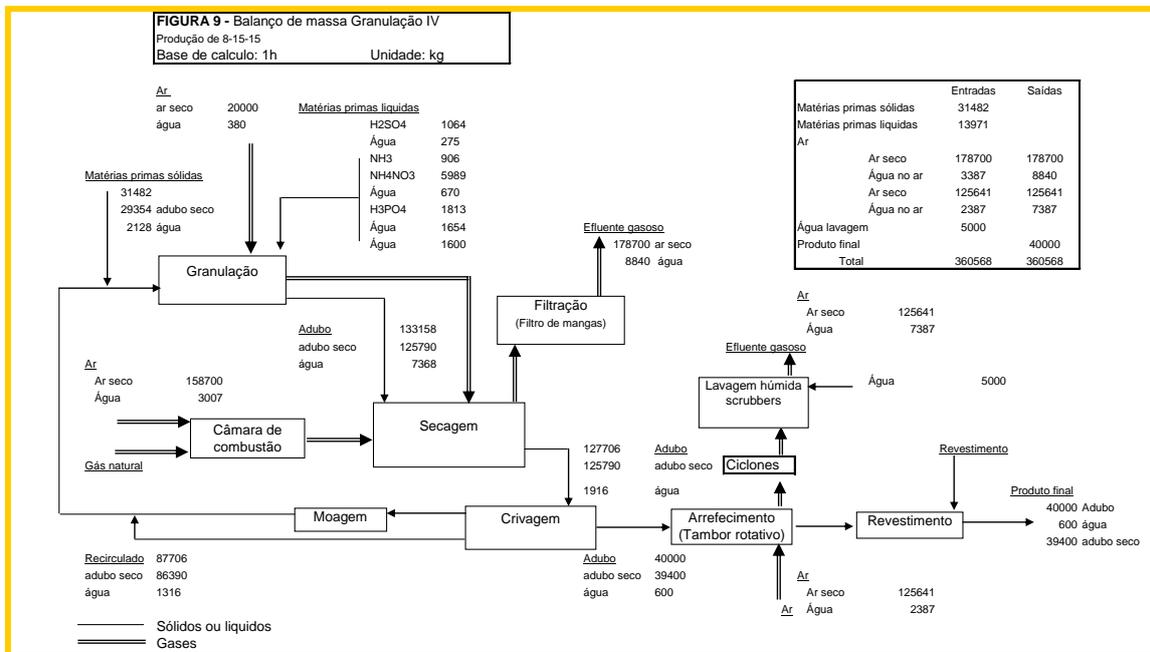


Figura 39 - Balanço de massa Granulação IV

(Fonte: ADP)

### 3.4.4 Unidade de ensacamento de adubos compostos

A unidade de ensacamento de adubos indicada na Figura 40 é constituída por várias secções:

Ensacamento de adubos compostos (sacos de 50 kg) - constituído por 2 instalações: Moller's 1 e Moller's 2;

#### Moller's 1

Constituída por uma linha de ensaque com capacidade de 40 ton/h, é composta por uma unidade de enchimento, costura, paletização, encarapuçamento e retratilização. O produto a ensacar é crivado antes de entrar no silo que alimenta as balanças, onde é pesado e descarregado para os sacos, sendo estes cozidos e "estivados" no paletizador a 35 sacos/paleta. Posteriormente a paleta é envolvida por uma manga retráctil, no encarapuçador, com as dimensões corretas da embalagem, vai a um retratilizador a gás, onde será efetuada a sua retratilização, seguindo para o armazém, cliente ou entreposto da ADP.

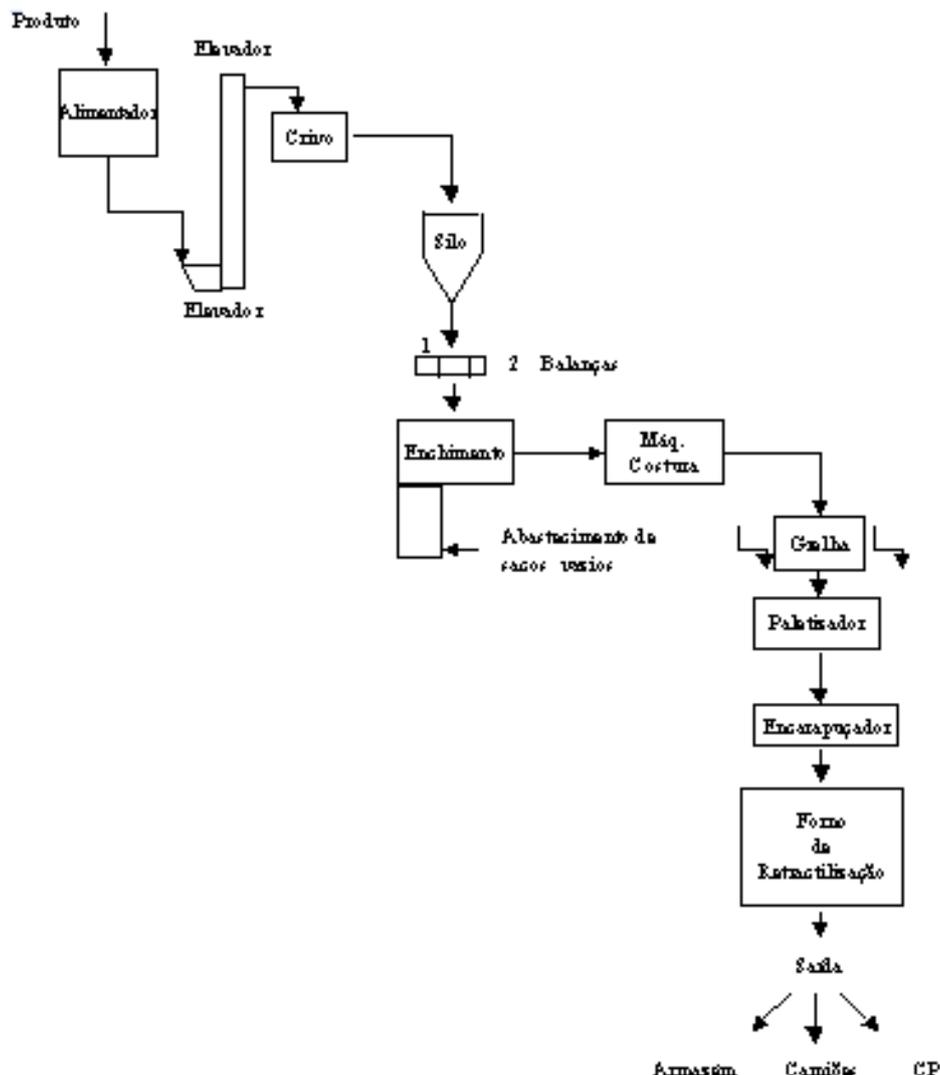


Figura 40 - Diagrama de ensacamento - Moller's 1

(Fonte: ADP)

## **Moller´s 2**

Constituída por 2 linhas de ensaque com capacidade nominal de 40 ton/h mas com uma capacidade instalada de 60 ton/h está indicada na Figura 41. Estas 2 linhas, após as máquinas de costura, vão debitar a sua produção para uma única linha de paletização, encarapuçamento e retratilização.

- Big-Bag´s - constituído por 2 instalações que não são autónomas, isto é, estão inseridas noutros sectores e dependem do seu funcionamento;
- Expedição em contentores (20-22 ton/contentor) - O produto expedido em contentores fechados ou “open-side” poderá sair paletizado e retratilizado a 40-44 sacos/palete, ou sair saco a saco;

### Expedição de produto paletizado e retratilizado

A preparação destas paletes é efetuada manualmente e a retratilização é efetuada num forno a gás (Hot-Pal) ou retratilizado manualmente com pistola de retratilização. A carga do contentor é efetuada com empilhador.

- Expedição de granéis - é efetuada em dois locais distintos:

### Expedição de granéis/ Tulhas A

A pesagem é efetuada em balança própria com registo e indicação digital. Ao produto é adicionado um “anti-dust” e depois é descarregado em camião ou em vagão.

### Expedição de granéis/ Tulhas B

A pesagem é efetuada em balança própria com registo e indicação digital. Ao produto é adicionado um “anti-dust” e descarregado em camião.

- Expedição de adubos ensacados (camião/CP). A expedição é efetuada por empilhadores que carregam os camiões e os vagões CP conforme o programa de abastecimento dos entrepostos da empresa ou das encomendas dos clientes.

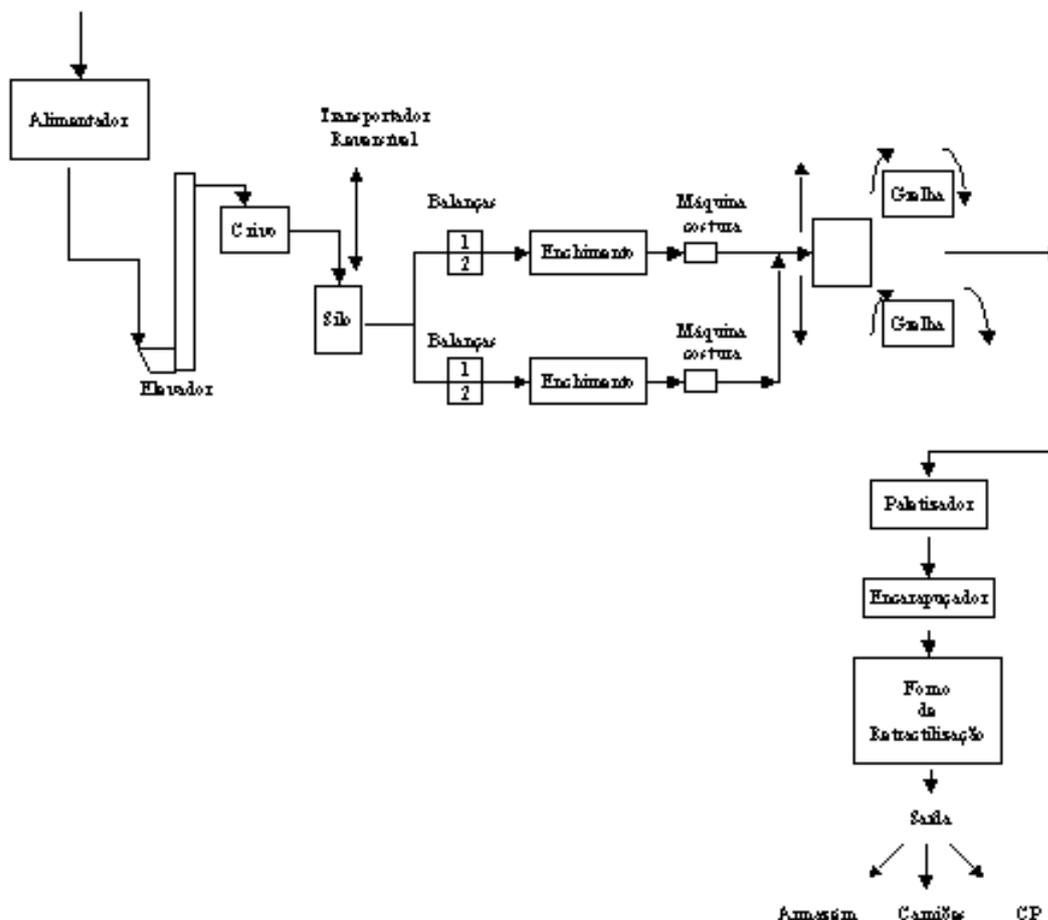


Figura 41 - Diagrama de ensacamento - Moller's 2

(Fonte: ADP)

### 3.4.4.1 Unidades Auxiliares

A ADP dispõe de duas caldeiras de vapor, uma em funcionamento normal e uma de reserva. Estas caldeiras são instalações de combustão com uma potência inferior a 50 MW.

A ADP possui uma rede de distribuição de vapor que serve para aquecer as armazenagens de solução de nitrato de amónio a 90%, do anti aglomerante que reveste os adubos (de nome comercial *Galoryl*) e da vinhaça.

A diluição de ácido sulfúrico para a produção de SSP 18% é efetuada pela adição de água ao ácido até obtenção da concentração desejada. Esta diluição é um processo exotérmico e a energia libertada aquece o ácido obtido. Para arrefecer a solução a bateria de diluição é um permutador com tubos de água de arrefecimento. No passado, esta água de arrefecimento que saía a 80°C da bateria era encaminhada para o rio Sado (80m<sup>3</sup>/h em funcionamento). Foi instalada uma torre de refrigeração que permitiu o reaproveitamento desta água em circuito fechado.

A água entra em chuveiro na torre e é atravessada por uma corrente ascendente de ar (retirado da atmosfera) que vai arrefecer a água para que possa voltar fria à bateria de diluição. Durante o processo ocorre a evaporação de uma parte da água que tem de ser reposta.

### 3.4.4.2 Capacidades de Armazenagem

#### Matérias-primas sólidas

Existe um armazém de fosforite no interior da instalação fabril com a capacidade de 40000 toneladas. As restantes matérias-primas sólidas são descarregadas em 5 células de armazenagem num armazém do cais. Cada célula tem a capacidade de 5000 toneladas, perfazendo um total de 25000 toneladas.

A unidade de produção de adubos compostos tem armazenagens no seu interior para consumo direto com um total de onze tulas perfazendo uma capacidade de 4750 toneladas.

#### Matérias-primas líquidas

As matérias-primas líquidas utilizadas na instalação industrial e respetivas quantidades estão indicadas no Quadro 8.

**Quadro 8 - Matérias-primas líquidas existentes na instalação industrial**

<b>Matéria-prima</b>	<b>Capacidades de armazenagem</b>
Amoníaco	1 depósito de 72 toneladas
Solução de nitrato de amónio 90%	3 depósitos de 100 toneladas cada
Ácido sulfúrico concentrado 98%	1 depósito de 5000 toneladas
Ácido sulfúrico diluído	1 depósito de 60 m <sup>3</sup> 1 depósito de 18 m <sup>3</sup> 1 depósito de 18 m <sup>3</sup>
Ácido Fosfórico	1 depósito de 550 m <sup>3</sup> 1 depósito de 18 m <sup>3</sup> 1 depósito de 21 m <sup>3</sup>
Galoryl	1 depósito de 30 toneladas 1 depósito de 35 toneladas
Vinhaça	1 depósito de 96 m <sup>3</sup>

(Fonte: ADP)

Existe ainda um depósito de gás propano com capacidade de 11 toneladas.

## Produto final

A capacidade de armazenagem de superfosfatos em pó é de 35000 toneladas. Neste armazém existem 5 tolhas para armazenar adubos compostos granulados para expedição a granel com a capacidade total de 11500 toneladas.

A capacidade de armazenagem de adubos compostos em 2 armazéns de adubos compostos a granel é de 10720 toneladas das tolhas 1 a 28 para o armazém A e de 16800 toneladas das tolhas 1 a 14.

Existem dois telheiros e um armazém para armazenagem de adubo ensacado.

### 3.4.4.3 Circuito de Aproveitamento Interno de Águas Industriais

As águas provenientes de lavagens de gases dos superfosfatos são totalmente reaproveitadas no próprio processo (Figura 42), podendo ser enviadas para as granulações de adubos em caso de necessidade. Os efluentes gerados no tratamento de águas das caldeiras (desmineralização), e os condensados de vapor são totalmente enviados para as granulações.

A instalação de diluição de ácido nos superfosfatos tem uma torre de refrigeração para reaproveitar toda a água de arrefecimento. A purga pontual efetuada a esta torre é enviada para as granulações. Os equipamentos de laboratório que necessitam de refrigeração com água geram um efluente que também é enviado para as granulações.

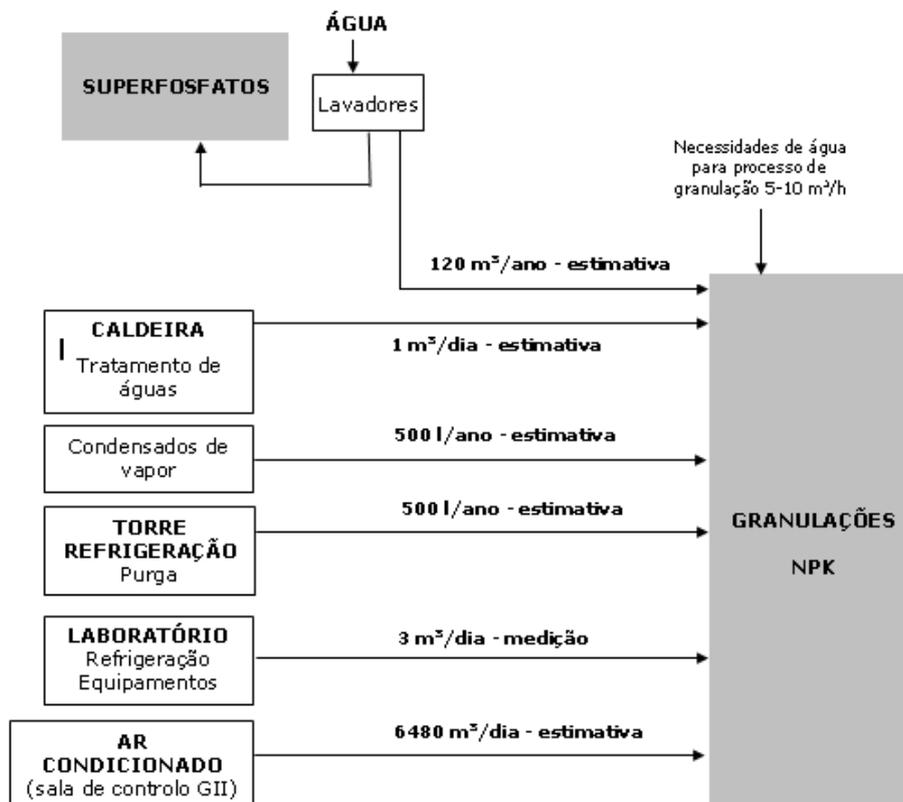


Figura 42 - Aproveitamento interno de águas industriais

(Fonte: ADP)

#### 3.4.4.4 Sistema de Tratamento de Efluentes Gasosos

Estando a ADP inserida no estuário do Sado numa zona muito sensível do ponto de vista ambiental e muito rica do ponto de vista paisagístico e turístico, é importante um controlo de todos os efluentes líquidos, gasosos e poeiras que se possam libertar no processo de fabrico. A ADP possui as seguintes medidas de antipoluição, que permitem remover partículas e gases de processo das correntes gasosas:

Superfosfatos:

- Torres de lavagem húmida para remoção de partículas e flúor.

Granulações - 1ª linha de produção - Granulação II:

- Filtro de mangas no secador;
- Bateria de 4 ciclones a jusante dos arrefecedores de leito fluidizado;
- Recirculação das poeiras retidas nos ciclones e no filtro de mangas.

Granulações - 2ª linha de produção - Granulação IV:

- Filtro de mangas no secador;
- Bateria de 4 ciclones no arrefecedor;
- Lavador via húmida tipo venturi para gases do granulador e secador;
- Lavador via húmida tipo venturi para gases do arrefecedor;
- Recirculação das águas de lavagem ao processo;
- Reutilização das poeiras retidas nos ciclones.

#### Riscos ambientais

Existe uma outra fonte importante de contaminação química e radiológica das águas subterrâneas e do meio aquático do estuário do Sado, resultante do fosfogesso acumulado junto às instalações industriais, muito próximo da margem marítima (aproximadamente 900 metros) como se pode observar na Figura 43.



**Figura 43 - Localização do depósito de fosfogesso**

(Imagem satélite do Google Earth)

Importa realçar que esta é uma zona ambientalmente muito sensível, classificada como reserva natural e é também uma zona de grande beleza natural como se pode observar na fotografia mostrada na Figura 44.



**Figura 44 - Estuário do Sado (Setúbal, Portugal) onde se situa a fábrica**

(Foto do autor)

### 3.5 Métodos de medição da radioatividade

#### 3.5.1 Medição da radiação

A radioatividade pode ser medida através de detetores de radiação que funcionam como transdutores da interação da radiação alfa, beta e gama com a matéria. Geram impulsos elétricos que posteriormente são processados por equipamentos eletrônicos; pretende-se geralmente contar esses impulsos para as diversas gamas de energia presentes.

Os detetores de radioatividade mais comuns no mercado podem ser agrupados em três tipos:

- a) Detetores de ampolas de gás (tipo Geiger-Mueller)
- b) Detetores de cintilação
- c) Detetores de semicondutores

#### Contador Geiger-Mueller

O contador Geiger-Mueller vulgarmente conhecido por Contador Geiger é o detetor de radiação mais conhecido. Consiste num tubo cheio com gás com um fio ligado a uma alta tensão (500 a 1000 Volt) que recolhe a corrente elétrica produzida pela ionização do gás resultante da incidência de uma radiação ionizante. Pode detetar radiação alfa, beta e gama, não sendo capaz de as distinguir entre si, nem medir a energia presente. Devido a estas limitações é usado apenas para estimar a radioatividade presente, geralmente dose, taxa de dose e contagem de ionizações. É um dispositivo com uma elevada sensibilidade e como tal adequado para a medição dos baixos níveis de radiação gama que se estima estarem presentes nos locais de trabalho a analisar (da ordem do  $\mu\text{Sv/h}$ ).

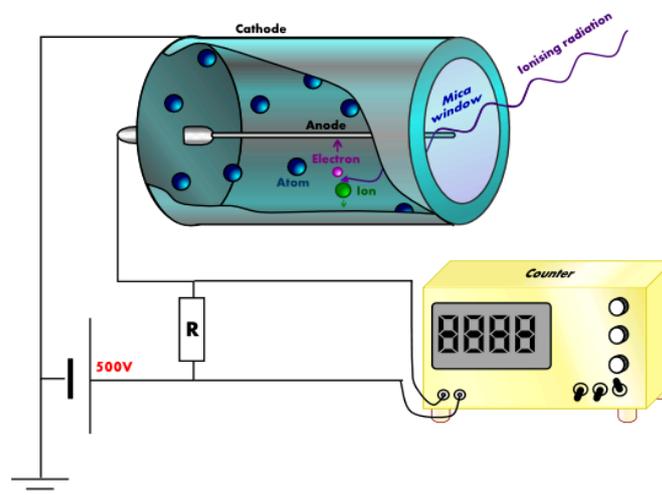


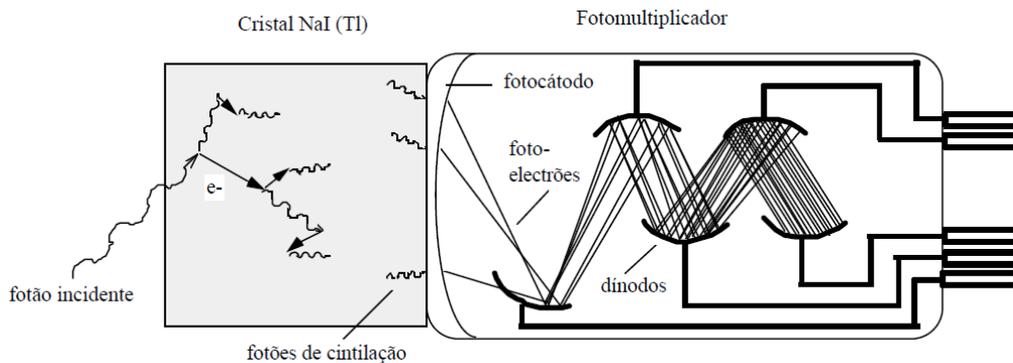
Figura 45 - Esquema de um contador Geiger-Mueller

(Fonte: Theresa Knott in Wikipédia)

## Detetores de Cintilação

Os detetores de cintilação são dispositivos que emitem uma luz quando expostos a uma radiação ionizante incidente. A luz é convertida em impulsos elétricos que são processados por circuitos eletrónicos.

O iodeto de sódio (NaI) é um dos materiais usados como detetor que emite luz (fotões de cintilação) quando absorve a radiação ionizante. A luz resultante é amplificada por um fotomultiplicador como indicado na Figura 46.



**Figura 46 - Esquema de um detetores de cintilação**

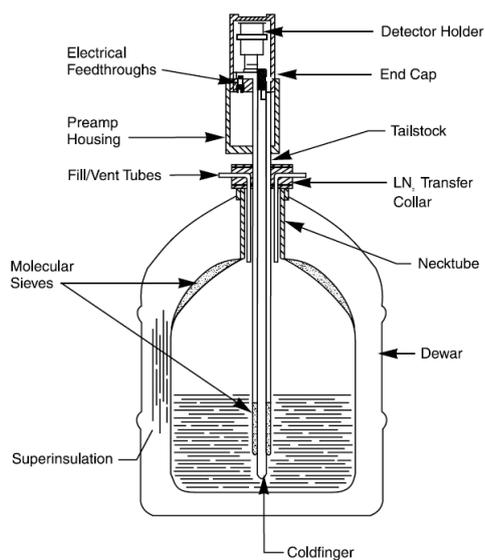
(Fonte: Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa)

## Detetores de semicondutores

Para medições precisas da energia e intensidade de raios X e Gama são usados detetores de estado sólido constituídos por silício ou germânio arrefecidos a temperaturas ligeiramente acima do nitrogénio líquido (77° K). Os detetores de silício são usados para medição de raios X até 20 keV de energia e os de germânio são usados na gama de 10 keV até alguns Mev.

Um sistema de espectrometria gama é geralmente composto por detetores de germânio arrefecidos por nitrogénio líquido para temperaturas de cerca de -200°C, para reduzir o ruído eletrónico gerado pelo semicondutor para níveis aceitáveis. Um detetores típico de germânio associado a um reservatório de nitrogénio líquido está indicado na Figura 47.

A título ilustrativo, mostra-se na Figura 48 o medidor de radiação Gama existente no ITN (Instituto Tecnológico e Nuclear) em Portugal onde foram efetuadas as medições da radiação gama das fosforites (matéria-prima principal para o fabrico dos fosfatos) e das cinzas dos filtros.



**Figura 47 - Detetor típico de germânio e reservatório de nitrogénio líquido**

(Fonte (Gilnore & Hemingway, 1995))



**Figura 48 - Medição da radiação gama numa amostra de fosforite**

(Foto do autor)

### 3.5.2 Medição da concentração de radão

Para determinar a concentração de radão no ar podem utilizar-se vários métodos, a escolha depende do tipo de equipamento de medida disponível, leitura direta ou leitura posterior e do tempo de amostragem das medidas a efetuar. Geralmente a medição da concentração de radão presente num determinado ambiente baseia-se na contagem das partículas emitidas pelo radão e pelos seus descendentes de vida curta. Alguns métodos baseiam-se em técnicas de deteção de raios gama e beta.

É importante na prática distinguir se o método utilizado mede a concentração do gás radão ou se mede outra característica associada aos elementos descendentes do radão. Em qualquer dos casos as técnicas a adotar podem classificar-se como ativas ou passivas segundo se empregue ou não ar forçado para a captação da amostra de ar.

Em função do tempo de amostragem podem ser classificados em três tipos:

#### a) Métodos instantâneos

As medições realizam-se a partir de amostras de ar recolhidas durante períodos de tempo curtos, geralmente entre 1 segundo e 20 minutos. Permitem utilizar equipamentos simples e de baixo custo e obtêm-se resultados rápidos. No entanto, sendo medições pontuais torna-se necessário escolher cuidadosamente as condições da medição para que os resultados obtidos sejam estatisticamente representativos da situação que se quer caracterizar. Geralmente estes métodos utilizam-se para realizar reconhecimentos iniciais, estudos para identificar caminhos de entrada do radão a partir do solo ou para avaliar a eficácia de ações corretivas implementadas.

#### b) Método de leitura continua

Neste caso faz-se passar um fluxo constante de ar através de um detetor adequado durante um período de tempo maior, avaliando-se assim a concentração em contínuo do gás. Permite estudar as flutuações em tempo real das concentrações podendo associá-las às atividades que foram realizadas ao longo do período de medição.

#### c) Métodos integradores

São usados geralmente detetores do tipo passivo que permitem obter informação sobre as concentrações médias durante períodos que podem chegar a dias, semanas ou meses, sendo 3 meses um valor típico de período de integração. É o método mais económico e o mais utilizado já que é adequado para estudos de inspeção e de reconhecimento e que permite geralmente decidir sobre a necessidade de tomar ações corretivas após três meses depois do início da medição.

Quanto ao princípio de funcionamento os equipamentos e dispositivos mais utilizados para a medição do radão e dos seus descendentes radioativos podem-se classificar em 3 tipos:

#### a) Células de cintilação

Consistem em cilindros metálicos, com um extremo transparente, que estão recobertos no seu interior por uma capa uniforme de sulfureto de zinco ativado com prata que é sensível às partículas alfa. As amostras de ar são introduzidas no seu interior, previamente em vazio, e depois de alcançar o equilíbrio mede o número de cintilações de luz com um tubo

fotomultiplicador para determinar a concentração de radão no ar. Um exemplo de detetor de radão pode ser visto na Figura 49.

Este método de medição foi usado neste trabalho na ADP para uma avaliação inicial da concentração de radão nos locais de trabalho tendo como vantagem o facto de dar uma leitura direta e imediata da concentração. Sendo um método instantâneo tem como desvantagem o facto de não permitir caracterizar os níveis de radiação durante um período de tempo mais alargado.



**Figura 49 - Medidor de concentração de radão de leitura direta**

(Foto do autor)

#### b) Detetores sólidos de traços

São sistemas passivos que se baseiam no uso de materiais tais como lâminas finas de nitrato de celulose ou policarbonato que têm a propriedade de serem impressionadas com traços nucleares em consequência das radiações emitidas pelo radão e pelos seus descendentes depois de um determinado tempo de exposição, geralmente 3 meses. Estes orifícios ou traços visíveis podem identificar-se e contar-se mediante sistemas de microscopia, sendo o seu número proporcional à concentração de radão existente durante o tempo de exposição, fornecendo o valor médio da concentração do radão durante esse período (Figura 50). Este foi o método usado para realizar de forma mais precisa as medições da concentração de radão nos locais de trabalho na ADP.



**Figura 50 - Princípio de funcionamento do dosímetro de radiação alfa**

(Esquema do autor adaptado de ITN)

c) Detetores de carvão ativado

São também sistemas passivos, muito simples, baseados na capacidade que o carbono ativo tem de reter o radão, sendo que o tempo de amostragem para estes detetores varia entre dois e sete dias. Determina-se o nível de radão medindo a radiação gama emitida pelo carbono ativo com um detetor como por exemplo o de iodeto de sódio.



**Figura 51 - Detetor de carvão ativo**

(Fonte: Radtrak)

No Quadro 9 apresentam-se de forma esquemática os diversos tipos de detetores de radão e o seu uso mais habitual.

**Quadro 9 - Aplicabilidade dos detetores de radão mais usuais**

Tipo de Detetor	Método Instantâneo	Método Contínuo	Método Integrado	Método Ativo	Método Passivo
Célula de cintilação	Sim	Sim	-	Sim	Sim
Detetor de traços	-	-	Sim	-	Sim
Detetor de carvão ativo	-	-	Sim	-	Sim

### **3.6 Trabalhos de campo e medições**

No trabalho de campo realizado na ADP foram usados os equipamentos de medição, devidamente calibrados, cujas características técnicas estão indicadas no Anexo B.

#### **3.6.1 Identificação e caracterização das fontes de radiação**

##### **Radiação externa gama**

Foram identificadas e caracterizadas as fontes de radiação presentes nos locais de trabalho, trata-se de matérias-primas, produtos acabados ou resíduos que contêm quantidades de radionuclídeos com concentração e atividade superiores ao normal, designadamente, radionuclídeos das séries  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , ou  $^{235}\text{U}$ . Podem estar presentes no ar sob a forma de poeiras ou podem estar contidos em recipientes, tubos, tanques e filtros. Podem também estar presentes no exterior das instalações industriais sob a forma de grandes depósitos de resíduos sólidos como é o caso do fosfogesso.

##### **Radiação alfa proveniente de poeiras radioativas**

Um perigo significativo para a saúde dos trabalhadores resulta da sua exposição à radiação alfa emitida por poeiras radioativas altamente energéticas, que podem ser inaladas, ingeridas ou absorvidas pela pele, capazes de destruir os tecidos internos não protegidos pela pele humana.

Além disso, e como já referido anteriormente, se os locais de trabalho tiverem concentrações elevadas de poeiras, o radão presente no ar vai gerando outros elementos radioativos no seu processo natural de decaimento radioativo, designadamente polónio, bismuto e chumbo. Estes elementos radioativos associam-se às poeiras respiráveis existentes no ar e são inalados, podendo depositar-se ao longo do sistema respiratório. A radiação alfa associada a esses elementos radioativos pode provocar danos irreparáveis nos tecidos dos pulmões, incluindo o desenvolvimento de neoplasmas.

Foram identificadas, caracterizadas e medidas as zonas com elevadas concentrações de poeiras no ar, provenientes da fosforite, com recurso a bombas de aspiração de ar, utilizando o método gravimétrico para pesar as poeiras depositadas nos filtros de recolha.

Deste modo, obteve-se uma estimativa da quantidade de radionuclídeos derivados da fosforite presentes no ar. As poeiras existentes no ar podem constituir um perigo para a saúde dos trabalhadores devido a possibilidade de inalação, ingestão e absorção pela pele de elementos radioativos presentes nessas poeiras.

##### **Radiação alfa proveniente do radão**

Foram identificados os espaços fechados ou pouco ventilados onde o radão se poderá acumular e atingir concentrações elevadas que poderão ser prejudiciais para a saúde dos trabalhadores. Foram estimadas as suas concentrações em ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) através de medições rápidas com recurso a um aparelho de leitura direta e contínua, obtendo-se uma indicação da atividade radioativa presente nessa atmosfera.

### 3.6.2 Medição da dose de radiação externa gama

#### Medição da taxa de dose de radiação externa gama

Com a medição da radiação externa gama procura-se estimar a radiação absorvida pelo trabalhador durante o seu dia de trabalho. Este valor depende da quantidade de material radioativo presente no local, da distância ao trabalhador, do tempo de exposição e de eventuais blindagens naturais ou artificiais que possam existir entre a fonte radioativa e o trabalhador.

A medição da taxa de dose de radiação externa gama foi efetuada com um medidor de radiação ionizante marca ALNOR, modelo RDS 120. Possui sondas para medição da radiação alfa, beta e gama. É de leitura direta no ecrã, medindo a taxa de dose de radiação em  $\mu\text{Sv/h}$  e pode também medir a dose total recebida durante o tempo de exposição em Sv. Uma foto do equipamento pode ser vista na Figura 52.

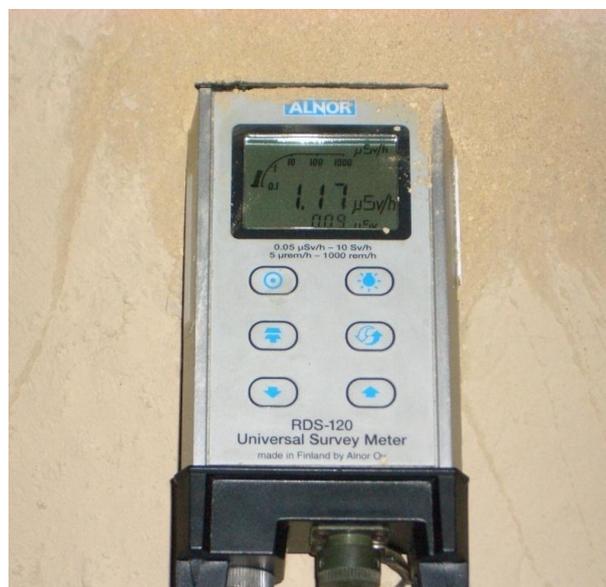


Figura 52 - Medidor de radiação ionizante marca ALNOR

(Foto do autor)

#### Medição da dose individual de radiação externa gama

Para medir a dose individual de radiação externa gama recebida por um trabalhador foi usado um dosímetro de radiação ionizante marca AUTOMESS, sensível à radiação X e gama, com leitura direta no ecrã. Possui vários níveis de alarme para doses excessivas e um alarme para taxas de dose elevadas. Este detetor possui uma mola para prender no cinto de forma a poder ser transportado pelo trabalhador o de trabalho. Uma foto do equipamento pode ser vista na Figura 53.



**Figura 53 - Dosímetro pessoal de radiação gama marca AUTOMESS**

(Foto do autor)

Foi efetuada uma primeira avaliação rápida em toda a instalação industrial com um monitor de radiação para localizar as zonas e os equipamentos com maior atividade radiológica, quer em operação normal, quer em atividades de manutenção e limpeza das instalações. Um detalhe das medições realizadas pelo autor na zona dos superfosfatos pode ser visto na Figura 54.



**Figura 54 - Autor efetuando medições da radiação externa no armazém dos superfosfatos**

(Foto do autor)

Também se analisaram do ponto de vista radiológico, as amostras da matéria-prima ao longo do seu processamento industrial, nos depósitos de resíduos e nos equipamentos instalados em espaços confinados e/ou zonas mal ventiladas.

## A - Tarefas de rotina

No decurso das tarefas de rotina, em produção normal da fábrica, foram realizadas medições de radiação externa. A medição da taxa de dose junto aos postos de trabalho consistiu na determinação da taxa de dose de radiação gama recebida pelo trabalhador, medida com um monitor de radiação em  $\mu\text{Sv/h}$  a uma distância de 1 m da fosforite. Os pontos de medição estão indicados no Anexo D e os valores obtidos estão indicados e interpretados no Capítulo 4 - Resultados, Seção 4.3 - Radiação externa gama nos locais de trabalho, página 139).

Um pormenor das medições realizadas nos depósitos de superfosfatos pode ser visto na Figura 55. Neste caso específico, a medição da taxa de dose está a ser efetuada pelo autor à distância de 1 m da superfície radioativa (pilha de fosforite).



**Figura 55 - Autor realizando medições da radiação gama proveniente dos superfosfatos**

(Foto do autor)

## B - Tarefas de manutenção

No decurso de tarefas específicas de manutenção, foi realizada a medição da taxa de dose na zona de trabalho. Consistiu na determinação da dose de radiação externa recebida através da colocação de um dosímetro pessoal de radiação no trabalhador durante o tempo de execução da tarefa. Um pormenor da colocação do dosímetro pessoal para a medição da dose de radiação externa gama recebida pelo autor pode ser visto na Figura 56.



**Figura 56 - Autor realizando medições da radiação gama com dosímetro pessoal**

(Foto do autor)

Para a medição da radiação gama em zonas com pouca ventilação com o exterior, onde se verificou a existência de gás radão e forte empoeiramento com pó de fosforite, as medições foram efetuadas usando uma máscara de proteção respiratória, como se pode observar na Figura 57.



**Figura 57 - Autor realizando a medição da radiação gama em equipamentos**

(Foto do autor)

### 3.6.3 Medição da concentração de poeiras no ar

A medição de poeiras respiráveis e inaláveis foi realizada com recurso a 6 bombas, marca SIDEKICK, de aspiração elétrica com caudal de ar calibrado, ciclone de separação de partícula por tamanho e filtro de papel para recolha das poeiras. A pesagem dos filtros foi efetuada em laboratório com balança de precisão.

A concentração de poeiras no ar pode ser medida por análise gravimétrica (determinação da massa das partículas por pesagem) de filtros de poeiras antes e após a exposição. O ar é aspirado por um tubo com recurso a uma bomba de aspiração, sendo as poeiras totais e as poeiras respiráveis separadas num ciclone intercalado no tubo de aspiração, como se indica na Figura 58.



Figura 58 - Conjunto de amostragem bomba de aspiração e ciclone

(Fonte: Sidekick)

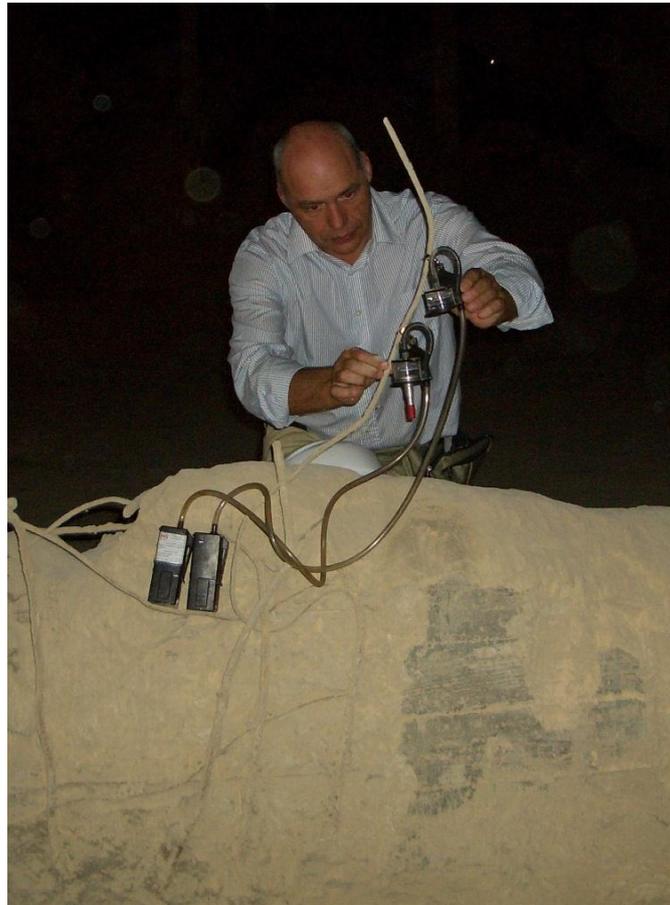
O processo inicia-se em laboratório com a pesagem do filtro numa balança com seis casas decimais para calcular a massa inicial do filtro. Após a exposição às poeiras o filtro volta a ser pesado para determinar a massa das partículas que ficaram retidas nele e assim obter a concentração de poeiras no ar em  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Deverá ser efetuada uma amostragem para partículas totais (sem o ciclone de separação de partículas de acordo com o seu peso) e para partículas respiráveis com o ciclone.

Para medir a concentração de poeiras no ar foi usado o seguinte material:

- Balança com precisão de seis casas decimais;
- 6 Bombas de amostragem para aspiração do ar através do filtro;
- Calibrador primário do caudal da bomba;
- Filtros de PVC com 2 a 5  $\mu\text{m}$  de porosidade;
- Cassetes de duas secções;
- Conjunto de amostragem porta-filtros.

A recolha das amostras de ar realizou-se nos locais onde se observou a existência de concentrações elevadas de poeiras. Esta recolha foi também efetuada após as operações que geralmente produzem forte empoeiramento como sejam descarga, movimentação de grandes quantidades de fosforite, limpeza de filtros, tanques, transportadores e outras operações de manutenção das instalações.

Um pormenor da colocação das bombas de aspiração, dos ciclones e dos filtros de retenção de poeiras nas instalações da ADP pode ser visto na Figura 59.



**Figura 59 - Autor colocando bombas de aspiração, ciclones e filtros de retenção das poeiras**

(Foto do autor)

Para medir a exposição individual dos trabalhadores às poeiras foram também colocadas bombas de aspiração no corpo de trabalhadores que realizam tarefas em zonas com elevado empoeiramento.

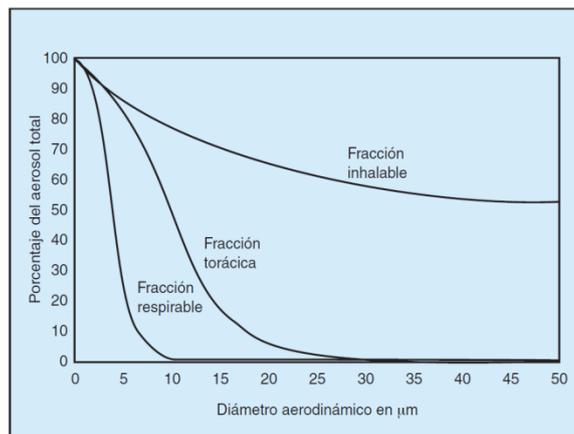
Um pormenor da colocação de uma bomba individual de aspiração de poeiras usada pelo autor pode ser visto na Figura 59.



**Figura 60 - Autor efetuando a medição de poeiras com bomba de aspiração**

(Foto do autor)

A medição das poeiras foi realizada de acordo com as técnicas de amostragem referidas na NIOSH 500 (partículas totais) e NIOSH 600 (partículas respiráveis) que estão incluídas no Anexo C. No que se refere à dimensão da partícula foram tidas em consideração as frações de interesse em relação à sua capacidade de penetrar no sistema respiratório humano como se indica na Figura 61.



**Figura 61 - Frações inalável, torácica e respirável como percentagem do aerossol total**

(Fonte: INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo), 2008)

onde:

- Fração inalável: a fração mássica do aerossol total que se inala através do nariz e da boca.
- Fração extratorácica: a fração mássica das partículas inaladas que não penetra para além da laringe.

- Fração torácica: a fração mássica das partículas inaladas que penetra para além da laringe.
- Fração traqueobronquial: a fração mássica das partículas inaladas que penetram para além da laringe, mas que não podem penetrar nas vias respiratórias não ciliadas.
- Fração respirável: a fração mássica das partículas inaladas que penetram nas vias respiratórias não ciliadas.

Os valores obtidos por análise laboratório referente às concentrações de poeiras no ar encontradas estão indicados no Capítulo 4 - Resultados, Seção 4.2 - Poeiras radioativas presentes no ar, página 133).

### 3.6.4 Medição da atividade do radão

A unidade de medida da atividade radioativa de uma substância é o Becquerel (Bq). A unidade de medida da concentração do radão no ar é o Becquerel por m<sup>3</sup> (Bq/m<sup>3</sup>). Pode também ser utilizado para expressar a atividade do radão no ar o pico Curie por litro (pCi/l), sendo 1 pCi/l igual a 37 Bq/m<sup>3</sup>.

Uma outra unidade usada frequentemente para medir da concentração do radão é o Working Level (WL). Define-se um WL como a combinação de produtos da desintegração do radão de vida curta que emitem 1,3 x 10<sup>5</sup> MeV de energia alfa por litro de ar.

Um WL corresponde aproximadamente à concentração de energia alfa potencial dos descendentes do radão de vida curta que se encontram em equilíbrio radioativo com 3.700 Bq (100 pCi/l) de radão. O equilíbrio radioativo surge quando cada produto de desintegração de vida curta apresenta a mesma atividade que o radão.

Em lugares fechados, como minas e no ar exterior, perto do solo, a concentração da atividade dos descendentes do radão nunca alcançam o equilíbrio radioativo com o radão devido fundamentalmente à ventilação e ao depósito dos produtos de desintegração do radão nas superfícies. Por isso usa-se um Fator de Equilíbrio (F) que se define como:

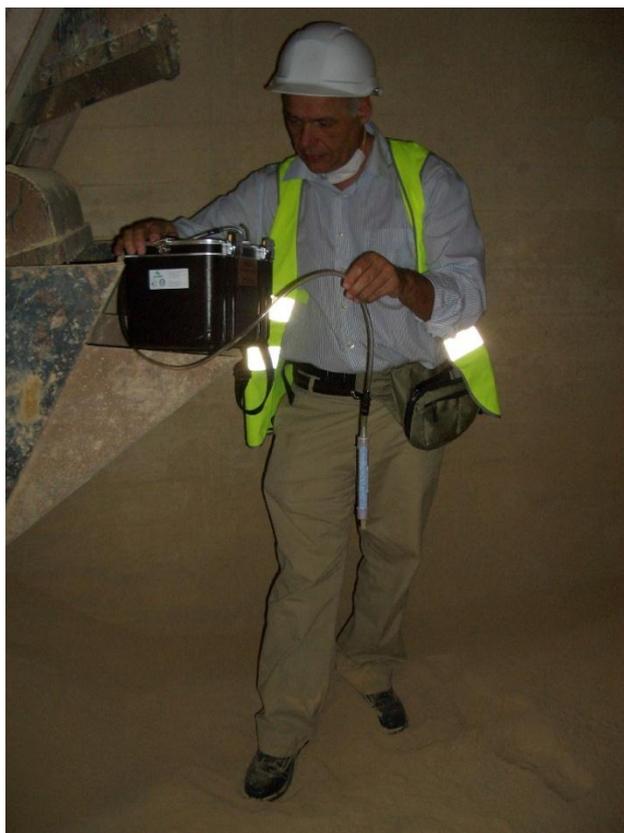
$$F = 100 \times \frac{[\text{descendentes em WL}]}{[\text{Concentração do radão pCi}]}$$

Geralmente para converter os níveis de radão em concentração dos descendentes utiliza-se um fator de equilíbrio médio de 0,5 sendo que uma concentração dos descendentes do radão de 1 WL equivale a uma concentração de radão de 200 pCi/l.

Diretamente relacionado com WL está o Working Level Month (WLM), medida utilizada geralmente em estudos epidemiológicos e que corresponde à exposição a uma concentração de 1 WL por um período de 170 horas durante um mês.

A concentração média de radão na atmosfera é de 2 Bq/m<sup>3</sup> (0,05 pCi/l) podendo em espaços mal ventilados atingir valores da ordem de milhares de Bq/ m<sup>3</sup>.

Nas medições realizadas em zonas com reduzida renovação do ar interior foram colocados detetores ativos e passivos de radão para medir a sua concentração. Um pormenor da medição do radão nas instalações da ADP pode ser visto na Figura 62.



**Figura 62 - Autor efetuando a medição do radão com equipamento de leitura direta**

(Foto do autor)

### 1. Medição da concentração de radão

Numa primeira fase para a avaliação inicial da concentração de radão foi usado um equipamento de deteção de radão marca DURRIDGE, modelo RAD7 equipado com filtro de secagem do ar. Fornece uma leitura direta no ecrã da concentração de radão em  $\text{Bq/m}^3$  após um período de amostragem (tipicamente de 5 minutos. Uma imagem do equipamento instalado para as medições pode ser vista na Figura 63.



**Figura 63 - Equipamento de deteção de radão marca DURRIDGE**

(Foto do autor)

Numa segunda fase, foram instalados 6 detetores passivos de traços nucleares fornecidos pelo ITN, para assim determinar a concentração de radão nos locais onde se previam concentrações elevadas. Na Figura 64 pode observar-se a colocação de um desses detetores pelo autor.

Os 6 detetores de radão foram mantidos em monitorização durante 29 dias nos locais indicados no Quadro 10.

**Quadro 10 - Localização dos detetores de radão**

Nº do Dosímetro	Descrição do Local	Tipo de Permanência de Trabalhadores
1	Fundo do túnel do transportador de entrada da fosforite (matéria prima)	Cerca de 20 entradas por dia em 3 turnos para operações de manutenção de rotina
2	Armazém da fosforite (matéria prima)	6 horas por dia
3	Sala de controlo do processo industrial	24 horas por dia em 3 turnos
4	Transportador de alimentação dos moinhos - 1º Piso	2 horas diárias
5	Elevador da fosforite grossa - 1º Piso	2 horas diárias
6	Transportador de alimentação do armazém da fosforite - 2º Piso	2 horas diárias

Pode observar-se na Figura 64 a colocação de um desses detetores no transportador de alimentação dos moinhos, situado no 1º Piso.



**Figura 64 - Autor instalando um dosímetro para determinação da concentração de radão**

(Foto do autor)

Os detetores de traços nucleares recolhidos após 29 dias de exposição nos locais de trabalho foram enviados para o ITN para determinação da concentração do radão. Na Figura 65 pode observar-se os 6 detetores usados na monitorização do radão.



**Figura 65 - Detetores de traços nucleares usados para a monitorização do radão**

(Foto do autor)

A determinação da concentração do radão foi efetuada no laboratório de radão do ITN através da contagem do número de micro-orifícios produzidos na película detetora (LA 115 da Kodak). A Figura 66 mostra a película depois de ser exposta à radiação alfa mas antes de sofrer o tratamento químico.



**Figura 66 - Película exposta à radiação alfa originada pelo radão**

(Foto do autor)

Os valores obtidos no laboratório do ITN referente às concentrações de radão encontradas estão indicados no Capítulo 4 - Resultados, Seção 4.4 - Avaliação da dose de radiação proveniente do radão, página 141).

### 3.6.5 Identificação e medição dos radionuclídeos por espectrometria gama

O objetivo da realização da espectrometria gama consistiu em identificar os núclídeos radioativos presentes e em medir corretamente a quantidade desses radionuclídeos nas amostras de fosforite e de poeiras retiradas dos filtros de manga.

Foram seguidos os seguintes passos:

- a) Recolha das amostras de fosforite nos diversos locais da fábrica que foram guardadas em sacos de plástico transparente.
- b) Posteriormente já em laboratório passagem das amostras para frascos de vidro selados.
- c) Espera de 30 dias até a amostra obter o equilíbrio radiológico entre o  $^{226}\text{Ra}$  e os seus descendentes (basicamente com o objetivo de não deixar escapar o gás radão do produto a medir)

A espectrometria gama foi realizada no laboratório de baixa atividade radioativa do ITN. Na Figura 67 pode observar-se a colocação de uma amostra selada de fosforite dentro da cabine de medição forrada com placas de chumbo.



**Figura 67 - Colocação pelo autor de uma amostra selada dentro da cabine de medição do ITN**

(Foto do autor)

Os valores obtidos na espectrometria gama das amostras de fosforite e de poeiras retiradas dos filtros de manga estão indicados no Capítulo 4, Seção 4.1. - Atividade radiológica dos produtos manipulados, página 128.

Um elemento essencial na espectrometria gama consiste no detetor de germânio arrefecido com nitrogénio líquido, este componente pode ser observado na Figura 68.



**Figura 68 - Detetor de germânio usado na espectrometria gama**

(Foto do autor)

### **3.7 Cálculo da dose de radiação por simulação em computador**

A proteção radiológica face à radiação externa pode conseguir-se, por medidas técnicas, através da redução da quantidade de material radioativo presente, da colocação de blindagens entre a fonte de radiação e os trabalhadores expostos ou afastando tanto quanto possível os trabalhadores das fontes radioativas. Pode também reduzir-se, através de medidas organizativas, o tempo de exposição dos trabalhadores às fontes radioativas a fim de limitar a dose total recebida.

Estas variáveis podem ser simuladas em computador através de um programa informático que incorpora um modelo adequado de propagação da radiação externa gama que leve em consideração as distâncias entre as fontes radioativas e os trabalhadores expostos, as blindagens (materiais e espessuras) e o tempo previsto de exposição dos trabalhadores a essas radiações. Pode-se deste modo antever os níveis de exposição a que os trabalhadores poderão vir a estar expostos numa hipotética situação futura, simulando diversos cenários possíveis. Por exemplo, numa fase de projeto ou remodelação de uma instalação fabril pode-se minimizar os níveis de exposição, simulando diversos *layouts* e tipos de proteções e deste modo escolher as melhores opções que garantam a máxima proteção dos trabalhadores contra as radiações ionizantes.

Deste modo, também se garante o cumprimento de um dos princípios fundamentais da prevenção que estabelece a obrigatoriedade do empregador identificar os riscos em todas as atividades da empresa, estabelecimento ou serviço na fase de conceção ou de construção de novas instalações (Lei nº 102/2009, artigo 15, alínea 2 a).

#### **3.7.1 Cálculo do nível de radiação externa gama**

A título ilustrativo, apresentam-se alguns exemplos do cálculo da radiação externa e da dose de radiação a que os trabalhadores poderão estar expostos, simulando diversas situações possíveis, variando as características das fontes radioativas, distâncias entre a fonte e o recetor, características das blindagens (materiais e espessuras) e tempo de exposição. Este exemplo procura simular aproximadamente a situação ilustrada na Figura 54, página 97, onde um trabalhador exerce a sua atividade junto de um armazenamento de fosforite de grandes dimensões.

Esta simulação foi efetuada pelo autor recorrendo a um programa de cálculo disponibilizado para *download* pela Wise Uranium Project em: <http://www.wise-uranium.org/rdcx.html> que simula um contador *Geiger* virtual e permite:

- a) Caracterizar a fonte radioativa (isótopos presentes, densidade da substância e atividade radioativa dos isótopos em Bq/m<sup>3</sup>).
- b) Selecionar e definir vários fatores de configuração e parâmetros de conversão.
- c) Definir a forma geométrica da fonte radioativa (pontual ou volumétrica: área de exposição e espessura do material).
- d) Definir o afastamento entre a fonte radioativa e os recetores (trabalhadores expostos).
- e) Variar a geometria do problema (afastamentos e distâncias) permitindo simular vários *layouts*.
- f) Caracterizar e introduzir blindagens de proteção para a radiação gama (nº de blindagens, distâncias, espessura e materiais).

- g) Definir o tempo de exposição dos trabalhadores à radiação ionizante (nº de horas anuais de exposição).

Como resultado das simulações realizadas no programa é possível estimar as seguintes grandezas:

- a) Taxa de dose de radiação externa em várias unidades de medida, sendo utilizada nas simulações apresentadas a unidade Sv/h.  
 b) Dose acumulada de radiação externa em várias unidades de medida, sendo utilizada nas simulações apresentadas a unidade Sv/ano.

Pretende-se nestas simulações calcular a taxa de dose de radiação num recetor (trabalhador exposto), em diversas situações, devida a fontes radioativas volumétricas constituídas por fosforite proveniente do Senegal. A fosforite foi caracterizada em termos de atividade radiológica de acordo com os ensaios laboratoriais que o autor realizou no laboratório radiológico do ITN (valores indicados na Tabela 2, página 128) e introduzida no programa como indicado no Quadro 11.

**Quadro 11 - Caracterização da fonte radioativa fosforite do Senegal**

Element / Nuclide	wt_% * Bq/g						
K-40	*.048						
Ra-226	*.1.686						
Th-232	*.0.035						
U-235	*.0.120						

\* preceding asterisk indicates entry in Bq/g, otherwise wt\_%

(Formulário de input de dados do programa de simulação)

Considerou-se para a simulação da exposição dos trabalhadores à radiação gama proveniente da fosforite, o campo de radiação indicado no esquema da Figura 69, onde se considera o efeito acumulativo da radiação proveniente de três superfícies radiantes (lateral direita, lateral esquerda e solo). Para efeitos de simulação, a distância considerada entre o trabalhador e a fonte radioativa foi de 1 cm para a radiação proveniente do solo e de 1 m para a radiação proveniente das duas superfícies laterais.

A espessura considerada para a camada de fosforite foi de 30 m para as duas superfícies laterais e 1m para a camada existente no solo.

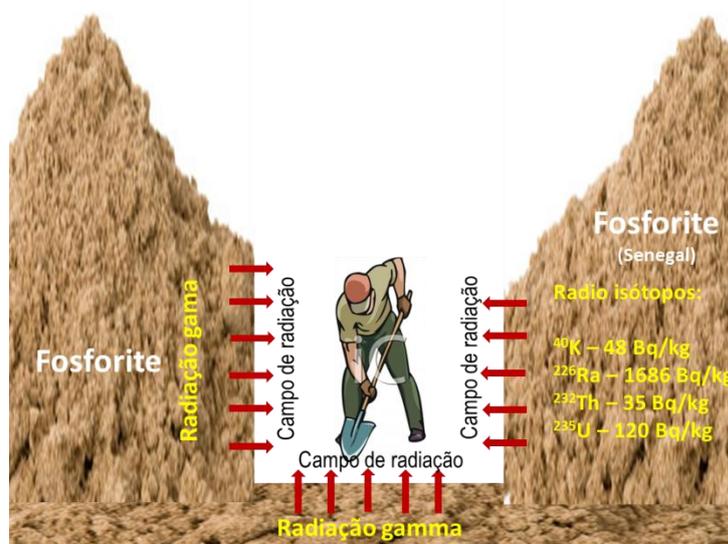


Figura 69 - Campo radiante considerado no cálculo da exposição à radiação externa gama

(Esquema do autor)

Foi considerada a geometria indicada na Figura 70 para a introdução de dados no programa de cálculo da radiação recebida pelo trabalhador.

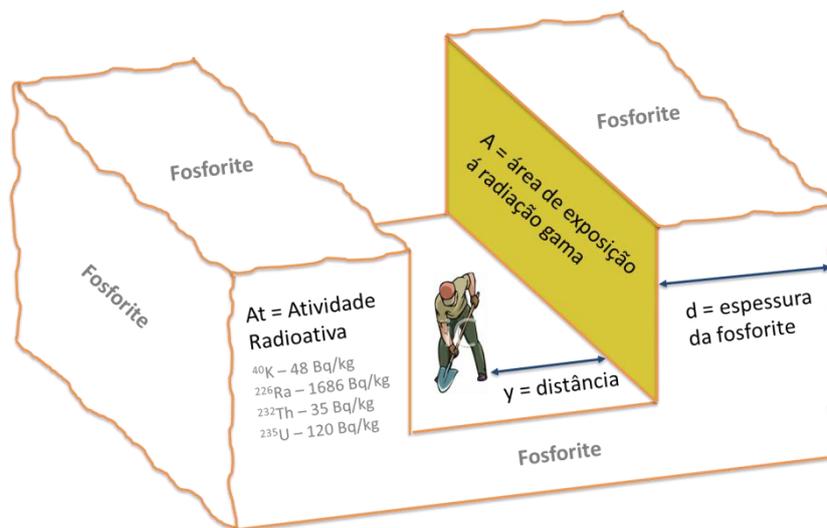


Figura 70 - Geometria considerada para a simulação da exposição à fosforite

(Esquema do autor)

Onde,

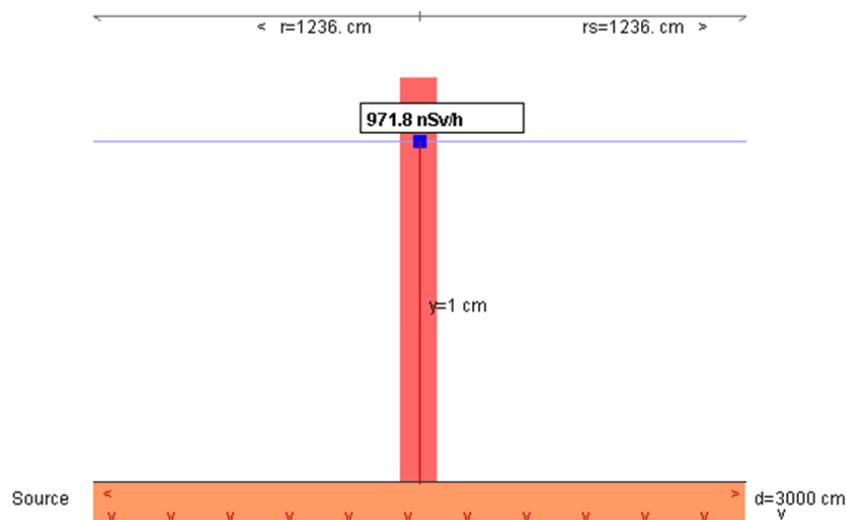
$A$  = área da camada de fosforite com radiação gama na direção do trabalhador

$d$  = espessura da camada de fosforite armazenada

$y$  = distância entre o trabalhador e a camada de fosforite

$At$  = Atividade radioativa - número de núcleos atômicos presentes na fosforite que se desintegram por segundo; este parâmetro foi medido no laboratório nuclear do ITN por espectrometria gama.

Para  $y = 1 \text{ cm}$ ,  $d = 3000 \text{ cm}$  e  $A = 480 \text{ m}^2$  o resultado da simulação realizada com o programa está indicado na Figura 71, obtendo-se o valor de  $971,8 \text{ nSv/h}$ .



**Figura 71 - Resultado da Simulação da exposição à fosforite (distância 1 cm)**

(Output do programa de simulação)

O contributo de cada radionuclido da fonte radioativa é indicado na Tabela 1:

Radionuclido	Atividade (mBq/g)	Taxa de dose (nSv/h)
$^{40}\text{K}$	48	134,1
$^{226}\text{Ra}$	1686	278,1
$^{232}\text{Th}$	35	18,12
$^{235}\text{U}$	120	541,4
<b>Total</b>		<b>971,8</b>

**Tabela 1 - Contributo dos radionuclidos presentes na fosforite para a radiação gama**

Para calcular a dose de radiação total presente deverá ser somado o contributo de radiação proveniente de cada uma das seis superfícies existentes de acordo com a expressão indicada na Equação 8,

$$Td_T = \sum_{i=1}^6 Td_i \quad \text{Equação 8}$$

Onde,

$Td_T$ - Taxa de dose total [Sv/h]

$Td_i$ - Taxa de dose de cada uma das superfícies consideradas [Sv/h]

$i$ - número de superfícies consideradas (de 1 até 6)

Neste exemplo, consideram-se como significativos apenas os contributos de radiação gama provenientes do solo e das paredes laterais, já que este modelo representa adequadamente as situações práticas de exposição observadas.

Para o cálculo da componente de radiação vinda do solo, considerou-se o trabalhador em contato com a fosforite (distância entre a fonte radioativa e o recetor de 1 cm), obtendo-se a taxa de dose de 0,97 $\mu$ Sv/h.

Para o cálculo da componente de radiação vinda das paredes de fosforite, considerou-se o trabalhador situado a uma distância de 1 m da fosforite (distância entre a fonte radioativa e o recetor de 100 cm), obtendo-se uma taxa de dose de 0,63  $\mu$ Sv/h.

Somando o contributo da radiação gama proveniente das três direções consideradas neste exemplo obtém-se,

$$\begin{aligned} \text{Taxa de dose total} &= \text{componente do solo} + 2 \times \text{componente lateral} \\ &= 0,97 + 2 \times 0,63 = 2,23 \mu\text{Sv/h} \end{aligned}$$

Multiplicando o valor obtido por 2000 horas de exposição, obtém-se uma dose anual de cerca de 4,5 mSv/ano, o que ultrapassa o limite máximo de exposição a radiações de origem natural consagrado na legislação de 1 mSv/ano. Importa referir que este cálculo é meramente ilustrativo e que se refere ao pior caso que se pode considerar, sendo as situações reais geralmente menos gravosas, quer em termos do número de horas de exposição anual do trabalhador, quer da distância do mesmo à fonte radioativa.

Importa realçar que os valores de taxa de dose obtidos por simulação do modelo em computador foram muito semelhantes aos valores obtidos nas medições de campo realizadas (ver Tabela 7- Valores de radiação externa gama nos locais de trabalho, página 139), podendo assim concluir-se que o modelo usado para a previsão da taxa de dose de radiação externa gama pode fornecer resultados adequados, viabilizando a sua utilização como uma ferramenta de previsão em fase de conceção de novas instalações onde esteja presente o risco de contaminação radioativa.

### **3.7.2 Cálculo do efeito das proteções introduzidas**

#### **Geometria do armazenamento e quantidade de fosforite armazenada**

Para calcular a taxa de dose recebida pelos trabalhadores expostos em função da geometria do armazenamento da fosforite (espessura da camada de fosforite e área de exposição) e consequentemente da quantidade de fosforite armazenada (volume e peso), foi efetuado um conjunto de simulações através do programa referido anteriormente.

Assim, fixando o parâmetro área de exposição em 10m<sup>2</sup>, 100m<sup>2</sup>, 500m<sup>2</sup> e de 1000m<sup>2</sup> fez-se variar o valor da espessura da pilha de fosforite 0 a 30m obtendo-se um conjunto de resultados de taxa de dose (nSv/h) usado para construir o gráfico apresentado na Figura 72.

Verifica-se por observação do gráfico, que para um armazenamento com uma pequena área de exposição, por exemplo 10 m<sup>2</sup>, o nível de radiação alcança 90% do seu valor máximo para cerca de 3 m de espessura de fosforite, aumentando pouco para espessuras maiores,

fundamentalmente devido ao efeito de blindagem criada pela própria camada de fosforite e também pelo aumento da distância entre a fonte radioativa e o recetor.

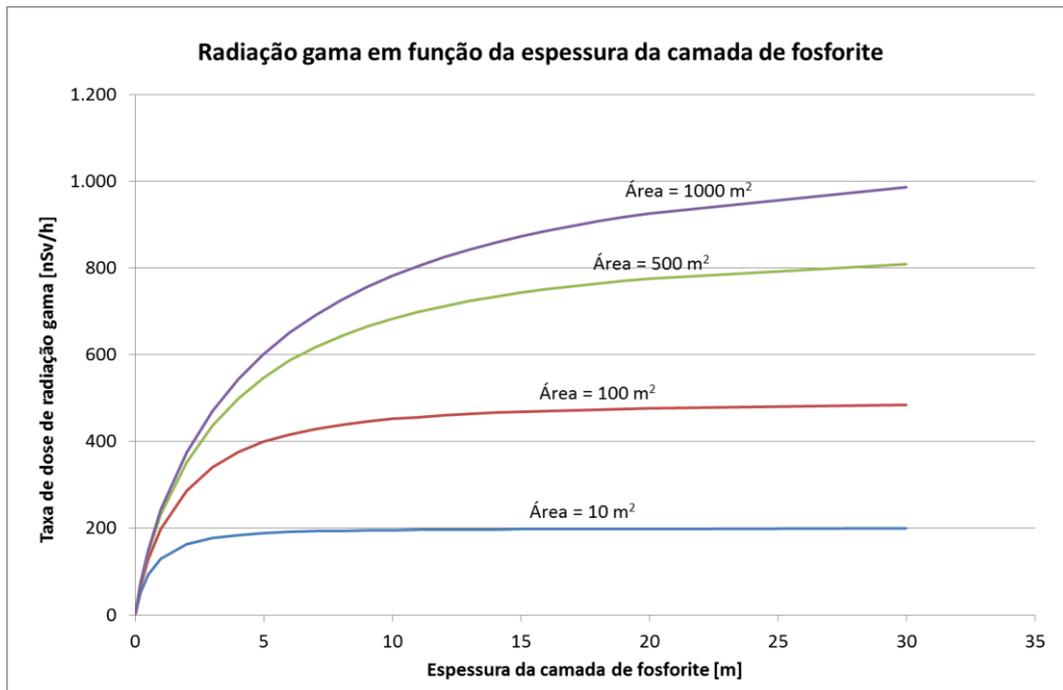


Figura 72 - Nível de radiação em função da espessura da camada de fosforite

Este efeito pode ser observado com mais detalhe no gráfico apresentado na Figura 73, onde se pode observar a variação da taxa de radiação (normalizada em relação ao valor máximo alcançável) em função da espessura da camada de fosforite, com o parâmetro área de exposição fixado em 10 m², 100m², 500m² e 1000 m².

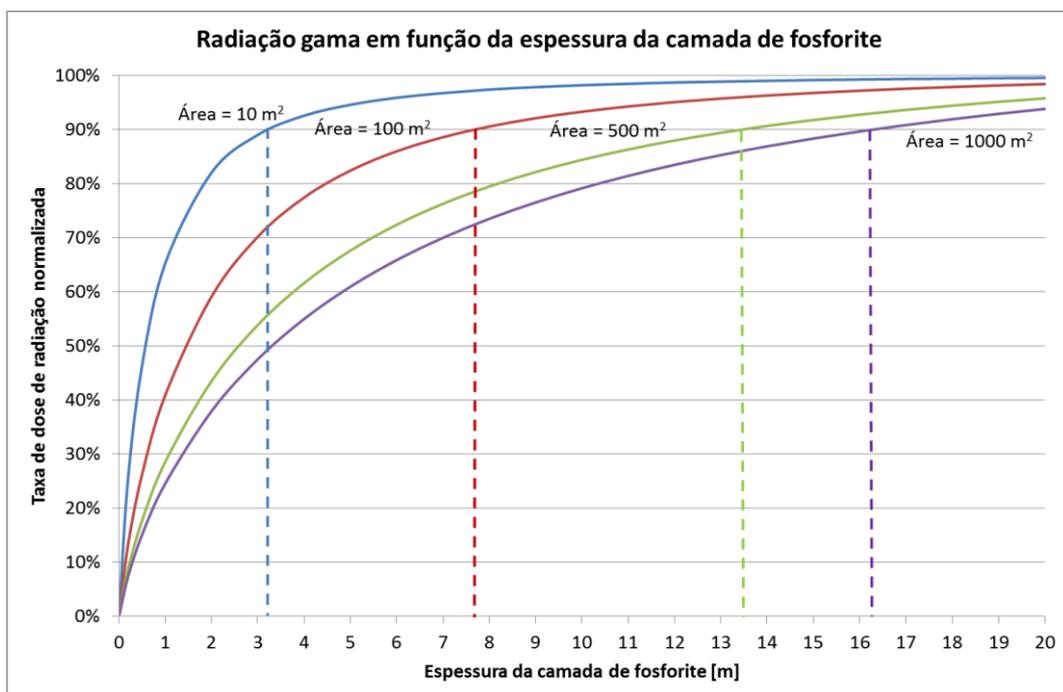


Figura 73 - Taxa de dose normalizada em função da espessura da fosforite

Pode igualmente observar-se que para um armazenamento com uma área de exposição grande, por exemplo 1000 m<sup>2</sup>, o nível de radiação gama alcança 90% do seu valor máximo para uma espessura da camada de fosforite de cerca de 16 m; a partir desse valor, aumentando a espessura da camada de fosforite, a radiação pouco aumenta devido ao efeito de blindagem provocado pela própria fosforite e ao aumento da distância entre a fosforite e o recetor.

Verifica-se igualmente, observando o gráfico da Figura 72, que o nível de radiação gama aumenta significativamente com o aumento da área de exposição da fosforite. Deste modo pode concluir-se que é preferível armazenar a mesma quantidade de fosforite em pilhas de menor altura e maior profundidade, para assim reduzir o nível de radiação gama emitida.

Também se pode concluir que quanto maior for a quantidade de fosforite armazenada maiores serão os níveis de radiação gama esperados, pelo que é recomendável manter os níveis de armazenamento de fosforite tão baixos quanto possível para assim reduzir a exposição dos trabalhadores à radiação externa gama.

### Distância entre a fonte radioativa e o recetor

Procurou-se igualmente determinar a diminuição na taxa de dose, originada pelo aumento da distância entre o trabalhador (recetor) e a fonte radioativa (pilha de fosforite) para as várias geometrias de armazenamento da fosforite consideradas.

Assim, fixando o parâmetro área de exposição em 10 m<sup>2</sup>, 100 m<sup>2</sup>, 500 m<sup>2</sup> e 1000 m<sup>2</sup>, para uma espessura da camada de fosforite de 20 m, fez-se variar o valor da distância entre o trabalhador e a pilha de fosforite de 0 a 30 m, obtendo-se um conjunto de valores de taxa de dose (nSv/h) que foram posteriormente usados para construir o gráfico apresentado na Figura 74.

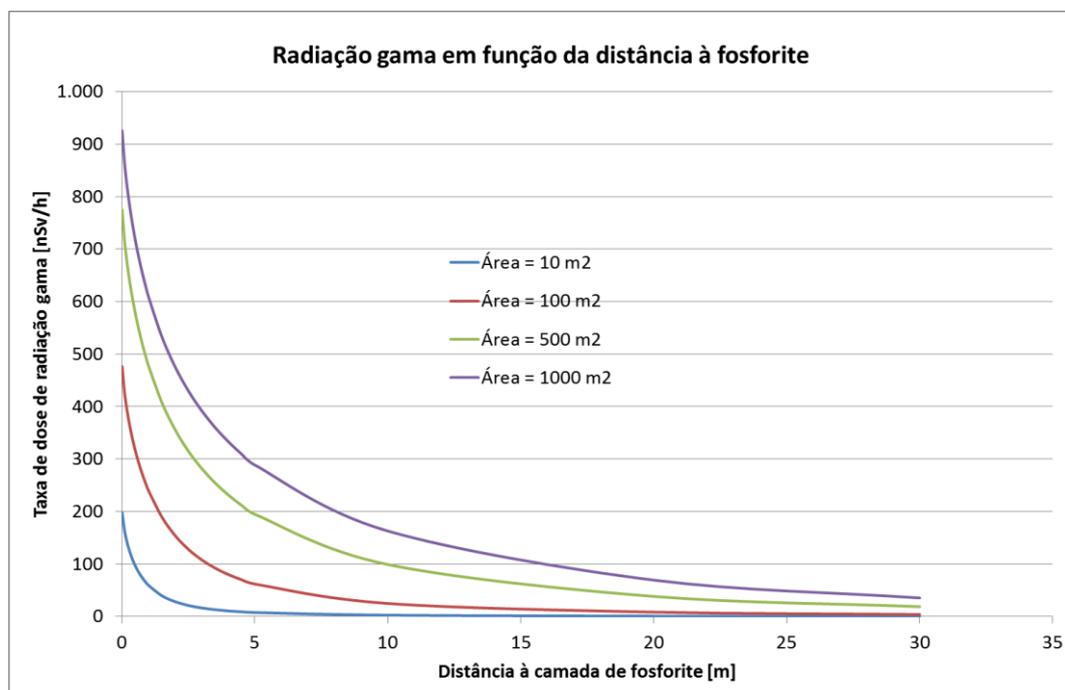


Figura 74 - Radiação gama em função da distância à fosforite

Mesmo para áreas de exposição muito grandes, da ordem dos 1000 m<sup>2</sup>, os resultados obtidos na simulação indicam que a taxa de dose desce significativamente para valores da ordem dos 100 nSv/h, a partir de uma distância de cerca de 16 m. Para este afastamento, a radiação gama emitida pela fosforite deixa de constituir um perigo significativo para os trabalhadores expostos.

Este fator pode ser estudado de forma mais pormenorizada, normalizando a curva da atenuação da radiação com a distância entre a fosforite e o recetor (Figura 74), obtendo-se o gráfico indicado na Figura 75, onde se pode observar que a atenuação da radiação em função da distância entre o recetor e a fosforite vai variar também com o parâmetro área de exposição. Deste modo, verifica-se que se consegue uma redução da taxa de dose para 10% do seu valor máximo com um afastamento de cerca de 2,5 m para uma área de 10 m<sup>2</sup>, 6,5 m para uma área de 100 m<sup>2</sup>, 12,5 m para uma área de 500 m<sup>2</sup> e 17 m para uma área de 1000 m<sup>2</sup>.

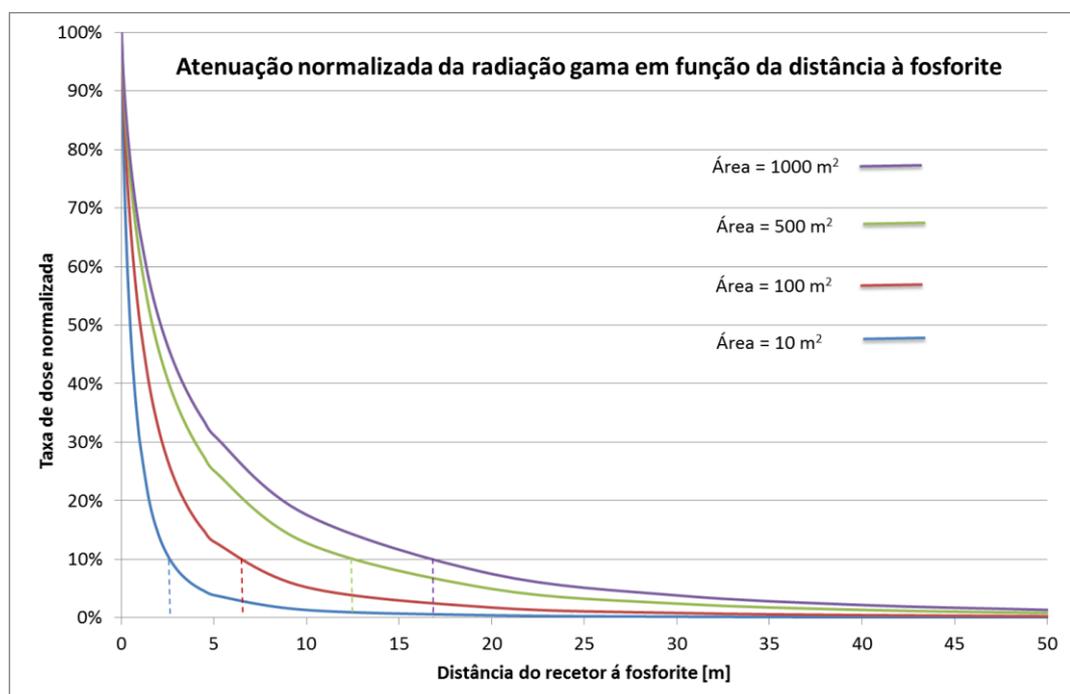


Figura 75 - Atenuação normalizada da radiação gama em função da distância à fosforite

Pode concluir-se assim que afastando os trabalhadores da fosforite se consegue uma boa proteção radiológica dos mesmos, devendo este fator ser considerado como uma medida importante de prevenção e proteção relativamente à radiação gama proveniente da fosforite ou de outros produtos com atividade radiológica significativa.

### Espessura da blindagem

Com o objetivo de proteger os trabalhadores da radiação externa gama pode interpor-se entre a fosforite e os trabalhadores uma blindagem com uma espessura adequada (ds1) como se indica na Figura 76.

A título ilustrativo, para concretizar a blindagem indicada, considerou-se a construção de uma parede em betão, por ser uma estrutura muito adequada desde o ponto de vista da proteção radiológica, da facilidade de construção e dos custos associados. Seguidamente,

realizou-se um conjunto de simulações em computador para calcular a eficácia desta blindagem, ou seja, a diminuição da taxa de dose recebida pelos trabalhadores em função da espessura da parede.

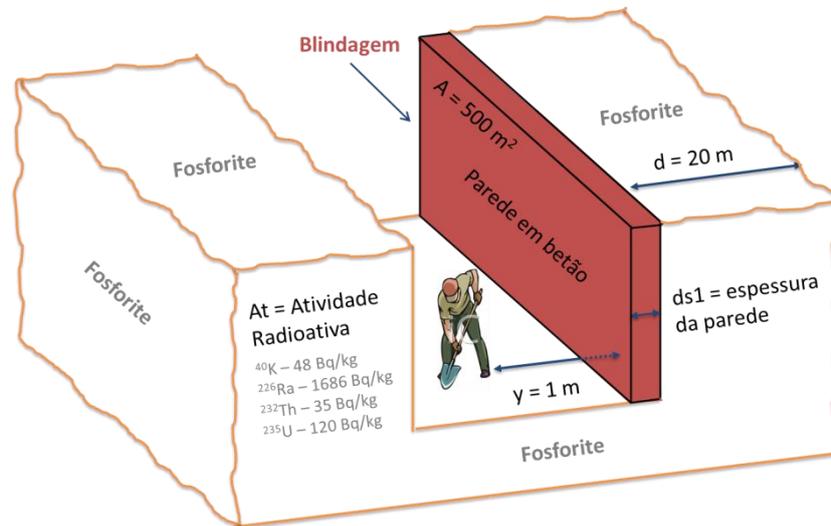


Figura 76 - Colocação de uma blindagem de proteção entre a fosforite e o trabalhador

(Esquema do autor)

Para uma área de exposição de  $500 \text{ m}^2$ , uma distância entre a fonte radioativa e o recetor de  $1 \text{ m}$  e uma espessura da camada de fosforite de  $20 \text{ m}$  fez-se variar a espessura da parede em betão de  $0$  a  $60 \text{ cm}$ , obtendo-se um conjunto de resultados usados para construir o gráfico apresentado na Figura 77.

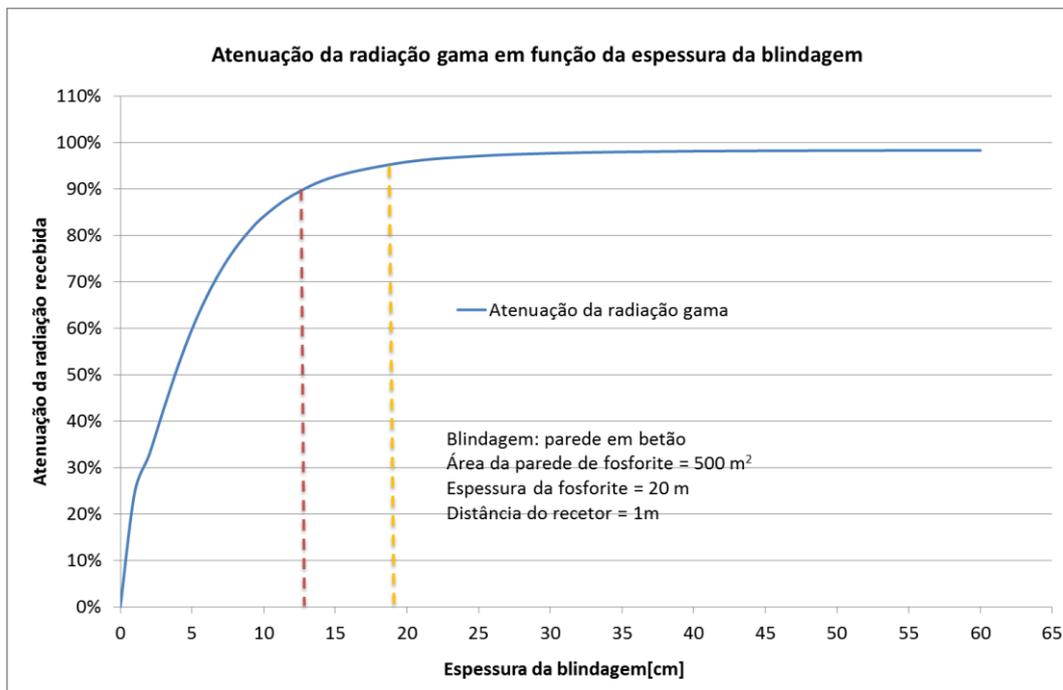


Figura 77 - Atenuação da radiação gama em função da espessura da blindagem

Através deste gráfico, verifica-se que se atinge uma proteção de 90% com uma espessura de parede em betão de cerca de 13 cm e uma proteção de 95% com uma espessura de parede de cerca de 19 cm, tornando-se assim possível, do ponto de vista técnico e económico, construir facilmente este tipo de blindagem.

Deste modo, pode concluir-se que colocando uma parede de betão de reduzida espessura entre os trabalhadores e a fosforite consegue-se uma boa proteção radiológica dos mesmos, devendo este fator ser considerado como mais uma medida importante para a prevenção e proteção dos trabalhadores expostos à radiação gama proveniente da fosforite ou de outros produtos com atividade radiológica significativa.

### **3.8 Medidas de controlo da exposição**

#### **3.8.1 Proteção face à radiação interna**

A proteção radiológica dos trabalhadores face à radiação interna pode conseguir-se evitando a inalação de gases ou poeiras radioativas e a ingestão ou o contacto das feridas com substâncias radioativas. Para reduzir a inalação de gases ou poeiras radioativas os locais de trabalho devem ser mantidos livres de poeiras e de fumos, convenientemente arejados e quanto possível livres de fontes radioativas que possam produzir radão.

Os principais danos causados pelo radão resultam da inalação dos seus descendentes de vida curta ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{214}\text{Po}$ ). O radão por si só não representa um problema importante já que a quase totalidade do radão inalado é exalado. A prevenção do radão é possível principalmente através de medidas de engenharia que reduzam o empoeiramento, facilitem o arejamento dos locais de trabalho e minimizem a acumulação do radão, outras medidas complementares são apresentadas no estudo (Najafi, 1998).

Deve também reduzir-se tanto quanto possível o tempo de exposição dos trabalhadores às poeiras radioativas a fim de reduzir a dose total recebida.

Em termos de proteção individual dos trabalhadores, se não for possível implementar uma proteção coletiva, é adequada a utilização de máscaras com filtros de proteção respiratória ou em casos extremos a utilização de equipamentos autónomos de respiração, como no caso particular de operações de manutenção ou de reparação em espaços mal ventilados.

#### **3.8.2 Proteção das vias respiratórias**

Os riscos para a saúde dos trabalhadores, provenientes da contaminação das vias respiratórias, podem estar presentes nos locais de trabalho sempre que uma atmosfera contenha contaminantes químicos, biológicos ou radiológicos em quantidade significativas. Os riscos para as vias respiratórias podem estar presentes no local de trabalho nas seguintes formas: poeiras e fibras, fumos, aerossóis, gases, vapores e micro-organismos com riscos biológicos.

A proteção das vias respiratórias pode ser feita através dos chamados dispositivos de proteção respiratória. No caso específico deste estudo, pretende-se encontrar uma boa proteção contra partículas com uma atividade radioativa significativa. Os filtros de partículas são geralmente classificados em 3 classes, de acordo com a norma EN 143:2000 Aparelhos de proteção respiratória — Filtros contra partículas.

Classe P1 - filtros de eficácia baixa

Classe P2 - filtros de eficácia média

Classe P3 - filtros de eficácia alta

São também de considerar as seguintes características dos filtros:

**Fator de Proteção Atribuído** (*Assigned Protection Factor*) (APF) significa, em termos laborais, o nível de proteção das vias respiratórias que se espera conseguir com um respirador ou classe de respiradores quando o empregador implementa um programa contínuo e eficaz de proteção respiratória.

**Máxima Concentração Admissível para Utilização** significa a máxima concentração de uma substância perigosa na atmosfera que se espera que ainda seja segura para o trabalhador, se este estiver protegido pelo uso do respirador. Essa concentração é determinada pelo fator de proteção atribuído ao respirador ou classe de respiradores e pelo valor limite de exposição (VLE) da substância perigosa.

### 3.8.3 Aparelhos de proteção filtrantes

São aparelhos filtrantes da atmosfera ambiente, com capacidade para removerem uma fração dos contaminantes do ar, purificando em certa medida o ar respirado pelo trabalhador. Designam-se na terminologia anglo-saxónica por *Air-purifying respirator* (APR). Na Figura 78, estão indicados os vários tipos de filtros disponíveis.



a) Filtro de partículas

b) Semimáscara com filtro

c) Máscara integral com filtro

**Figura 78 - Tipos de aparelhos filtrantes**

(Ilustração original de Attilis & Associates)

Características principais do filtro de partícula (Figura 78 a):

Trata-se de um filtro de partículas de pressão negativa que requer um esforço inspiratório do trabalhador ao puxar o ar através do filtro. O filtro compreende a totalidade ou uma parcela significativa da máscara. As partículas em suspensão no ar são removidas quando o ar inspirado passa através do filtro.

Os respiradores purificadores de ar CBRN<sup>11</sup> com certificação NIOSH com filtros HEPA<sup>12</sup> ou P-100<sup>13</sup> fornecem o nível mínimo aceitável de proteção contra a inalação de partículas pelos trabalhadores que se encontram a trabalhar em ambientes que possam estar contaminados com poeiras radioativas.

O valor típico do Fator de Proteção Atribuído (*Assigned Protection Factor*) é de 10 (APF=10), fonte: (REMM (Radiation Emergency Medical Management), 2011).

<sup>11</sup> CBRN estândaes e procedimentos de teste para todas as classes de protetores das vias respiratórias que conferem proteção contra a inalação de agentes perigosos (CBRN) *Chemical, Biological, Radiological and Nuclear*.

<sup>12</sup> HEPA: High Efficiency Particulate Air filters: um filtro com pelo menos 99,97% de eficiência na remoção de partículas monodispersas com 0,3 µm de diâmetro.

<sup>13</sup> P-100: um filtro facial capaz de filtrar pelo menos 99,97% das partículas aéreas com um diâmetro superior a 0,3 µm.

## Vantagens

- Peso reduzido;
- Não restringem a mobilidade do trabalhador;
- De baixo custo (em comparação com outros tipos de respiradores).

## Desvantagens

- Não fornecem oxigénio (não podem ser usados em ambientes com pouco oxigénio);
- Apenas podem ser utilizados quando o nível de concentração no ar de contaminantes está abaixo dos limites de concentração do filtro;
- Obriga a um ajuste na face para uma utilização eficaz;
- Algum ar contaminado vai poder penetrar para dentro da máscara;
- Não fornece uma proteção adequada aos olhos;
- Modelos de máscara integral podem embaciar durante o uso;
- Dificulta a comunicação verbal entre os trabalhadores.

Características principais da semimáscara com filtro de partículas (Figura 78 b):

A máscara é ajustada, através de elástico, à boca e nariz e requer igualmente um esforço inspiratório do trabalhador ao puxar o ar através do filtro. Pode ser colocado o filtro ou os filtros mais adequados para a remoção dos contaminantes.

O valor típico do Fator de Proteção Atribuído (*Assigned Protection Factor*) é de 10 (APF=10), fonte: (REMM (Radiation Emergency Medical Management), 2011).

## Vantagens

- Pouco pesado;
- Não restringem a mobilidade do trabalhador;
- De baixo custo (em comparação com outros tipos de respiradores).

## Desvantagens

- Não fornecem oxigénio (não podem ser usados em ambientes com pouco oxigénio);
- Apenas podem ser utilizados quando o nível de concentração no ar de contaminantes está abaixo dos limites de concentração do filtro;
- Obriga a um ajuste na face para uma utilização eficaz;
- Algum ar contaminado vai penetrar para dentro da máscara;
- Não fornece uma proteção adequada aos olhos;
- Dificulta a comunicação verbal entre os trabalhadores.

Características principais da máscara integral com filtro de partículas (Figura 78 c):

A máscara é ajustada de modo elástico à boca, nariz e olhos, requer igualmente um esforço inspiratório do trabalhador ao puxar o ar através do filtro. Pode ser colocado o filtro ou os filtros mais adequados para a remoção dos contaminantes específicos.

O valor típico do Fator de Proteção Atribuído (*Assigned Protection Factor*) é de 50 (APF=50) (REMM (Radiation Emergency Medical Management), 2011).

## Vantagens

- Pouco pesado;
- Não restringem a mobilidade do trabalhador;
- Fornece simultaneamente proteção das vias respiratória e proteção dos olhos.

## Desvantagens

- Não fornecem oxigénio (não podem ser usados em ambientes com pouco oxigénio);
- Apenas podem ser utilizados quando o nível de concentração no ar de contaminantes está abaixo dos limites de concentração do filtro;
- Obriga a um ajuste na face para uma utilização eficaz;
- Algum ar contaminado vai poder penetrar para dentro da máscara;
- A máscara integral pode embaciar durante o uso;
- Dificulta a comunicação verbal entre os trabalhadores.

Na Figura 79 estão indicados os vários tipos de filtros com ar forçado disponíveis.

Estes aparelhos contêm ventiladores alimentados por baterias que forçam a passagem do ar ambiente contaminado através de filtros de purificação de ar.

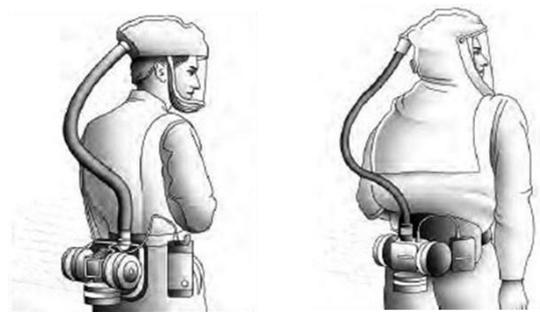
O valor típico do Fator de Proteção Atribuído (*Assigned Protection Factor*) é de 25 (APF=25) (REMM (Radiation Emergency Medical Management), 2011).

## Vantagens

- Maior nível de proteção do que os filtrantes sem ar forçado;
- São mais confortáveis de usar e respirar, diminuindo o esforço respiratório;
- Fornece simultaneamente proteção das vias respiratória e proteção dos olhos.

## Desvantagens

- Volumosos e barulhentos;
- Dependem da energia de uma bateria;
- Não fornecem oxigénio (não podem ser usados em ambientes com pouco oxigénio);
- Apenas podem ser utilizados quando o nível de concentração no ar de contaminantes está abaixo dos limites de concentração do filtro;
- Obriga a um ajuste na face para uma utilização eficaz;
- Algum ar contaminado ainda vai poder penetrar para dentro da máscara, apesar de existir uma pequena pressão positiva no seu interior;
- A máscara integral pode embaciar durante o uso;
- Dificulta a comunicação verbal entre os trabalhadores.



a) Aparelho filtrante com ar forçado (máscara)

b) Aparelho filtrante com ar forçado (capuz)

**Figura 79 - Tipos de aparelhos filtrantes com ar forçado**

(Ilustração original de Attilis & Associates)

### 3.8.4 Aparelhos de proteção isolantes

Quando existe deficiência de oxigénio e/ou uma concentração muito elevada de contaminante com a possibilidade do filtro colmatar muito rapidamente, poderão ser usados aparelhos de proteção respiratória com fornecimento de ar fresco exterior através de uma mangueira de aspiração indicado na Figura 80 a) e b) ou de aparelhos autónomos indicado na Figura 80 c).

O valor típico do Fator de Proteção Atribuído (*Assigned Protection Factor*) é de 1000 (APF=1000) para um respirador com fornecimento de ar fresco exterior através de uma mangueira; 10000 (APF=10000) para um respirador com fornecimento de ar fresco exterior através de uma mangueira e proteção de fugas; 10000 (APF=10000) para o aparelho autónomo de respiração (REMM (Radiation Emergency Medical Management), 2011)



a) Respirador com fornecimento de ar exterior por tubo

b) Respirador com fornecimento de ar exterior e proteção de fugas

b) Aparelho autónomo de respiração

**Figura 80 - Tipos de aparelhos isolantes**

(Ilustração original de Attilis & Associates)

### 3.8.5 Sinalização das zonas de risco

A classificação das zonas de trabalho em função do risco presente e a introdução de uma sinalética adequada constitui também uma medida importante para a limitação da exposição dos trabalhadores às radiações ionizantes, já que por um lado incentiva a avaliação do risco por parte do empregador e, por outro, promove a observância por parte dos trabalhadores expostos das medidas recomendadas de prevenção e de proteção.

Assim, de acordo com as doses anuais de radiação espetáveis nos diversos locais de trabalho estes devem ser classificados como zona vigiada, zona controlada, zona de permanência limitada, zona de permanência regulamentada, zona de acesso proibido, devendo sinalizar-se essas zonas com a sinalética adequada como a seguir se indica.

#### Zona vigiada

Aquela zona onde há probabilidade de se receberem doses acima dos limites de dose para os membros do público mas é muito improvável que se recebam doses eficazes superiores a 6 mSv ou doses equivalentes superiores a 3 /10 dos limites de dose equivalente para o cristalino, pele e para as extremidades (referidos na secção 2.3.3.4, página 44).

As zonas vigiadas devem ser sinalizadas com os pictogramas indicados na Figura 81, devendo ser usado: a) quando existe apenas o risco de radiação externa e o risco de contaminação seja desprezável; b) quando existe apenas o risco de contaminação e o risco de radiação externa seja desprezável; c) quando existem ambos os riscos.



Figura 81 - Pictogramas a usar na sinalização de zonas vigiadas

#### Zona controlada

Aquela zona onde há probabilidade de se receberem doses efetivas acima de 6 mSv/ano ou doses equivalentes superiores a 3/10 dos limites de dose equivalente para o cristalino, pele e extremidades.

Nestas zonas é necessário estabelecer procedimentos de trabalho, a fim de reduzir a exposição a radiações ionizantes, evitar a contaminação radioativa ou prevenir e limitar a probabilidade e a gravidade de acidentes radiológicos ou as suas consequências.

As zonas controladas devem ser sinalizadas com os pictogramas indicados na Figura 82, devendo ser usado: a) quando existe apenas o risco de radiação externa e o risco de

contaminação seja desprezável; b) quando existe apenas o risco de contaminação e o risco de radiação externa seja desprezável; c) quando existem ambos os riscos.

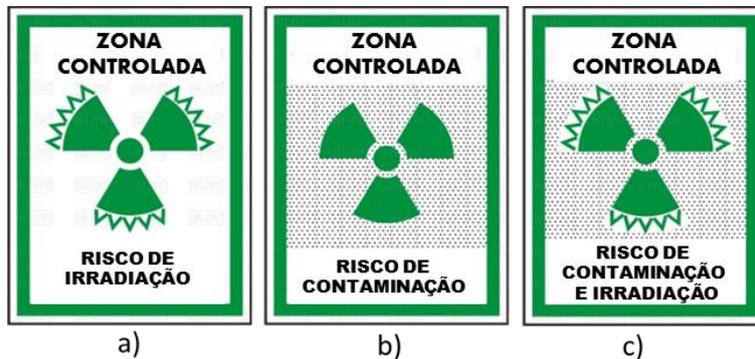


Figura 82 - Pictogramas a usar na sinalização de zonas controladas

Dentro das zonas controladas pode haver algumas que pelas suas características, em função do risco radiológico, exijam uma classificação mais restritiva, designadamente:

### Zona de permanência limitada

Aquela zona onde há o risco de se receber uma dose superior aos limites de dose se se permanece no seu interior durante uma jornada inteira de trabalho (50 semanas / ano, 5 dias / semana e 8 horas / dia).

### Zona de permanência regulamentada

Aquela zona onde há o risco de receber doses superiores a qualquer dos limites de dose em curtos períodos de tempo e exige requisitos especiais do ponto de vista da otimização.

As zonas de permanência regulamentada devem ser sinalizadas com os pictogramas indicados na Figura 83, devendo ser usado: a) quando existe apenas o risco de radiação externa e o risco de contaminação seja desprezável; b) quando existe apenas o risco de contaminação e o risco de radiação externa seja desprezável; c) quando existem ambos os riscos.



Figura 83 - Pictogramas a usar na sinalização de zonas de permanência regulamentada

## Zona de acesso proibido

Aquela zona onde há o risco de receber numa única exposição uma dose superior aos limites de dose.

As zonas de acesso proibido devem ser sinalizadas com os pictogramas indicados na Figura 84, devendo ser usado: a) quando existe apenas o risco de radiação externa e o risco de contaminação seja desprezável; b) quando existe apenas o risco de contaminação e o risco de radiação externa seja desprezável; c) quando existem ambos os riscos.



Figura 84 - Pictogramas a usar na sinalização de zonas de acesso proibido

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo, começa-se por apresentar os valores obtidos nas análises laboratoriais efetuadas no laboratório do ITN, relativos à medição da atividade radiológica das amostras de poeiras provenientes da fosforite e comparam-se os valores obtidos com os valores de atividade radiológica da fosforite referidos na literatura revista.

Em seguida, apresentam-se os valores obtidos nas medições efetuadas dentro das instalações industriais da ADP, em vários locais de trabalho, relativamente à concentração de poeiras respiráveis e totais existentes no ar, taxa de dose de radiação externa gama e concentração de radão em espaços confinados.

Apresentam-se igualmente os valores medidos de exposição ocupacional individual à radiação externa gama e à inalação de poeiras referente a um grupo de trabalhadores ao longo de um dia de trabalho. Estes valores foram obtidos com recurso a um dosímetro de radiação gama e a bombas de aspiração de ar individuais. Estima-se a dose total de radiação a que poderão estar expostos os trabalhadores e faz-se uma breve análise epidemiológica relativa aos trabalhadores expostos.

Analisa-se e discutem-se os resultados das medições efetuadas ao longo do estudo nos locais de trabalho observados. Com base nos resultados encontrados, equaciona-se um conjunto de ações de prevenção e de proteção que possam minimizar o impacto negativo na saúde dos trabalhadores expostos a radiações ionizantes com origem nas matérias-primas e nos produtos manipulados na indústria dos fosfatos.

Enquadram-se as vantagens e as limitações da utilização de ferramentas de simulação em computador que permitam, em fase de projeto de futuras instalações afetadas por riscos radiológicos, prever os níveis de radiação ionizante que poderão ocorrer nessas instalações e assim minimizar a futura exposição dos trabalhadores a essas radiações.

Finalmente, apresentam-se as ações de prevenção e de proteção consideradas mais eficazes para a proteção dos trabalhadores, que incluem a implementação de medidas de engenharia, de organização do trabalho e de proteção individual dos trabalhadores.

#### 4.1 Atividade radiológica dos produtos manipulados

##### Medição da atividade radiológica da fosforite (matéria-prima)

Realizou-se a medição, no laboratório do ITN, da atividade radiológica de amostras da fosforite usada no processo de fabrico dos fertilizantes, com o propósito de demonstrar que existe uma emissão radioativa significativa proveniente desta matéria-prima e comparar esses valores com os valores referidos na literatura revista.

Através de espectrometria gama efetuada nesse laboratório foi determinada a quantidade de núclidos radioativos presentes nas amostras das diversas fosforites usadas no processo de fabrico dos fertilizantes.

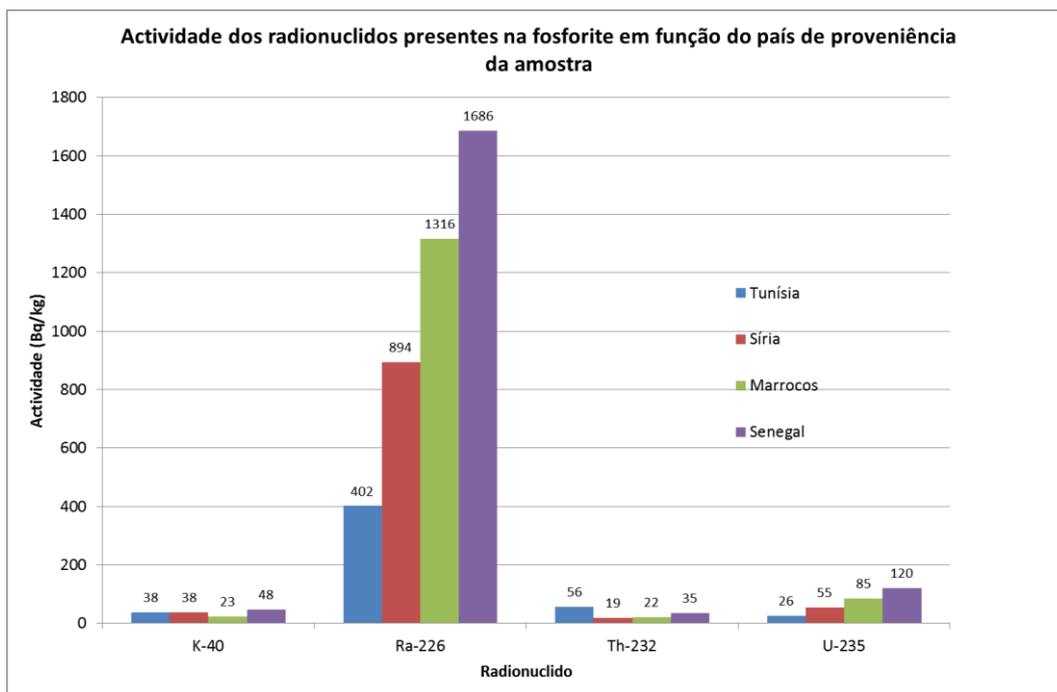
Desse modo, foi medida a atividade radiológica de amostras de fosforite oriunda de diversas proveniências, designadamente, Tunísia, Síria, Marrocos e Senegal com o objetivo de identificar as suas diferenças em termos radiológicos, apresentando-se os valores obtidos na Tabela 2.

Os relatórios dos ensaios laboratoriais, realizados no ITN, das amostras de fosforite, estão incluídos no Anexo E.

País de proveniência da fosforite	Grandeza Medida	Atividade dos radionuclídeos presentes			
		<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>235</sup> U (Bq/kg)
Tunísia	Ae - Atividade específica	30	381	52	22
	U - Incerteza expandida	8	21	4	4
	<b>Total</b>	<b>38</b>	<b>402</b>	<b>56</b>	<b>26</b>
Síria	Ae - Atividade específica	24	845	15	49
	U - Incerteza expandida	14	49	4	6
	<b>Total</b>	<b>38</b>	<b>894</b>	<b>19</b>	<b>55</b>
Marrocos	Ae - Atividade específica	13	1254	19	77
	U - Incerteza expandida	10	62	3	8
	<b>Total</b>	<b>23</b>	<b>1316</b>	<b>22</b>	<b>85</b>
Senegal	Ae - Atividade específica	34	1604	26	106
	U - Incerteza expandida	14	82	9	14
	<b>Total</b>	<b>48</b>	<b>1686</b>	<b>35</b>	<b>120</b>

Tabela 2 - Atividade dos radionuclídeos presentes na fosforite em função do país de proveniência

Estes mesmos valores são apresentados na forma de gráfico na Figura 85.



**Figura 85 - Atividade dos radionuclidos presentes na fosforite em função do país de proveniência**

Verifica-se, através dos valores medidos, que as amostras da fosforite apresentam uma atividade radiológica significativa, variando bastante consoante a sua proveniência. Assim, por exemplo, a fosforite proveniente do Senegal apresenta uma atividade radioativa do radionuclido  $^{226}\text{Ra}$  mais de quatro vezes superior à fosforite da Tunísia, situação que também se mantém aproximadamente para o caso do radionuclido  $^{235}\text{U}$ .

Material	$^{238}\text{U}$ (Bq/kg)	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)
Fosforite Granulada	1184	1554
Fosforite em Pedra	1517	1554
Fosfogesso	19 - 222	1221
SSP		925
TSP	2109	777
Ácido Fosfórico	1591	15 - 26

**Tabela 3 - Valores de atividade radiológica medidos numa indústria de fertilizantes nos EUA**

Pode ainda verificar-se que os valores medidos no ITN para o radionuclido  $^{226}\text{Ra}$  são bastante consistentes com os indicados na literatura (Birky et al., 1998) designadamente, os medidos numa indústria de produção de fertilizantes nos EUA e que estão indicados na Tabela 3.

A atividade radiológica da fosforite e dos seus produtos derivados sugere igualmente a possibilidade da existência de níveis de contaminação radioativa ao longo de todo o processo de fabrico, designadamente, em tanques de receção, filtragem, tubagens e transportadores. Equipamento antigo removido das instalações de processamento do ácido

fosfórico revelou conter concentrações elevadas de  $^{226}\text{Ra}$ , com um provável impacto negativo nos trabalhadores da manutenção, transporte e tratamento de resíduos.

A título ilustrativo, refira-se que resíduos e sucata de ferro da empresa ADP, provenientes da demolição de um armazém e de equipamentos antigos foram rejeitados pela SN - Siderurgia Nacional (Seixal, Portugal) por apresentarem uma elevada atividade radioativa. A Siderurgia Nacional, à semelhança de outras siderurgias espalhadas pelo mundo, realiza por rotina um controle da radioatividade de toda a sucata que adquire através de pórtico instalado na entrada da instalação para a medição da radioatividade. O pórtico instalado na entrada da Siderurgia Nacional para deteção de radiação na sucata adquirida pode observar-se na Figura 86.



**Figura 86 - Pórtico instalado na Siderurgia Nacional para deteção de radiação**

(Foto do autor)

### **Medição da atividade radiológica das cinzas recolhidas nos filtros**

A determinação da atividade radiológica das cinzas recolhidas nos filtros de mangas é igualmente importante para a avaliação da sua perigosidade, já que é necessário proceder com regularidade à limpeza desses filtros e essa operação é geralmente efetuada por trabalhadores externos sem preparação ou formação adequadas para a sua autoproteção.

Com esse propósito foi medida no laboratório do ITN a atividade radiológica de amostras de cinzas recolhidas dos filtros de manga provenientes do processo de produção dos fertilizantes estando os valores obtidos apresentados na Tabela 4.

Os relatórios dos ensaios laboratoriais, realizados no ITN, das amostras de cinzas, estão incluídos no Anexo E.

Grandeza Medida	Atividade dos radionuclídeos presentes nas cinzas dos filtros			
	<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>235</sup> U (Bq/kg)
Ae - Atividade específica	1098	155	12	39
U - Incerteza expandida	231	19	4	8
<b>Total</b>	<b>1329</b>	<b>174</b>	<b>16</b>	<b>47</b>

Tabela 4 - Atividade radiológica das cinzas recolhidas dos filtros de manga

Os mesmos valores são apresentados na forma de gráfico na Figura 87 para melhor comparação entre eles.

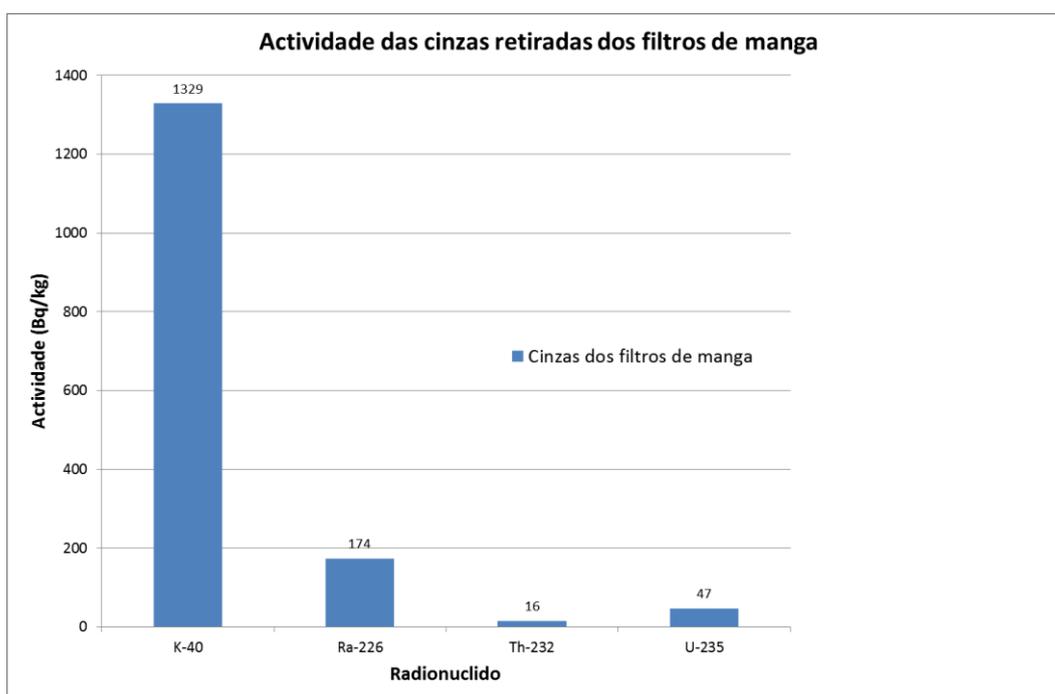


Figura 87 - Atividade radiológica das cinzas recolhidas dos filtros de manga

Verifica-se pelos valores obtidos que as cinzas presentes nos filtros de manga também apresentam uma atividade radiológica significativa, superior a 1500 Bq/kg, constituindo assim um perigo para os trabalhadores encarregues da sua limpeza, remoção e armazenamento, bem como para o meio ambiente.

A título ilustrativo apresenta-se uma fotografia de uma operação de limpeza de filtros de mangas realizadas na empresa ADP em 2010, Figura 88.



**Figura 88 - Operação de limpeza do filtro de mangas**

(Foto do autor)

Esta operação é geralmente realizada por trabalhadores externos à empresa sem a proteção adequada para o risco radiológico a que estão expostos, como se pode observar na fotografia apresentada (Figura 89).



**Figura 89 - Remoção manual das cinzas nos filtros de mangas**

(Foto do autor)

## **4.2 Poeiras radioativas presentes no ar**

Considerou-se importante neste trabalho a determinação do nível de concentração de poeiras existentes no ar, porque pode fornecer uma indicação aproximada da quantidade de radionuclídeos derivados da fosforite presentes no ar. As poeiras existentes no ar podem constituir um perigo para a saúde dos trabalhadores devido à possibilidade de inalação, ingestão e absorção pela pele de elementos radioativos presentes nessas poeiras. Como já referido anteriormente, um perigo significativo para a saúde dos trabalhadores expostos resulta da emissão de radiação alfa, por esses elementos radioativos, altamente energética, capaz de destruir os tecidos internos não protegidos pela pele humana.

Atendendo a que existe um efeito nocivo mais intenso provocado pelas partículas de poeira de pequena dimensão (até cerca de 5  $\mu\text{m}$ ), já que conseguem penetrar na região dos pulmões onde ocorrem as trocas gasosas, considera-se importante determinar essa concentração de poeiras respiráveis no ar. As poeiras respiráveis correspondem a uma fração das poeiras totais e podem ser separadas com recurso a um ciclone, como indicado na Figura 58, página 100.

Para determinar a concentração de poeiras no ar, foram medidas as poeiras totais e as poeiras respiráveis nas zonas de trabalho com recurso a 4 bombas de aspiração de ar, marca SIDEKICK, de aspiração elétrica com caudal de ar calibrado, ciclone de separação de partícula por tamanho e filtro de papel para recolha das poeiras. O equipamento usado pode ser visto na Figura 59, página 101. Os métodos de medição e de quantificação utilizados estão de acordo com as técnicas NIOSH 500 e NIOSH 600 apresentadas no Anexo C.

O método utilizado para determinar a concentração de poeiras no ar baseia-se na análise gravimétrica (determinação da massa por pesagem) dos filtros de poeiras antes e após a recolha. A diferença de peso do filtro, antes e depois da recolha das poeiras, dá-nos o peso das poeiras retidas no filtro e indiretamente uma medida da concentração de poeiras no ar.

As poeiras totais e as poeiras respiráveis existentes no ar são separadas num ciclone intercalado no tubo de aspiração, devido à diferença das suas massas, com a utilização do ciclone apenas chegam ao filtro as poeiras respiráveis (mais leves) enquanto que as poeiras mais pesadas precipitam no depósito existente na base do ciclone.

O processo de medição tem início no laboratório com a pesagem do filtro numa balança com seis casas decimais para calcular a massa inicial do filtro. Após a exposição às poeiras o filtro volta a ser pesado para determinar a massa das partículas que ficaram retidas no filtro e assim obter a concentração das poeiras no ar em  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

Para a avaliação da exposição ocupacional às partículas totais as bombas de aspiração de ar foram calibradas para 1 litro de ar / minuto com 2 horas de medição. Para as partículas respiráveis (separadas por um ciclone em alumínio) as bombas de aspiração foram calibradas para 2,5 litros de ar / minuto com 2,5 horas de medição.

### **Exposição ocupacional a poeiras totais e respiráveis**

Para determinar a exposição ocupacional a poeiras totais e a poeiras respiráveis foram colocadas bombas de aspiração e filtros nos trabalhadores selecionados como se pode observar na Figura 60, página 102.

Posteriormente em laboratório foi pesada a quantidade de poeiras presentes nos filtros sendo determinada a concentração de poeiras em função do valor do caudal de aspiração e do tempo de amostragem, de acordo com a Equação 9.

$$C_i = 10^6(P_f - P_i)/(C_a T_e) \quad \text{Equação 9}$$

em que,

$C_i$  - Concentração de poeiras no ar [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]

$P_f$  - Peso final do filtro [g]

$P_i$  - Peso inicial do filtro [g]

$C_a$  - Caudal da bomba de aspiração [ $\text{l}/\text{min}$ ]

$T_e$  - Tempo da amostragem [min]

Foi medida a exposição a poeiras dos seguintes trabalhadores: operador do granulador, operador de líquidos, chefe de turno, operador da pá, encarregado, operador fabril, responsável produção, operador responsável *Mollers*, operador granéis e operador *big bags*.

Os valores medidos de concentração de poeiras totais e respiráveis estão indicados na Tabela 5.

Local de Trabalho	Função do Trabalhador	Poeiras Totais ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	Poeiras Respiráveis ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
Granulação 4	Operador do Granulador	7,22	2,26
Granulação 4	Operador de Líquidos	29,4	1,24
Granulação 4	Chefe de Turno	2,42	1,56
Granulação 4	Operador da Pá	12,30	0,97
Granulação 2/4	Encarregado	2,26	0,97
Granulação 2	Operador Fabril	1,73	0,87
Granulação 2/4	Responsável Produção	0,94	0,82
Ensaque	Operador Responsável Mollers	1,19	0,89
Ensaque	Operador Granéis	2,66	0,99
Ensaque	Operador Big bags	4,61	1,15

**Tabela 5 - Valores de exposição ocupacional a poeiras**

Os valores apresentados na Tabela 5 sobre a exposição ocupacional a poeiras de vários grupos de trabalhadores da fábrica indicam que o nível de concentração de poeiras respiráveis não ultrapassa os  $2,26 \text{ mg}/\text{m}^3$ , portanto abaixo do nível de ação de  $5 \text{ mg}/\text{m}^3$  (valor correspondente a 50% do TLV-TWA).

Se estas poeiras fossem inertes poderiam não originar um risco muito significativo para a saúde dos operadores a trabalhar nesta zona. No entanto, de acordo com os valores indicados na Tabela 3, estas poeiras possuem uma atividade radiológica significativa pelo

que estes níveis de empoeiramento podem constituir um risco significativo para a saúde dos trabalhadores.

Os mesmos valores de concentração de poeiras totais e respiráveis são apresentados na forma de gráfico na Figura 90 de forma a identificar os valores mais significativos e a compará-los com os valores de referência dados pela Norma NP1796-2007 para partículas inertes, que são os seguintes.

VLE-MP para partículas inaláveis (totais) -  $10 \text{ mg/m}^3$

VLE-MP para partículas respiráveis -  $3 \text{ mg/m}^3$

A ACGIH indica que mesmo partículas biologicamente inertes, insolúveis, ou fracamente solúveis podem originar efeitos adversos e recomenda que as suas concentrações no ar devem ser mantidas abaixo de  $3 \text{ mg/m}^3$  para partículas respiráveis e de  $10 \text{ mg/m}^3$  para partículas inaláveis até que se verifique o estabelecimento de um VLE para uma dada substância.

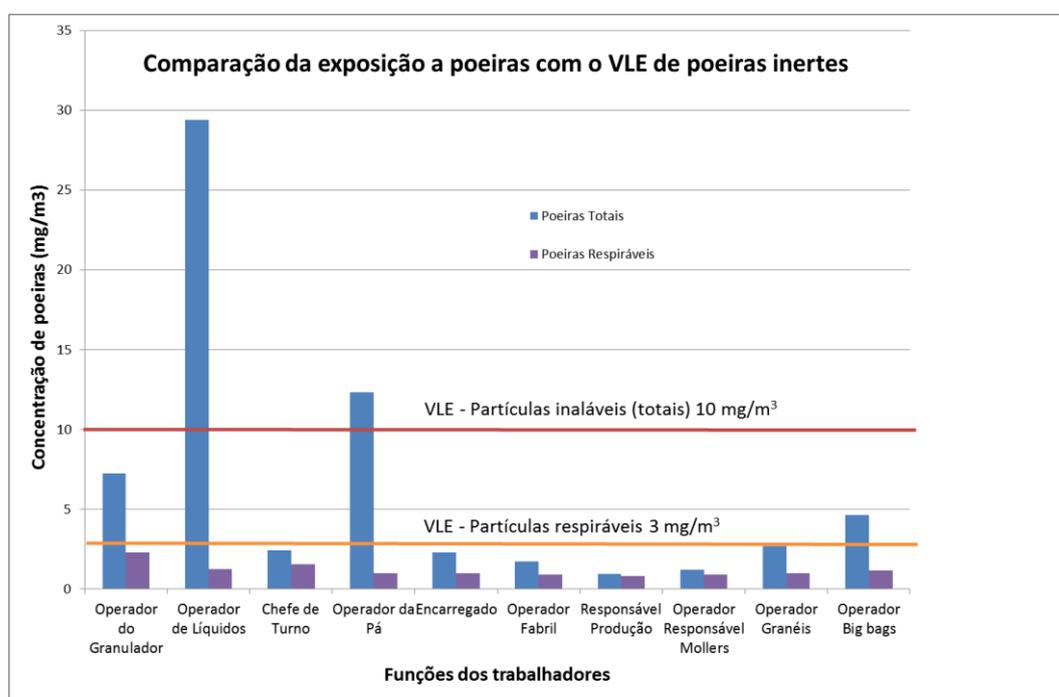


Figura 90 - Comparação da exposição a poeiras com o VLE de poeiras inertes

Verifica-se em algumas zonas concentrações de poeiras respiráveis significativas, mas que por si só não ultrapassam os limites estabelecidos se consideradas apenas como poeiras inertes. Neste caso particular, tratando-se de poeiras de fosforite com um conteúdo significativo de isótopos radioativos já se podem identificar riscos para os trabalhadores expostos, associados à inalação, ingestão e absorção destas poeiras.

É de realçar com especial ênfase, que estes valores de VLE-MP indicados não são aplicáveis para este estudo já que de acordo com a mesma norma só podem ser aplicados a poeiras que apresentem baixa toxicidade, por exemplo as que não sejam citotóxicas, genotóxicas, ou de qualquer outra forma quimicamente reativas com o tecido pulmonar e que não emitam radiações ionizantes, não causem sensibilização imunitária, ou efeitos

tóxicos, para além do originado por inflamação ou pelo mecanismo de “sobreesforço pulmonar”.

A referida norma não indica qual o valor VLE-MP admissível para poeiras que emitam radiações ionizantes, no entanto, somos levados a concluir por precaução, que o valor de VLE-MP para poeiras provenientes da fosforite com uma forte presença de isótopos radioativos deverá ser muito inferior aos valores acima indicados.

A título meramente ilustrativo, e como não existe na mesma Norma um VLE-MP para as poeiras radioativas, vai-se usar como referência o VLE-MP indicado para poeiras de carvão de  $0,4 \text{ mg/m}^3$ . É referido como efeito negativo na saúde derivado da exposição a poeiras de carvão a lesão pulmonar e a fibrose pulmonar. Representando agora este limite no mesmo gráfico obtemos o gráfico apresentado na Figura 91 onde resulta bem visível que os valores de empoeiramento são muito significativos quando comparados com o VLE-MP das poeiras do carvão.

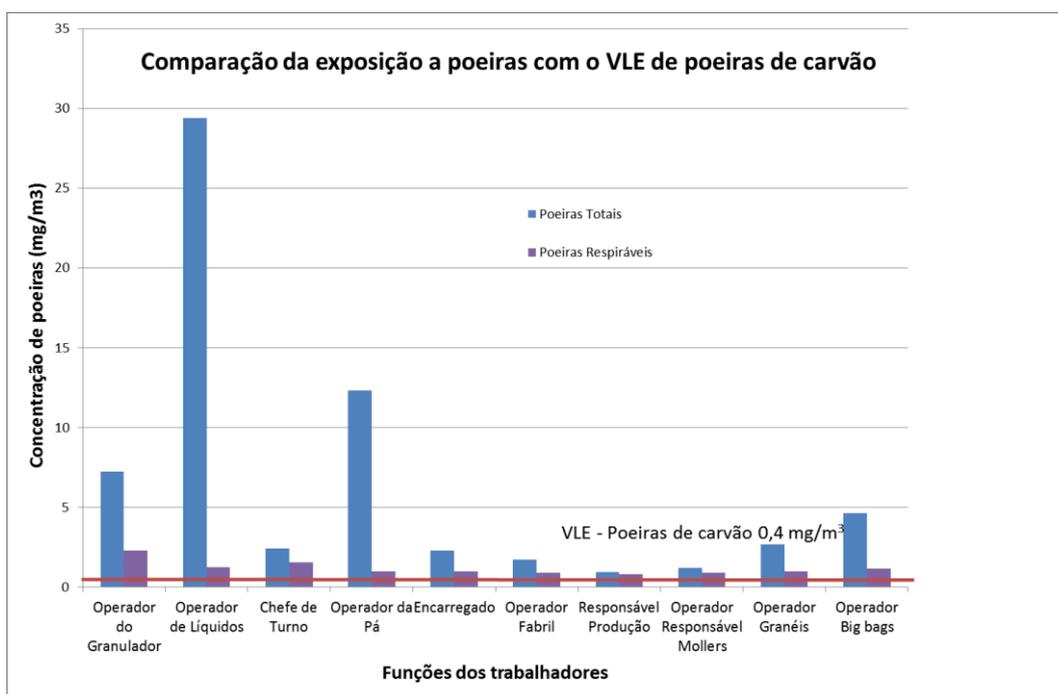


Figura 91 - Comparação dos valores de exposição com o VLE de poeiras de carvão

### Concentração de poeiras totais e respiráveis nos locais de trabalho

Os valores de concentração de poeiras totais e de poeiras respiráveis realizadas no mesmo período nas zonas referidas estão indicados na Tabela 6.

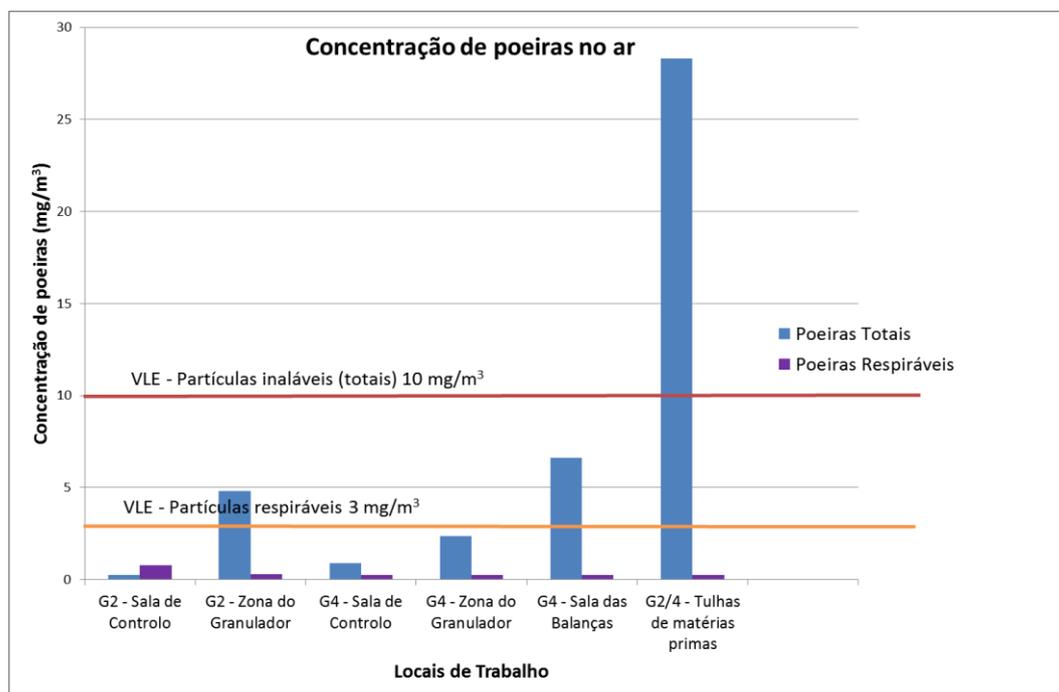
Estes valores foram medidos nas zonas indicadas, com recurso a bombas de aspiração e filtros estacionadas nos locais, enquanto se realizavam as tarefas de produção de rotina.

Local de Medição	Poeiras Totais (mg/m <sup>3</sup> )	Poeiras Respiráveis (mg/m <sup>3</sup> )
Granulação 2 - Sala de Controlo	0,26	0,79
Granulação 2 - Zona do Granulador	4,80	0,28
Granulação 4 - Sala de Controlo	0,87	0,25
Granulação 4 - Zona do Granulador	2,37	0,26
Granulação 4 - Sala das Balanças	6,60	0,25
Granulação 4 / Granulação 2 (Zona das Tulhas de matérias primas)	28,30	0,25

**Tabela 6 - Valores de concentração de poeiras no ar**

Na Figura 92, os mesmos valores são apresentados na forma de gráfico, onde podem ser comparados com os valores de referência indicados. Verifica-se em algumas zonas níveis de poeiras significativos, mas que por si só não ultrapassam os limites estabelecidos quando se trata de poeiras inertes. Neste caso particular tratando-se de poeiras com um conteúdo significativo de isótopos radioativos, pode identificar-se mais uma vez riscos associados à inalação, ingestão e absorção destas poeiras.

Os valores apresentados na Tabela 6 sobre a concentração das poeiras no ar nas zonas de trabalho indicam que o nível de concentração de poeiras respiráveis não ultrapassa 0,79 mg/m<sup>3</sup>, estando abaixo do nível de ação de 5 mg/m<sup>3</sup>. No entanto, tal como já referido, estas poeiras possuem uma atividade radiológica significativa pelo que ao se espalharem pela zona de trabalho, fábrica e zonas envolventes podem originar novas fontes de radioatividade.



**Figura 92 - Comparação da concentração de poeiras no ar com o VLE de poeiras inertes**

Mais uma vez comparando estes valores com o VLE-MP estabelecido para poeiras de carvão de  $0,4 \text{ mg/m}^3$  (de acordo com a Norma NP1796-2007) obtêm-se o gráfico indicado na Figura 93, onde resulta bem visível que os valores de empoeiramento são muito significativos quando comparados com este VLE-MP.

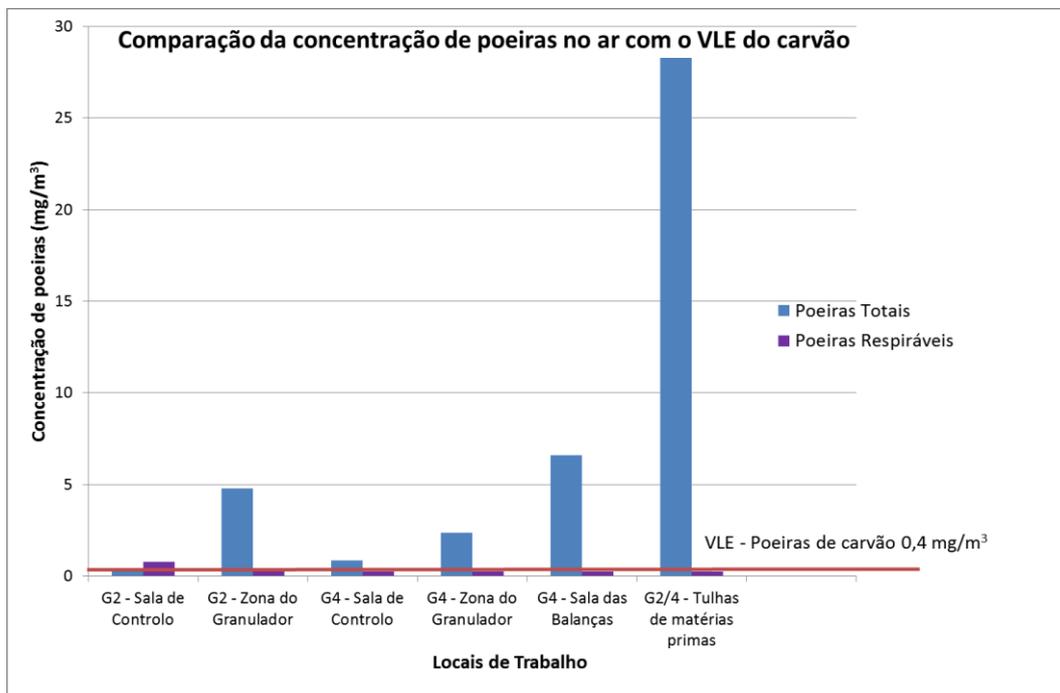


Figura 93 - Comparação da concentração de poeiras no ar com o VLE do carvão

### 4.3 Radiação externa gama nos locais de trabalho

#### Medição da taxa de dose da radiação externa gama

Foram efetuadas no interior das instalações várias medições da taxa de dose de radiação externa gama em vários locais de trabalho com recurso a um medidor de radiação ionizante marca ALNOR, modelo RDS 120. Em cada local de trabalho foram efetuadas várias medições em dias diferentes registando-se os valores indicados no Anexo E. Esses valores foram processados estatisticamente, obtendo-se os resultados globais indicados na Tabela 7.

Local da medição	Valor medido ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Desvio Padrão	Valor M+2 DP ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Dose Anual 2000 horas (mSv)	Condições da Zona de Trabalho
Armazém de MP matéria-prima	0,89	0,20	1,29	2,57	Sem produção
Transportadores	0,60	0,22	1,03	2,28	Sem produção
Moagem e Peneira	0,89	0,30	1,49	2,97	Sem produção
Armazenamento do produto final	0,99	0,32	1,62	3,24	Sem produção

Tabela 7- Valores de radiação externa gama nos locais de trabalho

Na Figura 94, os mesmos valores são apresentados na forma de gráfico onde podem ser comparados com o valor de referência indicado (1 mSv/ano).

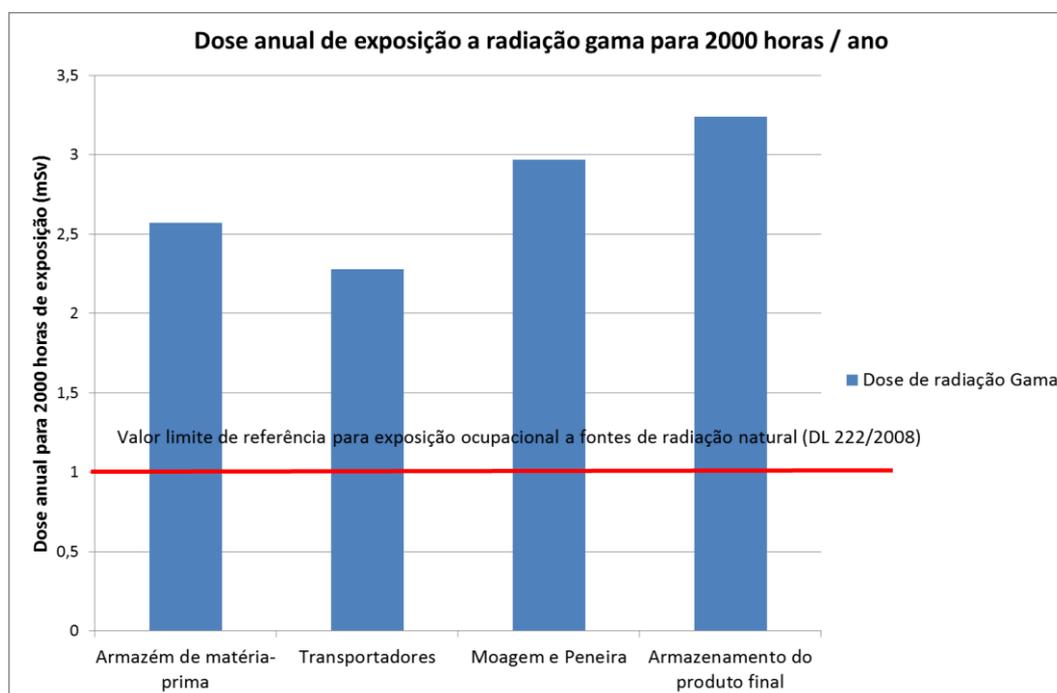


Figura 94 - Dose anual de exposição a radiação gama para 2000 horas / ano

O valor de referência assinalado (1  $\mu\text{Sv}$ ) está indicado no Decreto-Lei nº 222/2008, de 17 de Novembro de 2008, para trabalhadores não treinados e para o público em geral. Verifica-se assim que nos locais medidos os níveis de radiação gama existentes podem exceder, para

2000 horas de exposição anual, os limites estabelecidos para trabalhadores não treinados e para o público em geral.

Os valores apresentados na Tabela 7, sobre a radiação externa gama nos locais de trabalho avaliados, indicam que nas zonas de expedição e manipulação dos fosfatos secos, a dose anual de exposição à radiação externa gama de alguns trabalhadores pode chegar a 2,97 mSv /ano, excedendo assim o limite estabelecido de 1 mSv /ano e como tal devem ser considerados trabalhadores profissionalmente expostos a radiações ionizantes de acordo com a legislação portuguesa (Decreto-Lei nº 222/2008 de 17 de Novembro de 2008).

A localização dos pontos de medida da taxa de dose de radiação externa gama está indicada na planta apresentada na Figura 95. No Anexo D encontram-se as plantas da fábrica e no Anexo E estão indicados os resultados das medições efetuadas.

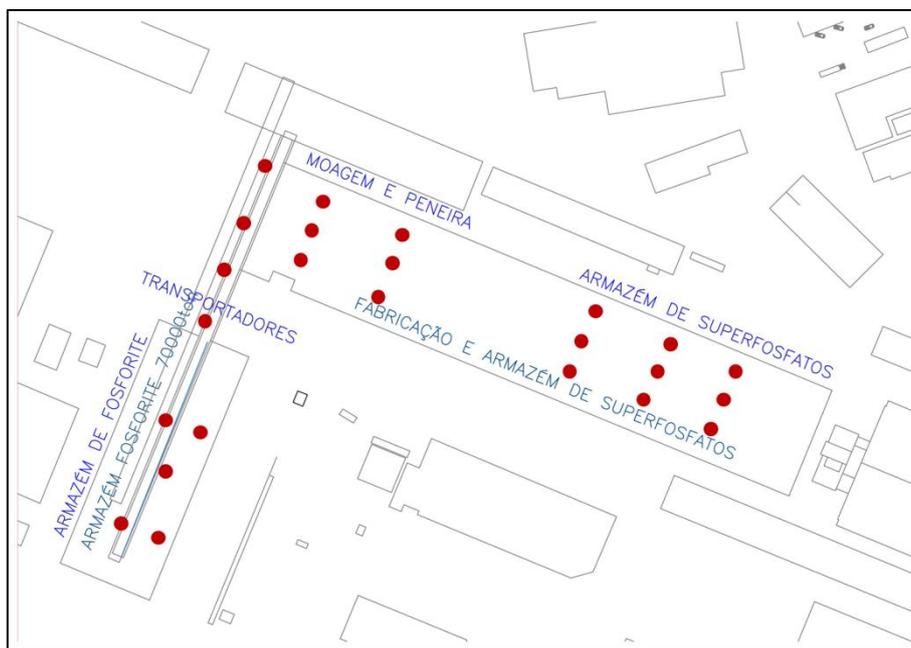


Figura 95 - Localização dos valores medidos de radiação externa

### Dosimetria individual de radiação externa gama

Para verificação dos resultados obtidos anteriormente, foi realizada uma medição da dose de radiação externa gama a que está exposto um trabalhador que opera na Zona de Moagem, através de um dosímetro digital com leitura direta no ecrã Marca AUTOMESS Modelo ADOS sensível à radiação X e gama. Esta dosimetria individual foi realizada no período de 18 a 22 de Maio de 2009, com um total de 40 horas de exposição à radiação ionizante proveniente da fosforite. A dose total medida durante esse período foi de 39  $\mu$ Sv. O valor obtido nesta dosimetria, o cálculo da taxa de dose e a estimativa da dose anual estão indicados na Tabela 8.

Local da medição	Valor medido ( $\mu$ Sv)	N.º de horas	Taxa de Dose ( $\mu$ Sv/h)	Dose anual em 2000 horas (mSv)
Zona de Moagem	39	40	0,98	1,950

Tabela 8 - Valores de dosimetria gama dos trabalhadores

Para este trabalhador a dose anual estimada de exposição à radiação externa gama pode atingir cerca de 2 mSv/ano, o que supera a dose estipulada para um trabalhador não treinado, para trabalhadores particularmente sensíveis (grávidas, e menores de idade) e para o público em geral.

O valor indicado na Tabela 8 para a taxa de dose na Zona de Moagem (0,98  $\mu$ Sv/h) é consistente com o obtido por medição direta da radiação gama no mesmo local (0,89 $\mu$ Sv/h), indicado na Tabela 7. Importa realçar que em situações de trabalho com movimentação do trabalhador dentro e fora da zona de maior exposição (diferente tempo de exposição e diferente proximidade com os produtos manipulados) a dose recebida pelo trabalhador pode variar significativamente.

Na situação medida constata-se que de acordo com Decreto-Lei 222/2008 este trabalhador está exposto a um nível de radiação externa gama superior ao máximo permitido para trabalhadores não vigiados em termos médicos.

#### **4.4 Avaliação da dose de radiação proveniente do radão**

Como já foi referido anteriormente, o radão é um gás inerte radioativo, produzido pelo decaimento do urânio natural que ocorre em rochas e solos em toda a crosta terrestre, sendo responsável por uma dose significativa de radiação a que os trabalhadores poderão estar expostos. O processo de formação do radão e dos seus descendentes radioativos está ilustrado na Figura 10, página 21. No caso das fosforites analisadas laboratorialmente, constatou-se uma forte presença de  $^{226}\text{Rd}$ , que é o elemento progenitor direto do radão, pelo que seria previsível que ocorresse uma concentração elevada de radão nos espaços fechados onde existisse um armazenamento significativo de fosforite ou dos seus produtos derivados.

Geralmente, o radão escapa-se para o ar livre e é diluído rapidamente na atmosfera, permanecendo em concentrações baixas, não sendo por isso fonte de grande preocupação. No entanto, em espaços fechados ou pouco ventilados, como os existentes na indústria estudada, o radão poderá acumular-se atingindo concentrações elevadas que poderão ser prejudiciais para a saúde dos trabalhadores. Importa aqui relembrar que o radão interior foi indicado pela APA como sendo a segunda principal causa de câncer de pulmão depois do hábito de fumar tabaco.

O radão é um emissor de radiação alfa com uma semivida de 3,8 dias, que decai numa série de descendentes de curta duração, nomeadamente  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{214}\text{Po}$  (ilustrado no Quadro 3, página 24). Uma certa fração desses descendentes associam-se a poeiras e a aerossóis sendo inalados pelos trabalhadores expostos, podem ser depositados nos pulmões e conseqüentemente podem bombardear o tecido pulmonar sensível com radiação alfa fortemente energética. A exposição continuada durante um período de tempo longo pode levar a transformações malignas nos tecidos e à formação de câncer pulmonar.

A concentração de radão na atmosfera é medida em becquerel por metro cúbico ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) e indica-nos a atividade radioativa (número de desintegrações por segundo) presente num metro cúbico dessa atmosfera.

Neste estudo, pretende-se obter a dose equivalente de radiação que tem o mesmo efeito biológico destruidor que uma dose igual de radiação gama. Pretende-se conhecer qual a

dose de radiação proveniente do radão (em sievert), ponderando o fator de qualidade da radiação (20 para partículas alfa) e o tecido afetado pela radiação (pulmões 0,12). Sendo a concentração de radão e a dose de radão duas grandezas físicas diferentes, é necessário usar um fator de conversão para determinar a dose de radão, conhecida a concentração do radão numa determinada atmosfera.

### Medição da concentração de radão nos locais de trabalho

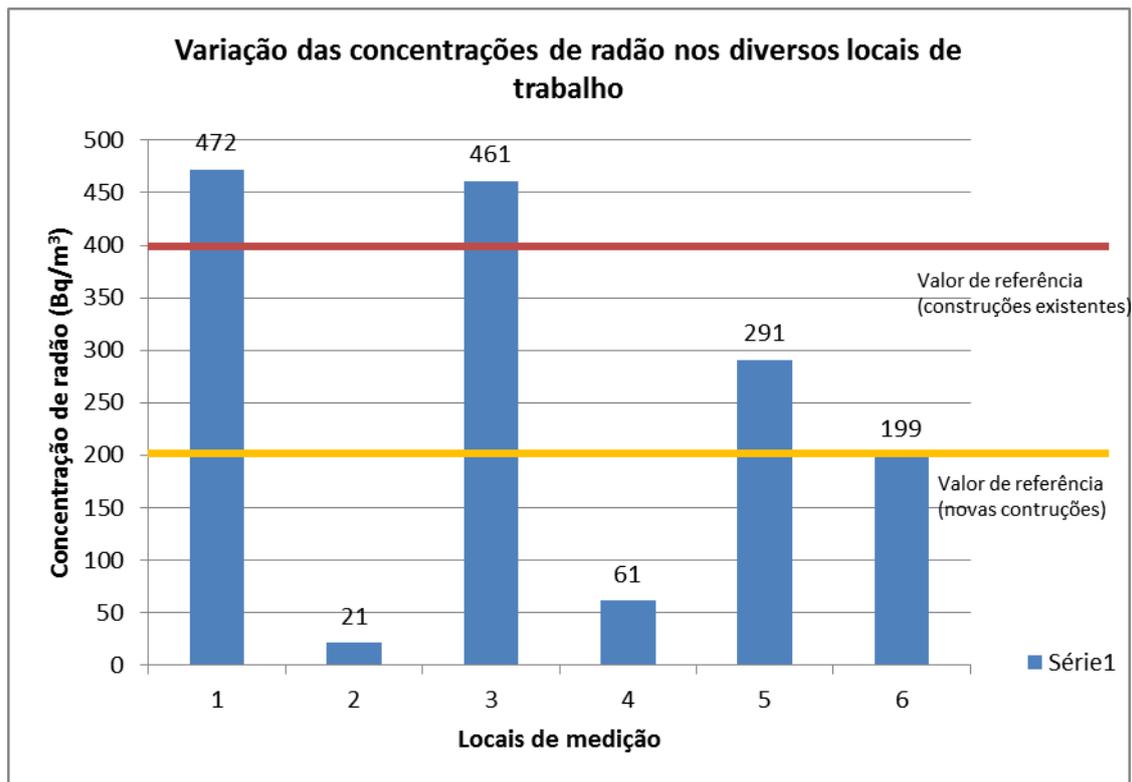
Numa primeira fase, foram efetuadas medições rápidas da concentração de radão na atmosfera, nas zonas onde se previam maiores concentrações do gás radioativo e simultaneamente tinham uma ocupação significativa de trabalhadores. Estas medições foram realizadas com recurso a um equipamento de deteção de radão, marca DURRIDGE, modelo RAD7, de leitura direta e equipado com filtro de secagem do ar, com períodos de amostragem de 5 minutos. Esta medição está ilustrada na Figura 62, página 104.

Numa segunda fase, realizaram-se medições mais rigorosas com recurso a detetores de traços nucleares, como ilustrado na Figura 64, página 105. Os detetores foram instalados e recolhidos após 29 dias de exposição nos locais de trabalho sendo posteriormente enviados para o ITN para determinação da concentração do radão nos espaços avaliados. Os resultados obtidos nas medições efetuadas estão indicados na Tabela 9.

Nº do Dosímetro	Descrição do Local	Tipo de Permanência de Trabalhadores	Valor (Bq/m <sup>3</sup> )
1	Fundo do túnel do transportador de entrada da fosforite (matéria prima)	Cerca de 20 entradas por dia em 3 turnos para operações de manutenção de rotina	472
2	Armazém da fosforite (matéria prima)	Ocupação 6 horas por dia	21
3	Sala de controlo do processo industrial	Ocupação 24 horas por dia em 3 turnos	461
4	Transportador de alimentação dos moinhos - 1º Piso	Ocupação 2 horas diárias	61
5	Elevador da fosforite grossa - 1º Piso	Ocupação 2 horas diárias	291
6	Transportador de alimentação do armazém da fosforite - 2º Piso	Ocupação 2 horas diárias	199

**Tabela 9 - Concentração do radão nos espaços avaliados**

Os mesmos valores são apresentados na forma de gráfico na Figura 96 onde podem ser comparados com os valores de referência indicados.



**Figura 96 - Variação das concentrações de radão nos diversos locais de trabalho**

Os valores de referência assinalados estão indicados no Decreto-Lei 79/2006 e na Diretiva 90/143/EURATOM. Verifica-se que em vários locais medidos os níveis de radão presentes podem exceder os limites máximos indicados na legislação.

Os níveis de ação para o radão em locais de trabalho nos diferentes países europeus, indicados no Quadro 6, apontam no sentido de que não deva ser excedido o valor 200 Bq/m<sup>3</sup>. A União Europeia (Diretiva 90/143/EURATOM) recomenda que para habitações já construídas (antes de 1996) as concentrações médias anuais não ultrapassem os 400 Bq/m<sup>3</sup> e que para futuras construções os níveis de radão sejam mantidos abaixo dos 200 Bq/m<sup>3</sup>.

### **Correlação entre o radão e o empoeiramento nos locais de trabalho**

Como já foi referido anteriormente, existe um risco particularmente elevado para a saúde dos trabalhadores, derivado da exposição a radiações alfa provenientes da inalação e ingestão de radão e dos seus descendentes radioativos. Esse risco é significativamente ampliado quando nessa mesma atmosfera existem níveis elevados de poeiras respiráveis.

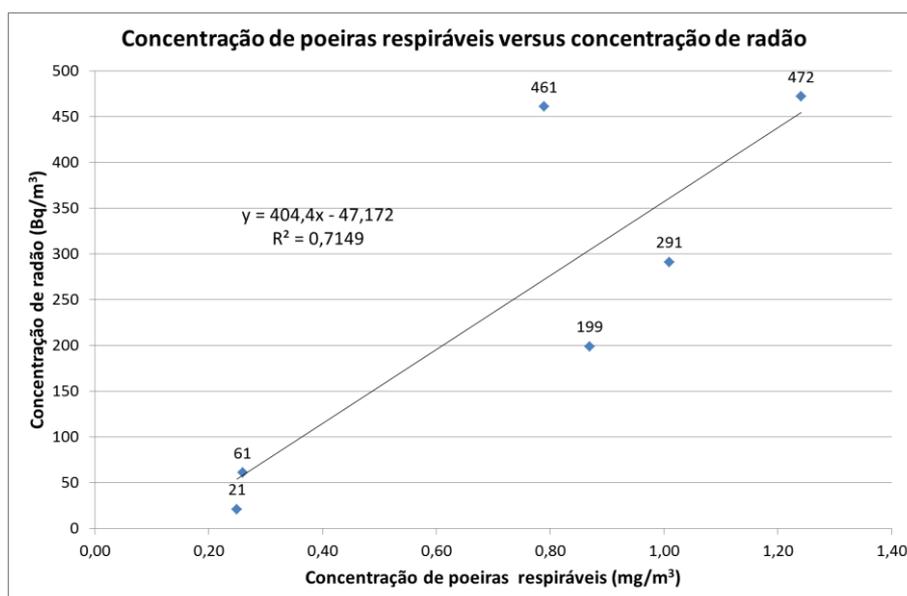
Está estabelecida claramente na literatura uma relação causa efeito demonstrável entre a inalação de radão e dos seus descendentes radioativos e o desenvolvimento de câncer pulmonar em trabalhadores expostos, tornando-a na segunda causa logo a seguir ao tabagismo.

Como já referido anteriormente, o problema principal do radão na saúde resulta da inalação dos seus descendentes radioativos de vida curta (<sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Pb, <sup>214</sup>Bi e <sup>214</sup>Po) já que possuem uma atividade radiológica importante. Se os locais de trabalho não são mantidos livres de poeiras, os produtos do decaimento radioativo referidos (polónio, bismuto e chumbo radioativo) associam-se às poeiras existentes no ar e são inalados e depositam-se ao longo

do sistema respiratório. A radiação alfa associada pode provocar danos irreparáveis nos tecidos dos pulmões, incluindo o desenvolvimento de neoplasmas.

De igual modo, a ingestão de partículas de poeira associadas aos produtos do decaimento radioativo do radão pode provocar a deposição dessas poeiras ao longo do sistema digestivo com o conseqüente bombardeamento dos tecidos sensíveis do estomago com as partículas alfa altamente energéticas.

Assim, para avaliar melhor a existência desse risco analisou-se a coincidência nos mesmos locais entre os níveis de concentração de poeiras e os níveis de concentração de radão na atmosfera, obtendo-se o gráfico indicado na Figura 97.



**Figura 97 - Correlação entre poeiras respiráveis e radão na atmosfera**

O R-quadrado da regressão ( $R^2$ ) é uma função direta da correlação entre as duas variáveis, sendo que um valor próximo de um indica uma forte relação entre as duas variáveis. Sendo o valor de  $R^2$  igual a 0,71 (indicado na Figura 97), pode-se concluir que existe uma coincidência espacial muito significativa entre a existência de radão na atmosfera e níveis elevados de empoeiramento com partículas respiráveis, aumentando significativamente o risco para a saúde dos trabalhadores expostos.

### **Conversão da concentração de radão para dose de radão**

Para contabilizar os efeitos da soma da radiação externa gama e da radiação proveniente do radão no trabalhador, torna-se necessário, como já referido, efetuar a conversão dos valores de concentração de radão ( $Bq/m^3$ ) para os valores de dose efetiva de radão (Sv).

Relativamente ao fator de conversão a utilizar, existem ainda algumas incertezas, com valores de conversão significativamente diferentes dados pela análise epidemiológica e pela análise dosimétrica. O valor indicado na legislação portuguesa (Decreto-Lei nº 222/2008) é de 1,4 Sv por  $J.h.m^3$  que convertido corresponde a cerca de 6,7 nSv por  $Bq.h.m^{-3}$ .

O fator de conversão recomendado no relatório (UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 2000) é de 9 nSv por  $Bq.h.m^{-3}$  e leva em consideração o

fator de qualidade da radiação alfa de  $W_r=20$  e a ponderação da dose para os tecidos do pulmão de  $W_T=0,12$ .

Por exemplo, para o valor registado de concentração de radão,  $461 \text{ Bq/m}^3$ , supondo uma exposição ocupacional anual dos trabalhadores expostos de 2.000 horas, um fator de equilíbrio do radão de 0.4 e um fator de conversão de 9 nSv por  $\text{Bq.h.m}^{-3}$  a dose efetiva estimada para um ano de exposição ao radão seria de 3,4 mSv/ano de acordo com a Equação 10:

$$D_e = C_i \times F_c \times F_e \times N_{ex} \quad \text{Equação 10}$$

onde,

$D_e$  - Dose Efetiva

$C_i$  - Concentração de Radão ( $\text{Bq/m}^3$ )

$F_c$  - Fator de Conversão = 9 nSv por ( $\text{Bq.h.m}^{-3}$ )

$F_e$  - Fator de Equilíbrio do radão = 0.4 (valor assumido para ambientes interiores)

$N_{EX}$  - Nº Horas de exposição (h)

Assim, para uma concentração de radão de  $461 \text{ Bq/m}^3$  obtêm-se uma dose efetiva de,

$$D_e = 461 \times 9 \times 10^{-9} \times 0,4 \times 2000 = 3,3 \text{ mSv/ano}$$

### Utilização de programa de cálculo da dose de radão

Para o cálculo da dose de radiação proveniente do radão (mSv), conhecida a sua concentração no ar em  $\text{Bq/m}^3$ , foi usado também um programa de cálculo disponibilizado em (Wise Uranium Project, 2011).

Neste caso, foi considerado o fator de conversão de 12 mSv/WLM usado para trabalhadores expostos, seguindo uma recomendação mais recente (Marsh, 2010) obtendo-se os valores indicados na Figura 98. O fator WLM (Working Level Month) é uma unidade de exposição usada geralmente para indicar a exposição laboral ao radão e corresponde a uma exposição mensal de um  $\text{WL}^{14}$  durante 170 horas.

---

<sup>14</sup> 1 WL (Working Level) define-se como qualquer combinação de descendentes do radão de semivida curta, num litro de ar, com potencial para emitir partículas alfa com uma energia de  $1.3 \times 10^5 \text{ MeV}$  durante o decaimento do radão até ao Chumbo 210. 1 WL é equivalente a  $3746 \text{ Bq/m}^3$  de  $^{222}\text{radão}$  em equilíbrio com os produtos do decaimento de semivida curta.

Radon-222 Input Data			
Number	Unit	Equilibrium Factor	Risk Factor
401	<input checked="" type="radio"/> Bq/m <sup>3</sup>	<input checked="" type="radio"/> indoors/work: <input type="text" value="0.4"/>	<input type="text" value="0.0005"/> per WLM
	<input type="radio"/> pCi/l		
	<input type="radio"/> MBq/h(m <sup>3</sup> a)	<input type="radio"/> outdoors: <input type="text" value="0.1"/>	
	<input type="radio"/> Bq/m <sup>3</sup> EEC		
	<input type="radio"/> pCi/l EEC		
	<input type="radio"/> μJ/m <sup>3</sup>		
	<input type="radio"/> nJ/m <sup>3</sup>		
	<input type="radio"/> MeV/cm <sup>3</sup>		
	<input type="radio"/> WL		
	<input type="radio"/> WLM/a		
<input type="radio"/> mJh/(m <sup>3</sup> a)			
<input type="radio"/> MBqh/(m <sup>3</sup> a) EEC			
Occupancy and Dose Factor			
<input checked="" type="radio"/> worktime: <input type="text" value="2000"/> h/year for <input type="text" value="40"/> years, at worker's dose factor of <input type="text" value="12"/> mSv/WLM			
<input type="radio"/> indoor occupancy: <input type="text" value="80"/> % of year		<input type="radio"/> for <input type="text" value="70"/> years, at public's dose factor of <input type="text" value="6"/> mSv/WLM	
<input type="radio"/> outdoor occupancy: <input type="text" value="20"/> % of year			
<input type="radio"/> continuous			
<b>Result:</b>	Dose rate = 3.474 μSv/h Annual dose rate = 6.948 mSv/a (0.979 WLM/a) Cumulative dose = 277.9 mSv (23.16 WLM) Excess lifetime cancer risk = 1.1508 (1 : 86.34)		

**Figura 98 - Resultados do programa de conversão de concentração em dose de radão**

Usando este critério para o cálculo da dose de radiação recebida, obtêm-se valores significativamente mais elevados de exposição, designadamente uma dose anual de 6,9 mSv/ano.

Pode ainda observar-se através dos resultados obtidos no programa de cálculo (Figura 98), que um trabalhador com este nível de exposição poderá receber uma dose acumulada de 278 mSv para 40 anos de vida profissional ativa, com um aumento de probabilidade de indução de câncer de cerca de 1,2% (1: 86,34).

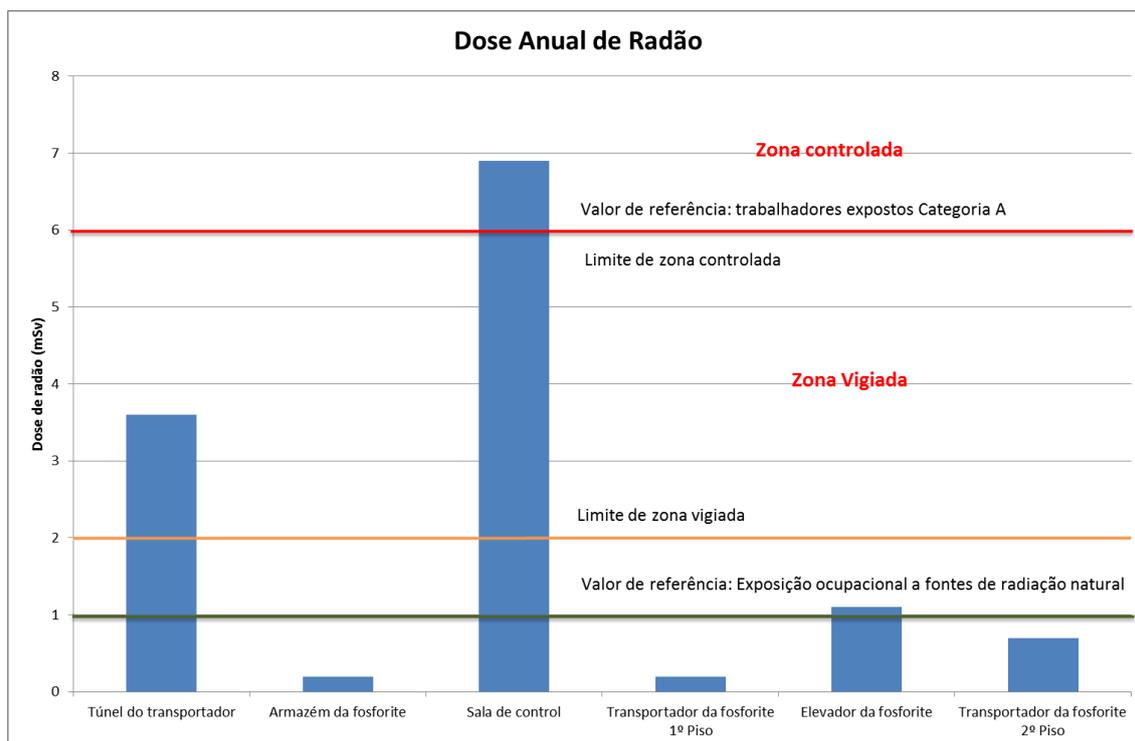
De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que existem trabalhadores que podem estar expostos a valores de dose efetiva superiores a 6 mSv/ano, mesmo considerando apenas o efeito da exposição ao radão. De acordo com a legislação portuguesa (Decreto-Lei nº 222/2008 de 17 de Novembro de 2008) os trabalhadores expostos a esses níveis de radiação devem ser considerados trabalhadores expostos a radiações ionizantes de Categoria A (a de mais elevada exposição) e a zona deve ser classificada como zona controlada em termos radiológicos.

Efetuando o mesmo cálculo para os valores de concentração de radão medidos nos vários locais de trabalho, estimando para cada situação o nº de horas diárias de permanência dos trabalhadores no local e usando o fator de conversão 12 mSv/WLM atrás indicado, obtêm-se os resultados indicados na Tabela 10.

Local de Trabalho	Nº estimado de horas de permanência		Dose de Radão (mS/ano)	Fator de Risco (%)
	Por dia	Por ano		
Fundo do túnel do transportador de entrada da fosforite (matéria prima)	4	1000	3,6	0.6
Armazém da fosforite (matéria prima)	6	1500	0,2	0.04
Sala de controlo do processo industrial	8	2000	6,9	1.2
Transportador de alimentação dos moinhos - 1º Piso	2	500	0,2	0.04
Elevador da fosforite grossa - 1º Piso	2	500	1,1	0.2
Transportador de alimentação do armazém da fosforite - 2º Piso	2	500	0,7	0.1

**Tabela 10 - Cálculo da dose de radão e do fator de risco associado**

Os mesmos valores são apresentados na forma de gráfico na Figura 99 onde podem ser comparados com os valores de referência indicados.



**Figura 99 - Dose anual de radão e valores de referência**

Em consequência dos valores estimados, a entidade empregadora deve promover a monitorização por dosimetria individual com uma periodicidade mensal e a vigilância médica que permita a determinação do estado de saúde dos trabalhadores relativamente à sua aptidão para desempenhar as suas funções. Por outro lado, sempre que a realização de

trabalhos implique uma exposição a fontes de radiação natural da qual possa resultar uma dose efetiva anual superior a 1 mSv para os trabalhadores, esses devem ser considerados trabalhadores expostos, aplicando-se todos os requisitos de vigilância, monitorização e proteção radiológica referidos no decreto-lei nº 222/2008.

### **Exposição ao radão em operações de manutenção**

Em operações de manutenção, reparação e limpeza realizadas no interior de vários equipamentos, designadamente dentro do reator e dos moinhos com espaços muito confinados, os níveis de radão podem aumentar de forma muito significativa devido a falta de arejamento. Tratando-se de exposições intensas, mas de curta duração não é possível efetuar medições com detetores passivos de traços nucleares, para os quais é necessário tipicamente um tempo acumulado de exposição de 1 a 3 meses.

O efeito da concentração elevada do radão, combinado com uma forte concentração de poeiras no ar, aumenta exponencialmente o risco para os trabalhadores envolvidos nas tarefas de limpeza. Como já foi referido anteriormente, é sabido que o risco radiológico associado ao radão, deve-se sobretudo aos seus descendentes sólidos formados no ar e que se agarram às partículas de pó, que sendo posteriormente inaladas irradiam os tecidos internos do pulmão com radiação alfa.

Em operações de manutenção e limpeza de equipamentos (ilustrado na Figura 100), realizadas por trabalhadores internos ou externos, o nível total de exposição a radiação externa e interna (poeiras inaladas, ingeridas ou absorvidas por feridas e radão) pode superar facilmente o valor de 1 mSv /ano. Neste caso esses trabalhadores devem ser protegidos dessas radiações e sujeitos a vigilância médica adequada.

Importa referir que os valores apresentados podem não ser totalmente representativos da realidade do funcionamento da fábrica, podem estar estimados por defeito, já que a fábrica se encontrava em laboração reduzida e a matéria-prima e o produto final armazenado era da ordem dos 20% da sua capacidade habitual.



**Figura 100 - Operação de manutenção de um transportador de fosforite em espaço pouco ventilado**

(Foto do autor)

### **Exposição ao radão em operações de remoção do fosfogesso**

Existe no exterior das instalações um aterro de fosfogesso (Figura 29, página 74) onde os níveis de radiação gama são também significativos, pelo que qualquer trabalho de manipulação desse resíduo envolve um risco elevado de exposição para os trabalhadores envolvidos. Existe igualmente uma libertação significativa de radão proveniente da pilha de fosfogesso, especialmente quando manipulado mecanicamente, pelo que a permanência no local e a conseqüente inalação de poeiras ou gases libertados na zona pode envolver um risco acrescido de exposição a radiação ionizante.

Neste caso, o tempo de exposição é difícil de determinar pois não se trata de um local de trabalho permanente mas onde se poderão realizar trabalhos de limpeza, manutenção ou recuperação ambiental com duração muito variável. De forma prudente este local deverá ser referenciado como sendo de risco radiológico significativo e devem ser efetuadas, caso a caso, avaliações da exposição dos trabalhadores às radiações ionizantes.

#### **4.5 Estimativa da Dose Total**

Pretende-se nesta fase estimar a dose de radiação correspondente aos efeitos acumulados da radiação externa gama e da exposição ao radão. Para estimar a dose de radiação total a que poderão estar expostos os trabalhadores devem ser considerados os seguintes fatores:

1. Atividade dos radionuclídeos presentes nas poeiras existentes no ar (valores medidos).
2. Concentração de poeiras existentes no ar nos locais de trabalho (valores medidos).
3. Quantidade média de ar inalada pelos trabalhadores e respetivo fator de conversão (obtidos na literatura).
4. Dose externa de radiação gama presente nos locais de trabalho (valores medidos).
5. Concentração de radão nas zonas de trabalho (valores medidos).
6. Número de horas de exposição aos vários tipos de contaminação (obtido por entrevistas e observação).
7. Tipo de proteção usada para as vias respiratórias (tipo de máscara respiratória, tipo de filtro, eficiência, estado de funcionamento, colocação adequada, tempo de utilização).

As medições efetuadas nos locais de trabalho permitem estimar a atividade radioativa das poeiras existentes no ar, a exposição ocupacional à radiação externa gama e a exposição ocupacional ao gás radão. A dose total de radiação a que cada trabalhador vai estar exposto, vai variar muito em função dos seus locais de trabalho de permanência, do tempo de permanência em cada local, do tipo de trabalho a realizar e das proteções individuais que o trabalhador usar.

Por observação direta do processo industrial, podemos identificar zonas de trabalho e categorias de trabalhadores com níveis de exposição muito diferentes. Temos situação de trabalhadores expostos a níveis de radiação externa gama e de empoeiramento elevados nos locais de trabalho, trabalhadores expostos a empoeiramento geral elevado resultante também de ventos de intensidade forte que se fazem sentir na zona em determinados dias do ano, trabalhadores da manutenção que podem permanecer muito tempo em áreas pouco ventiladas e com forte empoeiramento e ainda trabalhadores externos que realizam reparações e manutenções pontuais a equipamentos em zonas com elevada concentração de radão e de poeiras.

Importa também considerar a concentração de radão em espaços confinados tais como túneis, tanques, depósitos, máquinas e outros locais mal ventilados onde se encontram normalmente concentrações elevadas. Estes locais são raramente ocupados por trabalhadores em laboração normal mas podem ser ocupados por trabalhadores em operação de manutenção, limpeza e reparação de equipamentos.

A dose total de radiação a que o trabalhador está exposto pode ser calculada a partir da soma das diferentes doses recebidas: por inalação, ingestão e absorção por feridas de poeiras com radionuclídeos, inalação de radão e dos seus descendentes de semivida curta e radiação externa, como pode ser representado esquematicamente na Figura 101.

De acordo com (Birky et al., 1998), para estimar a dose de radiação por inalação de poeiras radioativas a que podem estar expostos os trabalhadores poderá assumir-se que o valor médio de ar ventilado pelos trabalhadores é de 35 l/min, com um valor máximo para um

trabalho pesado de 85 l/min e 13 l/min para um trabalho leve. Seria também necessário levar em consideração o fator de proteção introduzido pela utilização de máscaras contra poeiras e névoas cobrindo o nariz e a boca com um fator de proteção máximo de dez.



**Figura 101 - Contributos de radiação para a Dose Efectiva Total Equivalente**

Neste estudo, apenas se vai considerar o contributo das doses de radiação recebidas por radiação externa gama e por inalação de radão, já que as doses de radiação por inalação e absorção pela pele e por feridas são difíceis de estimar e supõe-se que o seu contributo para a dose total seja menos significativo. No entanto, como a contaminação radioativa por ingestão e através de feridas está presente nesses locais de trabalho, deve recomendar-se aos trabalhadores, para a sua proteção, que não ingiram comida ou bebidas em zonas de elevado empoeiramento e mantenham as feridas convenientemente protegidas dos produtos que manipulam.

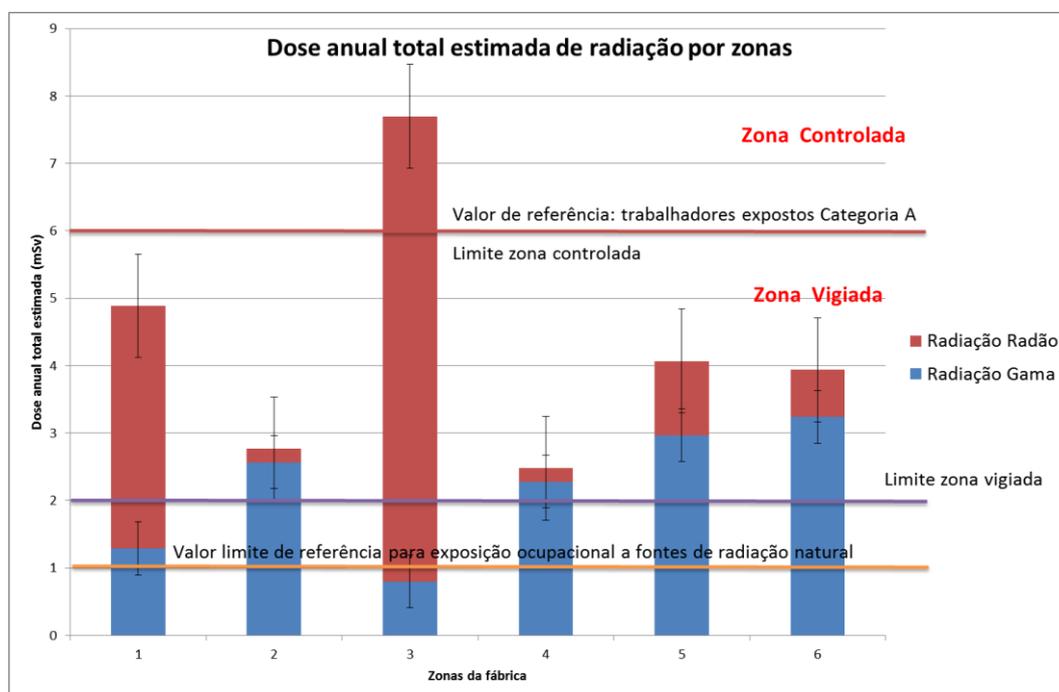
Considerando apenas a dose devida à radiação externa gama e à radiação alfa proveniente da exposição ao radão, temos na situação limite a soma das duas doses conduzindo aos resultados indicados na Tabela 11.

Zona	Nome do Local	Dose de radiação gama (mS/ano)	Dose de radiação radão (mS/ano)	Dose radiação total (mS/ano)
1	Túnel do transportador	1,29	3,6	4,89
2	Armazém da matéria-prima fosforite	2,57	0,2	2,77
3	Sala de controlo	0,8	6,9	7,7
4	Transportadores da fosforite	2,28	0,2	2,48
5	Elevador da fosforite / Moagem e Peneira	2,97	1,1	4,07
6	Armazenamento do produto final /Transportador	3,24	0,7	3,94

**Tabela 11 - Dose anual estimada de radiação para as várias zonas da fábrica**

Os valores calculados e apresentados na Tabela 11, relativos à estimativa de dose total recebida pelos trabalhadores (excluindo o contributo de dose de radiação recebida por inalação de poeiras radiativas e por absorção pela pele e por feridas) mostram que o nível de radiação presente nestes locais de trabalho pode ser significativamente perigoso para a saúde dos trabalhadores, podendo atingir um valor máximo de 7,7 mSv/ano.

Os mesmos valores são apresentados na forma de gráfico na Figura 102 onde podem ser comparados com os valores de referência indicados.



**Figura 102 - Dose anual estimada de radiação para as várias zonas da fábrica**

A título meramente ilustrativo, estão incluídas no gráfico apresentado as barras de erro correspondentes ao erro padrão que poderá ser assumido no cálculo da dose total.

As 6 zonas analisadas ultrapassam o valor limite de referência de 1 mSv/ano para a exposição ocupacional a fontes de radiação natural referido no decreto-lei 222/2008. Isto significa que estes trabalhadores que nelas trabalham devem ser considerados trabalhadores profissionalmente expostos. Atendendo a que também ultrapassam o limite de 2 mSv/ano, essas zonas devem ser consideradas zonas vigiadas em termos radiológicos.

A zona 3 correspondente a sala de controlo ultrapassa o limite de 6 mSv/ano, devendo ser considerada zona controlada em termos radiológicos.

#### 4.6 Dados epidemiológicos

A título ilustrativo, apresenta-se o cálculo do aumento do risco de câncer ao longo da vida profissional de 40 anos (*ELCR - Excess Lifetime Cancer Risk*) devido à dose de radiação recebida por um trabalhador. De acordo com (ICRP (International Commission on Radiological Protection), 1990) para efeitos estocásticos, o aumento de risco de câncer fatal é de 0,04 por Sievert por ano para um trabalhador exposto a radiações ionizantes. Assim por exemplo, no caso da sala de controlo com uma dose de radiação ionizante de 7,7 mSv/ano e para 40 anos de exposição, obtemos um aumento do risco de câncer dado por:

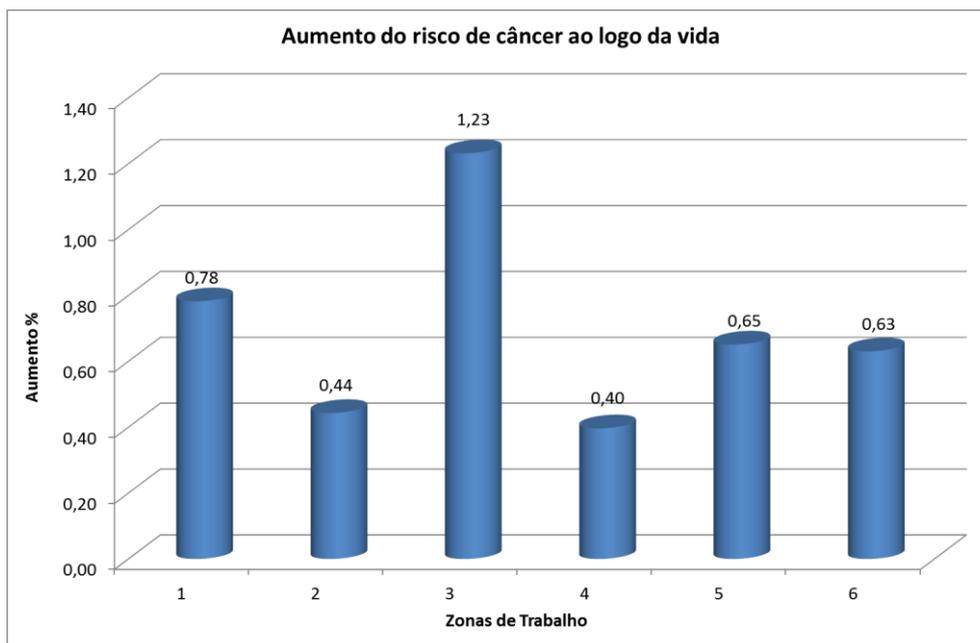
$$ELCR = 7,7 \times 0,04 \times 40 \text{ anos} = 1,23 \%$$

Efetuada o mesmo cálculo para os valores de dose estimados para as várias zonas de fabrico, obtêm-se os aumentos percentuais do risco de câncer ao longo da vida indicados na Tabela 12.

Nome do Local	Dose total de radiação (mS/ano)	Aumento do risco de câncer ao longo da vida (%)
Túnel do transportador	4,89	0,78
Armazém da matéria-prima fosforite	2,77	0,44
Sala de controlo	7,7	1,23
Transportadores da fosforite	2,48	0,40
Elevador da fosforite / moagem e peneira	4,07	0,65
Armazém produto final / transportador	3,94	0,63

**Tabela 12 - Aumento percentual do risco de câncer ao longo da vida**

Os mesmos valores são apresentados na forma de gráfico na Figura 103, onde se pode observar que os locais de trabalho de maior risco são as zonas da sala de controlo, junto aos transportadores da fosforite em pó e na zona de moagem e peneira, que coincidem com as zonas de elevado empoeiramento.



**Figura 103 - Aumento do risco de câncer ao logo da vida (%)**

Dados epidemiológicos recolhidos na literatura consultada sugerem também um maior risco de câncer do pulmão em trabalhadores que trabalham nas zonas de receção e secagem das matérias-primas, locais onde foram encontrados valores mais elevados de radiação e de poeiras.

De acordo com os dados fornecidos pela Medicina do Trabalho da empresa, não existem nos últimos cinco anos taxas de incidência anormais de doenças do foro respiratório graves, mas sim existem taxas de incidência significativamente elevadas de câncer de estomago não fatais entre os trabalhadores da empresa. No entanto é importante ter em consideração que os trabalhos de maior risco de exposição a radiações por inalação e absorção de poeiras, como sejam, trabalhos de limpeza, reparação e manutenção de equipamentos e das instalações industriais são realizados por pessoal externo à empresa que não são observados pela medicina ocupacional da empresa.

Assim, qualquer estudo epidemiológico que seja realizado apenas com os dados da empresa poderá conduzir a resultados sem significado, já que os dados médicos dos trabalhadores envolvidos em trabalhos de maior risco não estão incluídos. Acresce referir que estes trabalhadores externos geralmente não estão convenientemente informados sobre os riscos a que estão expostos e consequentemente não usam as proteções adequadas das vias respiratórias.

#### **4.7 Medidas de Prevenção e Proteção**

As medidas de controlo das radiações ionizantes a desenvolver têm como principal objetivo a manutenção dos níveis de exposição "tão baixos quanto razoavelmente possível," de acordo com o princípio já anteriormente referido ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*). Assim, toda e qualquer atividade que envolva exposição a radiações ionizantes, deverá decorrer tendo em consideração os seguintes aspetos:

Os diferentes tipos de atividade que envolvam exposição deverão ser previamente justificados pelos benefícios que acarretam;

Toda a exposição ou contaminação injustificada de pessoas ou do ambiente deverá ser evitada ao máximo;

Os níveis de exposição deverão ser sempre tão baixos quanto possível em cada momento e deverão ser sempre inferiores aos valores-limite legislados ou recomendados pelos organismos internacionais de proteção radiológica.

Considera-se essencial e de extrema importância a vigilância de saúde para os trabalhadores expostos a radiações ionizantes, tanto nos exames de admissão e periódicos, como nos ocasionais, nomeadamente em situação de exposição accidental.

A proteção radiológica dos trabalhadores face à radiação interna pode conseguir-se evitando a inalação ou a ingestão de gases ou poeiras radioativas. Os locais de trabalho devem ser mantidos livres de poeiras e fumos, convenientemente arejados e tanto quanto possível livres de fontes radioativas que possam produzir radão.

Deve-se também reduzir tanto quanto possível o tempo de exposição dos trabalhadores às poeiras radioativas a fim de reduzir a dose total recebida.

Os trabalhadores não devem ingerir comida ou bebidas em zonas contaminadas por radiação e devem manter as feridas convenientemente protegidas dos produtos que manipulam. Deverão também usar luvas adequadas na manipulação dos produtos manufaturados não só pela possibilidade de absorção de substâncias radioativas através de feridas como também devido ao contacto com os ácidos.

Em termos de proteção individual dos trabalhadores, depois de implementadas as proteções coletivas possíveis, é adequada a utilização de máscaras com filtros de proteção respiratória ou em casos extremos a utilização de equipamentos autónomos de respiração. É muito importante treinar os trabalhadores no uso correto dos filtros de proteção respiratória e encorajar o seu uso através de ações de sensibilização e de formação.

A proteção radiológica face à radiação externa pode conseguir-se através da colocação de blindagens entre a fonte de radiação e os trabalhadores expostos ou afastando tanto quanto possível os trabalhadores das fontes radioativas. Deve-se também reduzir tanto quanto possível o tempo de exposição dos trabalhadores às fontes radioativas a fim de reduzir a dose total recebida.

De acordo com o conhecimento científico existente e com a realidade observada na atividade da indústria é possível implementar com facilidade medidas de prevenção e de proteção com vista à redução da exposição.

#### **4.8 Ações a implementar**

As ações a implementar para a prevenção e proteção da exposição a radiações ionizantes devem incluir as seguintes:

- Efetuar controlos radiológicos, medindo em laboratório a atividade radioativa das matérias-primas (fosforites) recebidas das diversas proveniências, evitando sempre que

possível, a utilização de matérias-primas com níveis excessivos de radioatividade (ver 4.1. - Atividade radiológica dos produtos manipulados, página 128);

- Aplicar técnicas de engenharia no desenho das instalações e no processo de fabrico que reduzam o empoeiramento, facilitem a ventilação e a renovação do ar;
- Garantir uma manutenção adequada dos filtros dos equipamentos de AVAC (Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado) e cuidados adicionais no seu posterior manuseamento após contaminação radioativa;
- Implementar medidas organizativas que reduzam o tempo de permanência desnecessário dos trabalhadores em locais de maior risco de exposição radiológica;
- Promover a utilização pelos trabalhadores de máscaras filtrantes para proteção das vias respiratórias, convenientemente ajustadas, do tipo indicado na Figura 104 sempre que ocorra empoeiramento significativo com poeiras radioativas, quer devido aos trabalhos realizadas quer devido a condições meteorológicas de vento forte. Este tipo de máscara filtrante confere tipicamente um grau de proteção das vias respiratórias de 10 (APF=10) mas não protege os olhos contra as poeiras (ver 3.8.3- Aparelhos de proteção filtrantes, página 120);



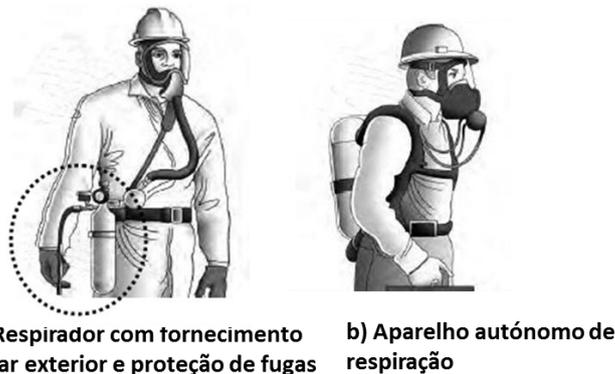
**Figura 104 - Proteção respiratória para zona de empoeiramento moderado**

- Garantir a utilização pelos trabalhadores de máscaras filtrantes de proteção respiratória, convenientemente ajustadas, do tipo indicado na Figura 105 em todos os trabalhos de manutenção e limpeza em zonas com elevada concentração de poeiras radioativas e radão (zonas pouco ventiladas). Este tipo de máscara filtrante confere tipicamente um grau de proteção das vias respiratórias de 50 (APF=50) e uma proteção adicional dos olhos contra as poeiras (ver 3.8.3- Aparelhos de proteção filtrantes, página 120). Torna-se igualmente necessário ventilar artificialmente essas zonas antes e durante a execução dos trabalhos;



**Figura 105 - Proteção respiratória para zona de empoeiramento elevado**

- Em situações de risco mais elevado, resultantes de trabalhos de manutenção e limpeza em espaços confinados, onde existam níveis de empoeiramento muito elevados, possível insuficiência de oxigênio e a presença de outros contaminantes, torna-se necessário ventilar artificialmente os locais de trabalho antes e durante a execução dos trabalhos e devem ser usados aparelhos autônomos de respiração dos tipos indicados na Figura 106. Quer o respirador com fornecimento de ar puro exterior através de um tubo e sistema de proteção de fugas (Figura 106, imagem a)) quer o aparelho autônomo de respiração (Figura 106, imagem b)), conferem tipicamente um grau de proteção das vias respiratórias de 10000 (APF=10000) e uma proteção adicional dos olhos contra as poeiras (ver 3.8.4 - Aparelhos de proteção isolantes, página 123);



**Figura 106 - Proteção respiratória para zonas com empoeiramento elevado**

- Sinalizar, com a sinalética adequada de perigo radiológico, os locais de trabalho de acordo com o risco radiológico determinado (conforme indicado em 3.8.5 - Sinalização das zonas de risco, página 124);

- Informar os trabalhadores expostos sobre os riscos radiológicos a que estão sujeitos e desenvolver um plano de formação e treino adequado para que os trabalhadores possam promover a sua própria proteção.

#### **4.9 Trabalhos Futuros**

O trabalho aqui iniciado pode ser complementado em trabalhos futuros, onde poderão ser desenvolvidos e aprofundados, entre outros, os seguintes temas:

1 - Desenvolver estudos epidemiológicos que incluam os trabalhadores internos e externos profissionalmente expostos nas empresas, com vista a verificar a existência de relação de

casualidade entre doenças do sistema respiratório e a exposição a poeiras com algum nível de radioatividade e ao gás radão em espaços pouco ventilados. Sendo os estudos epidemiológicos a principal fonte de conhecimento neste tema os parâmetros do modelo devem ser facilmente revistos em função de novos conhecimentos que venham a ser desenvolvidos no futuro.

2 - Determinar o nível de risco para cada trabalhador em função da sua exposição às diversas componentes de radiações a que estão expostos, anos de exposição e da sua suscetibilidade individual. Incluir também na avaliação do risco individual a exposição a radiações ionizantes fora do âmbito laboral, como por exemplo diagnósticos e tratamentos médicos.

3 - Construir um Sistema de Informação Geográfica (SIG) a nível do país com a localização e caracterização das atividades onde exista risco significativo de exposição laboral a radiações ionizantes de origem natural. Efetuar um inventário exaustivo de todas indústrias que processam e manipulam materiais de origem natural com níveis de radioatividade significativos, proceder à sua georeferenciação e caracterização em termos do risco para a saúde dos seus trabalhadores, público, populações vizinhas e meio ambiente. Estudar medidas para a prevenção dos riscos associados às radiações NORM, ao nível do ordenamento do território, e propor medidas de mitigação e proteção das populações contra as radiações ionizantes de baixa intensidade e o radão.

## 5 CONCLUSÕES

### 1 - Metodologia

A metodologia proposta e desenvolvida neste trabalho permitiu realizar de forma adequada a identificação e a avaliação dos riscos para a saúde dos trabalhadores, resultantes da sua exposição laboral a radiações ionizantes de origem natural. Paralelamente permitiu definir um conjunto de medidas eficazes de prevenção e de proteção da saúde dos trabalhadores expostos.

No caso de estudo apresentado, esta metodologia permitiu ainda avaliar adequadamente o efeito acumulativo dos diversos tipos de contaminação radioativa presentes, designadamente, a exposição à radiação externa gama, a inalação, a ingestão e a absorção de poeiras com isótopos radioativos e a exposição ao gás radão em ambientes de elevado empoeiramento.

Em resultado deste estudo, foi igualmente possível concluir que a metodologia desenvolvida é aplicável, com os necessários ajustes, também a outras atividades onde estejam presentes radiações ionizantes de origem natural, designadamente, estabelecimentos termais, grutas, minas, centrais térmicas a carvão e locais de trabalho subterrâneos.

### 2 - Revisão bibliográfica

Neste estudo foi efetuada uma exaustiva pesquisa bibliográfica da qual se apresenta apenas os itens mais relevantes no Capítulo 2. Nessa pesquisa foram identificados casos de níveis significativos de radiação ionizante em indústrias de fosfatos noutros países. Estes valores foram confirmados pelas medições laboratoriais realizadas neste trabalho podendo portanto afirmar-se categoricamente que a fosforite utilizada nesta indústria apresenta uma atividade radiológica significativa. Esta atividade radiológica pode variar bastante consoante a sua proveniência.

De acordo com as recomendações dos organismos internacionais de proteção radiológica e com a legislação portuguesa, os trabalhadores expostos a radiações ionizantes de origem natural devem estar sujeitos aos limites de dose fixados para o público em geral (1 mSv/ano).

A legislação portuguesa, designadamente o Decreto-Lei n.º 222/2008, indica que qualquer trabalhador que receba no seu posto de trabalho uma dose anual de radiação superior a 1 mSv deve ser considerado como trabalhador exposto. Nesta situação, devem aplicar-se ao trabalhador todos os requisitos de vigilância médica, de monitorização dos locais de trabalho e de proteção radiológica estipulados na referida legislação.

### **3 - Estudos epidemiológicos**

Os estudos epidemiológicos analisados, mostram um ligeiro aumento na taxa de incidência de câncer, mesmo para níveis de exposição a radiação externa gama baixos, menores que 20 mSv/ano. Estes resultados, associados a situações de maior sensibilidade individual de alguns trabalhadores, sugerem a possibilidade de doses baixas de exposição a radiação ionizante poderem induzir danos graves na saúde dos trabalhadores expostos.

Os estudos epidemiológicos referentes à exposição ao radão e seus descendentes radioativos mostram um significativo aumento na taxa de doenças de câncer pulmonar mesmo para níveis de exposição baixos, menores que 400 Bq/m<sup>3</sup>. Este efeito é fortemente amplificado em trabalhadores fumadores ou quando haja exposição simultânea a outras substâncias inaláveis, como por exemplo poeiras e fumos.

Neste sentido, para efetuar uma correta avaliação do risco para a saúde dos trabalhadores expostos deverá também ser considerada a existência de trabalhadores com uma maior sensibilidade às radiações, bem como os efeitos sinérgicos e acumulativos dos diversos tipos de radiação presentes no local de trabalho.

### **4 - Simulação em computador**

Os valores de taxa de dose obtidos através das medições de campo efetuadas foram semelhantes aos valores fornecidos pelo modelo utilizado, podendo assim aceitar-se a validade da aplicação deste modelo na previsão da taxa de dose de radiação externa gama.

### **5 - Resultados e análise de resultados**

O estudo efetuado no decorrer desta investigação permitiu identificar, na indústria dos adubos fosfatados, as seguintes condições de segurança e saúde no trabalho:

- a) Falta de percepção do risco por parte dos intervenientes

Nas observações efetuadas, constatou-se que os trabalhadores expostos a estas radiações ionizantes de origem natural desconhecem os riscos para a sua saúde e não são formados ou informados relativamente às medidas de prevenção e proteção radiológica adequadas, ou seja, esse perigo é geralmente ignorado pelos trabalhadores, empregadores, técnicos de higiene e segurança e medicina ocupacional.

Para além disso, foram identificadas operações de maior risco, como sejam trabalhos de limpeza de filtros e tanques, manutenção de equipamentos onde os níveis de exposição podem ser significativamente superiores aos existentes em operações de rotina, quer em termos de radiação externa quer de radiação interna. Geralmente esses trabalhos são realizados por trabalhadores externos à empresa que, por isso, não são seguidos em termos de medicina ocupacional e como tal não são incluídos nos registos epidemiológicos da empresa.

- b) Fosforites e resíduos com elevados níveis de radioatividade

Através das medições realizadas constatou-se que a fosforite proveniente do Senegal pode ter uma atividade radioativa originada pelos radionuclídeos <sup>226</sup>Ra e <sup>235</sup>U mais de quatro vezes superior à fosforite proveniente da Tunísia.

Nas medições efetuadas verificou-se ainda que as cinzas presentes nos filtros de manga apresentam uma atividade radiológica significativa superior a 1500 Bq/kg, constituindo assim

um perigo para os trabalhadores encarregues da sua limpeza, remoção e armazenamento, bem como para a contaminação do ambiente.

c) Elevado nível de empoeiramento das zonas de trabalho

Nas medições efetuadas foi também possível verificar níveis muito significativos de concentração de poeiras provenientes da fosforite, que não podem nem devem ser consideradas simplesmente como poeiras inertes. Neste caso particular tratando-se de poeiras da fosforite com um conteúdo significativo de isótopos radioativos que emitem radiações ionizantes, estão identificados riscos importantes para a saúde dos trabalhadores associados à inalação, ingestão e absorção pela pele e através de feridas não protegidas destas poeiras radioativas.

d) Doses significativas de radiação na indústria dos fertilizantes fosfatados

De acordo com os resultados obtidos no caso de estudo apresentado, pode demonstrar-se que alguns trabalhadores poderão estar a receber uma dose anual superior a 6 mSv/ano por efeito acumulado da exposição à radiação externa gama, à radiação alfa proveniente do radão e dos seus descendentes radioativos e à radiação associada à inalação, ingestão e absorção pela pele e através de feridas de poeiras radioativas.

Em locais de trabalho onde se encontrou forte empoeiramento e fraca ventilação, a componente mais significativa de dose radioativa observada corresponde ao radão e aos seus descendentes radioativos. É o caso particular de áreas técnicas, túneis e transportadores subterrâneos da matéria-prima (fosforite).

Um risco significativamente elevado foi encontrado nas operações de manutenção que envolvem a exposição a poeiras finas resultantes da limpeza de equipamentos e dos filtros de mangas dos sistemas de aspiração localizada existentes na fábrica. Esta exposição laboral conduz à inalação e à ingestão de poeiras pelos trabalhadores bem como à possível absorção de substâncias com níveis significativos de radioatividade através da pele ou de feridas não protegidas.

Devido à atividade radioativa muito significativa dos resíduos produzidos, concluiu-se que existem riscos importantes para os trabalhadores envolvidos nas operações de manutenção, de limpeza e de recuperação ambiental dos resíduos de fosfogesso, acumulados geralmente em pilhas de grandes dimensões no exterior das instalações.

Paralelamente existem também riscos, muito importantes para o ambiente, relativamente à contaminação de solos, das águas subterrâneas, das lagoas, das linhas de água e dos rios, resultantes dos depósitos de fosfogesso acumulados pelas indústrias dos fertilizantes fosfatados.

## **5 - Recomendações de medidas de prevenção e proteção**

Na elaboração das recomendações deve observar-se o princípio ALARA *As Low As Reasonably Achievable*, segundo o qual todas as exposições às radiações ionizantes devem ser mantidas tão baixas quanto seja razoavelmente possível, tendo em consideração fatores sociais e económicos.

Deste modo, é possível implementar medidas de proteção e de prevenção simples e eficazes que incluem as seguintes:

- a) Formar e informar os trabalhadores expostos a radiações ionizantes de origem natural sobre os riscos para a sua saúde resultantes dessa exposição e sobre quais as medidas de prevenção e proteção radiológica e ocupacional que devem observar.
- b) Identificar e sinalizar convenientemente os locais de trabalho com risco radiológico significativo, colocando a sinalética adequada ao perigo radiológico identificado.
- c) Vigiar a saúde dos trabalhadores expostos a radiações ionizantes através de exames médicos de admissão, periódicos e ocasionais adequados ao risco identificado.
- d) Controlar do ponto de vista radiológico as matérias-primas recebidas das diversas proveniências, de modo a garantir que não são ultrapassados os níveis de radioatividade usuais, procurando que estes sejam o mais baixo possível.
- e) Minimizar a probabilidade de que os trabalhadores possam ingerir comidas ou bebidas em zonas contaminadas por radiação ionizante de modo a evitar a ingestão de poeiras radioativas.
- f) Colocar blindagens entre as fontes de radiação e os trabalhadores ou afastar tanto quanto possível os trabalhadores dessas fontes radioativas.
- g) Aplicar técnicas de engenharia na conceção das instalações e no processo de fabrico que reduzam o empoeiramento, facilitem a ventilação e promovam a renovação do ar.
- h) Garantir uma manutenção adequada dos filtros dos equipamentos de AVAC (Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado) e observar cuidados adicionais no seu posterior manuseamento e limpeza após contaminação radioativa.
- i) Arejar convenientemente os locais de trabalho que tenham pouca ventilação natural, de forma a mantê-los livres de poeiras e quanto possível livres de materiais que possam originar a libertação e a acumulação de radão.
- j) Reduzir o tempo de permanência dos trabalhadores nos locais de maior risco radiológico, reduzindo tanto quanto possível o tempo de exposição a fim de reduzir a dose total recebida.
- k) Promover o uso de luvas adequadas aquando da manipulação de ácidos e de outros produtos corrosivos, evitando assim a absorção de substâncias radioativas (radiação alfa) através da pele e de feridas abertas.
- l) Utilizar máscaras com filtros de proteção respiratória ou em casos extremos utilizar equipamentos autónomos de respiração.
- m) Treinar os trabalhadores no uso correto das máscaras e dos filtros de proteção respiratória e encorajar o seu uso através de ações de sensibilização e formação.
- n) Ventilar artificialmente os locais de maior risco onde se realizem trabalhos pontuais de manutenção e limpeza antes e durante a execução desses trabalhos e garantir o uso de máscaras de proteção respiratória convenientemente ajustadas, sendo que em situações de risco mais severo se deva providenciar o uso de aparelhos autónomos de respiração.
- o) Utilizar máscaras de proteção respiratória convenientemente ajustadas sempre que ocorra empoeiramento significativo, quer devido às operações realizadas quer devido a condições meteorológicas adversas.

- p) Observar preocupações ambientais, no que diz respeito ao impacto no ambiente como resultado do processo de fabrico e dos resíduos produzidos, designadamente, o do fosfogesso que é altamente ácido e contém vários contaminantes tóxicos, incluindo flúor, arsénio, cádmio, crómio, chumbo, mercúrio e vários produtos do decaimento nuclear do urânio. Como é sabido o fosfogesso está entre os resíduos com maior concentração de radioatividade que provém de materiais naturais.
- q) Minimizar o impacto ambiental e o risco para a saúde pública das populações próximas, reduzindo:
- A libertação de gases tóxicos no ambiente, pois observa-se que os gases dos fluoretos são frequentemente emitidos em grandes quantidades nas comunidades vizinhas, causando sérios danos ambientais e de saúde pública.
  - A contaminação de solos, águas subterrâneas, lagoas, linhas de água e rios com resíduos de fosfogesso.
  - A libertação de radão na atmosfera dos depósitos de fosfogesso, que quando transportado por via aérea, em função do regime de ventos locais, pode acumular-se em determinadas zonas, podendo atingir valores de concentração elevados noutras instalações industriais ou zonas habitacionais que se situem na sua proximidade.

Como resultado da profundidade e da seriedade com que este trabalho foi abordado, o autor desta tese está convicto que os seus resultados venham a contribuir para a melhoria as condições de laboração de todos os agentes envolvidos em indústrias onde estejam presentes contaminantes radioativos, com especial enfoque nos trabalhadores associados à mineração e/ou manuseamento das matérias-primas e dos seus derivados e em todos aqueles que, de algum modo, estejam expostos a algum tipo de contaminação proveniente destes produtos.

Todos nunca seremos demais para contribuir para um mundo melhor, pelo que sendo assim, trabalhos futuros, talvez usando uma metodologia semelhante, são desejáveis em todo o tipo de atividades onde exista perigosidade para a saúde dos trabalhadores e para o meio ambiente de que somos parte integrante; cabe-nos decidir se pretendemos ser destruidores ou defensores desse nosso bem.



## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archer, V. E. (1987). Association of lung cancer mortality with precambrian granite. *Arch Environ Health*, 42, pp. 87-91.
- Assembleia da República Portuguesa. (2009). Lei n.º 7/2009. *Diário da República n.º 30, Série I de 2009-02-12*.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (1999). *Toxicological Profile for Ionizing Radiation*. U.S.: U.S. Department of Health and Human Services.
- Axelsson, O., & Sundell, L. (1978). Mining, lung cancer and smoking. *Scand J Work Environ Health*, 4, pp. 46-52.
- Birky, B. K., Tolaymat, T., & Warren, B. C. (1998). *Evaluation of Exposure to Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials (TENORM) in the Phosphate Industry*. Florida, USA: Florida Institute of Phosphate Research.
- Block, G., Matanoski, M., Seltser, R., & Mitchell, T. (15 de Dezembro de 1988). Cancer Morbidity and Mortality in Phosphate Workers. *Cancer Research*, pp. 7298-7303.
- Cardis, E., Vrijheid, M., & Blettner, M. (2005). *Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries*. Obtido em 23 de Março de 2009, de Web site de BMJ Medical Publication of the Year: <http://www.bmj.com/cgi/content/full/331/7508/77>
- Clarke, R. H., & Southwood, T. E. (1989). Risks from ionizing radiation. *Nature*, 6, pp. 197-198.
- Comissão Europeia. (30 de 3 de 2010). Tratado que institui a comunidade europeia da energia atómica (2010/C 84/01). *Jornal Oficial da União Europeia*.
- Commission of the European Communities. (21 de Fevereiro de 1990). 90/143/Euratom. *Official Journal of the European Communities*.
- Connett, M. (2003). *The Phosphate Fertilizer Industry: An Environmental Overview*. Obtido em 28 de Maio de 2009, de Fluoride Action Network: <http://www.fluoridealert.org/phosphate/overview.htm>

- CPEP (Contemporary Physics Education Project). (2003). *Nuclear Science - A Guide to the Nuclear Science Wall Chart*. Contemporary Physics Education Project.
- CSN (Consejo de Seguridad Nuclear). (1989). *Radiación: dosis, efectos, riesgos*. Madrid: Consejo de Seguridad Nuclear.
- Darby, S. C., Whitley, E., & Howe, G. R. (1995). Radon and lung cancer other than lung cancer in underground miners: a collaborative analysis of 11 studies. *J Nat Cancer Inst*, 87, pp. 378-384.
- European Commission. (1995). *Report EUR 15448 (Nuclear Science and Technology)*. Luxembourg : European Commission.
- European Council. (13 de Maio de 1996). Directiva 96/29/EURATOM. *Official Journal of the European Union*.
- Fleischer, R. L. (Jul de 1981). A possible association between lung cancer and phosphate mining and processing. *Health Phys*, 41(1), pp. 171-5.
- Forastiere, F., Valesini, S., & Arca, M. (1985). Lung cancer an natural radiation in an Italian province. *Sci Total Environ*, 45, pp. 519-526.
- Gilmore, G., & Hemingway, J. (1995). *Practical Gamma-Ray Spectrometry*. John Wiley & Sons.
- Governo Português - Ministério da Saúde. (2002). Decreto-Lei n.º 165/2002. *Diário da República n.º 163, Série I-A de 2002-07-17*.
- Governo Português - Ministério da Saúde. (2002). Decreto-Lei n.º 167/2002. *Diário da República n.º 164, Série I-A de 2002-07-18*.
- Governo Português - Ministério da Saúde. (2008). Decreto-Lei n.º 222/2008. *D.R. n.º 223, Série I de 2008-11-17*.
- Governo Português - Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. (2006). Decreto-Lei n.º 79/2006. *Diário da República n.º 67, Série I-A de 2006-04-04*.
- Governo Português - Ministério do Trabalho e da Solidariedade Social. (2007). Decreto Regulamentar n.º 76/2007. *Diário da República n.º 136, Série I de 2007-07-17*.
- Hakl, J., Hunyadi, I., Csige, I., Geczy, G., Lenart, L., & Varhegyi, A. (1997). Radon transport phenomena studied in karst caves : International experiences on radon levels and exposures. (I. C. Solids, Ed.) *Radiation measurements*, 28, pp. 675-684.
- Henshaw, D. L., Ross, A. N., & Fewes, A. P. (1996). Enhanced deposition of radon daughter nuclei in the vicinity of power frequency electromagnetic fields. *International Journal of Radiation Biology*, pp. 25-38.
- Hnizdo, E., Murray, J., & Klempman, S. (1997). Lung cancer in relation to exposure to silica dust, silicosis and uranium production in South African gold miners. *Thorax*, 52, pp. 271-275.

- Hornung, R. W., & Meinhardt, T. J. (1987). Quantitative risk assessment of lung cancer in US uranium miners. *Health Phys*, 52, pp. 417-430.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). (1988). *The Radiological Accident in Goiânia*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- IARC (International Agency for Research on Cancer). (1993). *Monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans. Some naturally occurring substances. Food items and constituents, heterocyclic aromatic amines and mycotoxins*. Lyon: International Agency for Research on Cancer.
- IARC (International Agency for Research on Cancer). (1994a). *IARC study group on cancer risk among nuclear industry workers, new estimates of cancer risk due to low doses of ionizing radiation*. An international study: *Lancet* / Agência Internacional para a Investigação sobre o Cancro.
- IARC (International Agency for Research on Cancer). (1994b). *Direct estimates of cancer mortality due to low doses of ionising radiation: an international study* (Vol. 344). *Lancet*: (CIRC) Centre International de Recherche sur le Cancer.
- ICRP (International Commission on Radiological Protection ). (1990). *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 60.
- ICRP (International Commission on Radiological Protection). (2005). *ICRP Publication 99 Low - Dose Extrapolation of Radiation Related Cancer Risk*. International Commission on Radiological Protection.
- INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo). (2008). *NTP 808 - Exposición laboral a agentes químicos: requisitos de los procedimientos de medición*. Obtido em 10 de Março de 2009, de <http://www.insht.es: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/786a820/808%20web.pdf>
- IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire). (2006). *Synthèse par l'IRSN des rapports de l'UNSCEAR*. France: Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire.
- Kusiak, R., Ritchie, A. C., & Muller, J. (1993). Mortality from lung cancer in Ontario uranium miners. *British Journal of Industrial Medicine*, 50, pp. 920-928.
- L'Abbé, K. A., Howe, G. R., & Burch, J. D. (1991). Radon exposure, cigarette smoking, and other mining experience in the Beaverlodge uranium miners cohort. *Health Physics*, 60, pp. 489-495.
- Langner, I., Blettner, M., Gundestrup, M., Storm, H., Aspholm, R., Auvinen, A., et al. (Feb de 2004). Cosmic radiation and cancer mortality among airline pilots: results from a European cohort study (ESCAPE). *Radiat Environ Biophys*, 42(4), pp. 247-56.
- Little, J. B. (2000). Radiation carcinogenesis. *Carcinogenesis: Integrative Cancer Research*, 21 (3), pp. 397-404.

- Lubin, J. H., Tomásek, L., Edling, C., Hornung, R. W., Howe, G., Kunz, E., et al. (1997). Estimating lung cancer mortality from residential radon using data for low exposures of miners. *Radiation research*, 147, pp. 126-134.
- Marsh, J. W. (2010). Dose conversion factors for radon. *Health Physics*, 99, No. 4, pp. 511-516.
- Mc Laughlin, J. K., Jing-Qiong, C., & Dossemeci, M. (1992). A nested case-control of lung cancer among silica exposed workers in China. *British Journal of Industrial Medicine*, 49, pp. 167-171.
- Mcbride, J. P., Moore, R. E., Witherspoon, J. P., & Blanco, R. E. (1977). *Radiological Impact of Airborne Effluents of Coal and Nuclear Plants*. Health and Safety Research Division. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory.
- Moolgavkar, S. H., Luebec, E. G., & Krewski, D. (1993). Radon cigarette smoke and lung cancer: a Re-analysis of the Colorado Plateau uranium miners' data. *Epidemiology*, pp. 204-217.
- Morrison, H. I., Villanueva, P. J., & Lubin, J. H. (1998). Radon progeny exposure and lung cancer risk in a cohort of Newfoundland fluorspar miners. *Radiat Res*, 150, pp. 58-65.
- Najafi, E. T. (1998). Radon reduction systems in the construction of new houses in Gainesville. *Florida Health Phys*, pp. 514-517.
- NAS (National Academy of Sciences). (1990). *Health Effects of Exposure*. Washington: National Academy of Sciences / National Academy Press.
- NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements). (1989). *Report No. 98 "Guidance on Radiation Received in Space Activities"*. Bethesda: NCRP.
- Nunes, F. O. (2010). *Segurança e Higiene do Trabalho - Manual Técnico*. Lisboa: Edições Gustave Eiffel.
- Quindós, L. S., Qsoto, J., & Fernández, P. L. (1991). Radon and lung cancer in Spain. *Radiat Prot Dosim*.
- REMM (Radiation Emergency Medical Management). (2011). [http://www.remm.nlm.gov/respiratory\\_ppe.htm](http://www.remm.nlm.gov/respiratory_ppe.htm). (US Department of Health and Human Services) Obtido em 2 de 12 de 2011, de <http://remm.nlm.gov>: [http://www.remm.nlm.gov/respiratory\\_ppe.htm](http://www.remm.nlm.gov/respiratory_ppe.htm)
- Roscoe, R. J., Steeland, K., & Halperin, W. E. (1989). Lung cancer mortality among nonsmoking uranium miners exposed to radon daughters. *Jama*, 262, pp. 629-633.
- Schmidts, G., & Krüppers, C. (1995). *Handling of radium and uranium contaminated waste piles and other wastes from phosphate ore processing*. Nuclear Science & Technology. Luxembourg: European Commission.
- Scholten, L. C., & Timmermans, C. W. (1996). Natural radioactivity in phosphate fertilizers. *Fertilizer Research*, 43, pp. 103-107.

- Snashall, D., & Patel, D. (2003). *Abc of Occupational and Environmental Medicine* (2ª Edição ed.). London WC1H 9JR: BMJ Publishing Group.
- Sollet, E., & Velasco, E. (1997). *La Naturaleza de la Radiación*. Madrid: Iberdrola.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). (1994). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. Nova York: Nações Unidas - Comité Científico das Nações Unidas para o Estudo dos Efeitos das Radiações Atômicas.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. New York: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly.
- Upton, A. C., Albert, R. E., & Burns, F. J. (1986). *Historical perspectives on radiation carcinogenesis*. Nova York: Elsevier.
- Wise Uranium Project. (2011). <http://www.wise-uranium.org/rdcrn.html>. (World Information Service on Energy) Obtido em 15 de Dezembro de 2011, de <http://www.wise-uranium.org/>.
- Woodward, A., Roder, D., & Mc Michael, A. J. (1991). Radon daughter exposures at the radium hill uranium mine and lung cancer rates among former workers. *Cancer Causes Control*, 2, pp. 213-220.
- Xuan, X. Z., Schatzkin, A., & Mao, B. L. (1991). Feasibility of conducting a lung-cancer chemoprevention trial among tin miners in Yunnan. *Cancer Causes Control*, 2, pp. 175-182.
- Zapata, F., & Roy, R. N. (2004). *Use of Phosphate Rocks for Sustainable Agriculture*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.



## **ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo A - Proteção radiológica - organizações internacionais

Anexo B - Características técnicas dos equipamentos usados nas medições

Anexo C - Referências NIOSH para medição de poeiras

Anexo D - Plantas de localização

Anexo E - Resultados das medições efetuadas



# **Anexo A - Organizações internacionais de proteção radiológica**



### Organizações internacionais de proteção e segurança radiológica:

- International Radiation Protection Association
- Radiation Protection of Patients
- ICRP, International Commission on Radiation Protection
- ICRU, International Commission on Radiation Units
- IAEA, International Atomic Energy Agency
- UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the effects of Ionizing Radiations
- HPA (ex NRPB), Health Protection Agency, UK
- IRPA, International Radiation Protection Association
- NCRP, National Council on Radiation Protection and Measurements, USA
- IRSN, Institute for Radioprotection and Nuclear Safety, France
- REMM - Radiation Emergency Medical Management (US Department of Health and Human Services)

### Sítios em Espanha:

- [CSN](#) (Consejo de Seguridad Nuclear)
- [ENRESA](#) (Empresa Nacional de Residuos Radiactivos)
- [CSIC](#) (Centro Superior de Investigaciones Científicas)
- [SNE](#) (Sociedad Nuclear Española)
- [SEPR](#) (Sociedad Española de Protección Radiológica)
- [SEMN](#) (Sociedad Española de Medicina Nuclear)
- [SEFM](#) (Sociedad Española de Física Médica)
- [CIEMAT](#) (Centro de Investigación Energética, Medioambiental y Tecnológica)
- [elradon.com](#) (El Portal Español sobre el Radón)



## **Anexo B - Características técnicas dos equipamentos usados**

1.3 Taking a Look

The RAD7 Professional Electronic Radon Detector



## INTRODUCTION

The RAD7 is a highly versatile instrument that can form the basis of a comprehensive radon measurement system. It may be used in many different modes for different purposes. This manual adopts a progressive approach, in which there is, first, a simple, step-by-step description of how to get readings for a) real-time monitoring, and b) sniffing. Next comes a more detailed description of the many features of the instrument and how to access them. The rest of the manual covers a whole range of topics, in somewhat arbitrary order. We recommend that, as soon as possible, you read the entire text, just so that you will have an idea of what there is. While you can start to make good measurements on the first day of ownership of the RAD7, it can take years to master the subtleties of radon and thoron behaviour, and to appreciate the full capabilities of the instrument.

We have tried to make the manual easy to use, with a useful table of contents. Please let us know how well we have succeeded. If there are some topics inadequately covered, please tell us. We will issue updates from time to time.

### Points of special note

The RAD7 is a rugged and long-lasting piece of equipment. There are many units still in daily use that were sold nine years ago or more. However, it is a sophisticated, precision electronic device, and it is not hermetically sealed, so please treat it with respect. Please do not allow water, other liquids or dirt to get into the machine. If using it somewhere where it may get splashed, damaged, or exposed to rain, please protect it.

The batteries are lead-acid technology, like a car's. If left in a discharged state they will, like a car's, lose capacity. After running the RAD7 on its batteries please recharge them as soon as possible (by plugging in the unit and turning it on). With careful use, the batteries, like a car's will last five years or more.

Finally, there is one security feature that is sometimes inadvertently set by an inexperienced, though authorized, user; namely the key pad lockout. If the key pad ceases to function, and all you see is "DURRIDGE RAD7" on the display, just do the following: Hold down the ENTER and two arrow keys until you hear a beep, release the three keys and immediately push MENU. You should then be rewarded by "Test" on the display. If the tone was set to OFF, then you will not hear the beep, so hold the three keys down for three to four seconds, before releasing them and pushing MENU, - try hold-down times a little longer, or shorter, if, at first, you do not succeed.

## Chapter 3

### 3.11.2 Adsorbed Radon Gas.

Radon atoms can adsorb on or absorb into internal surfaces of the RAD7, on the inside of tubing or on desiccant granules. This radon can stay behind after you purge the instrument, then desorb (or out-gas) from these surfaces and enter the sample cell volume. This effect is ordinarily negligible since only a small fraction of the radon ever becomes adsorbed. But at very high radon concentrations (over 1000 pCi/L), even a small fraction can be significant, and you can expect to see some lingering radon after purging the instrument.

The best solution is to purge for 10 minutes every few hours until the count rate goes down. Even in the worst possible case, the radon must decay with a 3.82 day half-life, so you will eventually be able to use the instrument again.

### 3.11.3 Intrinsic Background.

Due to very low concentrations of alpha emitting contaminants in the materials of the RAD7's construction, you can expect to get as much as one count every two hours (0.009 cpm) without any radon present. This count rate, corresponding to about 0.02 pCi/L, is low enough to neglect when doing routine indoor radon work. But for very low-leveled outdoor radon levels, or special clean room applications, this background may be significant. With painstaking technique, and long-term monitoring, it can be measured. Very low level readings can then be corrected for background, bringing the detection threshold of the instrument down below 0.02 pCi/L.

### 3.11.4 Long-lived Radon Daughters.

After many years of use at elevated radon levels, your RAD7's detector will accumulate lead-210, an isotope with a 22-year half-life. Though lead-210 is itself a beta emitter, one of its daughters is polonium-210, which produces a 5.3 MeV alpha particle. The RAD7 is able to distinguish this isotope by its energy, and exclude it from all calculations. We do not expect lead-210 buildup to contribute significantly to background in the RAD7, even after years of ordinary use.

### 3.11.5 Contamination by Radon, or Thoron, Producing Solids.

If radon- or thoron-producing solids, such as radium-226 or thorium-228, become trapped in inlet hoses or filters, they may emanate radon or thoron gas that will be carried through the filters and into the instrument. Certain dusty soils may contain enough of these isotopes to make this scenario possible. If you suspect this kind of contamination, please call DURRIDGE. We would like to discuss your experience with you and help you solve your problem.

### 3.11.6 Other Alpha Emitters.

As long as you filter the incoming air stream, there is little or no possibility for contamination of the instrument with other alpha emitters. Virtually all solids will be stopped by the inlet filters. The only naturally-occurring alpha-emitting gas other than radon and thoron is radon-219, or "actinon." Actinon, which has a very short half-life (less than four seconds), results from the decay of naturally-occurring uranium-235. But since uranium-235 is so much less abundant than uranium-238 (the ancestor of radon-222), we do not expect to ever see actinon in significant quantities apart from even more significant quantities of radon.

### 3.11.7 Beta and Gamma Emitters.

The RAD7's solid state alpha particle detector is almost completely insensitive to beta or gamma radiation, so there will be no interference from beta-emitting gases or from gamma radiation fields. The most likely effect of high levels of beta or gamma radiation will probably be an increase in detector leakage current and increased alpha peak width. Typical environmental levels of beta and gamma emitters have absolutely no effect on the RAD7.

## 3.12 Precision & Accuracy

"Precision" means exactness of measurement with regard to reliability, consistency and repeatability. "Accuracy" means exactness of measurement with regard to conformity to a measurement standard. An accurate instrument is necessarily

### Chapter 3

precise, but a precise instrument can be inaccurate (due to mis-calibration, for example).

As long as the operator follows consistent procedures, counting statistics will dominate the RAD7's precision. Environmental factors have proven to be much less significant over normal ranges of operation. Aside from precision, the most important factor in RAD7 accuracy is calibration.

DURRIDGE calibrates all instruments to a "master" instrument with a calibration precision of about " 2%. The master instrument has been calibrated by way of inter-comparison with radon chambers run by the U.S. EPA and the U.S. Department of Energy. We estimate the accuracy of the master instrument to be within " 4%, based on inter-comparison results. We estimate the overall calibration accuracy of your RAD7 to be

about " 5%. We look forward to new developments in calibration standardization and traceability, which we expect to help improve calibration accuracy.

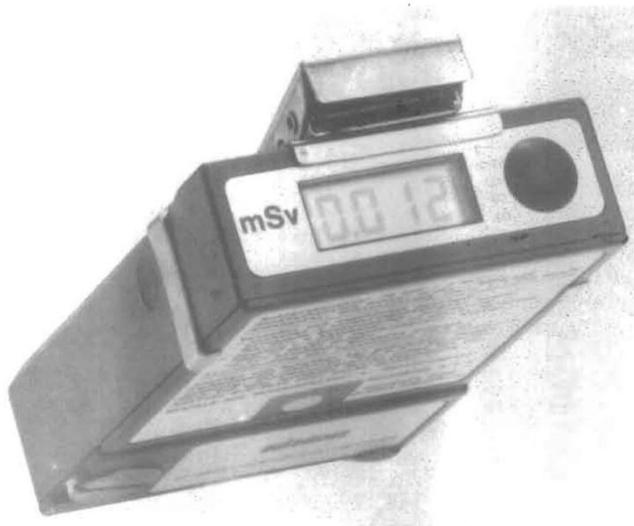
The table below summarizes the precision of the RAD7 according to the contribution of counting statistics. Counting statistics depend on sensitivity (calibration factor) and background count rate. The RAD7's intrinsic, or "fixed," background count rate is so low as to be a negligible contributor to precision, for the range of radon concentrations covered by the table. Environmental and other factors may affect precision by as much as " 2%. The uncertainty values reported by the RAD7 are estimates of precision based on counting statistics alone, and are two-sigma values, as are the values in the following table.

**Table: 3.12 Typical RAD7 precision based on counting statistics only.**

Normal Mode with sensitivity 0.500 cpm/pCi/L. Table values are two-sigma uncertainty (or 95% confidence interval) in units of pCi/L (percent).

	1 pCi/L	4 pCi/L	20 pCi/L	100 pCi/L
1 hr	0.37 (37%)	0.73 (32%)	1.64 (8.2%)	3.65 (3.7%)
2 hr	0.26 (26%)	0.52 (13%)	1.15 (5.8%)	2.58 (2.6%)
6 hr	0.15 (15%)	0.30 (7.4%)	0.67 (3.4%)	1.49 (1.5%)
24 hr	0.07 (7.4%)	0.15 (3.8%)	0.33 (1.7%)	0.74 (0.7%)
48 hr	0.05 (5.3%)	0.10 (2.6%)	0.23 (1.2%)	0.53 (0.5%)
72 hr	0.04 (4.3%)	0.09 (2.1%)	0.19 (1.0%)	0.43 (0.4%)

<b>automess</b> Automation und Messtechnik GmbH	Description and Operating Instructions 07/90
DIGITAL ALARM DOSIMETER ADOS	




---

D-68526 Ladenburg · Daimlerstrasse 27 · Telephone +49-6203-9503-00 · Telefax +49-6203-9503-29

#### 4. Technical data

Radiation detector: GM counting tube ZP 1300 or equivalent, for photon radiation, with energy filter

Counting tube dimensions: Inside diameter 4.8 mm, effective length 8 mm

Dose sensitivity: 100 counting tube pulses correspond to 1 micro-Sv

Photon energy: Nominal range of use 0.07 MeV to 3 MeV

Measured quantity: Photon equivalent dose

Measuring accuracy: +/- 20% (usually better than +/- 10%), calibration with Cs-137 gamma radiation

Directional dependency: +/- 20% in nominal range of use of +/- 45° from preferred direction; +10%/-30% for all angles of incidence (complete solid angle) with Cs-137 gamma radiation

Preferred direction: Perpendicular to point marked on large housing surface

Display: 4-position, 7-segment liquid-crystal display (LCD) with three decimal points between the four digits

Dose measuring range: 0.001 mSv to 9999 mSv, no counting losses up to 5 Sv/h

Dose display formats: Four formats with autoranging:  
 0.000 - 9.999 mSv  
 10.00 - 99.99 mSv  
 100.0 - 999.9 mSv  
 1000 - 9999 mSv

Dose memory: Non-volatile, data remains stored for at least 10 years

Dose reset: Only possible after switching on instrument or with analyzer

Dose alarm: Ten fixed alarm thresholds, one of which can be selected after switching on instrument

Dose rate measuring range: 1 mSv/h to 999 mSv/h with a relative standard deviation of less than 5%. The dose rate is only displayed if the dose rate alarm threshold is reached or exceeded. Time constant of dose rate display: 8 seconds for dose rates less than 1 mSv/h, sliding constant from 8 seconds to 2 seconds for dose rates of

1 mSv/h to 3.5 mSv/h, less than 2 seconds for dose rates greater than 3.5 mSv/h.

Dose rate display formats: Three formats with autoranging:  
 h1.00 - h9.99 mSv/h  
 h10.0 - h99.9 mSv/h  
 h100 - h999 mSv/h

The flashing "h" at the first position stands for "per hour".

Dose rate alarm: One fixed alarm threshold at 1 mSv/h

Remaining time display: Digital display when button pressed, in the format xhyy for x hours and yy minutes

Battery voltage display: Digital display in volts when button pressed, in the format 4.0v to 10.0v, automatic alarm when voltage falls below 5.0 V

Overload: Can be overloaded up to at least 25 Sv, no return up to at least 50 Sv/h

Radiological function check: Automatic monitoring of minimum pulse rate, audible/visual alarm if minimum rate undershot

Alarm tone: Approx. 4 kHz, approx. 80 dB at a distance of 30 cm

Temperature range: -30 to +60 ° Celsius (LCD becomes increasingly inert below -10° C), temperature dependency of measured value over the entire range less than 10%, referred to +20° C

Relative humidity: Nominal range of use 0 to 100 % relative humidity

External atmospheric pressure: Nominal range of use 600 to 1300 mbar

Positional dependency: Any desired nominal range of use

Operating voltage range: 5.0 to 10.0 V

Power supply: Standard 9 V battery, e.g. VARTA 6F22 or 6LR61 (alkaline)

Service life at radiation levels up to 0.2 mSv/h: approx. 2000 hours with 6LR61 (without alarm tone)

Housing: Die-cast aluminium, degree of protection IP67 according to DIN 40050 (protection against penetration of dust and protection when instrument immersed in water), easily decontaminable

Dimensions: Height 97 mm, width 60 mm, depth 23 mm

---

D-68526 Ladenburg · Daimlerstrasse 27 · Telephone +49-6203-9503-00 · Telefax +49-6203-9503-29

Weight: Approx. 145 g without battery, approx.  
190 g with battery

Regular maintenance: Not necessary, since no wearing parts (in  
particular no separate lithium button cell  
or similar for memory preservation)

Accessory: Detachable, stainless-steel clip

Option: Automatic analysis / logging with reader /  
printer

- Subject to change without notice -

---

D-68526 Ladenburg · Daimlerstrasse 27 · Telephone +49-6203-9503-00 · Telefax +49-6203-9503-29

# RDS-110



## The RDS-110

Multi-Purpose Survey Meter

The RDS-110 is a robust and rugged survey meter that is ideally suited for any conditions as well as the harshest environments. In use by Military Forces, Emergency Responders, HazMat Teams, Civil Engineering and Medical professionals, it is a proven and trusted performer. With it's built in GM detector, the RDS-110 offers a wide range measurement capability. Simple to use, with LED indication of the range and a large easy to read LCD display with back-light, it does not require any set-up before use, as it performs it's own self diagnostic test.

## Available Options

RDS-110 Options available: A range of GM Tube-based external probes for gamma and beta contamination measurement. These probes simply plug into the base of the unit and the RDS-110 automatically sets up the instrument for the relevant measuring range and unit.

- **GMP-111 External Beta Probe**
- **GMP-112L External Gamma Probe**
- **GMP-112 H External Gamma Probe**
- **GMP-115 External "pancake" Beta Probe**

TECHNICAL SPECIFICATIONS:	
Radiological Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> <li>radiation detected: gamma and X-rays, 50 keV...1.25MeV. Beta radiation with an external probe</li> <li>detectors: one halogen quenched, energy compensated GM tube</li> <li>dose rate measurement range: 0.05 Sv/h - 99.99 mSv/h or 5 µrem/h - 9.999 rem/h</li> <li>dose measurement range: 0.001 - 999.9 mSv or 0.1 mrem - 9999 mrem</li> <li>pulse rate: 0.1 - 999 CPS</li> <li>automatic range indication by flashing LED signals</li> <li>calibration accuracy: ± 5%, <sup>137</sup>Cs, calibration direction and in the calibration field, temperature +20 °C (68°F)</li> <li>dose rate linearity: ±15 % over the range 0.1 Sv/h - 99.99 mSv/h or 10 rem /h - 9.999 rem/h</li> <li>alarm levels: freely adjustable alarm levels for dose rate, accumulated dose and CPS</li> <li>response to the angle of incidence: ±15 % within 135° from the calibration direction with 65 keV energy</li> </ul>
Functional Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> <li>battery alarm: two-step alarm for low battery voltage</li> <li>overload indication: OFL information on display</li> <li>Self-diagnostics: continuous operational check of electronics and GM tube. possible malfunction indicated by "dF" information on display</li> <li>external detectors: <ul style="list-style-type: none"> <li><b>GMP-111 Beta Probe</b>, 0 to 10,000 cps</li> <li><b>GMP-15 "Pancake" Beta Probe</b>, 0 to 10,000 cps</li> <li><b>GMP-112L Gamma Probe</b>, 0.05 Sv/h to 10 mSv/h</li> <li><b>GMP-112H Gamma Probe</b>, 10 Sv/h to 3 Sv/h</li> </ul> </li> </ul>
Electrical Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> <li>power supply: 3 x alkaline cell IC LR6 (recommended) or standard dry cells or rechargeable iCd batteries of the same size</li> <li>battery life: 200 hours at normal background, (up to 400 hours without buzzer/illumination)</li> <li>battery alarm: two-step alarm for low battery voltage</li> </ul>
Mechanical Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> <li>case: impact resistant, aluminium case, shielded against RF interferences and NEMP</li> <li>dimensions: 88 x 185 x 42 mm</li> <li>weight: 570 g without batteries, 650 g with batteries</li> <li>connections: 7-pin lockable connector with protective cap for external detectors or auxiliary alarm devices (5 V, open collector output)</li> </ul>
Environmental Characteristics	<p>Temperature:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-25+55°C operational</li> <li>-40+70°C storage</li> </ul>
 <p>Laurus Systems, Inc. - 3505 Ellicott Mills Dr, B-1, - Ellicott City, MD - 21043 - Ph: 410-465-5558 - Fax: 410-465-5257 - www.LaurusSystems.com</p>	



## **Anexo C - Referências NIOSH para medição de poeiras**



**PARTICULATES NOT OTHERWISE REGULATED, RESPIRABLE 0600**

DEFINITION: aerosol collected by sampler with 4- $\mu$ m median cut point      CAS: None      RTECS: None

<b>METHOD: 0600, Issue 3</b>		<b>EVALUATION: FULL</b>	<b>Issue 1: 15 February 1984</b> <b>Issue 3: 15 January 1998</b>
<b>OSHA:</b> 5 mg/m <sup>3</sup> <b>NIOSH:</b> no REL <b>ACGIH:</b> 3 mg/m <sup>3</sup>	<b>PROPERTIES:</b> contains no asbestos and quartz less than 1%; penetrates non-ciliated portions of respiratory system		
<b>SYNONYMS:</b> nuisance dusts; particulates not otherwise classified			
SAMPLING		MEASUREMENT	
<b>SAMPLER:</b>	CYCLONE + FILTER (10-mm nylon cyclone, Higgins-Dewell [HD] cyclone, or Aluminum cyclone + tared 5- $\mu$ m PVC membrane)	<b>TECHNIQUE:</b>	GRAVIMETRIC (FILTER WEIGHT)
<b>FLOW RATE:</b>	nylon cyclone: 1.7 L/min HD cyclone: 2.2 L/min Al cyclone: 2.5 L/min	<b>ANALYTE:</b>	mass of respirable dust fraction
<b>VOL-MIN:</b> <b>-MAX:</b>	20 L @ 5 mg/m <sup>3</sup> 400 L	<b>BALANCE:</b>	0.001 mg sensitivity; use same balance before and after sample collection
<b>SHIPMENT:</b>	routine	<b>CALIBRATION:</b>	National Institute of Standards and Technology Class S-1.1 or ASTM Class 1 weights
<b>SAMPLE STABILITY:</b>	stable	<b>RANGE:</b>	0.1 to 2 mg per sample
<b>BLANKS:</b>	2 to 10 field blanks per set	<b>ESTIMATED LOD:</b>	0.03 mg per sample
ACCURACY		<b>PRECISION:</b>	<10 $\mu$ g with 0.001 mg sensitivity balance; <70 $\mu$ g with 0.01 mg sensitivity balance [3]
<b>RANGE STUDIED:</b>	0.5 to 10 mg/m <sup>3</sup> (lab and field)	<b>APPLICABILITY:</b> The working range is 0.5 to 10 mg/m <sup>3</sup> for a 200-L air sample. The method measures the mass concentration of any non-volatile respirable dust. In addition to inert dusts [4], the method has been recommended for respirable coal dust. The method is biased in light of the recently adopted international definition of respirable dust, e.g., = +7% bias for non-diesel, coal mine dust [5].	
<b>BIAS:</b>	dependent on dust size distribution [1]	<b>INTERFERENCES:</b> Larger than respirable particles (over 10 $\mu$ m) have been found in some cases by microscopic analysis of cyclone filters. Over-sized particles in samples are known to be caused by inverting the cyclone assembly. Heavy dust loadings, fibers, and water-saturated dusts also interfere with the cyclone's size-selective properties. The use of conductive samplers is recommended to minimize particle charge effects.	
<b>OVERALL PRECISION (<math>\hat{S}_{r,r}</math>):</b>	dependent on size distribution [1,2]	<b>OTHER METHODS:</b> This method is based on and replaces Sampling Data Sheet #29.02 [6].	
<b>ACCURACY:</b>	dependent on size distribution [1]		

**EQUIPMENT:**

1. Sampler:
  - a. Filter: 5.0- $\mu$ m pore size, polyvinyl chloride filter or equivalent hydrophobic membrane filter supported by a cassette filter holder (preferably conductive).
  - b. Cyclone: 10-mm nylon (Mine Safety Appliance Co., Instrument Division, P. O. Box 427, Pittsburgh, PA 15230), Higgins-Dewell (BGI Inc., 58 Guinan St., Waltham, MA 02154)[7], aluminum cyclone (SKC Inc., 863 Valley View Road, Eighty Four, PA 15330), or equivalent.
2. Personal sampling pump, 1.7 L/min  $\pm$  5% for nylon cyclone, 2.2 L/min  $\pm$  5% for HD cyclone, or 2.5 L/min  $\pm$  5% for the AI cyclone with flexible connecting tubing.  
NOTE: Pulsation in the pump flow must be within  $\pm$  20% of the mean flow.
3. Balance, analytical, with sensitivity of 0.001 mg.
4. Weights, NIST Class S-1.1, or ASTM Class 1.
5. Static neutralizer, e.g., Po-210; replace nine months after the production date.
6. Forceps (preferably nylon).
7. Environmental chamber or room for balance, e.g., 20 °C  $\pm$  1 °C and 50%  $\pm$  5% RH.

---

**SPECIAL PRECAUTIONS:** None.

---

**PREPARATION OF SAMPLERS BEFORE SAMPLING:**

1. Equilibrate the filters in an environmentally controlled weighing area or chamber for at least 2 h.
2. Weigh the filters in an environmentally controlled area or chamber. Record the filter tare weight,  $W_1$  (mg).
  - a. Zero the balance before each weighing.
  - b. Handle the filter with forceps (nylon forceps if further analyses will be done).
  - c. Pass the filter over an anti-static radiation source. Repeat this step if filter does not release easily from the forceps or if filter attracts balance pan. Static electricity can cause erroneous weight readings.
3. Assemble the filters in the filter cassettes and close firmly so that leakage around the filter will not occur. Place a plug in each opening of the filter cassette.
4. Remove the cyclone's grit cap before use and inspect the cyclone interior. If the inside is visibly scored, discard this cyclone since the dust separation characteristics of the cyclone may be altered. Clean the interior of the cyclone to prevent reentrainment of large particles.
5. Assemble the sampler head. Check alignment of filter holder and cyclone in the sampling head to prevent leakage.

**SAMPLING:**

6. Calibrate each personal sampling pump to the appropriate flow rate with a representative sampler in line.  
NOTE 1: Because of their inlet designs, nylon and aluminum cyclones are calibrated within a large vessel with inlet and outlet ports. The inlet is connected to a calibrator (e.g., a bubble meter). The cyclone outlet is connected to the outlet port within the vessel, and the vessel outlet is attached to the pump. See APPENDIX for alternate calibration procedure. (The calibrator can be connected directly to the HD cyclone.)  
NOTE 2: Even if the flowrate shifts by a known amount between calibration and use, the nominal flowrates are used for concentration calculation because of a self-correction feature of the cyclones.
7. Sample 45 min to 8 h. Do not exceed 2 mg dust loading on the filter. Take 2 to 4 replicate samples for each batch of field samples for quality assurance on the sampling procedure (see Step 10).  
NOTE: Do not allow the sampler assembly to be inverted at any time. Turning the cyclone to anything more than a horizontal orientation may deposit oversized material from the cyclone body onto the filter.

**SAMPLE PREPARATION:**

8. Remove the top and bottom plugs from the filter cassette. Equilibrate for at least 2 h in an environmentally controlled area or chamber.

**CALIBRATION AND QUALITY CONTROL:**

9. Zero the microbalance before all weighings. Use the same microbalance for weighing filters before and after sample collection. Calibrate the balance with National Institute of Standards and Technology Class S-1.1 or ASTM Class 1 weights.
10. The set of replicate field samples should be exposed to the same dust environment, either in a laboratory dust chamber [8] or in the field [9]. The quality control samples must be taken with the same equipment, procedures, and personnel used in the routine field samples. Calculate precision from these replicates and record relative standard deviation ( $S_r$ ) on control charts. Take corrective action when the precision is out of control [8].

**MEASUREMENT:**

11. Weigh each filter, including field blanks. Record this post-sampling weight,  $W_2$  (mg), beside its corresponding tare weight. Record anything remarkable about a filter (e.g., visible particles, overloading, leakage, wet, torn, etc.).

**CALCULATIONS:**

12. Calculate the concentration of respirable particulate,  $C$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), in the air volume sampled,  $V$  (L):

$$C = \frac{(W_2 - W_1) - (B_2 - B_1)}{V} \cdot 10^3, \text{ mg}/\text{m}^3$$

where:  $W_1$  = tare weight of filter before sampling (mg)  
 $W_2$  = post-sampling weight of sample-containing filter (mg)  
 $B_1$  = mean tare weight of blank filters (mg).  
 $B_2$  = mean post-sampling weight of blank filters (mg)  
 $V$  = volume as sampled at the nominal flowrate (i.e., 1.7 L/min or 2.2 L/min)

**EVALUATION OF METHOD:**

1. Bias: In respirable dust measurements, the bias in a sample is calculated relative to the appropriate respirable dust convention. The theory for calculating bias was developed by Bartley and Breuer [10]. For this method, the bias, therefore, depends on the international convention for respirable dust, the cyclones' penetration curves, and the size distribution of the ambient dust. Based on measured penetration curves for non-pulsating flow [1], the bias in this method is shown in Figure 1.

For dust size distributions in the shaded region, the bias in this method lies within the  $\pm 0.10$  criterion established by NIOSH for method validation. Bias larger than  $\pm 0.10$  would, therefore, be expected for some workplace aerosols. However, bias within  $\pm 0.20$  would be expected for dusts with geometric standard deviations greater than 2.0, which is the case in most workplaces.

Bias can also be caused in a cyclone by the pulsation of the personal sampling pump. Bartley, et al. [12] showed that cyclone samples with pulsating flow can have negative bias as large as  $-0.22$  relative to samples with steady flow. The magnitude of the bias depends on the amplitude of the pulsation at the

cyclone aperture and the dust size distribution. For pumps with instantaneous flow rates within 20% of the mean, the pulsation bias magnitude is less than 0.02 for most dust size distributions encountered in the workplace.

Electric charges on the dust and the cyclone will also cause bias. Briant and Moss [13] have found electrostatic biases as large as -50%, and show that cyclones made with graphite-filled nylon eliminate the problem. Use of conductive samplers and filter cassettes (Omega Specialty Instrument Co., 4 Kidder Road, Chelmsford, MA 01824) is recommended.

2. Precision: The figure 0.068 mg quoted above for the precision is based on a study [3] of weighing procedures employed in the past by the Mine Safety and Health Administration (MSHA) in which filters are pre-weighed by the filter manufacturer and post-weighed by MSHA using balances readable to 0.010 mg. MSHA [14] has recently completed a study using a 0.001 mg balance for the post-weighing, indicating imprecision equal to 0.006 mg.

Imprecision equal to 0.010 mg was used for estimating the LOD and is based on specific suggestions [8] regarding filter weighing using a single 0.001 mg balance. This value is consistent with another study [15] of repeat filter weighings, although the actual attainable precision may depend strongly on the specific environment to which the filters are exposed between the two weighings.

#### REFERENCES:

- [1] Bartley DL, Chen CC, Song R, Fischbach TJ [1994]. Respirable aerosol sampler performance testing. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 55(11): 1036-1046.
- [2] Bowman JD, Bartley DL, Breuer GM, Shulman SA [1985]. The precision of coal mine dust sampling. Cincinnati, OH: National Institute for Occupational Safety and Health, DHEW (NIOSH) Pub. No. 85-220721.
- [3] Parobeck P, Tomb TF, Ku H, Cameron J [1981]. Measurement assurance program for the weighings of respirable coal mine dust samples. *J Qual Tech* 13:157.
- [4] ACGIH [1996]. 1996 Threshold limit values (TLVs™) for chemical substances and physical agents and biological exposure indices (BEIs™). Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- [5] American Conference of Governmental Industrial Hygienists [1991]. Notice of intended change - appendix D - particle size-selective sampling criteria for airborne particulate matter. *Appl Occup Env Hyg* 6(9): 817-818.
- [6] NIOSH [1977]. NIOSH Manual of sampling data sheets. Cincinnati, OH: National Institute for Occupational Safety and Health, DHEW (NIOSH) Publication No. 77-159.
- [7] Higgins RI, Dewell P [1967]. A gravimetric size selecting personal dust sampler. In: Davies CN, Ed. *Inhaled particles and vapors II*. Oxford: Pergamon Press, pp. 575-586.
- [8] Bowman JD, Bartley DL, Breuer GM, Doemeny LJ, Murdock DJ [1984]. Accuracy criteria recommended for the certification of gravimetric coal mine dust personal samplers. NTIS Pub. No. PB 85-222446 (1984).
- [9] Breslin, JA, Page SJ, Jankowski RA [1983]. Precision of personal sampling of respirable dust in coal mines. U.S. Bureau of Mines Report of Investigations #8740.
- [10] Bartley DL, Breuer GM [1982]. Analysis and optimization of the performance of the 10-mm cyclone. *Am Ind Hyg Assoc J* 43: 520-528.
- [11] Caplan KJ, Doemeny LJ, Sorenson S [1973]. Evaluation of coal mine dust personal sampler performance, Final Report. NIOSH Contract No. PH CPE-r-70-0036.
- [12] Bartley DL, Breuer GM, Baron PA, Bowman JD [1984]. Pump fluctuations and their effect on cyclone performance. *Am Ind Hyg Assoc J* 45(1): 10-18.
- [13] Briant JK, Moss OR [1983]. The influence of electrostatic charge on the performance of 10-mm nylon cyclones. Unpublished paper presented at the American Industrial Hygiene Conference, Philadelphia, PA, May 1983.
- [14] Koqut J [1994]. Private Communication from MSHA, May 12, 1994.

[15] Vaughn NP, Chalmers CP, Botham [1990]. Field comparison of personal samplers for inhalable dust. *Ann Occup Hyg* 34: 553-573.

**METHOD REVISED BY:** David L. Bartley, Ph.D., NIOSH/DPSE/ARDB and Ray Feldman, OSHA.

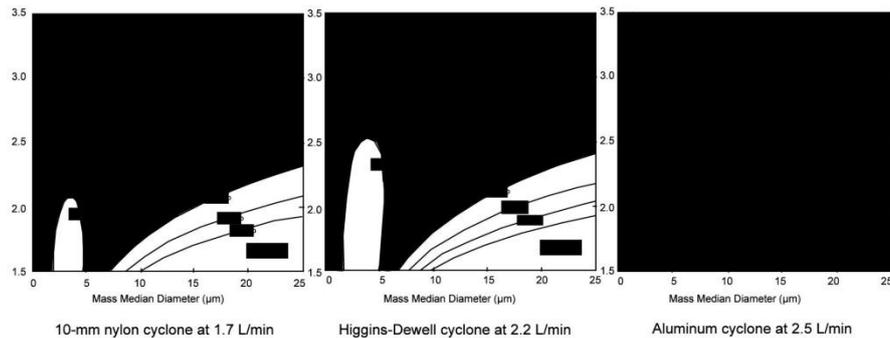


Figure 1. Bias of three cyclone types relative to the international respirable dust sampling convention.

#### APPENDIX: Jarless Method for Calibration of Cyclone Assemblies

This procedure may be used in the field to calibrate an air sampling pump and a cyclone assembly without using the one-liter "calibration jar".

- (1) Connect the pump to a pressure gauge or water manometer and a light load (adjustable valve or 5- $\mu\text{m}$  filter) equal to 2" to 5"  $\text{H}_2\text{O}$  with a "TEE" connector and flexible tubing. Connect other end of valve to an electronic bubble meter or standard bubble tube with flexible tubing (See Fig. 2.1).  
NOTE: A light load can be a 5- $\mu\text{m}$  filter and/or an adjustable valve. A heavy load can be several 0.8- $\mu\text{m}$  filters and/or adjustable valve.
- (2) Adjust the pump to 1.7 L/min, as indicated on the bubble meter/tube, under the light load conditions (2" to 5"  $\text{H}_2\text{O}$ ) as indicated on the pressure gauge or manometer.
- (3) Increase the load until the pressure gauge or water manometer indicates between 25" and 35"  $\text{H}_2\text{O}$ . Check the flow rate of the pump again. The flow rate should remain at 1.7 L/min  $\pm$  5%.
- (4) Replace the pressure gauge or water manometer and the electronic bubble meter or standard bubble tube with the cyclone having a clean filter installed (Fig. 2.2). If the loading caused by the cyclone assembly is between 2" and 5"  $\text{H}_2\text{O}$ , the calibration is complete and the pump and cyclone are ready for sampling.

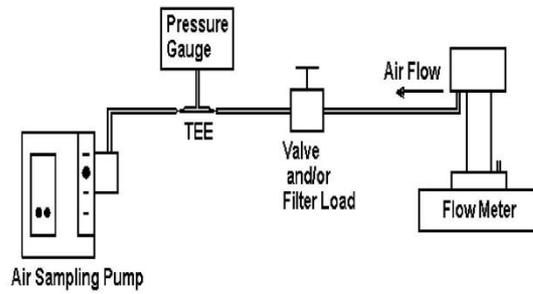


Figure 2.1 Block Diagram of Pump/Load/Flow Meter Set-up.

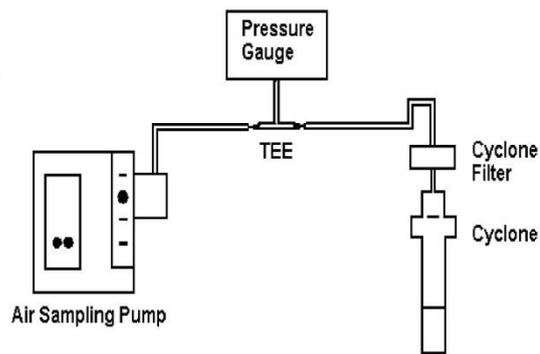


Figure 2.2. Block Diagram with Cyclone as the Test Load.

**PARTICULATES NOT OTHERWISE REGULATED, TOTAL**

**0500**

DEFINITION: total aerosol mass      CAS: NONE      RTECS: NONE

METHOD: 0500, Issue 2		EVALUATION: FULL	Issue 1: 15 February 1984 Issue 2: 15 August 1994
OSHA: 15 mg/m <sup>3</sup> NIOSH: no REL ACGIH: 10 mg/m <sup>3</sup> , total dust less than 1% quartz		PROPERTIES: contains no asbestos and quartz less than 1%	
SYNONYMS: nuisance dusts; particulates not otherwise classified			
SAMPLING		MEASUREMENT	
<b>SAMPLER:</b> FILTER (tared 37-mm, 5-µm PVC filter)  <b>FLOW RATE:</b> 1 to 2 L/min  <b>VOL-MIN:</b> 7 L @ 15 mg/m <sup>3</sup> <b>-MAX:</b> 133 L @ 15 mg/m <sup>3</sup>  <b>SHIPMENT:</b> routine  <b>SAMPLE STABILITY:</b> indefinitely  <b>BLANKS:</b> 2 to 10 field blanks per set  <b>BULK SAMPLE:</b> none required		<b>TECHNIQUE:</b> GRAVIMETRIC (FILTER WEIGHT)  <b>ANALYTE:</b> airborne particulate material  <b>BALANCE:</b> 0.001 mg sensitivity; use same balance before and after sample collection  <b>CALIBRATION:</b> National Institute of Standards and Technology Class S-1.1 weights or ASTM Class 1 weights  <b>RANGE:</b> 0.1 to 2 mg per sample  <b>ESTIMATED LOD:</b> 0.03 mg per sample  <b>PRECISION (<math>\bar{S}_r</math>):</b> 0.026 [2]	
ACCURACY			
<b>RANGE STUDIED:</b> 8 to 28 mg/m <sup>3</sup>			
<b>BIAS:</b> 0.01%			
<b>OVERALL PRECISION (<math>\bar{S}_r</math>):</b> 0.056 [1]			
<b>ACCURACY:</b> ±11.04%			
<b>APPLICABILITY:</b> The working range is 1 to 20 mg/m <sup>3</sup> for a 100-L air sample. This method is nonspecific and determines the total dust concentration to which a worker is exposed. It may be applied, e.g., to gravimetric determination of fibrous glass [3] in addition to the other ACGIH particulates not otherwise regulated [4].			
<b>INTERFERENCES:</b> Organic and volatile particulate matter may be removed by dry ashing [3].			
<b>OTHER METHODS:</b> This method is similar to the criteria document method for fibrous glass [3] and Method 5000 for carbon black. This method replaces Method S349 [5]. Impingers and direct-reading instruments may be used to collect total dust samples, but these have limitations for personal sampling.			

**EQUIPMENT:**

1. Sampler: 37-mm PVC, 2- to 5- $\mu$ m pore size membrane or equivalent hydrophobic filter and supporting pad in 37-mm cassette filter holder.
  2. Personal sampling pump, 1 to 2 L/min, with flexible connecting tubing.
  3. Microbalance, capable of weighing to 0.001 mg.
  4. Static neutralizer: e.g., Po-210; replace nine months after the production date.
  5. Forceps (preferably nylon).
  6. Environmental chamber or room for balance (e.g., 20 °C  $\pm$  1 °C and 50%  $\pm$  5% RH).
- 

**SPECIAL PRECAUTIONS:** None.

---

**PREPARATION OF FILTERS BEFORE SAMPLING:**

1. Equilibrate the filters in an environmentally controlled weighing area or chamber for at least 2 h.  
NOTE: An environmentally controlled chamber is desirable, but not required.
2. Number the backup pads with a ballpoint pen and place them, numbered side down, in filter cassette bottom sections.
3. Weigh the filters in an environmentally controlled area or chamber. Record the filter tare weight,  $W_f$  (mg), and the mean laboratory blank tare weight,  $B_f$  (mg).
  - a. Zero the balance before each weighing.
  - b. Handle the filter with forceps. Pass the filter over an antistatic radiation source. Repeat this step if filter does not release easily from the forceps or if filter attracts balance pan. Static electricity can cause erroneous weight readings.
4. Assemble the filter in the filter cassettes and close firmly so that leakage around the filter will not occur. Place a plug in each opening of the filter cassette. Place a cellulose shrink band around the filter cassette, allow to dry and mark with the same number as the backup pad.

**SAMPLING:**

5. Calibrate each personal sampling pump with a representative sampler in line.
6. Sample at 1 to 2 L/min for a total sample volume of 7 to 133 L. Do not exceed a total filter loading of approximately 2 mg total dust. Take two to four replicate samples for each batch of field samples for quality assurance on the sampling procedure.

**SAMPLE PREPARATION:**

7. Wipe dust from the external surface of the filter cassette with a moist paper towel to minimize contamination. Discard the paper towel.
8. Remove the top and bottom plugs from the filter cassette. Equilibrate for at least 2 h in the balance room.
9. Remove the cassette band, pry open the cassette, and remove the filter gently to avoid loss of dust.  
NOTE: If the filter adheres to the underside of the cassette top, very gently lift away by using the dull side of a scalpel blade. This must be done carefully or the filter will tear.

**CALIBRATION AND QUALITY CONTROL:**

10. Zero the microbalance before all weighings. Use the same microbalance for weighing filters before and after sample collection. Maintain and calibrate the balance with National Institute of Standards and Technology Class S-1.1 or ASTM Class 1 weights.
11. The set of replicate samples should be exposed to the same dust environment, either in a laboratory dust chamber [7] or in the field [8]. The quality control samples must be taken with the same

equipment, procedures, and personnel used in the routine field samples. The relative standard deviation calculated from these replicates should be recorded on control charts and action taken when the precision is out of control [7].

**MEASUREMENT:**

12. Weigh each filter, including field blanks. Record the post-sampling weight,  $W_2$  (mg), and the mean post-sampling weight of laboratory blank filters,  $B_2$  (mg). Record anything remarkable about a filter (e.g., overload, leakage, wet, torn, etc.).

**CALCULATIONS:**

13. Calculate the concentration of total particulate,  $C$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), in the air volume sampled,  $V$  (L):

$$C = \frac{(W_2 - W_1) - (B_2 - B_1)}{V} \times 10^3, \text{ mg}/\text{m}^3.$$

**EVALUATION OF METHOD:**

Lab testing with blank filters and generated atmospheres of carbon black was done at 8 to 28  $\text{mg}/\text{m}^3$  [2,6]. Precision and accuracy data are given on page 0500-1.

**REFERENCES:**

- [1] NIOSH Manual of Analytical Methods, 3rd ed., NMAM 5000, DHHS (NIOSH) Publication No. 84-100 (1984).
- [2] Unpublished data from Non-textile Cotton Study, NIOSH/DRDS/EIB.
- [3] NIOSH Criteria for a Recommended Standard ... Occupational Exposure to Fibrous Glass, U.S. Department of Health, Education, and Welfare, Publ. (NIOSH) 77-152, 119-142 (1977).
- [4] 1993-1994 Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices, Appendix D, ACGIH, Cincinnati, OH (1993).
- [5] NIOSH Manual of Analytical Methods, 2nd ed., V. 3, S349, U.S. Department of Health, Education, and Welfare, Publ. (NIOSH) 77-157-C (1977).
- [6] Documentation of the NIOSH Validation Tests, S262 and S349, U.S. Department of Health, Education, and Welfare, Publ. (NIOSH) No. 77-185 (1977).
- [7] Bowman, J.D., D.L. Bartley, G.M. Breuer, L.J. Doemeny, and D.J. Murdock. Accuracy Criteria Recommended for the Certification of Gravimetric Coal Mine Dust Personal Samplers. NTIS Pub. No. PB 85-222446 (1984).
- [8] Breslin J.A., S.J. Page, and R.A. Jankowski. Precision of Personal Sampling of Respirable Dust in Coal Mines, U.S. Bureau of Mines Report of Investigations #8740 (1983).

**METHOD REVISED BY:**

Jerry Clere and Frank Hearl, P.E., NIOSH/DRDS.



## **Anexo D - Plantas de localização**













Planta com a localização das medições realizadas



## **Anexo E - Resultados das medições efetuadas**





MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

**instituto tecnológico e nuclear**

UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA

Estrada Nacional 10, 2686-953 Sacavém

Tel: (+351) 219 946 000, fax: (+351) 219 941 995, Email: dprsn.secretariado@itn.pt

Laboratórios de Medida / Espectrometria Gama

## Relatório de Ensaio

### ORIGEM

*Entidade* : Gil Estevez  
*Endereço* : Previnorma

*Referência do cliente* : Amostra I

*Data de recepção* : 2010-11-12

### IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

*Código LM* : LM.29.2439/10

*Descrição* : Fosforite (Tunísia)

*Quantidade* : (290,4 ± 8,7) g

*Data de referência* : 2010-11-12

### IDENTIFICAÇÃO DA ANÁLISE

*Método* : Espectrometria gama com detectores HPGe (procedimento técnico LM\_PT\_01)

*Referência do espectro* : D91113

*Técnico* : Lídia Silva

*Data da medição* : 2011-01-25

*Data da análise* : 2011-03-18

### RELATÓRIO

A Análise por Espectrometria Gama apresentou os valores indicados na tabela anexa.

Os resultados referem-se exclusivamente à amostra ensaiada.

Este relatório não deve ser reproduzido, a não ser na íntegra, sem o acordo da UPSR.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

**instituto tecnológico e nuclear**

UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA

Estrada Nacional 10, 2686-953 Sacavém

Tel: (+351) 219 946 000, fax: (+351) 219 941 995, Email: dprsn.secretariado@itn.pt

Laboratórios de Medida / Espectrometria Gama

**TABELA DE RESULTADOS**

Radionuclido	Ae ± U (Bq/kg)	Ir (%)	AMD (Bq/kg)
K-40	2,99E+01 ± 8,0E+00	26,9	1,11E+01
Ra-226	3,81E+02 ± 2,1E+01	5,4	2,26E+00
Th-232	5,23E+01 ± 3,8E+00	7,2	2,99E+00
U-235	2,20E+01 ± 4,1E+00	18,7	6,43E+00

Legenda:

- Ae = Actividade específica.  
O número a seguir ao símbolo ± é o valor da incerteza expandida, U = Ku, com U determinado a partir da incerteza padrão combinada, u, e um factor de expansão K = 2.  
A incerteza expandida U define um intervalo no qual, para uma distribuição Normal, se pode garantir, com aproximadamente 95% de confiança, que se encontra o valor real da actividade específica.
- Ir = Incerteza relativa expandida da actividade específica.
- AMD = Actividade mínima detectável.  
Representa o valor de actividade a partir do qual a probabilidade de uma falsa identificação do radionuclido é inferior a 5%.
- \* = O radionuclido foi detectado mas a sua actividade específica é inferior à AMD. Assim existe uma probabilidade não desprezável de se tratar de uma falsa identificação.
- n.d. = O radionuclido não foi detectado.

**FIM DO RELATÓRIO**

Sacavém, 18 de Março de 2011

O Responsável Técnico

Lídia Silva

O Responsável dos LM

Mário C. Reis

Ficheiro de relatório: D91113

Página 2 de 2

Modelo LM\_LM\_06-Rev.2



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

**instituto tecnológico e nuclear**

UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA

Estrada Nacional 10, 2686-953 Sacavém

Tel: (+351) 219 946 000, fax: (+351) 219 941 995, Email: dprsn.secretariado@itn.pt

Laboratórios de Medida / Espectrometria Gama

## Relatório de Ensaio

### ORIGEM

*Entidade* : Gil Estevez  
*Endereço* : Previnorma

*Referência do cliente* : Amostra II

*Data de recepção* : 2010-11-12

### IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

*Código LM* : LM.29.2440/10

*Descrição* : Fosforite (Síria)

*Quantidade* : (131,8 ± 4,6) g

*Data de referência* : 2010-11-12

### IDENTIFICAÇÃO DA ANÁLISE

*Método* : Espectrometria gama com detectores HPGe (procedimento técnico LM\_PT\_01)

*Referência do espectro* : D91121

*Técnico* : Lídia Silva

*Data da medição* : 2011-02-08

*Data da análise* : 2011-03-17

### RELATÓRIO

A Análise por Espectrometria Gama apresentou os valores indicados na tabela anexa.

Os resultados referem-se exclusivamente à amostra ensaiada.

Este relatório não deve ser reproduzido, a não ser na íntegra, sem o acordo da UPSR.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

**instituto tecnológico e nuclear**

UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA

Estrada Nacional 10, 2686-953 Sacavém

Tel: (+351) 219 946 000, fax: (+351) 219 941 995, Email: dprsn.secretariado@itn.pt

Laboratórios de Medida / Espectrometria Gama

**TABELA DE RESULTADOS**

Radionuclido	Ae ± U (Bq/kg)	Ir (%)	AMD (Bq/kg)
K-40	2,4E+01 ± 1,4E+01	58,1	2,37E+01
Ra-226	8,45E+02 ± 4,9E+01	5,8	4,38E+00
Th-232	1,51E+01 ± 3,9E+00	26,2	8,23E+00
U-235	4,85E+01 ± 6,2E+00	12,8	1,37E+01

Legenda:

- Ae = Actividade específica.  
O número a seguir ao símbolo ± é o valor da incerteza expandida,  $U = Ku$ , com  $U$  determinado a partir da incerteza padrão combinada,  $u$ , e um factor de expansão  $K = 2$ .  
A incerteza expandida  $U$  define um intervalo no qual, para uma distribuição Normal, se pode garantir, com aproximadamente 95% de confiança, que se encontra o valor real da actividade específica.
- Ir = Incerteza relativa expandida da actividade específica.
- AMD = Actividade mínima detectável.  
Representa o valor de actividade a partir do qual a probabilidade de uma falsa identificação do radionuclido é inferior a 5%.
- \* = O radionuclido foi detectado mas a sua actividade específica é inferior à AMD. Assim existe uma probabilidade não desprezável de se tratar de uma falsa identificação.
- n.d. = O radionuclido não foi detectado.

**FIM DO RELATÓRIO**

Sacavém, 17 de Março de 2011

O Responsável Técnico

Lídia Silva

O Responsável dos LM

Mário C. Reis

Ficheiro de relatório: D91121

Página 2 de 2

Modelo LM\_LM\_06-Rev.2



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

**instituto tecnológico e nuclear**

UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA

Estrada Nacional 10, 2686-953 Sacavém

Tel: (+351) 219 946 000, fax: (+351) 219 941 995, Email: dprsn.secretariado@itn.pt

Laboratórios de Medida / Espectrometria Gama

## Relatório de Ensaio

### ORIGEM

*Entidade* : Gil Estevez  
*Endereço* : Previnorma

*Referência do cliente* : Amostra IV

*Data de recepção* : 2010-11-12

### IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

*Código LM* : LM.29.2442/10

*Descrição* : Cinzas Filtros

*Quantidade* : (85,5 ± 8,39) g

*Data de referência* : 2010-11-12

### IDENTIFICAÇÃO DA ANÁLISE

*Método* : Espectrometria gama com detectores HPGe (procedimento técnico LM\_PT\_01)

*Referência do espectro* : D91122

*Técnico* : Lídia Silva

*Data da medição* : 2011-02-09

*Data da análise* : 2011-03-17

### RELATÓRIO

A Análise por Espectrometria Gama apresentou os valores indicados na tabela anexa.

Os resultados referem-se exclusivamente à amostra ensaiada.

Este relatório não deve ser reproduzido, a não ser na íntegra, sem o acordo da UPSR.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

**instituto tecnológico e nuclear**

UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA

Estrada Nacional 10, 2686-953 Sacavém

Tel: (+351) 219 946 000, fax: (+351) 219 941 995, Email: dprsn.secretariado@itn.pt

Laboratórios de Medida / Espectrometria Gama

**TABELA DE RESULTADOS**

Radionuclido	Ae $\pm$ U (Bq/kg)	Ir (%)	AMD (Bq/kg)
K-40	1,098E+03 $\pm$ 2,31E+02	21,0	2,59E+01
Ra-226	1,55E+02 $\pm$ 1,9E+01	12,2	3,77E+00
Th-232	1,15E+01 $\pm$ 4,0E+00	34,9	8,17E+00
U-235	3,92E+01 $\pm$ 7,7E+00	19,6	1,27E+01

Legenda:

Ae = Actividade específica.

O número a seguir ao símbolo  $\pm$  é o valor da incerteza expandida,  $U = Ku$ , com  $U$  determinado a partir da incerteza padrão combinada,  $u$ , e um factor de expansão  $K = 2$ .

A incerteza expandida  $U$  define um intervalo no qual, para uma distribuição Normal, se pode garantir, com aproximadamente 95% de confiança, que se encontra o valor real da actividade específica.

Ir = Incerteza relativa expandida da actividade específica.

AMD = Actividade mínima detectável.

Representa o valor de actividade a partir do qual a probabilidade de uma falsa identificação do radionuclido é inferior a 5%.

\* = O radionuclido foi detectado mas a sua actividade específica é inferior à AMD. Assim existe uma probabilidade não desprezável de se tratar de uma falsa identificação.

n.d. = O radionuclido não foi detectado.

**FIM DO RELATÓRIO**

Sacavém, 17 de Março de 2011

O Responsável Técnico

Lídia Silva

O Responsável dos LM

Mário C. Reis

Ficheiro de relatório: D91122

Página 2 de 2

Modelo LM\_LM\_06-Rev.2



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

**instituto tecnológico e nuclear**

UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA

Estrada Nacional 10, 2686-953 Sacavém

Tel: (+351) 219 946 000, fax: (+351) 219 941 995, Email: dprsn.secretariado@itn.pt

Laboratórios de Medida / Espectrometria Gama

## Relatório de Ensaio

### ORIGEM

*Entidade* : Gil Estevez  
*Endereço* : Previnorma

*Referência do cliente* : Amostra V

*Data de recepção* : 2010-11-12

### IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

*Código LM* : LM.29.2443/10

*Descrição* : Fosforite (Senegal)

*Quantidade* : (223 ± 5,9) g

*Data de referência* : 2010-11-12

### IDENTIFICAÇÃO DA ANÁLISE

*Método* : Espectrometria gama com detectores HPGe (procedimento técnico LM\_PT\_01)

*Referência do espectro* : D91123

*Técnico* : Lídia Silva

*Data da medição* : 2011-02-10

*Data da análise* : 2011-03-17

### RELATÓRIO

A Análise por Espectrometria Gama apresentou os valores indicados na tabela anexa.

Os resultados referem-se exclusivamente à amostra ensaiada.

Este relatório não deve ser reproduzido, a não ser na íntegra, sem o acordo da UPSR.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

**instituto tecnológico e nuclear**

UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA

Estrada Nacional 10, 2686-953 Sacavém

Tel: (+351) 219 946 000, fax: (+351) 219 941 995, Email: dprsn.secretariado@itn.pt

Laboratórios de Medida / Espectrometria Gama

**TABELA DE RESULTADOS**

Radionuclido	Ae ± U (Bq/kg)	Ir (%)	AMD (Bq/kg)
K-40	3,4E+01 ± 1,4E+01	39,7	2,11E+01
Ra-226	1,604E+03 ± 8,2E+01	5,1	3,20E+00
Th-232	2,60E+01 ± 8,9E+00	34,5	6,82E+00
U-235	1,06E+02 ± 1,4E+01	13,4	1,43E+01

Legenda:

Ae = Actividade específica.

O número a seguir ao símbolo ± é o valor da incerteza expandida, U = Ku, com U determinado a partir da incerteza padrão combinada, u, e um factor de expansão K = 2.

A incerteza expandida U define um intervalo no qual, para uma distribuição Normal, se pode garantir, com aproximadamente 95% de confiança, que se encontra o valor real da actividade específica.

Ir = Incerteza relativa expandida da actividade específica.

AMD = Actividade mínima detectável.

Representa o valor de actividade a partir do qual a probabilidade de uma falsa identificação do radionuclido é inferior a 5%.

\* = O radionuclido foi detectado mas a sua actividade específica é inferior à AMD. Assim existe uma probabilidade não desprezável de se tratar de uma falsa identificação.

n.d. = O radionuclido não foi detectado.

**FIM DO RELATÓRIO**

Sacavém, 17 de Março de 2011

O Responsável Técnico

Lídia Silva

O Responsável dos LM

Mário C. Reis

Ficheiro de relatório: D91123

Página 2 de 2

Modelo LM\_LM\_06-Rev.2



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

**instituto tecnológico e nuclear**

UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA

Estrada Nacional 10, 2686-953 Sacavém

Tel: (+351) 219 946 000, fax: (+351) 219 941 995, Email: dprsn.secretariado@itn.pt

Laboratórios de Medida / Espectrometria Gama

## Relatório de Ensaio

### ORIGEM

*Entidade* : Gil Estevez  
*Endereço* : Previnorma

*Referência do cliente* : Amostra III

*Data de recepção* : 2010-11-12

### IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

*Código LM* : LM.29.2441/10

*Descrição* : Fosforite (Marrocos)

*Quantidade* : (286,7 ± 6,94) g

*Data de referência* : 2010-11-12

### IDENTIFICAÇÃO DA ANÁLISE

*Método* : Espectrometria gama com detectores HPGe (procedimento técnico LM\_PT\_01)

*Referência do espectro* : D91124

*Técnico* : Lídia Silva

*Data da medição* : 2011-02-14

*Data da análise* : 2011-03-18

### RELATÓRIO

A Análise por Espectrometria Gama apresentou os valores indicados na tabela anexa.

Os resultados referem-se exclusivamente à amostra ensaiada.

Este relatório não deve ser reproduzido, a não ser na íntegra, sem o acordo da UPSR.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

**instituto tecnológico e nuclear**

UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA

Estrada Nacional 10, 2686-953 Sacavém

Tel: (+351) 219 946 000, fax: (+351) 219 941 995, Email: dprsn.secretariado@itn.pt

Laboratórios de Medida / Espectrometria Gama

**TABELA DE RESULTADOS**

Radionuclido	Ae ± U (Bq/kg)	Ir (%)	AMD (Bq/kg)
K-40	1,33E+01 ± 9,6E+00	72,1	1,47E+01 *
Ra-226	1,254E+03 ± 6,2E+01	5,0	2,82E+00
Th-232	1,92E+01 ± 2,5E+00	13,2	4,73E+00
U-235	7,70E+01 ± 8,3E+00	10,8	1,14E+01

Legenda:

Ae = Actividade específica.

O número a seguir ao símbolo ± é o valor da incerteza expandida, U = Ku, com U determinado a partir da incerteza padrão combinada, u, e um factor de expansão K = 2.

A incerteza expandida U define um intervalo no qual, para uma distribuição Normal, se pode garantir, com aproximadamente 95% de confiança, que se encontra o valor real da actividade específica.

Ir = Incerteza relativa expandida da actividade específica.

AMD = Actividade mínima detectável.

Representa o valor de actividade a partir do qual a probabilidade de uma falsa identificação do radionuclido é inferior a 5%.

\* = O radionuclido foi detectado mas a sua actividade específica é inferior à AMD. Assim existe uma probabilidade não desprezável de se tratar de uma falsa identificação.

n.d. = O radionuclido não foi detectado.

**FIM DO RELATÓRIO**

Sacavém, 18 de Março de 2011

O Responsável Técnico

Lídia Silva

O Responsável dos LM

Mário C. Reis

Ficheiro de relatório: D91124

Página 2 de 2

Modelo LM\_LM\_06-Rev.2



**INSTITUTO TECNOLÓGICO E NUCLEAR, I.P.**  
NUCLEAR AND TECHNOLOGICAL INSTITUTE

**UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA**  
RADIOLOGICAL PROTECTION AND SAFETY UNIT

Estrada Nacional 10, Apartado 21  
P-2686-953 SACA VÉM  
PORTUGAL

Telefone: (351) 219946000  
Fax: (351) 219941995  
E-mail: dprsn@itn.pt

**BOLETIM DE ANÁLISE**  
*ANALYSIS REPORT*

<b>Análise n.º:</b> Analysis n.º:	<b>Solicitada por: J. Gil Estevez</b> Requested by:
<b>Período de Amostragem: 27-10-2010 – 25-11-2010</b> Sampling period:	<b>Data do Pedido:</b> Date of request:
<b>Tipo de Amostra: Ar</b> Sample type:	<b>Código da Amostra (Cliente): JGE1010-01</b> Customer sample code:
<b>Volume da Amostra Analisada:</b> Volume of analysed sample:	<b>Data da Medida: 06/12/2010</b> Measurement date:
<b>Tipo de Análise:</b> Type of analysis: <input checked="" type="checkbox"/> <b>Radão no ar (interior de habitações)</b> ---Indoor Radon <input type="checkbox"/> <b>Radão na água</b> ---Radon in water	<b>Resultados da Análise: 472 Bq m<sup>-3</sup></b> Results of analysis:
<b>Observações: Concentração superior ao valor indicado na Recomendação 90/143/EURATOM para habitações já existentes (400 Bq m<sup>-3</sup>).</b> Observations:	

**Grupo de Radioactividade Ambiente**

**Técnico Responsável**

**(Eva Andrade)**



**INSTITUTO TECNOLÓGICO E NUCLEAR, I.P.**  
NUCLEAR AND TECHNOLOGICAL INSTITUTE

**UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA**  
RADIOLOGICAL PROTECTION AND SAFETY UNIT

Estrada Nacional 10, Apartado 21  
P-2686-953 SACA VÉM  
PORTUGAL

Telefone: (351) 219946000  
Fax: (351) 219941995  
E-mail: dprsn@itn.pt

**BOLETIM DE ANÁLISE**  
*ANALYSIS REPORT*

<b>Análise n.º:</b> Analysis n.º:	<b>Solicitada por: J. Gil Estevez</b> Requested by:
<b>Período de Amostragem: 27-10-2010 – 25-11-2010</b> Sampling period:	<b>Data do Pedido:</b> Date of request:
<b>Tipo de Amostra: Ar</b> Sample type:	<b>Código da Amostra (Cliente): JGE1010-02</b> Customer sample code:
<b>Volume da Amostra Analisada:</b> Volume of analysed sample:	<b>Data da Medida: 06/12/2010</b> Measurement date:
<b>Tipo de Análise:</b> Type of analysis: <input checked="" type="checkbox"/> <b>Radão no ar (interior de habitações)</b> ---Indoor Radon <input type="checkbox"/> <b>Radão na água</b> ---Radon in water	<b>Resultados da Análise: 21 Bq m<sup>-3</sup></b> Results of analysis:
<b>Observações: Concentração inferior ao valor indicado na Recomendação 90/143/EURATOM para habitações já existentes (400 Bq m<sup>-3</sup>).</b> Observations:	

**Grupo de Radioactividade Ambiente**

**Técnico Responsável**

**(Eva Andrade)**



**INSTITUTO TECNOLÓGICO E NUCLEAR, I.P.**  
NUCLEAR AND TECHNOLOGICAL INSTITUTE

**UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA**  
RADIOLOGICAL PROTECTION AND SAFETY UNIT

Estrada Nacional 10, Apartado 21  
P-2686-953 SACA VÉM  
PORTUGAL

Telefone: (351) 219946000  
Fax: (351) 219941995  
E-mail: dprsn@itn.pt

**BOLETIM DE ANÁLISE**  
*ANALYSIS REPORT*

<b>Análise n.º:</b> Analysis n.º:	<b>Solicitada por: J. Gil Estevez</b> Requested by:
<b>Período de Amostragem: 27-10-2010 – 25-11-2010</b> Sampling period:	<b>Data do Pedido:</b> Date of request:
<b>Tipo de Amostra: Ar</b> Sample type:	<b>Código da Amostra (Cliente): JGE1010-03</b> Customer sample code:
<b>Volume da Amostra Analisada:</b> Volume of analysed sample:	<b>Data da Medida: 06/12/2010</b> Measurement date:
<b>Tipo de Análise:</b> Type of analysis: <input checked="" type="checkbox"/> <b>Radão no ar (interior de habitações)</b> ---Indoor Radon <input type="checkbox"/> <b>Radão na água</b> ---Radon in water	<b>Resultados da Análise: 461 Bq m<sup>-3</sup></b> Results of analysis:
<b>Observações: Concentração superior ao valor indicado na Recomendação 90/143/EURATOM para habitações já existentes (400 Bq m<sup>-3</sup>).</b> Observations:	

**Grupo de Radioactividade Ambiente**

**Técnico Responsável**

**(Eva Andrade)**



**INSTITUTO TECNOLÓGICO E NUCLEAR, I.P.**  
NUCLEAR AND TECHNOLOGICAL INSTITUTE

**UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA**  
RADIOLOGICAL PROTECTION AND SAFETY UNIT

Estrada Nacional 10, Apartado 21  
P-2686-953 SACA VÉM  
PORTUGAL

Telefone: (351) 219946000  
Fax: (351) 219941995  
E-mail: dprsn@itn.pt

**BOLETIM DE ANÁLISE**  
*ANALYSIS REPORT*

<b>Análise n.º:</b> Analysis n.º:	<b>Solicitada por: J. Gil Estevez</b> Requested by:
<b>Período de Amostragem: 27-10-2010 – 25-11-2010</b> Sampling period:	<b>Data do Pedido:</b> Date of request:
<b>Tipo de Amostra: Ar</b> Sample type:	<b>Código da Amostra (Cliente): JGE1010-04</b> Customer sample code:
<b>Volume da Amostra Analisada:</b> Volume of analysed sample:	<b>Data da Medida: 06/12/2010</b> Measurement date:
<b>Tipo de Análise:</b> Type of analysis: <input checked="" type="checkbox"/> <b>Radão no ar (interior de habitações)</b> ---Indoor Radon <input type="checkbox"/> <b>Radão na água</b> ---Radon in water	<b>Resultados da Análise: 61 Bq m<sup>-3</sup></b> Results of analysis:
<b>Observações: Concentração inferior ao valor indicado na Recomendação 90/143/EURATOM para habitações já existentes (400 Bq m<sup>-3</sup>).</b> Observations:	

**Grupo de Radioactividade Ambiente**

**Técnico Responsável**

**(Eva Andrade)**



**INSTITUTO TECNOLÓGICO E NUCLEAR, I.P.**  
NUCLEAR AND TECHNOLOGICAL INSTITUTE

**UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA**  
RADIOLOGICAL PROTECTION AND SAFETY UNIT

Estrada Nacional 10, Apartado 21  
P-2686-953 SACA VÉM  
PORTUGAL

Telefone: (351) 219946000  
Fax: (351) 219941995  
E-mail: dprsn@itn.pt

**BOLETIM DE ANÁLISE**  
*ANALYSIS REPORT*

<b>Análise n.º:</b> Analysis n.º:	<b>Solicitada por: J. Gil Estevez</b> Requested by:
<b>Período de Amostragem: 27-10-2010 – 25-11-2010</b> Sampling period:	<b>Data do Pedido:</b> Date of request:
<b>Tipo de Amostra: Ar</b> Sample type:	<b>Código da Amostra (Cliente): JGE1010-05</b> Customer sample code:
<b>Volume da Amostra Analisada:</b> Volume of analysed sample:	<b>Data da Medida: 06/12/2010</b> Measurement date:
<b>Tipo de Análise:</b> Type of analysis: <input checked="" type="checkbox"/> <b>Radão no ar (interior de habitações)</b> ---Indoor Radon <input type="checkbox"/> <b>Radão na água</b> ---Radon in water	<b>Resultados da Análise: 291 Bq m<sup>-3</sup></b> Results of analysis:
<b>Observações: Concentração inferior ao valor indicado na Recomendação 90/143/EURATOM para habitações já existentes (400 Bq m<sup>-3</sup>).</b> Observations:	

**Grupo de Radioactividade Ambiente**

**Técnico Responsável**

**(Eva Andrade)**



**INSTITUTO TECNOLÓGICO E NUCLEAR, I.P.**  
NUCLEAR AND TECHNOLOGICAL INSTITUTE

**UNIDADE DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICA**  
RADIOLOGICAL PROTECTION AND SAFETY UNIT

Estrada Nacional 10, Apartado 21  
P-2686-953 SACA VÉM  
PORTUGAL

Telefone: (351) 219946000  
Fax: (351) 219941995  
E-mail: dprsn@itn.pt

**BOLETIM DE ANÁLISE**  
*ANALYSIS REPORT*

<b>Análise n.º:</b> Analysis n.º:	<b>Solicitada por: J. Gil Estevez</b> Requested by:
<b>Período de Amostragem: 27-10-2010 – 25-11-2010</b> Sampling period:	<b>Data do Pedido:</b> Date of request:
<b>Tipo de Amostra: Ar</b> Sample type:	<b>Código da Amostra (Cliente): JGE1010-06</b> Customer sample code:
<b>Volume da Amostra Analisada:</b> Volume of analysed sample:	<b>Data da Medida: 06/12/2010</b> Measurement date:
<b>Tipo de Análise:</b> Type of analysis: <input checked="" type="checkbox"/> <b>Radão no ar (interior de habitações)</b> ---Indoor Radon <input type="checkbox"/> <b>Radão na água</b> ---Radon in water	<b>Resultados da Análise: 199 Bq m<sup>-3</sup></b> Results of analysis:
<b>Observações: Concentração inferior ao valor indicado na Recomendação 90/143/EURATOM para habitações já existentes (400 Bq m<sup>-3</sup>).</b> Observations:	

**Grupo de Radioactividade Ambiente**

**Técnico Responsável**

**(Eva Andrade)**

## Resultado das Medições Efectuadas - ADP

Data da medição: 25-11-2010

Moagem e Peneira				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
0,41	<b>0,89</b>	<b>0,30</b>	<b>1,49</b>	<b>2,97</b>
0,72				
0,83				
1,05				
1,12				
1,21				

Armazenagem do Produto final				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
0,63	<b>0,99</b>	<b>0,32</b>	<b>1,62</b>	<b>3,24</b>
0,82				
1,12				
0,51				
0,79				
1,17				
1,51				
1,17				
1,15				

Armazem Matéria Prima				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
1,17	<b>0,89</b>	<b>0,20</b>	<b>1,29</b>	<b>2,57</b>
0,82				
0,63				
0,85				
0,97				

Transportadores				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
0,51	<b>0,60</b>	<b>0,22</b>	<b>1,03</b>	<b>2,28</b>
0,72				
0,33				
0,82				

## Resultado das Medições Efectuadas - ADP

Data da medição: 05-08-2010

Moagem e Peneira				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
0,5	<b>0,86</b>	<b>0,23</b>	<b>1,32</b>	<b>2,63</b>
0,7				
0,87				
1,03				
0,98				
1,1				

Armazenagem do Produto final				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
0,73	<b>0,93</b>	<b>0,25</b>	<b>1,42</b>	<b>2,83</b>
0,78				
1,15				
0,61				
0,59				
1,07				
1,21				
1,1				
1,09				

Armazem Matéria Prima				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
1,13	<b>0,85</b>	<b>0,22</b>	<b>1,30</b>	<b>2,60</b>
0,86				
0,52				
0,79				
0,95				

Transportadores				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
0,5	<b>0,59</b>	<b>0,23</b>	<b>1,04</b>	<b>2,31</b>
0,69				
0,32				
0,84				

## Resultado das Medições Efectuadas - ADP

Data da medição: 15-05-2009

Moagem e Peneira				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
0,46	<b>0,89</b>	<b>0,31</b>	<b>1,50</b>	<b>3,01</b>
0,68				
0,79				
1,15				
1,27				
1,01				
1,01				

Armazenagem do Produto final				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
0,62	<b>0,92</b>	<b>0,26</b>	<b>1,45</b>	<b>2,89</b>
0,78				
1,08				
0,49				
0,75				
1,12				
1,23				
1,12				
1,09				
1,09				
1,09				

Armazem Matéria Prima				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
1,12	<b>0,86</b>	<b>0,19</b>	<b>1,23</b>	<b>2,47</b>
0,79				
0,62				
0,83				
0,95				

Transportadores				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
0,49	<b>0,59</b>	<b>0,25</b>	<b>1,10</b>	<b>2,45</b>
0,71				
0,29				
0,87				

## Resultado das Medições Efectuadas - ADP

Data da medição: 22-05-2009

Moagem e Peneira				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
0,38	<b>0,87</b>	<b>0,30</b>	<b>1,48</b>	<b>2,96</b>
0,7				
0,81				
1,2				
1,01				
1,12				

Armazenagem do Produto final				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
0,61	<b>0,96</b>	<b>0,32</b>	<b>1,61</b>	<b>3,23</b>
0,78				
1,03				
0,49				
0,78				
1,16				
1,52				
1,1				
1,2				

Armazem Matéria Prima				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
1,12	<b>0,87</b>	<b>0,19</b>	<b>1,25</b>	<b>2,49</b>
0,91				
0,6				
0,8				
0,91				

Transportadores				
Valores uSv/h	Média uSv/h	Desvio Padrão uSv/h	Média + 2 DP uSv/h	Dose Anual mSv/ano
0,47	<b>0,58</b>	<b>0,24</b>	<b>1,05</b>	<b>2,33</b>
0,7				
0,3				
0,83				