



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharia

# **Contribuição para o Conhecimento da Contaminação de Solos Resultante da Laboração da Indústria Extractiva Mineira**

**Caso de Estudo: Complexo Mineiro da Carrasca e de  
Vale d'Arca (Sabugal)**

**Fábio Sánchez Pombar**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia Civil - Geotecnia e Ambiente**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Gabriel de Faria Lapa Barbosa de Almeida

Co-orientador: Prof. Doutora Sandra da Costa Henriques Soares

**Covilhã, Outubro de 2011**

# Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer toda a disponibilidade e ajuda do meu orientador, o Prof. Pedro Almeida, sem o qual não conseguiria realizar a dissertação. Também lhe quero agradecer a grande ajuda que me proporcionou no trabalho de campo e pelo empréstimo de algum material.

A minha co-orientadora, Prof. Sandra Soares, agradeço a sua enorme paciência e ajuda, e por me disponibilizar o laboratório de Física Nuclear.

Ao Eng. José Riscado quero agradecer a sua ajuda na realização dos ensaios de corte directo, e ao Prof. Luís Pais agradeço por disponibilizar-me o laboratório de Mecânica dos Solos.

Também agradeço ao Centro de Óptica da UBI, pela realização dos ensaios de difracção por raios X.

Por último, quero agradecer a todas as pessoas que contribuíram com alguma ajuda nesta dissertação e às que sempre me apoiaram e estiveram comigo na realização deste objectivo.

# Resumo

Na região de Quarta-feira (freguesia de Sortelha, concelho do Sabugal), funcionaram várias explorações mineiras durante grande parte do século XX. Devido à falta de legislação, os resíduos foram depositados em escombreyras, havendo a possibilidade do material estar contaminado.

Este trabalho consistiu em analisar as escombreyras de duas antigas explorações mineiras de urânio da região (Carrasca e Vale d'Arca). O estudo consistiu em determinar os níveis de radiação gama na zona das escombreyras, analisar a mobilidade dos materiais e identificar os elementos radioactivos presentes.

Foram elaboradas cartografias das duas explorações mineiras com os níveis de dose absorvida no solo e a 1 metro de altura. Nalguns locais foram obtidos valores superiores a 3 microSievert por hora. Para verificar a estabilidade de taludes, realizaram-se ensaios correntes de Mecânica dos Solos e concluiu-se que existe instabilidade de materiais. Também foram visíveis casos de ravinamento e “creep” no solo.

Para identificar os contaminantes, realizaram-se ensaios de espectrografia por cintilometria e identificaram-se radionuclídeos descendentes do rádio.

Neste momento foi iniciada a reabilitação ambiental de ambas as explorações mineiras coordenada pela EDM (Empresa de Desenvolvimento Mineiro).

## Palavras-chave

radiação; radionuclídeos; contaminação de solos; ambiente; geotecnia

# Abstract

Several Uranium and Radium mining complexes have been active during most of the XX<sup>th</sup> century at the region of Quarta-feira (Sortelha, Sabugal municipality). Due to lack of legislation, waste materials have been deposited in heaps, along with possible contaminated material.

This work aims to analyze the two heaps of previous uranium mines in the region (Carrasca and Vale d'Arca) in order to determine the levels of gamma radiation in the area of the heap, to analyze the mobility of the material and identify the radioactive elements.

Maps were prepared with the two mining radiation levels in the soil and 1 meter in height. In some places values over 3 microSievert per hour were registered. To check the stability of slopes essays of Soil Mechanics were preformed and it was possible to verify that there is possible instability of materials. Cases of ravine in the waste materials were also visible.

To identify the radioactive contaminants, scintillation spectrography was performed, and it was possible to verify that the identified isotopes were descendants of the uranium-238 series.

At this time the environmental rehabilitation of both mining has begun coordinated by EDM (Mining Development Enterprise).

# Keywords

radiation; radionuclides; soil contamination; environment; geotechnics

# Índice

Agradecimentos .....	II
Resumo .....	III
Palavras-chave .....	III
Abstract .....	IV
Keywords .....	IV
Lista de figuras .....	VIII
Lista de tabelas .....	X
Lista de acrónimos.....	XI
1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento geral e justificação do trabalho.....	1
1.2. Objectivos .....	2
2. Radioactividade.....	3
2.1. Introdução ao conceito de radiação .....	3
2.2. Descoberta da radioactividade .....	3
2.3. Radiação não ionizante.....	4
2.3.1. Radiação não ionizante .....	4
2.3.2. Radiação ionizante.....	5
2.4. Radiação cósmica .....	7
2.5. Lei do declínio radioactivo e grandezas e unidades fundamentais.....	8
2.6. Interacção de partículas .....	11
2.6.1. Interacção de energia electromagnética .....	11
2.6.2. Interações de partículas carregadas rápidas.....	12
3. Contaminação radioactiva do solo e estabilidade de taludes .....	13
3.1. Radioactividade natural.....	13
3.2. Radioactividade artificial .....	13
3.3. Principais elementos de radioactividade natural (principais radionuclídeos existentes no solo) .....	14
3.4. Séries de decaimentos naturais.....	15
3.5. Exposição dos seres vivos quanto à radiação.....	17
3.6. Consequências dos radionuclídeos para a saúde.....	18

3.6.1. O radão e as suas características .....	18
3.6.2. Consequências para a saúde .....	18
3.7. Estabilidade de taludes .....	19
3.7.1. Causas de instabilidade das encostas e mecanismo de rotura. ....	20
3.7.2. Classificação dos movimentos .....	21
4. Exploração mineira do urânio .....	24
4.1. O comércio do urânio a nível mundial .....	24
4.2. Principais aplicações do urânio .....	25
4.3. Distribuição do urânio em Portugal .....	26
4.4. Técnicas de extracção de urânio .....	26
4.5. Recuperação ambiental de antigas minas de urânio .....	27
5. Caso de estudo .....	29
5.1. Enquadramento geográfico .....	29
5.2. Enquadramento geológico .....	30
5.3. Clima e precipitação.....	30
5.4. Passado mineiro da região .....	31
5.5. Localização das explorações mineiras de Vale d’Arca e da Carrasca .....	32
6. Análise de resultados .....	34
6.1. Cartografia com os níveis de radiação gama nas escombreiras de Vale d’Arca e da Carrasca (concelho do Sabugal) .....	34
6.1.1. Trabalho de campo.....	34
6.1.2. Cartografias e resultados obtidos .....	35
6.2. Ensaio correntes de mecânica dos solos .....	38
6.2.1. Cálculo do teor de humidade .....	38
6.2.2. Análise granulométrica do solo .....	38
6.2.3. Ensaio de corte directo .....	40
6.3. Distribuição da actividade nas diferentes granulometrias .....	43
6.3.1. Comparação da actividade radioactiva nas diferentes classes granulométricas....	43
6.4. Ensaio de espectrografia gama por cintilometria .....	45
6.4.1. Calibração .....	46
6.4.2. Radionuclídeos identificados nas amostras.....	47

7. Considerações sobre os resultados obtidos .....	49
7.1. Níveis de radiação presentes nas escombreyras.....	49
7.2. Análise dos ensaios de mecânica dos solos .....	50
7.3. Actividade das diferentes classes granulométricas.....	50
7.4. Discussão dos ensaios de espectrografia gama por cintilometria.....	50
8. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros .....	53
Bibliografia.....	54

ANEXOS

# Lista de figuras

Figura 1- Representação do espectro electromagnético (5). .....	4
Figura 2 - Distribuição da dose anual de radiação cósmica em função da altitude (11). .....	8
Figura 3 - Variação do número de radionuclídeos ao longo do tempo (13). .....	9
Figura 4 - Dose média anual de radiação recebida pelo homem (18). .....	14
Figura 5 - Série de decaimento do $^{238}\text{U}$ (20). .....	16
Figura 6 - Série de decaimento do $^{235}\text{U}$ (20). .....	16
Figura 7 - Série de decaimento do $^{232}\text{Th}$ (20). .....	17
Figura 8 - Escoamento superficial, onde se evidenciam processos de “creeping” (27). .....	21
Figura 9 - Esquema de uma queda ou desabamento (28). .....	22
Figura 10 - Esquema de um escoamento rotacional (30). .....	23
Figura 11 - Escorregamento plano, com a superfície de falha bem definida (30). .....	23
Figura 12 - Produção de urânio a nível mundial (31). .....	24
Figura 13 - Valores de mercado do óxido de urânio a preços correntes e preços corrigidos (19). .....	25
Figura 14 - Área da Barragem Velha após a conclusão dos trabalhos de recuperação (34). ....	28
Figura 15 - Enquadramento da região de Quarta-feira no distrito da Guarda (38). .....	29
Figura 16 - Localização específica das explorações mineiras no Vale de Quarta-feira (39). ...	30
Figura 17 - Representação das zonas climáticas da Península Ibérica (41). .....	31
Figura 18 - Vista de uma escombreira da Mina da Carrasca, onde se evidenciam processos de “Creeping”. .....	32
Figura 19 - Vista das escombreyras da Mina de Vale d’Arca. ....	33
Figura 20 - Equipamento utilizado para as medições da radiação gama nas escombreyras. ....	34
Figura 21 - Valores de radiação gama ( $\mu\text{Sv/h}$ ) no solo na área mineira da Carrasca. ....	36
Figura 22 - Valores de radiação gama ( $\mu\text{Sv/h}$ ) a 1m de altura na área mineira da Carrasca. ..	36
Figura 23 - Valores de radiação gama (no solo) na Mina de Vale d’Arca. ....	37
Figura 24 - Valores de radiação gama (a 1m de altura do solo) na Mina de Vale d’Arca. ....	37
Figura 25 - Curvas granulométricas das amostras da Mina da Carrasca. ....	39
Figura 26 - Curvas granulométricas das amostras da Mina de Vale d’Arca. ....	39
Figura 27 - Tensões de corte obtidas nos ensaios realizados para a amostra 3 (Carrasca). ....	40
Figura 28 - Tensões de cortes obtidas nos ensaios realizados para a amostra D (Vale d’Arca). 41	
Figura 29 - Gráfico com os valores das tensões normais e tensões máximas de corte para determinar o ângulo de atrito e a coesão (amostra 3). .....	42
Figura 30 - Gráfico com os valores das tensões normais e tensões máximas de corte para determinar o ângulo de atrito e a coesão (amostra D). .....	42
Figura 31 - Distribuição da actividade nas diferentes classes granulométricas na Mina da Carrasca. ....	44

Figura 32 - Distribuição da actividade das diferentes classes granulométricas da Mina de Vale d'Arca.....	44
Figura 33 - Representação do fotomultiplicador. ....	45
Figura 34 - Representação do amplificador com o conversor analógico digital.....	45
Figura 35 - Espectrograma das energias de decaimento de fontes de bário e cézio.....	46
Figura 36 - Comparação dos espectrogramas de três classes granulométricas. ....	47
Figura 37 - Escombreira da Mina de Vale d'Arca com sinais de instabilidade no talude. ....	49
Figura 38 - Espectrograma dos ponteiros de relógio com rádio. ....	51
Figura 39 - Espectrograma da radiação de fundo. ....	52

# Lista de tabelas

Tabela 1 - Dependência de Q com o LET, em água (12). .....	10
Tabela 2- Séries de decaimentos naturais (19). .....	15
Tabela 3 - Percentagens em água das diferentes amostras de solo. ....	38
Tabela 4 - Valores das tensões máximas de corte e tensões normais calculadas para os diferentes ensaios. ....	41
Tabela 5 - Ângulos de atrito e coesão das duas amostras submetidas ao ensaio de corte. ....	42
Tabela 6 - Valores de radiação obtidos para as diferentes classes granulométricas. ....	43
Tabela 7 - Energias de decaimento do bário-133 e césio-137 para calibração do aparelho. ...	47
Tabela 8 - Níveis de energia detectados nos picos das amostras. ....	48

# Lista de acrónimos

<i>Bi</i>	-	<i>bismuto</i>
<i>Bq</i>	-	<i>becquerel</i>
<i>c</i>	-	<i>Coesão</i>
<i>Ci</i>	-	<i>curie</i>
<i>D</i>	-	<i>dose absorvida</i>
<i>dE</i>	-	<i>energia absorvida</i>
<i>dm</i>	-	<i>unidade de massa</i>
<i>dt</i>	-	<i>Intervalo de tempo</i>
<i>eV</i>	-	<i>electrovolt</i>
<i>Gy</i>	-	<i>gray</i>
<i>H</i>	-	<i>dose equivalente</i>
<i>K</i>	-	<i>potássio</i>
<i>kPa</i>	-	<i>kilo-pascal</i>
<i>L</i>	-	<i>transferência de energia linear</i>
<i>N</i>	-	<i>número de núcleos</i>
<i>N<sub>0</sub></i>	-	<i>número de núcleos no instante t<sub>0</sub></i>
<i>Np</i>	-	<i>neptúnio</i>
<i>Pb</i>	-	<i>chumbo</i>
<i>Po</i>	-	<i>polónio</i>
<i>Q</i>	-	<i>factor de qualidade</i>
<i>Ra</i>	-	<i>rádio</i>
<i>Rn</i>	-	<i>radão</i>
<i>Sv</i>	-	<i>sievert</i>
<i>T<sub>1/2</sub></i>	-	<i>tempo de semi-vida</i>
<i>Th</i>	-	<i>tório</i>
<i>U</i>	-	<i>urânio</i>
<i>λ</i>	-	<i>constante de decaimento</i>
<i>τ</i>	-	<i>vida média</i>
<i>Φ</i>	-	<i>ângulo de atrito</i>

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento geral e justificação do trabalho

O solo é um recurso natural localizado na parte superior da crosta terrestre. Ao conter água, possui as capacidades necessárias para a produção de alimentos, essenciais para o desenvolvimento dos seres vivos. É um meio vital para as plantas, porque nele se fixam e crescem, condicionando todo o desenvolvimento do ecossistema.

Desde o início da revolução industrial o problema da contaminação de solos tornou-se relevante. Foi desde o aparecimento das primeiras fábricas que a poluição começou a ter maior relevância. Os gases desperdiçados, e os materiais abandonados ao ar livre afectaram também o solo, impedindo-o de exercer as suas funções correctamente.

Um solo contaminado pode ter efeitos negativos a grande escala, uma vez que os contaminantes podem expandir-se para outros meios. Quando ocorrem grandes precipitações, o solo pode movimentar-se por erosão e os contaminantes podem chegar aos aquíferos. Quando isto acontece, a água pode tornar-se imprópria para o consumo e as populações próximas podem ver-se afectadas. Os animais ao beberem dessa água ingerem os contaminantes que podem chegar ao homem indirectamente através da cadeia alimentar. A agricultura é também afectada, tanto pela presença destas impurezas no solo como na água e a fauna e a flora podem reduzir-se significativamente. Também é de salientar a degradação paisagística devido à acumulação de resíduos em lugares não acondicionados.

Para além da indústria, existem outras formas de contaminação do ambiente; desde o uso excessivo de fertilizantes e herbicidas a casos de contaminação por acidente. A libertação de metais pesados pela explosão de um reactor nuclear ou a ruptura de tanques subterrâneos são dos casos mais comuns e podem ser bastante prejudiciais.

Neste trabalho, estudou-se a contaminação de um solo resultante da laboração da indústria extractiva mineira, concretamente da exploração de urânio e rádio. Esta actividade, que teve um papel importante no século XX, pode ter consequências prejudiciais para o solo se não forem considerados planos de mitigação ambiental.

O presente estudo consistiu em analisar a contaminação do solo de duas antigas explorações mineiras do concelho do Sabugal, distrito da Guarda. A região tem um passado mineiro recente destinado à extracção de urânio e rádio. Tal como sucedeu noutros locais, esta actividade mineira acabou por fechar e o seu encerramento não foi efectuado tendo em atenção os problemas ambientais, devido à inexistência de legislação na altura. O material não aproveitado foi depositado em locais próximos às antigas minas, existindo a possibilidade

do solo estar contaminado por elementos radioactivos, entre os quais, elementos descendentes da série do urânio.

## 1.2. Objectivos

Para a realização deste trabalho colocaram-se três objectivos principais que serão descritos seguidamente:

- Elaboração de cartografias, com os níveis de radiação gama no solo, da zona das escombrelras das antigas explorações mineiras da Carrasca e de Vale d'Arca.
- Estudo da mobilidade dos materiais, através da realização de ensaios correntes de Mecânica dos Solos.
- Identificação dos contaminantes, através da realização de ensaios de espectrografia gama por cintilometria, e de ensaios de difracção por raios X.

O trabalho de campo consistiu numa ida ao local do antigo complexo mineiro da Carrasca e Vale d'Arca. O motivo da deslocação foi obter os níveis de radiação presentes, observar o estado das escombrelras, recolher amostras, e tirar algumas fotos.

As amostras foram levadas para o laboratório de Mecânica dos Solos, para realizar os respectivos ensaios, e posteriormente para o Laboratório de Física Nuclear onde se efectuaram os ensaios de espectrografia gama. Já, a difracção por raios X foi executada pelo Centro de Óptica da Universidade da Beira Interior.

## 2. Radioactividade

### 2.1. Introdução ao conceito de radiação

Desde sempre que o ser humano e os outros seres vivos têm estado expostos constantemente a radiação proveniente de fontes naturais. Esta radiação provém tanto do espaço (radiação cósmica) como de átomos radioactivos que existem em todo o planeta. Na Terra a maior parte da radiação é emitida a partir dos solos ricos em potássio, tório e urânio. O radão é o principal contribuinte para a exposição da população às radiações ionizantes, de origem natural e artificial. Este gás incolor, inodoro e insípido resulta do decaimento do urânio presente em algumas rochas, no solo e na água. Para além da radiação natural, também existe radiação que provém de fora do planeta, é a chamada radiação cósmica.

### 2.2. Descoberta da radioactividade

Em 1895, Wilhelm Roentgen ao trabalhar com uma ampola de raios catódicos observou que, inesperadamente, uma placa fluorescente, que se encontrava fora da ampola, emitia luz. Ao aperceber-se que os raios que saíam da ampola eram de tipo desconhecido, designou-os de raios X. Colocando a sua mão na trajectória dos raios X, observou sobre a placa a sombra do seu esqueleto (1).

Um ano mais tarde, em 1896, Becquerel levava a cabo estudos sobre a fluorescência de sais de urânio excitados pela luz. Durante as suas experiências observou que as radiações fluorescentes eram capazes de reproduzir as silhuetas de certos objectos opacos colocados sobre placas fotográficas, mesmo quando estas estavam protegidas com papel negro. A interpretação de Becquerel era a de que o composto emitia algum tipo de radiação capaz de atravessar o papel e actuar sobre a chapa, semelhante à dos raios X descobertos por Röntgen. Este processo de emissão espontânea de radiação passou a ser designado por radioactividade. Posteriormente a radioactividade foi identificada como resultante da desintegração dos núcleos de urânio (1).

No final de 1897, Pierre e Marie Curie investigaram a possível emissão radioactiva de outros elementos acabando por descobrir que o tório também emitia radiações. Em 1898, foram descobertos dois novos elementos radioactivos, o polónio e o rádio (2).

Actualmente sabe-se que as radiações estudadas por Becquerel eram electrões emitidos pela desintegração beta dos descendentes do  $^{238}\text{U}$  (3).

Podemos então afirmar que a radioactividade é a propriedade que certos núcleos têm de emitirem radiações espontaneamente. Os nuclídeos que apresentam essas propriedades são designados de radionuclídeos (4).

## 2.3. Radiação não ionizante e ionizante

Define-se radiação como toda a energia que se propaga no espaço sob a forma de ondas electromagnéticas. Consoante o resultado da sua interacção com a matéria a radiação pode classificar-se como:

- Radiação não ionizante;
- Radiação ionizante.

Na figura 1, está representado o conjunto de todas as formas de energia radiante do Universo.

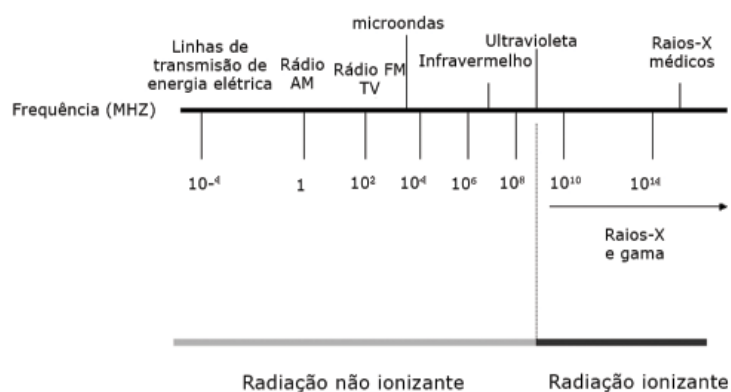


Figura 1- Representação do espectro electromagnético (5).

### 2.3.1. Radiação não ionizante

As radiações não ionizantes são as que não produzem ionização, isto é, não possuem energia suficiente para produzirem a emissão de electrões, de átomos ou moléculas com as quais interactivam. No Espectro Electromagnético estas radiações são as que possuem baixas energias (inferiores a 12,4eV) (1). A luz visível, raios infra-vermelhos, micro-ondas e as ondas de rádio são normalmente consideradas como radiações não ionizantes.

Este tipo de radiação pode no entanto apresentar alguns perigos para a saúde. Os efeitos podem ser bioquímicos, ou podem induzir a mudanças de comportamento. A capacidade que a radiação não ionizante tem de penetrar no corpo humano depende também da absorção por parte dos diferentes tecidos, contudo ainda existem muitas incertezas sobre os efeitos que

podem causar. Por exemplo, sabe-se que as micro-ondas podem produzir queimaduras ou danos no sistema reprodutor, e os raios ultravioleta podem dar origem a problemas de pele e do sistema imunitário (1).

### 2.3.2. Radiação ionizante

A radiação ionizante é a que possui energia suficiente, para remover electrões de átomos e moléculas produzindo iões.

Ao atravessarem a matéria, as radiações ionizantes transmitem a sua energia cinética aos electrões podendo provocar a ionização ou excitação dos átomos. No processo de ionização um ou mais electrões são arrancados do átomo transformando-o num ião positivo.

A ionização designa-se directa quando uma partícula carregada, ao deslocar-se na matéria, perde directamente a sua energia numa ionização local, em quebras de ligações químicas ou na excitação dos átomos vizinhos. A ionização é indirecta quando a partícula (fotão, neutrão etc.), numa primeira interacção, transfere toda ou parte da sua energia para as partículas carregadas do meio (electrões ou protões) que por sua vez vão provocar ionização directa (6).

Como exemplos de radiações ionizantes, temos:

- Partículas carregadas - partículas beta, partículas alfa, electrões e protões;
- Partículas neutras - neutrões;
- Ondas electromagnéticas - raios  $\gamma$ , raios X e raios ultravioleta.

As radiações ionizantes oferecem maiores riscos para a saúde. A exposição a grandes quantidades de radiação pode ter consequências muito graves, como por exemplo, alterações genéticas importantes, perda de cabelo, queimaduras de pele, aparecimento de neoplasias e em casos extremos, causar a morte do indivíduo (7).

O homem pode ser contaminado através da inalação, ingestão ou absorção dérmica. A inalação é o principal meio de entrada dos radionuclídeos gasosos, que se transferem para o sangue através dos alvéolos.

#### 2.3.2.1. Partículas alfa ( $\alpha$ )

As partículas alfa são núcleos de  $^4\text{He}$ , isto é, são constituídas por dois protões e dois neutrões. Como se trata de partículas pesadas e pouco penetrantes, o seu alcance no ar é inferior a 10 cm mas são altamente ionizantes. Um factor que contribui para o elevado poder de ionização é a velocidade relativamente pequena das partículas alfa, o que determina um tempo de

interacção razoavelmente grande. Como a cada ionização a partícula  $\alpha$  perde uma parte da sua energia, a sua velocidade diminui muito rapidamente daí o seu baixo poder de penetração. São emitidas geralmente por núcleos de massa muito elevada para que o átomo se torne mais estável. Esta desintegração é frequente entre os elementos naturais mais pesados que se podem encontrar na natureza, como o caso do Urânio ou Rádio, mas passam por decaimentos sucessivos até encontrarem uma forma estável.

Quando as partículas alfa são provenientes de uma fonte externa ao organismo humano, praticamente não oferecem nenhum perigo. No entanto, se forem provenientes de uma fonte interna ao organismo (o material radioactivo pode ter sido ingerido ou inalado ou ainda absorvido pela pele ou ferimentos), podem ser muito perigosas, uma vez que produzem mais ionizações ao longo de seu trajecto (danificando directamente os tecidos).

As partículas alfa possuem um espectro de energia monoenergética limitado entre 4 a 6 MeV, sendo facilmente blindadas (uma folha de papel é suficiente para as barrar).

Grande parte das fontes de emissão alfa é formada pelo depósito de isótopos na superfície dos materiais.

### **2.3.2.2. Partículas beta ( $\beta$ )**

Como as partículas beta são constituídas por electrões, que são mais leves e mais rápidos do que as partículas alfa, penetram mais profundamente na matéria. Podem atravessar até 1mm de alumínio e, no ar, podem alcançar até 13m. O seu poder de ionização é bem menor. O perigo oferecido pelas partículas beta, provenientes tanto de uma fonte interna como externa, pode ser classificado como moderado. A partícula beta é cerca de 7000 vezes mais leve do que a partícula alfa e tem velocidade muito maior.

Os electrões podem interagir com a matéria fundamentalmente por dois processos, ionização ou radiação de travagem (“bremsstrahlung”). Como apresentam maior velocidade e menor carga do que as partículas alfa, a ionização é menor do que a produzida por estas e o poder de penetração maior. Como são relativamente leves os electrões sofrem colisões com os núcleos com pouca perda de energia pelo que as trajectórias, ao longo da matéria, são irregulares. Se considerarmos fontes de fraca intensidade uma folha de alumínio com alguns milímetros de espessura é suficiente para absorver os electrões impedindo a sua passagem.

Em muitas fontes de partículas beta, o núcleo formado continua num estado excitado, fazendo com que este se desintegre imediatamente com a emissão de pelo menos um fóton de energia gama.

### 2.3.2.3. Radiação gama ( $\gamma$ )

Devido à ausência de carga e massa, a penetrabilidade dos raios gama é muito maior, pois são ondas electromagnéticas de comprimento de onda ( $\lambda$ ) muito pequeno. O alcance no ar é muito grande e são barradas por placas de chumbo de 3 cm de espessura. Os raios gama, provenientes de uma fonte externa, oferecem maior perigo do que os provenientes de uma fonte interna, isto porque toda a energia das radiações alfa e beta é absorvida pelo órgão, enquanto parte da radiação gama é absorvida pelo órgão. Devido ao seu grande poder de penetração, a maior parte da energia atravessa e sai do corpo.

A interação da radiação electromagnética ionizante com a matéria produz-se basicamente por três processos: Efeito Fotoeléctrico, Efeito de Compton e Produção de Pares (8), (9).

A grande parte das fontes de energia gama, emitem este tipo de energia após produzirem uma desintegração de partículas beta. Isto acontece porque o núcleo continua num estado excitado após a libertação das partículas, sendo a energia em excesso libertada em forma de onda electromagnética.

Os raios gama e X são radiações electromagnéticas com propriedades idênticas distinguindo-se apenas pela sua origem, isto é, os raios gama são produzidos por emissão nuclear e os raios X são apenas energia electromagnética. Estas radiações são muito mais penetrantes do que as partículas alfa e beta. Os raios X produzidos por fontes naturais são, em geral, menos penetrantes do que os raios gama. O corpo humano é facilmente atravessado por estes raios. A blindagem para estas radiações faz-se com materiais densos como chumbo ou tipos especiais de cimento e o seu poder ionizante é fraco.

## 2.4. Radiação cósmica

A radiação cósmica é um tipo de radiação ionizante que provém do espaço exterior. Consiste numa variedade de partículas que constantemente bombardeiam a terra, apesar de muitas delas não passarem da alta atmosfera. É constituída por um fluxo primário de partículas de elevada energia, provenientes do espaço interestelar, que incide continuamente a superfície terrestre e por radiações secundárias que têm a sua origem nas interacções das partículas primárias com a atmosfera (3).

A radiação cósmica primária é constituída por partículas com energias extremamente altas (cerca de 1020eV), são elas protões (87%), partículas alfa (11%), núcleos com número atómico entre 4 e 26 (1%) e electrões com energia muito elevada (1%). Apesar de grande percentagem da radiação vir do exterior do nosso sistema solar, alguma é produzida durante erupções solares. A radiação cósmica primária predomina na estratosfera a uma altitude acima dos 25km (10).

A dose anual de radiação cósmica a que estamos sujeitos depende da altitude e da latitude a que nos encontramos. Os raios cósmicos ao atravessarem a atmosfera chocam com ela e perdem energia. Deste modo, quanto maior for a altitude maior é a quantidade de radiação a que estamos sujeitos uma vez que a camada de ar que actua como protecção é menos espessa. Por exemplo, viajar de avião contribui para o aumento da dose de radiação que uma pessoa recebe.

A radiação cósmica decresce à medida que nos deslocamos do pólo para o equador devido ao efeito do campo geomagnético da Terra e do Sol sobre os raios cósmicos primários (9). Na figura 2 pode observar-se a distribuição da dose anual de radiação cósmica em função da altitude.

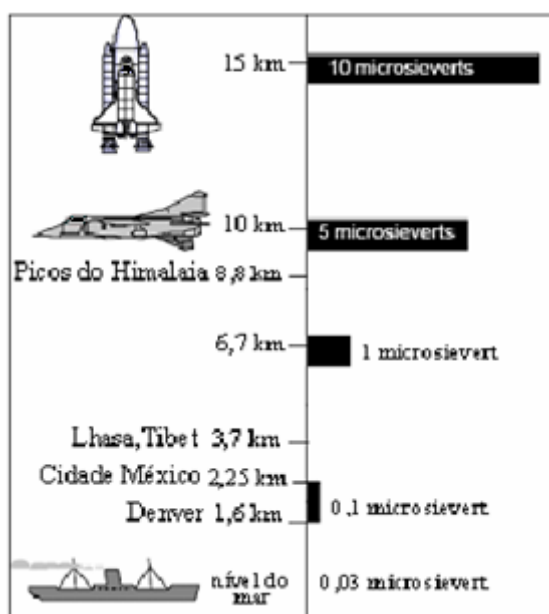


Figura 2 - Distribuição da dose anual de radiação cósmica em função da altitude (11).

## 2.5. Lei do declínio radioactivo e grandezas e unidades fundamentais

Existem vários tipos de decaimento nuclear com emissão de partículas ou de radiação electromagnética, tais como, decaimentos  $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ ,  $\gamma$ , captura electrónica, fissão, emissão de neutrões, cuja consequência é uma maior estabilidade dos núcleos.

Em 1900, Rutherford descobriu que a taxa de emissão de radiação não era constante, mas diminuía exponencialmente com o tempo. Este é um processo estatístico uma vez que não se mede o tempo que um núcleo demora a decair mas sim a probabilidade de um núcleo decair por unidade de tempo. No caso de um decaimento estatístico, o número de núcleos  $dN$  que decaem é proporcional ao intervalo de tempo  $dt$  e ao número de núcleos presente, logo:

$$dN = -\lambda \cdot N dt \quad (2.1)$$

Na equação 2.1, N representa o número de radionuclídeos no instante t e  $\lambda$  representa a constante de decaimento. Esta constante é uma propriedade nuclear característica de cada nuclídeo e representa a probabilidade de um núcleo decair por unidade de tempo. O sinal negativo deve-se ao facto do número de núcleos diminuir ao longo do tempo (12). Na figura 3, representa-se a variação do número de radionuclídeos ao longo do tempo.

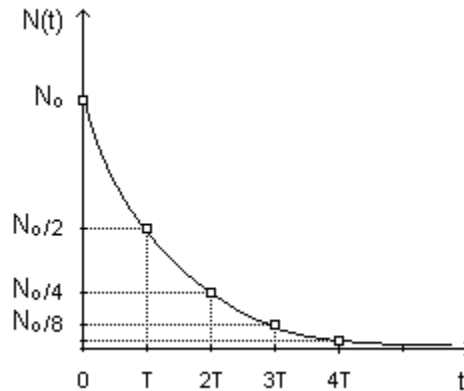


Figura 3 - Variação do número de radionuclídeos ao longo do tempo (13).

A integração da equação 2.1 conduz à Lei do decaimento radioactivo:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

Na equação 2.2,  $N_0$  traduz o número de núcleos da amostra no instante  $t=0$ . O decréscimo do valor da exponencial é controlado através da constante de decaimento radioactivo  $\lambda$ .

Existem várias grandezas para caracterizar a radioactividade num local. Os níveis de radiação podem ser calculados em relação à sua actividade, à dose absorvida e equivalente e também em relação ao seu factor de qualidade. Para além das grandezas que actualmente fazem parte do sistema internacional, foram utilizadas outras até à sua substituição pelas actuais.

A actividade de uma amostra radioactiva é definida como o número de decaimentos por unidade de tempo (14), de acordo com a expressão:

$$A(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

A unidade SI que mede a actividade de uma amostra radioactiva é o becquerel, Bq, que é igual a um decaimento por segundo (1 Bq = 1 decaimento/s).

A unidade antiga, curie, Ci, é ainda utilizada com frequência. A relação entre ambas é (15):

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 3,7 \times 10^{10} \text{ decaimentos/s} \quad (2.4)$$

1Ci corresponde à actividade de 1g de  $^{226}\text{Ra}$ .

Para a protecção é importante a dose de radiação absorvida ou a quantidade de energia depositada na matéria por qualquer tipo de radiação ionizante em qualquer tipo de material. Assim, define-se dose absorvida,  $D$ , como a energia absorvida,  $dE$ , proveniente de qualquer tipo de radiação, por unidade de massa do material absorvente,  $dm$  (8):

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.5)$$

A unidade SI de dose é o gray, Gy, e corresponde à absorção de um joule por um quilograma de material.

Quando são avaliados os efeitos da radiação nos organismos vivos, a absorção de quantidades de radiação equivalentes de energia por unidade de massa em condições de irradiação diferentes não garantem o mesmo efeito biológico. De facto a extensão dos efeitos pode diferir por uma ordem de magnitude consoante a energia é depositada sob a forma de partículas carregadas pesadas ou electrões. O conceito de dose equivalente foi então introduzido para quantificar de uma forma mais adequada os prováveis efeitos biológicos de uma dada exposição. A dose equivalente,  $H$ , é o produto entre a dose absorvida,  $D$ , e o factor qualidade,  $Q$ , que caracteriza a radiação (8):

$$H = D \times Q \quad (2.6)$$

A unidade SI da dose equivalente é o sievert (Sv). O factor de qualidade ( $Q$ ) é adimensional e depende da transferência de energia linear (LET). O factor de qualidade aumenta com a transferência de energia linear (LET). A tabela 1 mostra a dependência de  $Q$  com o LET.

Tabela 1 - Dependência de  $Q$  com o LET, em água (12).

LET, $L$ $\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$ em $\text{H}_2\text{O}$	$Q(L)$
< 10	1
de 10 a 100	$0,32L - 2,2$
> 10	$300/\sqrt{L}$

Considera-se que os fotões gama possuem um factor de qualidade igual a 1, enquanto que para as partículas alfa, esse factor é igual a 20.

O tempo de semi-vida,  $T_{1/2}$ , é definido como o tempo necessário para que o número de núcleos radioactivos se reduza a metade do seu valor inicial (15).

Substituindo  $N = N(0)/2$  na equação anterior obtém-se:

$$0,5 = e - \lambda t \Leftrightarrow t = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2.7)$$

O tempo médio de vida ou vida média,  $\tau$ , do núcleo define-se como o tempo médio que o núcleo é capaz de sobreviver antes de decair (14). O número de núcleos que sobrevive no tempo  $t$  é  $N(t)$  e o número de núcleos que decaem entre  $t$  e  $t+dt$  é  $dNdt$ . A vida média é então dado por:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t |dN/dt| dt}{\int_0^{\infty} |dN/dt| dt} \Leftrightarrow \tau = \frac{1}{\lambda} \quad (2.8)$$

Como se pode observar, a vida média é o inverso da constante de decaimento. O tempo de vida média relaciona-se com o tempo de meia-vida através da expressão:

$$t_{1/2} = (\ln 2)\tau \Leftrightarrow t_{1/2} = 0,693\tau \quad (2.9)$$

## 2.6. Interacção de partículas

Sempre que ocorrem emissões de radiação ionizante, estas podem interferir com a matéria, provocando alterações a nível atómico e sub-atómico. A estas interferências damos o nome de interacções, e podem ocorrer devido aos vários tipos de energia cedida pelas radiações ionizantes.

### 2.6.1. Interacção de energia electromagnética

Como já foi referido anteriormente, a energia electromagnética capaz de provocar alterações num átomo, como por exemplo, a remoção de electrões, situa-se maioritariamente na zona dos raios X e raios gama. Estes fotões podem percorrer grandes distâncias sem colidir com qualquer partícula e as probabilidades de interacção dependem das características do meio e da radiação. Para cada fotão existe um momento associado, e quando ocorrem colisões com partículas, a energia é-lhes transferida. As principais interacções que ocorrem a partir da energia electromagnética são os seguintes (6):

- Efeito Rayleigh: o átomo absorve a radiação e reemite-a numa direcção diferente. Neste efeito a radiação é tratada apenas como uma onda.
- Efeito fotoeléctrico: efeito onde o fotão é absorvido pelo átomo sendo libertado um electrão. A energia cinética adquirida pelo electrão é a

diferença de energia entre o fóton e a energia de ligação do electrão ao átomo.

- Efeito Compton: trata-se do espalhamento da energia do fóton pelo electrão livre do material. Parte da energia é transferida para o electrão, e o resto é transmitida noutra direcção.
- Reacções fotonucleares: é a principal reacção nuclear provocada por fótons. Consiste no embate de um fóton num núcleo, onde a energia de ligação entre os prótons e neutrões é menor que no fóton. A energia é totalmente absorvida e provoca que um nucleão seja libertado fazendo com que o núcleo se transforme noutra espécie nuclear.

### 2.6.2. Interações de partículas carregadas rápidas

As partículas carregadas têm um comportamento diferente da energia electromagnética. Devido às forças coulombianas, estas partículas interagem com mais do que um átomo ou electrão, mas não transferem toda a sua energia cinética. Esta vai-se perdendo gradualmente cada vez que colide com uma partícula, embora possam haver interações mais intensas onde a partícula perde, imediatamente, grande parte da sua energia. Este processo prolonga-se até a partícula perder toda a sua energia deixando de considerar-se uma radiação ionizante. A probabilidade de uma partícula deste tipo passar por um corpo sem interagir é tão pequena que se considera desprezável. Em média uma partícula de 1MeV colide cerca de  $10^5$  vezes antes de se extinguir (1).

Para além do que foi a cima mencionado, existem outros tipos de interações. Por exemplo, um caso comum são as interações de neutrões, que podem ser absorvidos pelos átomos e provocar alterações nucleares. Tal como os fótons, os neutrões podem passar camadas de material sem embater com qualquer partícula devido que a força nuclear tem alcance muito curto e só actua entre o electrão e o núcleo (1).

## 3. Contaminação radioactiva do solo e estabilidade de taludes

A crosta terrestre é constituída por rochas e sedimentos. Devido aos fenómenos naturais que ocorreram ao longo dos tempos, existe actualmente uma grande diversidade de materiais que estão constantemente em movimento. Alguns destes materiais são radioactivos e vão decaindo para elementos mais estáveis, com emissão de energia. A instabilidade de encostas naturais ou artificiais é um fenómeno que também contribui para propagação de material contaminado.

### 3.1. Radioactividade natural

A radioactividade natural pode ser considerada uma das distintas formas de contaminação do solo. As rochas e os sedimentos são constituídos por uma grande variedade de elementos químicos definidos pela sua natureza litológica. Alguns destes elementos emitem radiações ionizantes e se existirem em elevadas quantidades, podem ser prejudiciais para a saúde e para o ambiente. Os elementos radioactivos presentes no solo estão sujeitos ao mecanismo de transporte, que pode ser natural através de erosão de sedimentos, ou provocado pela acção do homem. As emissões naturais de radionuclédeos aumentaram desde a revolução neolítica, mas foram intensificadas a partir da industrialização e pela extracção de matérias-primas (16).

A radiação cósmica é também uma fonte natural de contaminação do ambiente. Em elevadas altitudes os núcleos de hidrogénio representam 95% do bombardeamento cósmico. A maior parte dos radionuclédeos provenientes do espaço, são transportados para o solo através da água da chuva, mas como têm semi-vidas curtas não têm grande impacto no planeta (17).

### 3.2. Radioactividade artificial

Para além da radiação natural, também existe radiação artificial que é provocada pela acção do homem. As maiores fontes de emissões artificiais são os exames médicos que recorrem a raios X, correspondendo a cerca de 18% da dose média anual recebida pelo homem. Outra fonte de radiação artificial são as centrais nucleares, mas a dose de radiação fornecida por estas fontes é muito reduzida correspondendo a apenas 0,03% da dose média anual (18). Apesar desse baixo valor, estas instalações podem ser muito perigosas já que no seu núcleo possuem níveis de radiação extremamente elevados. No caso de ocorrer um acidente devido à

explosão de um reactor, os elementos radioactivos podem espalhar-se por grandes distâncias, fazendo com que determinadas zonas se tornem impróprias para a fixação de população.

Dos casos mais graves de contaminação devido a explosões em centrais nucleares, encontram-se o acidente de Chernobyl em 1986 e mais recentemente em Fukushima em 2011.

Na figura 4 apresentam-se as fontes de radiação a que o Homem está exposto, com a respectiva percentagem de dose média anual recebida.



Figura 4 - Dose média anual de radiação recebida pelo homem (18).

Pela análise da figura, pode observar-se que o gás radão constitui a maior fonte radioactiva a que está exposto o homem todos os dias, sendo responsável por mais de 50% da exposição média anual (18).

### 3.3. Principais elementos de radioactividade natural (principais radionuclídeos existentes no solo)

Já foi dito que a maior parte da radiação ionizante recebida tem origens naturais, podendo esta ser terrestre ou proceder do espaço através dos raios cósmicos. A radiação cósmica contribui com cerca de 15% da radiação natural absorvida pelo homem, em que o  $^7\text{Be}$  o  $^3\text{H}$  e o  $^{14}\text{C}$  são os principais radionuclídeos transportados. Os restantes 85% são devidos à radiação terrestre, constituindo a principal forma de radioactividade absorvida pelo Homem (16).

Na natureza existem séries de decaimentos naturais e radionuclídeos independentes que se desintegram directamente em isótopos estáveis. Os radionuclídeos naturais podem dividir-se em duas classes; os radionuclídeos das séries de decaimento e os isótopos radioactivos independentes de qualquer série. Estes últimos desintegram-se directamente em átomos estáveis e incluem o potássio-40, o rubídio-87, e formas radioactivas de vanádio, cádmio, cério, platina entre outros.

### 3.4. Séries de decaimentos naturais

Na formação da Terra existiam quatro séries de decaimentos totalmente independentes entre si. Hoje em dia, apenas é possível encontrar na natureza elementos pertencentes a três séries (série do urânio-238, tório-232 e urânio-235). A série do neptúnio-237 decaiu toda em forma de chumbo, uma vez que a sua semi-vida era muito curta (2,17 milhões de anos) em comparação com a idade da terra (19). Na tabela 2, estão identificadas as quatro séries de decaimentos, juntamente com as respectivas semi-vidas e os isótopos estáveis obtidos.

Tabela 2- Séries de decaimentos naturais (19).

Nome da série	Radionuclídeo original	Semi-vida (anos)	Isótopo estável obtido
Tório	$^{234}\text{Th}$	$1,41 \times 10^{10}$	Chumbo - 208
Actínio	$^{235}\text{U}$	$7,04 \times 10^8$	Chumbo - 207
Urânio	$^{238}\text{U}$	$4,47 \times 10^9$	Chumbo - 206
Neptúnio (extinta)	$^{237}\text{Np}$	$2,14 \times 10^6$	Bismuto - 209

Comparando os isótopos  $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$  tendo em conta o período de semi-vida, pode concluir-se que o mais abundante é o  $^{238}\text{U}$ .

Actualmente as séries radioactivas do urânio e tório ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) juntamente com o  $^{40}\text{K}$  são as principais fontes de radiação naturais (16). Nas figuras 5, 6 e 7, estão esquematizadas as três séries radioactivas existentes actualmente na Terra.

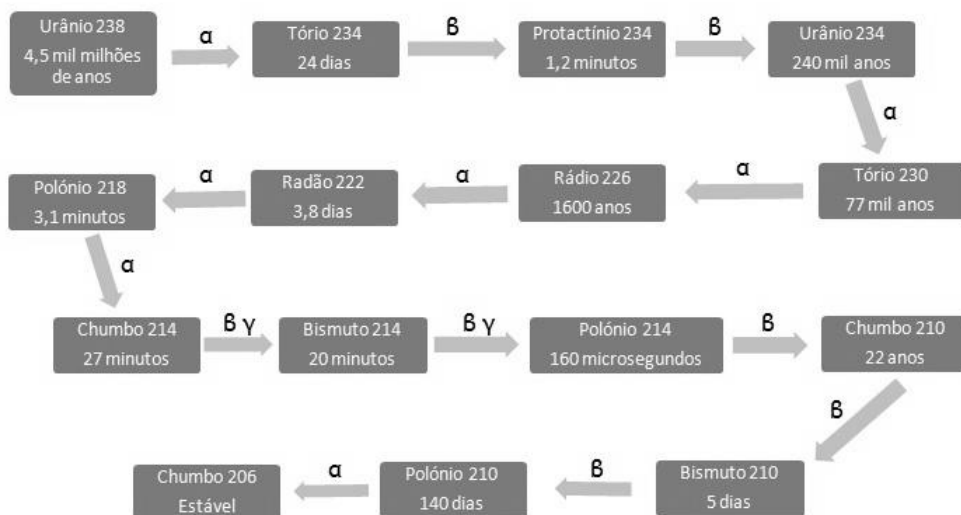


Figura 5 - Série de decaimento do  $^{238}\text{U}$  (20).

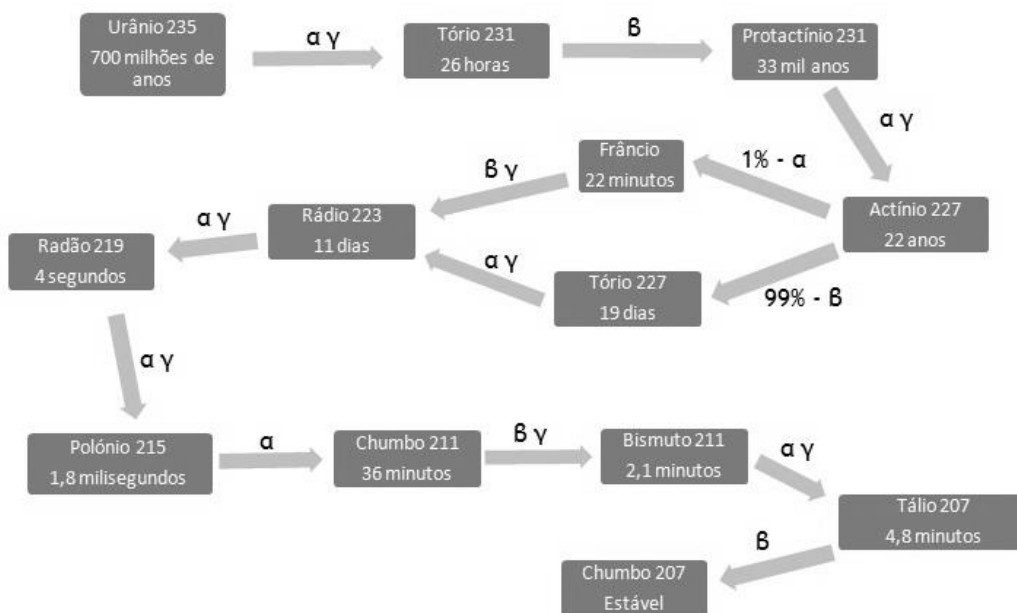


Figura 6 - Série de decaimento do  $^{235}\text{U}$  (20).

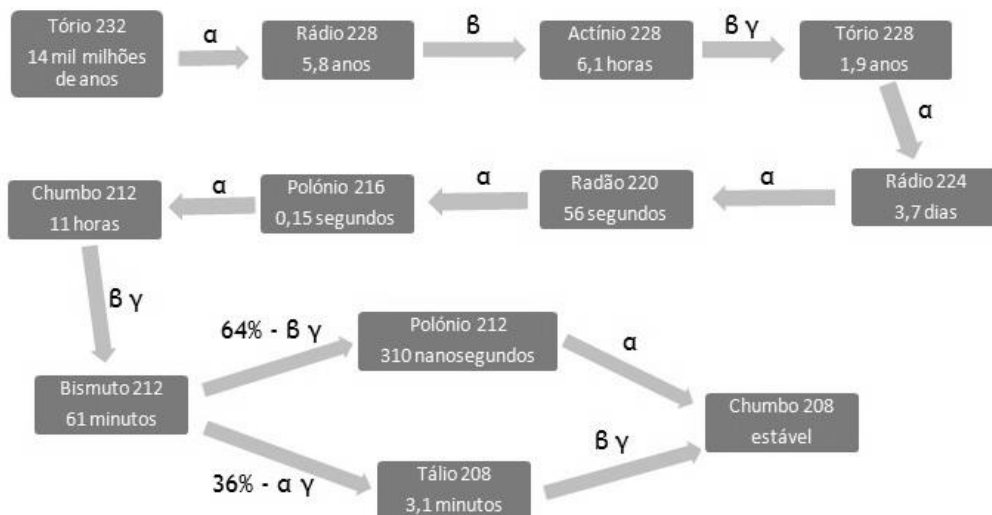


Figura 7 - Série de decaimento do  $^{232}\text{Th}$  (20).

Nas séries de decaimento descritas estão indicados os respectivos tempos de semi-vida de cada espécie atômica e para cada decaimento, identifica-se o tipo de radiação emitida. Os isótopos que emitem partículas alfa e beta dão origem a dois isótopos diferentes. A percentagem de ocorrência das duas espécies está indicada no esquema. As três séries têm como elemento estável final, um isótopo de chumbo.

### 3.5. Exposição dos seres vivos quanto à radiação

Diariamente os seres vivos estão expostos a irradiação interna e externa. A energia ionizante que atinge directamente a pele dos seres vivos denomina-se de irradiação externa. Esta irradiação tanto pode ocorrer devido aos radionuclídeos provenientes do espaço como também pelos elementos presentes na crosta terrestre. Por outro lado, a irradiação interna é a radiação que entra no corpo através da ingestão de alimentos contaminados e água ou por inalação.

O urânio é um elemento da tabela periódica pertencente à família dos metais pesados e à serie dos actinídeos. Possui densidade elevada ( $d=18,7$ , tornando-o mais denso que elementos como o chumbo ou mercúrio), e apresenta uma cor cinza ou branca. Este elemento está normalmente associado a várias espécies de minerais e não se encontra isolado na natureza. Por ser um elemento radioactivo natural, passa por vários decaimentos até atingir a forma estável de chumbo. Por este motivo, nos locais onde existem grandes concentrações de urânio, também se encontram presentes outros isótopos entre os quais, o rádio e o gás radão.

Trata-se da fonte radioactiva natural mais abundante no planeta e encontra-se normalmente associado a minerais de rochas metamórficas, ígneas e sedimentares (21). A sua concentração não depende apenas da natureza litológica do local, já que por vezes é possível encontrar grandes quantidades em fracturas de rochas.

### 3.6. Consequências dos radionuclídeos para a saúde

#### 3.6.1. O radão e as suas características

O radão, é um gás raro de número atómico 86, tem a maior densidade de todos os gases conhecidos e pode dissolver-se em água e solventes orgânicos. Ocorre nas rochas, no solo e na água, sendo que a sua concentração depende das características geológicas locais (18). Este gás pode concentrar-se nas habitações e por ser incolor e inodoro não é detectado pelas populações. O radão ocorre em maiores quantidades nas rochas graníticas do que nas rochas sedimentares e está directamente relacionado com o teor de urânio presente e com a permeabilidade (22).

O  $^{222}\text{Rn}$  (radão), o  $^{220}\text{Rn}$  (torão) e o  $^{219}\text{Rn}$  (actinão), são três isótopos que ocorrem de forma natural a partir das séries de decaimento de urânio e tório. Decaem directamente do rádio através de emissões alfa e as suas concentrações na crosta terrestre são diferentes. O actinão demora apenas 4 segundos para que metade dos seus átomos se desintegre, facto que limita a sua capacidade de migração. Por outro lado, a abundância do  $^{235}\text{U}$  em relação ao urânio natural (apenas 0,711%), faz com que a presença de  $^{219}\text{Rn}$  seja desprezável. O torão tem uma semi-vida de aproximadamente 56 segundos bastante inferior à do  $^{222}\text{Rn}$  que tem uma semi-vida de 3,8 dias. Apesar desta diferença, como o  $^{232}\text{Th}$  é mais abundante que o  $^{238}\text{U}$ , a presença destes dois isótopos de radão no solo é similar. Contudo o isótopo dominante de radão na atmosfera é o  $^{222}\text{Rn}$  (23). Uma das particularidades deste elemento é o facto de ser o único gás das séries de decaimento natural, facto a que lhe está associada uma grande mobilidade.

#### 3.6.2. Consequências para a saúde

Ultimamente tem se verificado um aumento do interesse neste gás devido aos riscos que a sua presença pode provocar nas populações. Foram feitos vários estudos por diversos países de maneira a quantificar a concentração de radão nos diferentes locais (18).

Este gás é reconhecido como agente carcinogénico, sendo considerado pela Organização Mundial de Saúde (OMS) como segunda causa de cancro de pulmão, a seguir ao fumo do tabaco.

As consequências que a inalação de radão pode trazer para a saúde, não dependem directamente deste, mas sim dos elementos obtidos através do seu decaimento. Quando se concentra nos pulmões, o radão decai para polónio, bismuto, e chumbo. Estes elementos são metais pesados, muito activos quimicamente que podem formar moléculas rapidamente, em forma condensada. Durante este decaimento são emitidas partículas alfa que se fixam no tecido pulmonar (23). Os elementos obtidos por decaimento do  $^{222}\text{Rn}$  podem dividir-se em dois grupos: os isótopos de vida média curta, onde se incluem o  $^{214}\text{Pb}$ , o  $^{214}\text{Bi}$  e o  $^{214}\text{Po}$ , e os isótopos de vida média longa, o  $^{210}\text{Po}$ , o  $^{210}\text{Pb}$  e o  $^{210}\text{Bi}$ . Como no primeiro grupo a maior semi-vida é de 27 minutos, é bastante provável que todo o decaimento seja feito antes que o corpo humano elimine os materiais (24). A radiação pode romper moléculas chave, como a cadeia de ADN, podendo causar graves problemas de saúde (25). O grupo dos isótopos de vida média longa, não tem tanto contributo como os primeiros já que o  $^{210}\text{Pb}$  tem uma semi-vida de 22 anos, ou seja, tem uma alta probabilidade de ser eliminado pelo organismo antes de decair (23).

Segundo a Agência de Protecção Ambiental dos EUA, entre uma a três pessoas em 100 que inalem ar com concentrações de radão de  $150\text{Bq}/\text{dm}^3$  ( $150000\text{Bq}/\text{m}^3$ ), têm grandes possibilidades de contrair cancro de pulmão. Em 1990, a comissão europeia elaborou uma recomendação (90/143/Euratom) que indica um valor limite de  $400\text{Bq}/\text{m}^3$  para as habitações já construídas e de  $200\text{Bq}/\text{m}^3$  para as habitações a construir (18). Em Portugal realizou-se mais tarde uma transposição desta recomendação para a legislação nacional em 2006. Este decreto-lei impõe a concentração máxima de radão de  $400\text{Bq}/\text{m}^3$ , sendo obrigatória a sua comprovação nas zonas graníticas (26).

### 3.7. Estabilidade de taludes

Um talude é uma superfície inclinada do solo normalmente provocada pelo aterro ou escavação de uma obra. Devido às diferentes características dos solos, torna-se necessário recorrer à mecânica de solos e de rochas para estudar a estabilidade destes materiais, embora não esquecendo o papel básico que pode desempenhar a geologia aplicada na formulação de qualquer critério aceitável (27). Quando o talude é formado naturalmente sem intervenção do homem domina-se encosta natural.

O estudo da estabilidade de taludes torna-se cada vez mais importante devido às graves consequências que pode provocar um deslizamento de terras. Algumas das causas que podem aumentar esse risco são as seguintes (28):

- Aumento da urbanização e desenvolvimento de áreas urbanas;
- Desflorestamento contínuo das encostas;

- Aumento das taxas de precipitação causadas pela mudança de clima.

Existem diferentes tipos de taludes, por isso a análise da sua estabilidade tem objectivos diferentes para cada caso (27).

Em encostas naturais, cortes ou escavações, é necessário estudar a estabilidade dos taludes e avaliar as medidas de estabilização. Para barragens e aterros deve definir-se a secção de forma que seja economicamente mais viável. A estabilidade dos taludes numa barragem deve ser verificada no final da construção, em operação e quando houver necessidade de rebaixar o talude. Nos aterros deve existir um estudo no fim da construção e a longo prazo (27).

### 3.7.1. Causas de instabilidade das encostas e mecanismo de rotura.

A estabilidade de um talude depende essencialmente das tensões e resistências nele presentes. Quando as tensões de corte originárias de esforços instabilizadores (como por exemplo, esforços externos) são superiores à resistência de corte do maciço, o talude pode ser considerado como potencialmente instável. Por este motivo, as causas desta instabilidade são normalmente devidos ao aumento da tensão de corte e à diminuição da resistência do solo [16].

O aumento da tensão de corte pode dever-se pelos seguintes factores (29):

- Remoção do suporte lateral (erosão, perda da camada superior e deslocamentos de rochas ou solo);
- Efeito da sobrecarga (precipitação, vegetação, acúmulo de deslocamentos anteriores, efeito da construção, aterros, acumulação de escombros, etc.);
- Tensões transitórias (tensões que ocorrem num curto espaço de tempo como descargas eléctricas, deslocamento de materiais adjacentes);
- Pressões laterais (pressões de água em fracturas, consequências do congelamento em continuidades, aumento do teor de humidade, etc.).

Por outro lado, a diminuição da resistência de corte pode ter as seguintes consequências:

- Variações devidas a reacções físico-químicas (eliminação da cobertura vegetal, submersão de solos não saturados, variação da humidade com o tempo);
- Modificações estruturais (colapso em solos colapsíveis, argila formada em ambiente marinho);
- Outros factores como fluência progressiva ou acções devidos a matéria orgânica.

### 3.7.2. Classificação dos movimentos

Os movimentos ocorrem quando existe uma ruptura no solo provocando um deslocamento para fora de toda a massa participante. Existem várias formas de deslocamento dos materiais, pelo que a classificação pode variar segundo o seu autor. Neste trabalho, os tipos de movimentos serão divididos em três grandes grupos: escoamentos superficiais, subsidências e escorregamentos (27). Para além do tipo de movimento, a mobilização de materiais pode diferenciar-se pela sua forma de corte e pela velocidade do movimento.

#### 3.7.2.1. Escoamentos superficiais

Nos escoamentos, os movimentos ocorrem quando existe uma ruptura do solo provocando um deslocamento para fora de toda a massa participante. Estes podem ocorrer muito lentamente (fluência), ou podem gerar-se por movimentos rápidos (corridas).

A fluência (“creep”) é um processo muito lento e contínuo sem uma zona de ruptura definida. É causado pela acção gravidade e está associada a efeitos de variação da temperatura e humidade. Este fenómeno pode observar-se na curvatura de troncos de árvores, inclinação de postes ou fendas no solo. Os movimentos são da ordem de alguns centímetros por ano. Na figura 8 esquematiza algumas das consequências deste tipo de escoamento.

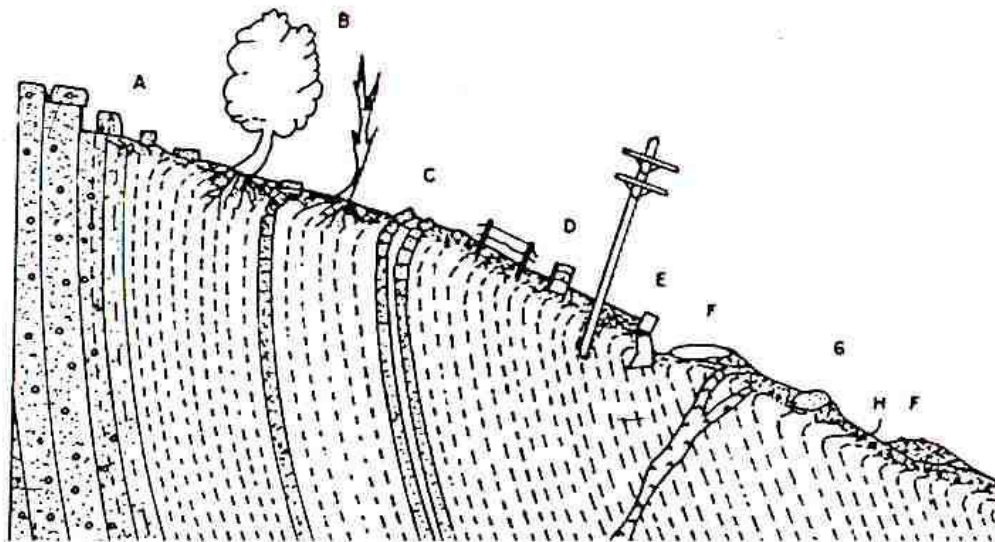


Figura 8 - Escoamento superficial, onde se evidenciam processos de “creeping” (27).

As corridas são um tipo de escoamentos superficiais que se caracterizam pelo movimento do corpo do talude semelhante a um fluido viscoso. O deslocamento processa-se a velocidades

elevadas (> 10km/h) e pode por vezes ter consequências catastróficas (30). Este escoamento é causado pela perda de resistência do talude devido à presença de água em excesso.

### 3.7.2.2. Subsidiências

As subsidiências consistem no movimento da superfície do solo causado pelo afundamento das camadas interiores. O motivo destes afundamentos pode ser devido à remoção de uma fase sólida, líquida ou gasosa no interior. A actividade mineira, as acções erosivas de águas subterrâneas e o efeito de vibração em sedimentos não consolidados, são algumas das acções que podem originar subsidiências.

Outro tipo de subsidiências são os recalques, ocasionados por movimentos verticais do solo. Neste caso, a acção do peso próprio ou o rebaixamento do nível freático podem ocasionar este tipo de deslocamento.

Os desabamentos ou quedas podem considerar-se subsidiências bruscas. Os movimentos caracterizam-se por ser de queda livre, onde o material deslocado pode ser de grandes dimensões, como rochas. Na figura X representa-se um caso de uma subsidiência brusca.

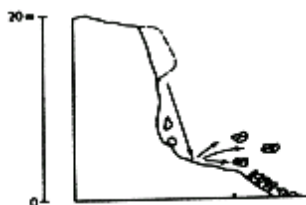


Figura 9 - Esquema de uma queda ou desabamento (28).

### 3.7.2.3. Escorregamentos

Os escorregamentos são movimentos rápidos ao longo de superfícies bem definidas. Estas falhas podem ser planas ou rotacionais.

- Escorregamento circular ou rotacional - A superfície de corte é curva e ocorre habitualmente em materiais argilosos cujo comportamento mecânico está regido pela fracção argilosa (30). Na figura 10, representa-se um esquema onde se distinguem as diferentes camadas dum escorregamento deste tipo. É possível distinguir facilmente a falha de corte.
- Escoamento plano - Está associado à presença de extractos pouco resistentes localizados a pouca profundidade do talude. A superfície de falha desenvolve-se em paralelo à zona frágil, sendo que nos extremos a falha termina em curva, formando

fendas. Os extractos que favorecem estas falhas são habitualmente argilas fracas ou areias finas (30). Na figura 111 representa-se um corte longitudinal dum escorregamento plano.

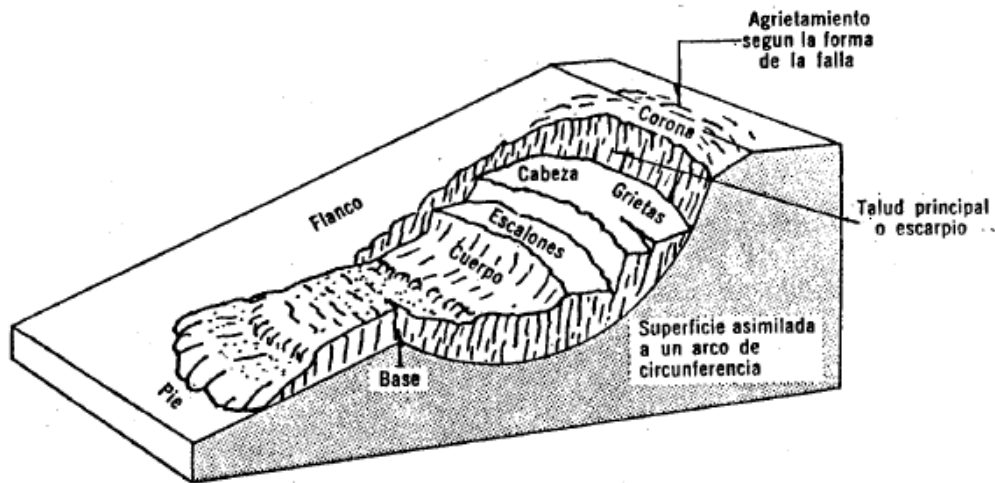


Figura 10 - Esquema de um escoamento rotacional (30).

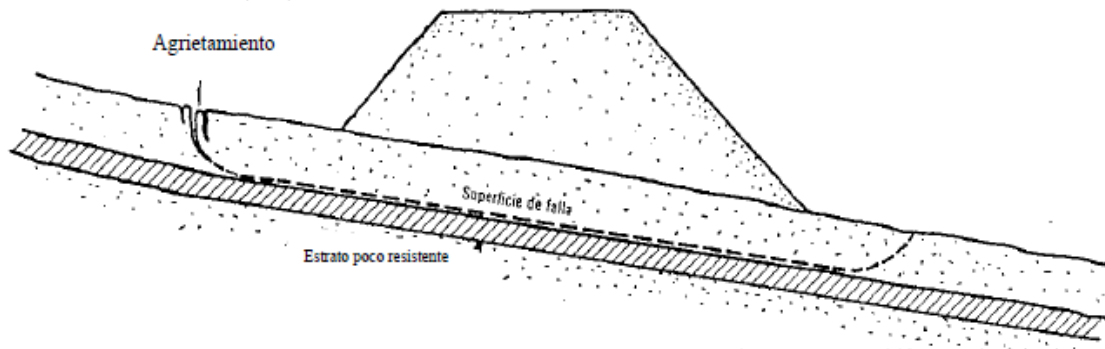


Figura 11 - Escorregamento plano, com a superfície de falha bem definida (30).

## 4. Exploração mineira do urânio

A exploração mineira de elementos radioactivos é uma actividade que já tem mais de um século de existência. Até à terceira década do século XX, os jazigos de urânio eram explorados com a finalidade de se extrair rádio (pode extrair-se cerca de uma grama de rádio por cada 3,3 toneladas de urânio), já que o urânio até essa altura não tinha grande interesse a nível comercial sendo lançado para as escombreiras (19).

Nos anos 30, surgiram os primeiros ensaios para a utilização da energia nuclear. Os estudos feitos em 1934 por Enrico Fermi e seus colaboradores, e em 1938 por Otto Hahn e Fritz Strassmann, foram essenciais para o surgimento do interesse na pesquisa de minérios de urânio e tório. A partir deste momento, as antigas escombreiras de urânio e rádio começaram a ser reaproveitadas e o comércio de urânio começou a ter grande impacto a nível mundial (19). Este elemento foi bastante utilizado na indústria bélica e no fabrico de material nuclear. O *Manhattan Project* utilizou este elemento para a concepção das bombas atómicas lançadas no Japão em 1945.

### 4.1. O comércio do urânio a nível mundial

Em 2007, a produção total de Urânio era de cerca de 50.572 toneladas, e 63% da produção mundial concentrava-se no Canadá, Cazaquistão e Austrália. A produção na União Europeia, resumia-se a apenas 3%. No caso das reservas de urânio, a Austrália detinha cerca de 27% em 2008, seguindo-se do Cazaquistão com 17% e do Canadá com 13%. Actualmente, o urânio é muito utilizado como combustível para centrais nucleares. Na figura 12, representa-se a produção a nível mundial.

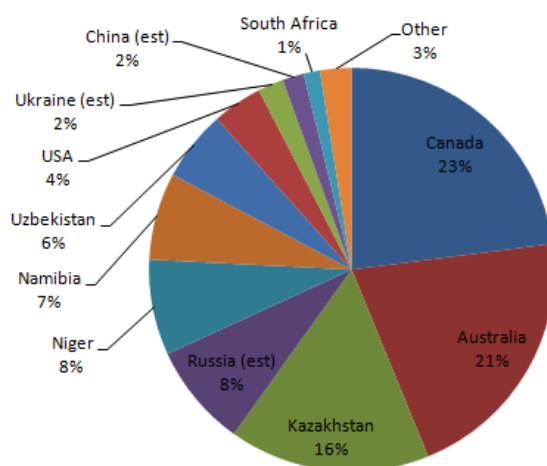


Figura 12 - Produção de urânio a nível mundial (31).

O mercado dos concentrados do urânio variou bastante desde que este começou a ser comercializado. Ao contrário de outros minérios, não existe um valor oficial para o mercado deste metal, deste modo algumas organizações privadas desenvolveram os indicadores de preço de referência às transacções do mercado (19). Desde que se iniciou a comercialização do óxido de urânio, existiram 3 picos entre 1953 e 1957, entre 1976 e 1978 e entre 2004 e 2007, onde ocorreu uma evidente subida de preço. Na figura 13 pode-se observar o valor do óxido de urânio nas diferentes épocas.

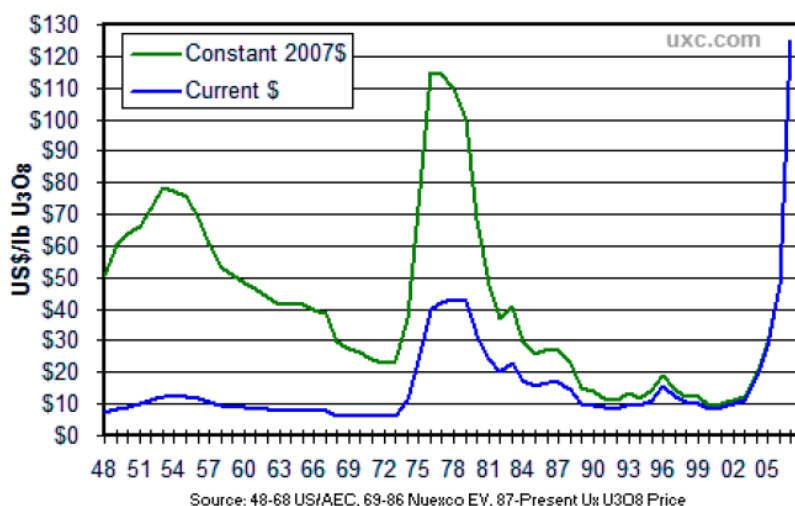


Figura 13 - Valores de mercado do óxido de urânio a preços correntes e preços corrigidos (19).

Em Portugal a exploração de urânio deu-se quase toda na segunda metade do século XX. Segundo a Empresa Nacional de Urânio, Portugal era em 1983 dos países da Europa ocidental com maiores recursos de urânio correspondendo a 0,38% dos recursos mundiais, sendo cerca de 17700 toneladas (19).

## 4.2. Principais aplicações do urânio

O urânio é um material que pode ter aplicações diversas. No início foi utilizado para a indústria do vidro e porcelana, para obtenção de determinadas colorações através dos sais de urânio. Na indústria bélica, foi muito utilizado urânio empobrecido, na sua maioria <sup>238</sup>U. Para a produção de electricidade utilizaram-se os três isótopos das séries de decaimento, com mecanismos de reacção diferentes. Cerca de 16% da electricidade é produzida em centrais nucleares. O urânio pode ser útil também na medicina, podendo ser usado no tratamento de carcinomas, e na esterilização de equipamentos médicos (19).

### 4.3. Distribuição do urânio em Portugal

Os principais depósitos de urânio em Portugal concentram-se maioritariamente na zona das Beiras, predominantemente nos distritos da Guarda e de Castelo Branco, embora também haja jazigos no Alto Alentejo, Douro e Trás-os-Montes.

Na Península Ibérica a localização dos jazigos de urânio está relacionada com o magmatismo Hercínico pós-tectónico, normalmente materializado por intrusões de granitos monzoníticos de grão médio a grosseiro de duas micas. A maior parte das jazidas portuguesas de urânio, encontram-se na parte ocidental do Maciço Hespérico, onde estão dispostas em forma de arco, contornando a Serra da Estrela pelo norte. Nas rochas de contacto do granito monzonítico com o complexo xisto-grauváquico ante-Ordovícico presente nas regiões de Seia, Sabugal, Tondela, Albergaria-a-Velha, também existem alguns depósitos, mas em menor quantidade e dispostos irregularmente (32).

O primeiro depósito de urânio português foi descoberto em 1907, na Urgeiriça (concelho de Nelas, distrito de Viseu), mas foi só em 1913 que se iniciou a primeira concessão para uma exploração mineira deste tipo. Assim como sucedia noutras partes do mundo, na primeira metade do século XX, as explorações mineiras tinham apenas a finalidade de extrair rádio, sendo que nos anos 30, após o desenvolvimento de uma metodologia de extracção mais económica, foi possível lançar este metal a preços altamente competitivos. Após a suspensão quase total da extracção em 1941, o interesse da redescoberta nos jazigos de urânio surge cerca de 1950.

Existiram em Portugal cerca de 60 explorações de urânio. Esta actividade foi muito intensa na segunda metade do século XX, até que devido ao decréscimo do interesse económico e estratégico, as minas foram encerrando até aos dias de hoje.

### 4.4. Técnicas de extracção de urânio

A exploração dos jazigos de urânio era normalmente feita em três fases: a prospecção, que tinha como objectivo a descoberta do jazigo; a exploração, que consistia no método de exploração do minério, podendo ser feita a céu aberto, subterrânea ou mista; e o tratamento do minério, em que se aplicava o processo de extracção do urânio.

Para efectuar o tratamento do minério foram utilizados diferentes processos. Os sistemas de tratamento convencionais utilizavam britadores e moinhos onde a rocha era fragmentada em partículas de 20mm, ou inferiores. Nas partículas finas aplicava-se o processo de lixiviação para produzir uma lama fina de partículas suspensas em água, sendo depois separado o óxido de urânio. Outro processo utilizado era a lixiviação *in situ*, em que se extraía o urânio da solução ácida injectada nas galerias (19).

## 4.5. Recuperação ambiental de antigas minas de urânio

Se não forem usadas técnicas preventivas e devidamente monitorizadas, qualquer tipo de exploração mineira gera actividades susceptíveis de degradar o ambiente. A poluição provocada por uma exploração mineira pode ser de dois tipos.

- Poluição pontual: ocorre quando a mina se encontra em actividade (quando existe uma monitorização ou controlo a poluição pode ser impedida);
- Poluição difusa: ocorre após o encerramento da mina, em que normalmente já não há nenhuma monitorização ou vigia (32).

Após efectuar a extracção do urânio, o material rejeitado pode alcançar níveis de radiação 20 a 100 vezes superior à radiação natural existente nas jazidas superficiais, e são necessários milhares de anos para que a radioactividade atinja valores aceitáveis.

Em Portugal, tal como aconteceu noutros países, muitas antigas áreas mineiras permaneceram a céu aberto devido à falta de legislação. Actualmente, para reduzir a propagação dos radionuclídeos e o risco das populações, algumas explorações mineiras são objecto de intervenção, tendo em vista a recuperação da zona.

São vários os riscos associados ao mau encerramento das explorações mineiras, podendo trazer problemas para o ambiente e para as populações próximas. As causas mais comuns são as seguintes:

- O radão pode propagar-se mais facilmente;
- Instabilidade de taludes. Os materiais das escombreyras podem dispersar-se pela acção do vento e da chuva, ou por outras acções da natureza;
- Contaminação das águas superficiais e subterrâneas;
- Instabilidade das minas devido a assentamentos.

A emissão de contaminantes pode atingir as pessoas e o meio de diferentes formas que pode ser por via:

- Atmosférica -> irradiação pela inalação do radão e dos seus produtos de decaimentos;
- Terrestre -> ingestão de alimentos contaminados;
- Aquática -> ingestão de água contaminada e de alimentos regados com esta água.

Para proceder à recuperação de uma antiga área mineira há vários objectivos a ter em conta. É necessária uma modificação do local para que os níveis de radiação e os impactos ambientais se reduzam a valores aceitáveis. As principais preocupações são as seguintes:

- Controlar a dispersão dos materiais;
- Controlar a erosão para prevenir a contaminação das águas;
- Reduzir a emissão da radiação gama e do radão;
- Recuperar a geomorfologia da paisagem original.

Existem várias técnicas para restauração de minas. Por exemplo, a empresa espanhola ENRESA levou a cabo um projecto de recuperação de várias minas de urânio nas regiões de Estremadura e Andaluzia. Os poços foram ocupados com material de escombros sendo depois tapados com lajes de betão. Também foram estabilizadas *in situ* algumas escombros que sobraram ou foram transportadas para outros locais. Os terrenos e a estabilização das escombros, foi realizada de maneira a facilitar a sua integração paisagística, evitando assim a sua erosão a longo prazo. Finalmente foram construídas coberturas vegetais com um grau de estabilidade aceitável de maneira a respeitar a paisagem circundante (33).

Em Portugal, A empresa EDM, desenvolveu alguns projectos de restauração de antigas explorações mineiras, estando actualmente algumas obras em curso (34). Uma destas obras foi a restauração nas antigas minas da Urgeiriça. Com quase um século de exploração (de 1907 a 2001), foram produzidas 4370 toneladas de concentrado de urânio e 13 milhões de toneladas de resíduos. A intervenção compreendia a selagem da escombros da Barragem Velha, onde estavam depositados cerca de 1,4 milhões de metros cúbicos de rejeitados; a recuperação da Barragem Nova e o fecho da mina subterrânea (35). Devido às dimensões do material de escombros presente na Barragem velha, o tratamento teve que ser feito *in situ*, ficando a sua recuperação concluída em 2008. A restauração da Barragem Nova assim como outras obras diversas na envolvente das escombros encontram-se actualmente em curso, estando a sua conclusão prevista até 2013 (34).



Figura 14 - Área da Barragem Velha após a conclusão dos trabalhos de recuperação (34).

## 5. Caso de estudo

### 5.1. Enquadramento geográfico

As antigas explorações mineiras da Carrasca e de Vale d'Arca localizam-se na parte ocidental do concelho do Sabugal, distrito da Guarda. Estão situadas próximas da povoação de Quarta-feira e inserem-se num vale de forte relevo junto da serra de São Cornélio. A topografia do vale varia entre os 550 metros (na ribeira junto à povoação de Quarta-Feira) e os 1008 metros (na elevação de São Cornélio) (36). Nas altitudes mais baixas flui a Ribeira de Quarta-feira, curso de água pertencente à bacia hidrográfica do rio Zêzere.

O vale de Quarta-feira enquadra-se numa região muito acidentada. Esta zona é a prolongação para ocidente da Meseta Ibérica, onde a erosão provocada pelas inúmeras ribeiras presentes, originou vários vales. Os pontos mais altos tais como, a Senhora do Castelo (com 718 metros), a serra do Espírito Santo (726 metros), a Esperança (715 metros), Sortelha (773 metros) entre outros, são testemunhos da antiga superfície da meseta (37). Na figura 15, está representada a localização da região de Quarta-feira na Beira Interior e na figura 16 representa-se a localização específica das duas explorações mineiras.

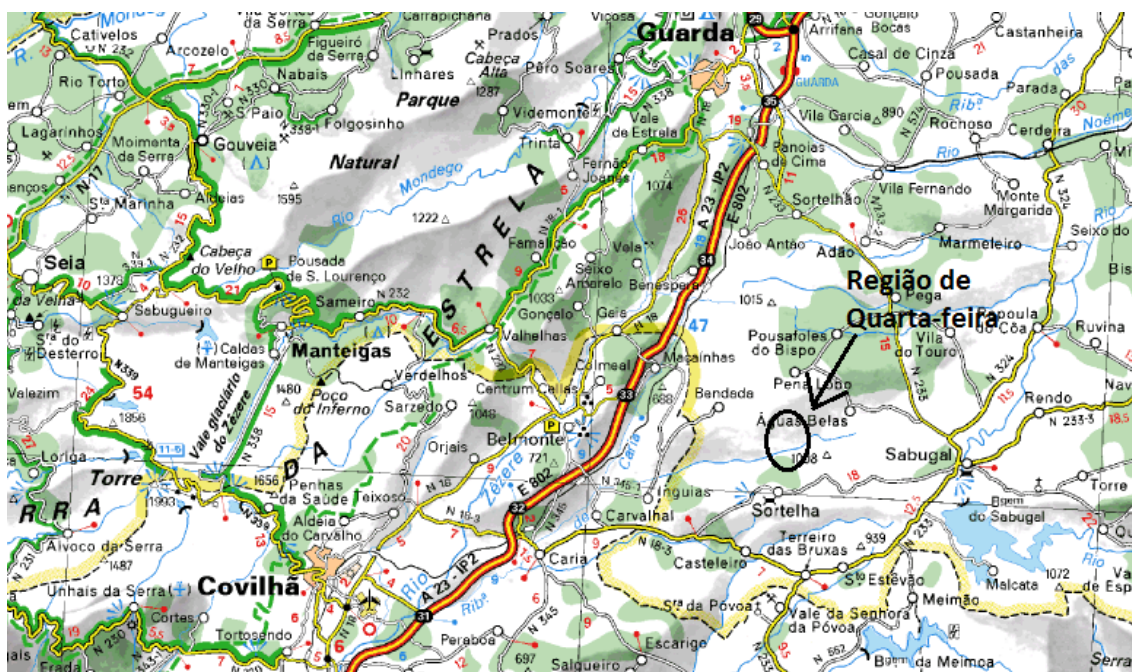


Figura 15 - Enquadramento da região de Quarta-feira no distrito da Guarda (38).



Figura 16 - Localização específica das explorações mineiras no Vale de Quarta-feira (39).

## 5.2. Enquadramento geológico

A região de Quarta-feira é constituída por uma extensa mancha de granito de grão médio a fino, de duas micas com a biotite predominante. É um granito alcalino, com tendência monzonítica, podendo apresentar só características alcalinas. O quartzo apresenta extinções ondolantes, e os feldspatos são albite, albite-oglioclase, oglioclase e micropertite, intensamente caulinizadas. Tanto a biotite como a moscovite podem apresentar inclusões de zircão envolvidas por halos pleocróicos, e a apatite pode ocorrer em cristais grandes (37).

## 5.3. Clima e precipitação

O vale de Quarta-feira encontra-se na zona climática continental da Península Ibérica (figura 17). O clima possui uma influência mediterrânica em que se verifica a existência de duas estações bem demarcadas. Os invernos são longos e rigorosos, podendo a temperatura

alcançar valores negativos. Por outro lado, o Verão é de curta duração mas as temperaturas podem exceder os 35° durante o dia.

Em relação à precipitação, encontram-se diferenças entre os meses mais quentes e os meses de Inverno. O Verão caracteriza-se como uma estação seca onde praticamente não ocorre precipitação (principalmente nos meses de Julho e Agosto). Os meses de Inverno são os que apresentam maior precipitação, podendo alguma ser em forma de neve nos pontos de maior altitude (40).



Figura 17 - Representação das zonas climáticas da Península Ibérica (41).

#### 5.4. Passado mineiro da região

Desde a descoberta do rádio em 1898, por Pierre e Marie Curie, começou a surgir o interesse por minerais radioactivos. Na região de Quarta-feira, a exploração de minerais radioactivos iniciou-se desde 1908 (nomeadamente as minas de Vale d'Arca, Bica e Carrasca), ano em que foram concessionadas muitas minas por todo o país.

Nos seus inícios, estas explorações mineiras tinham como objectivo a extracção de rádio, que era exportado para França por transporte ferroviário. Em 1910 após o isolamento do rádio no seu estado puro, uma companhia Francesa, estabeleceu-se na região da Guarda com o intuito de controlar uma vasta área mineira.

Devido à importância do rádio até à Segunda Guerra Mundial, foram concessionadas outras minas de materiais radioactivos na região, e o material era exportado para Inglaterra e França.

Após 1940, a produção de rádio começou a ser substituída pelos concentrados de óxido de urânio. Nesta segunda fase de exploração o minério era enviado para a mina da Urgeiriça,

onde era tratado. Por ano produziam-se cerca de 125 toneladas de urânio para o qual o material era utilizado para o fabrico de armamento nuclear.

Devido às explorações mineiras existentes a partir de 1950, notou-se na região um desenvolvimento económico, contribuindo para o aumento de postos de trabalho. O acréscimo da população, como na aldeia de Quarta-feira, contribuiu também para o desenvolvimento de pequenos comércios. A “Companhia Portuguesa de Radium” explorou as minas de Vale d’Arca, Carrasca e Bica até 1962, ano em que passaram para a Junta de Energia Nuclear.

Contudo, tal como aconteceu em outras zonas do País, todas as explorações mineiras de urânio acabaram por fechar ao longo dos anos (42).

## 5.5. Localização das explorações mineiras de Vale d’Arca e da Carrasca

A Mina da Carrasca situa-se a sudoeste da povoação de Quarta-feira, junto da estrada que liga Águas Belas e as proximidades de Sortelha. Do lado oposto da estrada estão situados alguns terrenos agrícolas. As escombrelas distinguem-se facilmente do solo natural.

Na envolvente das escombrelas observaram-se a alguns processos de “Creeping” patentes na deformação dos troncos de algumas árvores sobre o maciço rochoso granítico com um grau de alteração entre W3 e W4. Na figura 18, representa-se uma escombrela da Mina da Carrasca.



Figura 18 - Vista de uma escombrela da Mina da Carrasca, onde se evidenciam processos de “Creeping”.

A Mina de Vale d'Arca por seu lado localiza-se a nordeste da povoação de Quarta-feira, e o acesso a esta efectua-se por um caminho de terra batida estando a cerca de 1 km a nordeste da povoação. A área ocupada pelas escombreiras é consideravelmente menor que na Mina da Carrasca. Neste caso há a particularidade da Ribeira de Quarta-feira situar-se junto às escombreiras. Em relação às escombreiras, estas são mais visíveis que as da Mina da Carrasca devido à sua disposição e à praticamente inexistência de vegetação de recobrimento. Na figura 19, representa-se uma vista geral das escombreiras de Vale d'Arca.



Figura 19 - Vista das escombreiras da Mina de Vale d'Arca.

## 6. Análise de resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados em laboratório e do trabalho de campo. Na secção 6.1, faz-se uma breve descrição do trabalho de campo e apresentam-se as cartografias com os níveis de radiação gama obtidos nas escombreliras. No ponto 6.2, estão descritos os resultados dos ensaios de mecânica dos solos realizados. No ponto 6.3, apresentam-se os valores da actividade obtida para as diferentes classes granulométricas. Finalmente na secção 6.4, estão apresentados os resultados dos ensaios de espectrografia, assim como os radionuclídeos identificados nas amostras.

### 6.1. Cartografia com os níveis de radiação gama nas escombreliras de Vale d'Arca e da Carrasca (concelho do Sabugal)

#### 6.1.1. Trabalho de campo

Um dos objectivos deste trabalho foi determinar o nível de radiação gama presente nas escombreliras estudadas. Para isto foi necessário recorrer ao local de estudo para determinar a radioactividade em vários pontos, assim como a distribuição granulométrica do solo das escombreliras e a sua mobilidade.

O equipamento utilizado foi um geiger (medidor de radiação gama em  $\mu\text{Sv/h}$ ), de marca FAG Kugelfischer, modelo FM40F2, número de série 7159 e calibração 9-2011 (figura 20). Também foi usado um GPS para retirar as coordenadas exactas de cada ponto analisado.



Figura 20 - Equipamento utilizado para as medições da radiação gama nas escombreliras.

Começou-se por medir em locais um pouco afastados das explorações mineiras, com o intuito de obter a radiação de fundo presente na zona. Seguidamente escolheram-se vários pontos na escombreira e calcularam-se os respectivos níveis de radiação no solo e a 1 metro de altura. A posição do geiger no solo serviu para detectar o material mais radioactivo e o posicionamento a 1 metro de altura teve o fim de obter a radiação envolvente. A técnica utilizada em cada ponto foi apontar pelo menos dez valores (aleatoriamente) em  $\mu\text{Sv/h}$  detectados pelo aparelho, obtendo a média.

### 6.1.2. Cartografias e resultados obtidos

Na Mina da Carrasca, o valor da radiação de fundo obtido foi de cerca de  $0,3 \mu\text{Sv/h}$  ( $0,29 \mu\text{Sv/h}$  a 1m de altura e  $0,32 \mu\text{Sv/h}$  no solo). Junto da boca da mina encontraram-se os valores mais elevados, ultrapassando os  $2 \mu\text{Sv/h}$  com o equipamento 1 metro de altura do solo.

Na encosta do lado oposto da estrada também se detectaram alguns valores consideráveis de radiação, com a curiosidade de existirem no local alguns terrenos agrícolas e também a passagem de um curso de água proveniente do local das escombreiras.

Nas figuras 21 e 22, representam-se as cartografias com os valores de radiação gama obtidos na exploração mineira da Carrasca.

Os valores obtidos para a Mina de Vale d'Arca foram ligeiramente mais elevados. Num dos pontos a radiação presente a 1 metro de altura do solo atingiu os  $3 \mu\text{Sv/h}$ . Os níveis de radiação obtidos nas escombreiras da Mina de Vale d'Arca estão representados nas figuras 23 e 24.

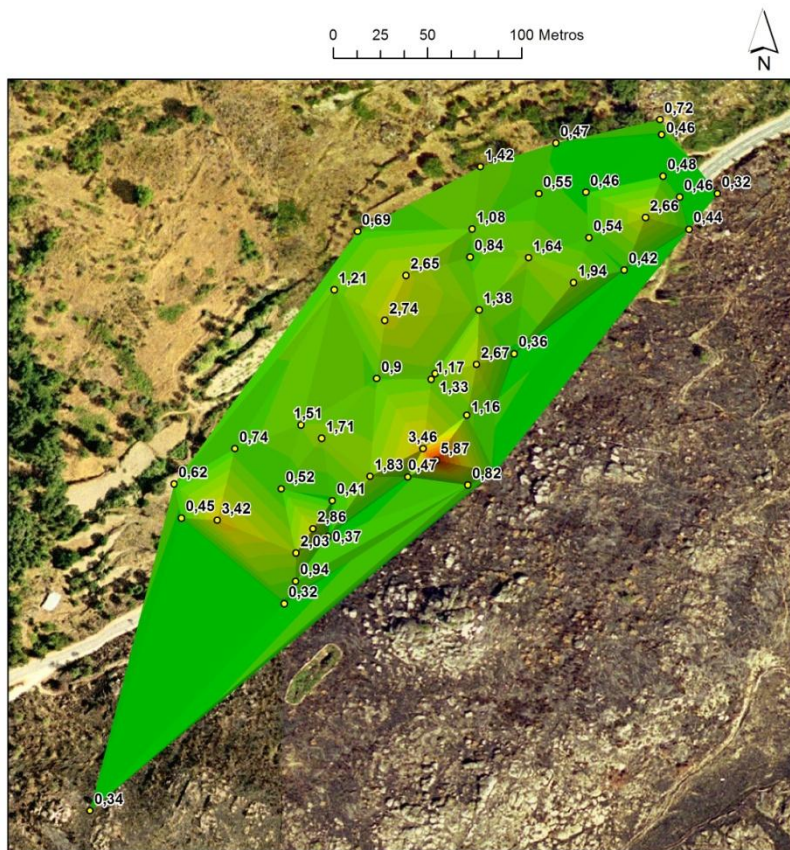


Figura 21 - Valores de radiação gama ( $\mu\text{Sv/h}$ ) no solo na área mineira da Carrasca.



Figura 22 - Valores de radiação gama ( $\mu\text{Sv/h}$ ) a 1m de altura na área mineira da Carrasca.

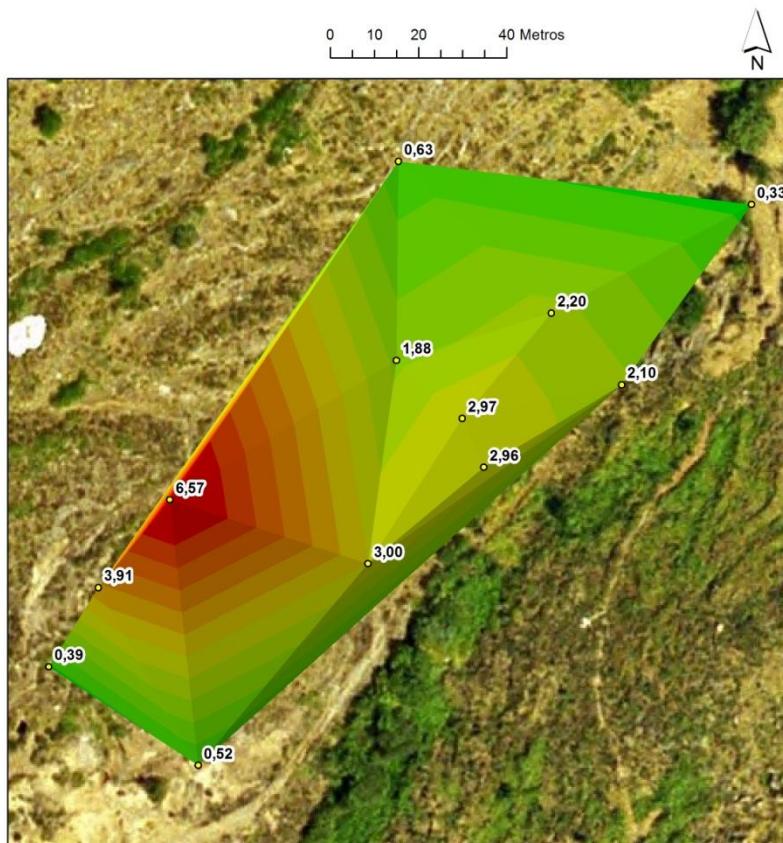


Figura 23 - Valores de radiação gama (no solo) na Mina de Vale d'Arca.

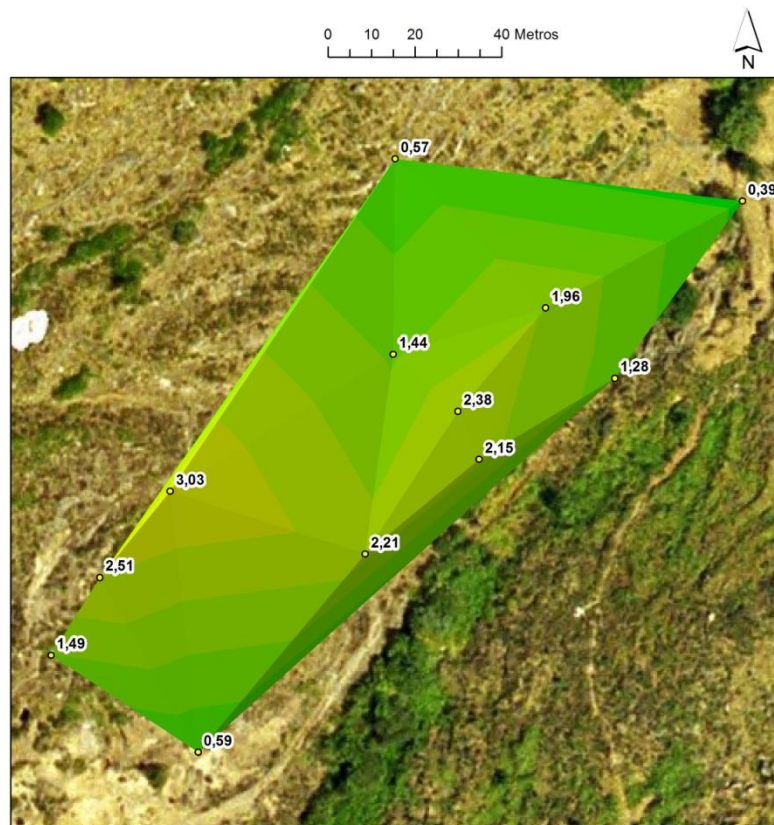


Figura 24 - Valores de radiação gama (a 1m de altura do solo) na Mina de Vale d'Arca.



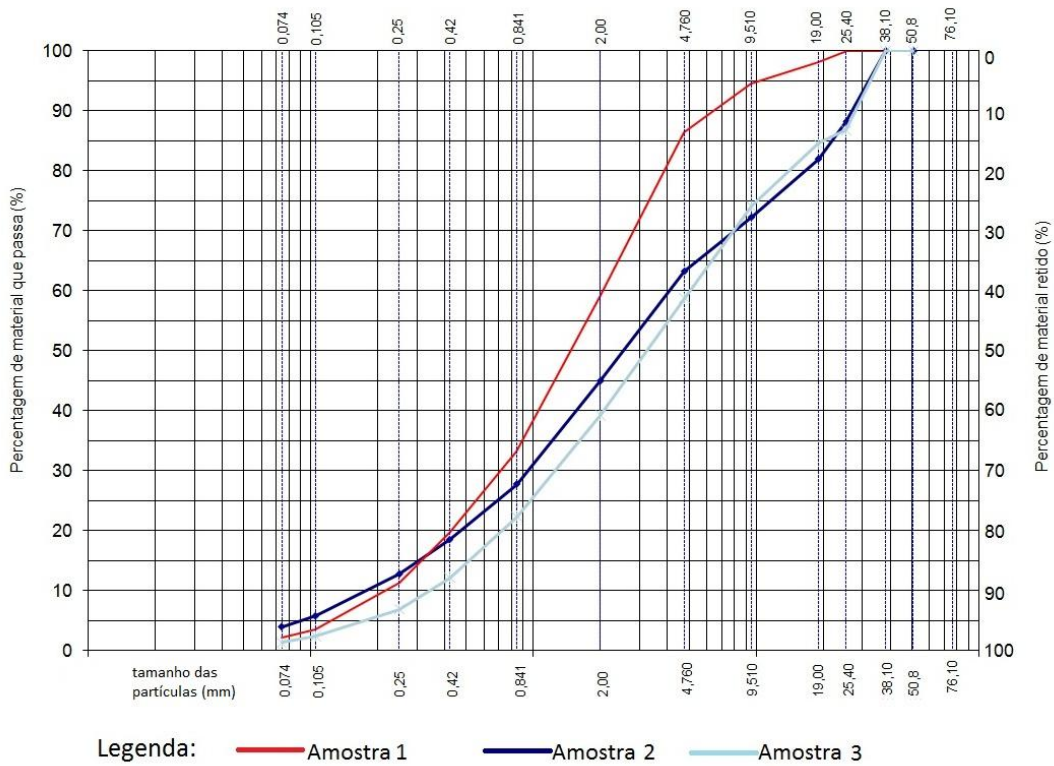


Figura 25 - Curvas granulométricas das amostras da Mina da Carrasca.

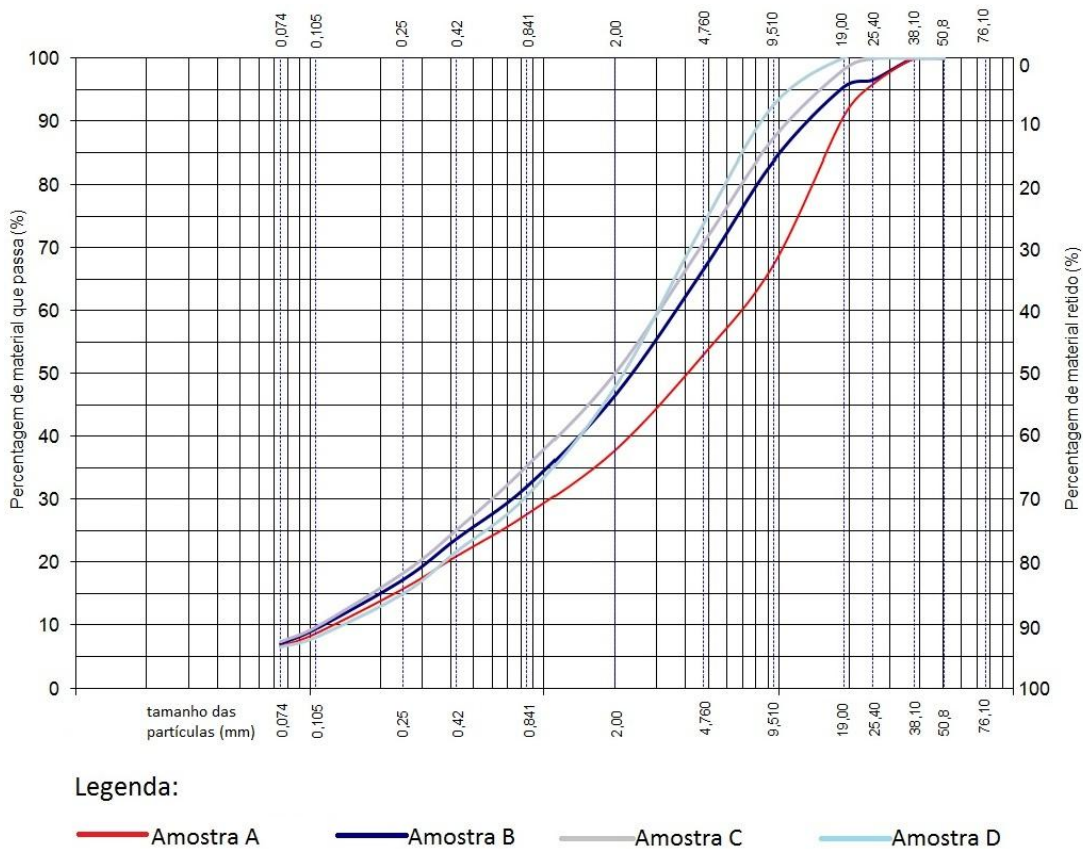


Figura 26 - Curvas granulométricas das amostras da Mina de Vale d'Arca.

As amostras com uma curva granulométrica mais uniforme foram escolhidas para realizar o ensaio de corte. Escolheram-se para realizar o ensaio de corte a amostra 3 da Mina da Carrasca, e a amostra D de Vale d'Arca.

### 6.2.3. Ensaio de corte directo

Os ensaios de corte directo foram realizados para uma amostra de cada mina. O objectivo foi determinar o ângulo de atrito e a coesão.

Para cada amostra realizaram-se 4 ensaios com diferentes valores da tensão vertical aplicada. A técnica de ensaio usada foi o de consolidado drenado. Nas figuras 27 e 28, apresentam-se respectivamente os valores das tensões de corte para a amostra 3 (Carrasca), e para a amostra D (Vale d'Arca). As tabelas da fase de consolidação e da fase de corte estão expostos nos anexos.

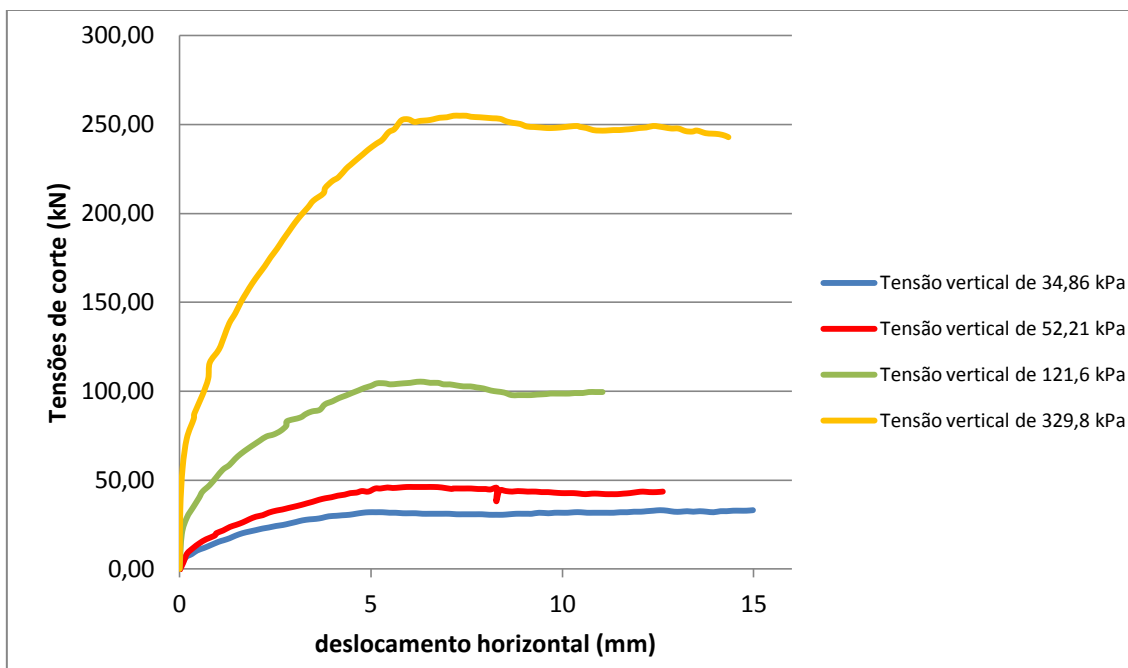


Figura 27 - Tensões de corte obtidas nos ensaios realizados para a amostra 3 (Carrasca).

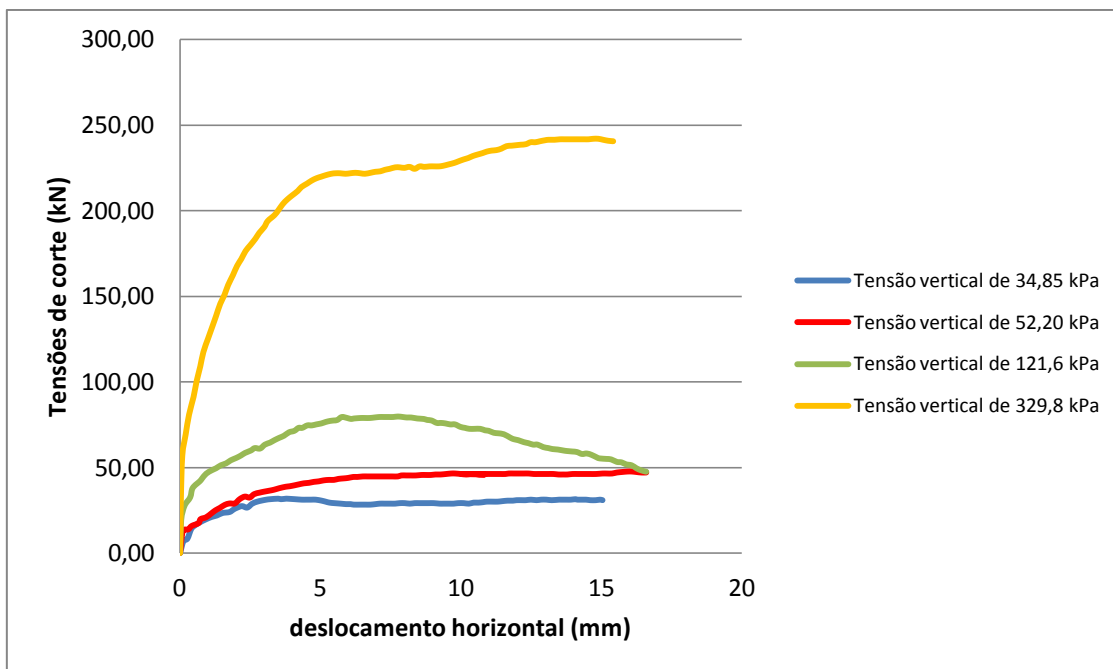


Figura 28 - Tensões de cortes obtidas nos ensaios realizados para a amostra D (Vale d'Arca).

Na tabela 4 apresentam-se as tensões máximas de corte (obtidas a partir dos gráficos das tensões de corte) e os valores das tensões normais. Com estes valores é possível construir as rectas de regressão, cujas equações das rectas permitem determinar o ângulo de atrito e a coesão (figuras 29 e 30).

Tabela 4 - Valores das tensões máximas de corte e tensões normais calculadas para os diferentes ensaios.

Ensaio de Corte	Amostra 3		Amostra D	
	Tensão máxima de corte (kPa)	Tensão normal (kPa)	Tensão máxima de corte (kPa)	Tensão normal (kPa)
1º ENSAIO (0,5 kg)	33,10	34,86	31,66	34,85
2º ENSAIO (1kg)	46,05	52,21	47,77	52,20
3º ENSAIO (3 kg)	105,3	121,60	79,72	121,6
4º ENSAIO (9kg)	255,0	329,78	242,0	329,8

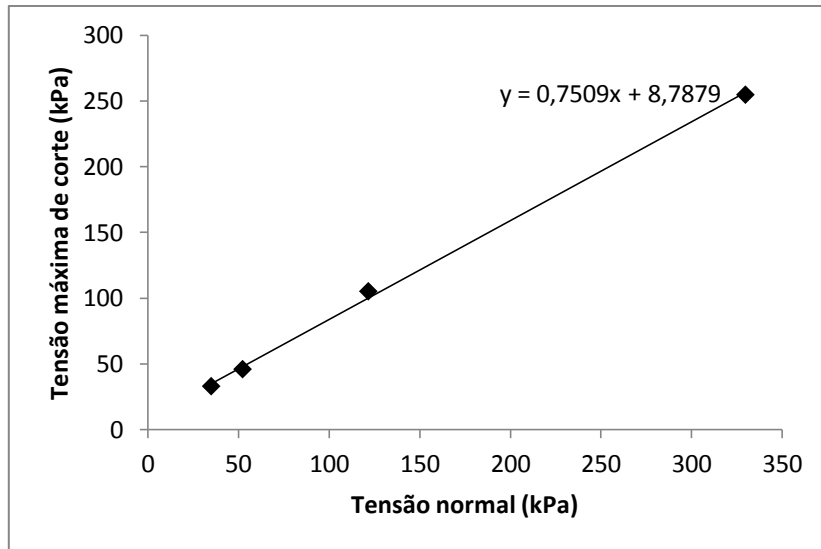


Figura 29 - Gráfico com os valores das tensões normais e tensões máximas de corte para determinar o ângulo de atrito e a coesão (amostra 3).

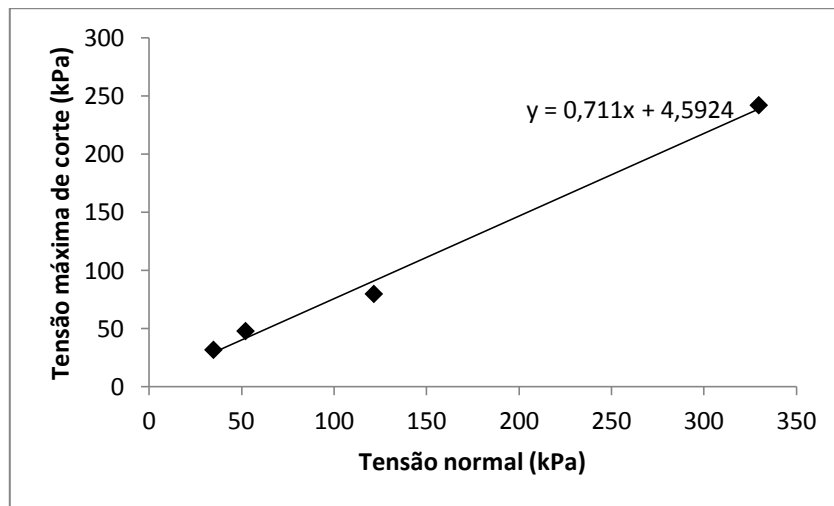


Figura 30 - Gráfico com os valores das tensões normais e tensões máximas de corte para determinar o ângulo de atrito e a coesão (amostra D).

Os valores da coesão e do ângulo de atrito são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Ângulos de atrito e coesão das duas amostras submetidas ao ensaio de corte.

	Coesão (c)	Ângulo de atrito ( $\Phi$ )
Amostra 3	8,78	36,9°
Amostra D	4,59	35,4°

### 6.3. Distribuição da actividade nas diferentes granulometrias

Após a obtenção de todas as amostras separadas pelas diferentes classes granulométricas, procedeu-se ao cálculo da actividade radioactiva presente. O equipamento utilizado foi um detector Geiger-Muller (Gamma-Scout) com janela de mica que permite a leitura de radiação gama, alfa e beta através de fios metálicos. Os valores obtidos, foram registados em decaimentos por segundo por kg (Bq/kg).

Na tabela 6 apresentam-se os valores obtidos, já com a subtracção da radiação de fundo no local.

Tabela 6 - Valores de radiação obtidos para as diferentes classes granulométricas.

Classes granulométricas (tamanho dos grãos em mm)	Número de decaimentos por segundo num kg de solo (Bq/kg)						
	Mina da Carrasca			Mina de Vale d'Arca			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Amostra D
<0,074	0,83	0,40	12,6	3,69	2,65	4,76	15,4
0,074 a 0,105	0,97	1,37	12,4	3,40	2,45	1,35	13,9
0,105 a 0,250	1,36	0,55	5,76	0,74	1,25	1,61	7,38
0,250 a 0,420	2,06	0,38	4,42	0,66	0,52	1,17	3,22
0,420 a 0,841	0,67	0,35	2,44	0,32	0,16	0,67	2,67
0,841 a 2,00	1,33	0,45	2,21	0,15	0,38	0,00	1,16
2,00 a 4,76	0,94	0,62	3,10	0,00	0,00	0,58	2,07
4,76 a 9,51	4,59	0,35	4,80	1,12	0,00	0,99	2,05
>9,51	1,83	0,23	4,84	0,23	4,03	0,00	1,52

Dos valores apresentados grande parte têm valores próximos de zero, uma vez que se aproximam aos valores da radiação de fundo. Após a rectificação da actividade de fundo alguns valores apresentam-se ligeiramente inferiores a zero, sendo apresentados nesta tabela com valor nulo.

#### 6.3.1. Comparação da actividade radioactiva nas diferentes classes granulométricas

Embora grande parte das classes granulométricas tenha valores insignificantes, é de notar que algumas registaram valores superiores à radiação de fundo. Os valores mais elevados obtiveram-se nas amostras D para a Mina de Vale d'Arca, e na amostra 3 para a Mina da Carrasca. As amostras B e C apresentaram alguma actividade e a amostra 1 apenas obteve valores mais elevados na fracção grossa entre 4,76 e 9,51 mm (cascalhos). A actividade registada na amostra 2, não teve valores significativos em relação à radiação de fundo.

Para uma melhor comparação entre as diferentes classes elaboraram-se os histogramas de distribuição apresentados na figuras 31 e 32. Neles estão dispostos as diferentes amostras agrupadas por mina e classe granulométrica.

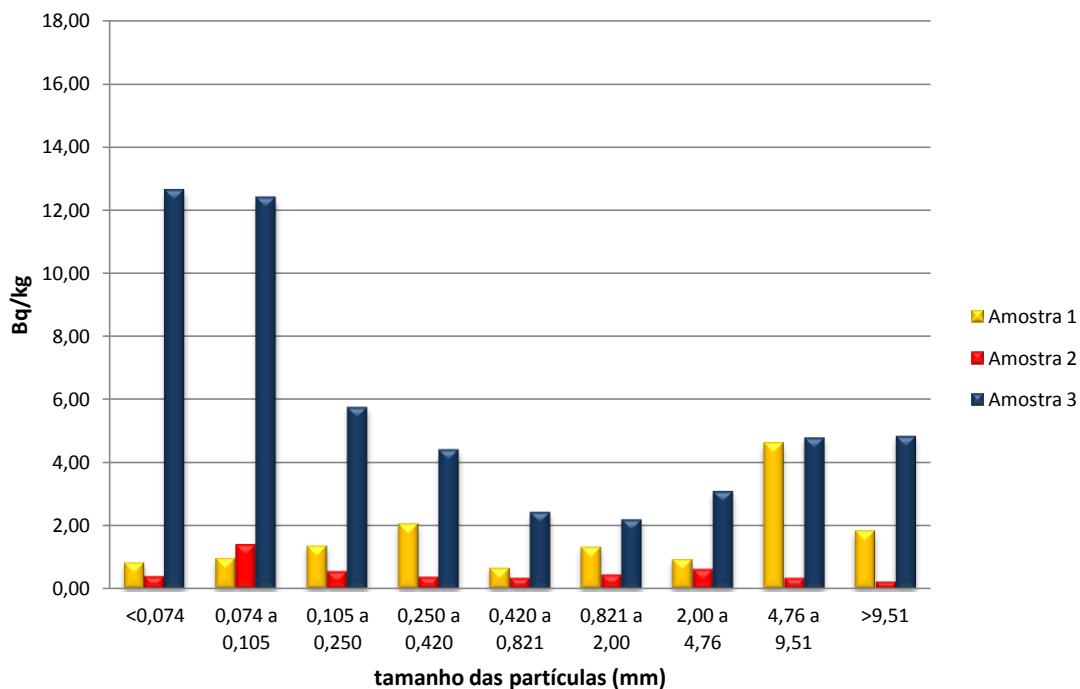


Figura 31 - Distribuição da actividade nas diferentes classes granulométricas na Mina da Carrasca.

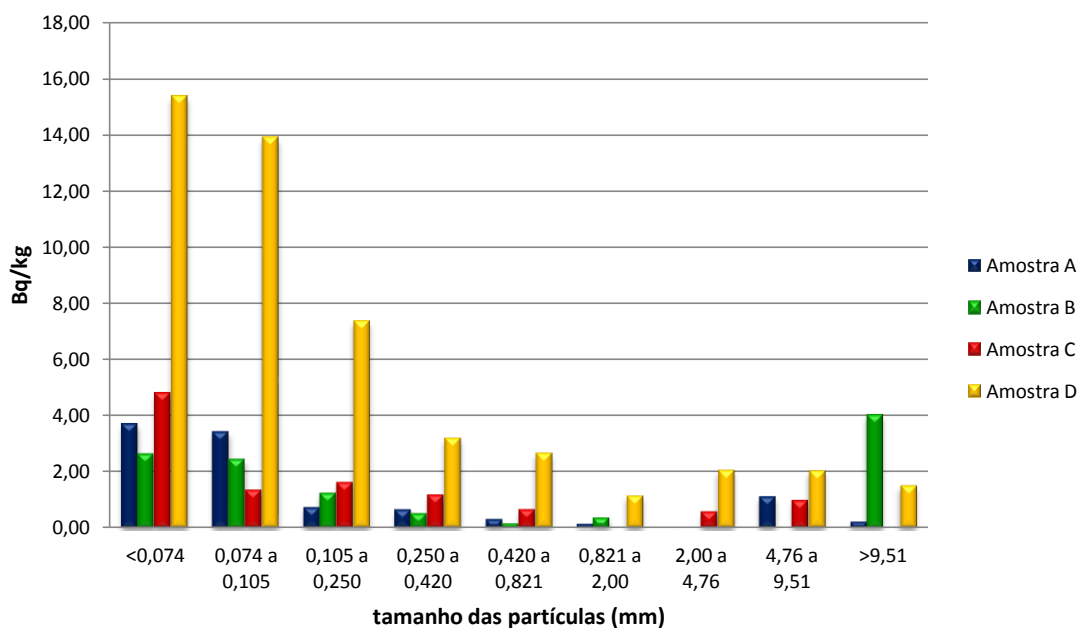


Figura 32 - Distribuição da actividade das diferentes classes granulométricas da Mina de Vale d'Arca.

## 6.4. Ensaios de espectrografia gama por cintilometria

As amostras que apresentaram maiores valores de actividade, foram escolhidas para a realização dos ensaios de espectrografia gama, com o objectivo de identificar alguns radionuclídeos presentes. O equipamento usado foi um fotomultiplicador de iodeto de sódio (modelo 2007P, Camberra) com detector de cintilação (modelo 802-3, Camberra), um amplificador e um conversor analógico digital (ADC). Nas figuras 33 e 34, ilustra-se o equipamento utilizado com cada aparelho identificado.



Figura 33 - Representação do fotomultiplicador.

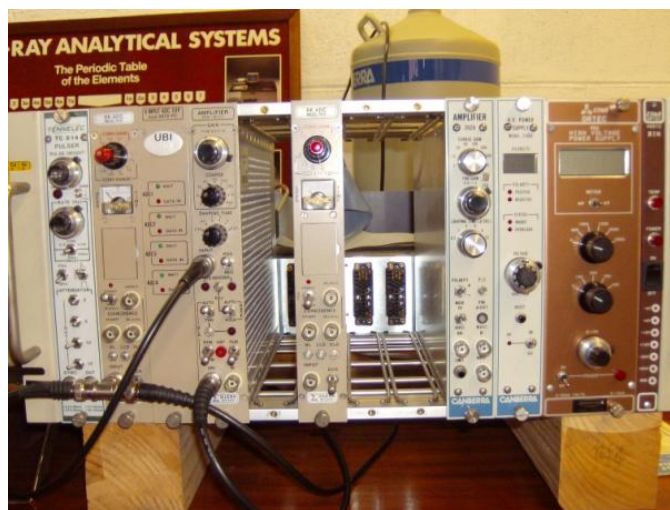


Figura 34 - Representação do amplificador com o conversor analógico digital.

O fotomultiplicador lê a energia electromagnética presente na amostra. O sinal lido é analógico e é discretizado no conversor por mais de 8000 canais. O conversor analógico digital converte o sinal analógico para digital, de forma a poder ser observado num computador.

Estas medições foram realizadas nas granulometrias mais finas das amostras C e D (Mina de Vale d'Arca) e na amostra 3 (Mina da Carrasca).

#### 6.4.1. Calibração

O espectrograma distribui os diferentes níveis de energia em mais de 8000 canais diferentes e em cada canal é efectuada uma contagem do número de fótons gama emitidos com determinada energia electromagnética. No entanto para saber a energia que lhe corresponde cada canal, é necessário uma calibração do aparelho, sendo neste caso realizada com fontes de cézio-137 e bário-133. Na figura 35 representa-se o espectrograma obtido com estas fontes.

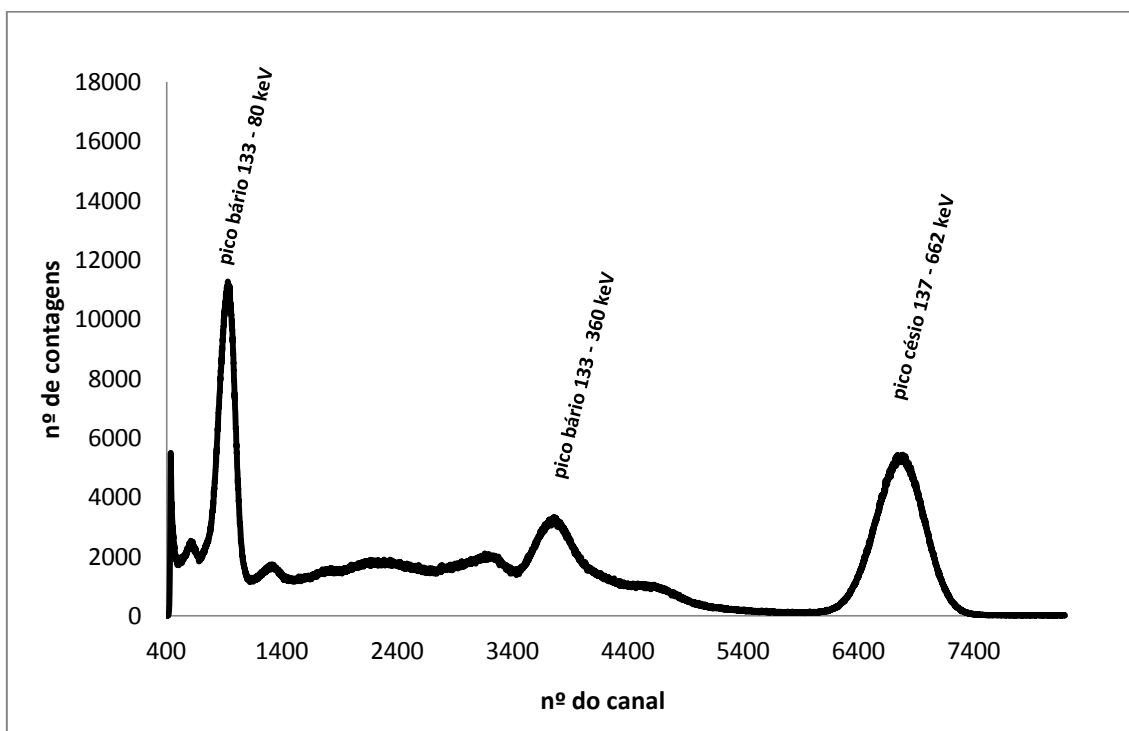


Figura 35 - Espectrograma das energias de decaimento de fontes de bário e cézio.

Os picos de energia são os valores das energias de decaimento destes isótopos. Após a consulta destes dados (43), é possível fazer a calibração através do número dos canais que originaram os picos (tabela 7). É de salientar que só se usaram dois picos para a calibração.

Tabela 7 - Energias de decaimento do bário-133 e césio-137 para calibração do aparelho.

Canal	Contagens	Energia (keV)
932	11271	80
6785	5434	662

Com uma interpolação dos dados da tabela, podem calcular-se as energias para todos os canais. É de notar que só se utilizaram dois picos

#### 6.4.2. Radionuclídeos identificados nas amostras

Depois de ter o equipamento calibrado, realizaram-se os ensaios para as amostras seleccionadas. Durante a realização dos ensaios, efectuaram-se outras calibrações com as fontes de bário e césio, de forma a manter a precisão.

Foram identificados vários picos, e chegou-se à conclusão que estes foram os mesmos para todas as classes granulométricas. Na figura 36 representam-se espectrogramas de amostras diferentes onde observar-se que estes são muito semelhantes.

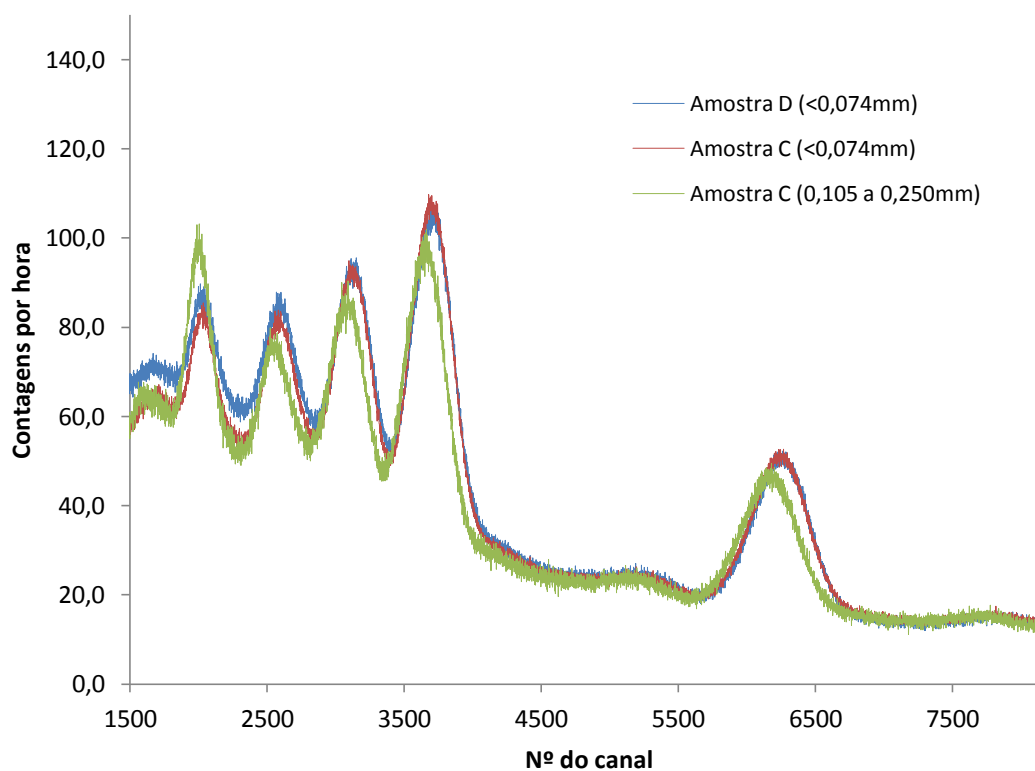


Figura 36 - Comparação dos espectrogramas de três classes granulométricas.

Na tabela 8 estão identificados os picos dos espectrogramas anteriores com a respectiva energia gama, número de contagens/hora e canal. Através da obtenção das intensidades de energia dos picos, puderam identificar-se os respectivos radionuclídeos. Em anexo seguem umas tabelas com os resultados de todas as amostras que foram submetidas aos ensaios de espectrografia com as respectivas calibrações antes e depois.

Tabela 8 - Níveis de energia detectados nos picos das amostras.

Picos dos espectrogramas		Amostra 3 (0,105 a 0,250 mm)			Amostra C (<0,074 mm)			Amostra D (<0,074 mm)		
		Canal	keV	Contagens /hora	Canal	keV	Contagens /hora	Canal	keV	Contagens /hora
#1	<sup>226</sup> Ra	2005	190,1	103,2	2034	189,8	86,0	2013	187,4	89,7
#2	<sup>212</sup> Pb, <sup>224</sup> Ra	2523	242,6	79,9	2585	245,1	83,7	2568	242,7	87,9
#3	<sup>214</sup> Pb	3091	300,2	90,4	3124	299,2	94,5	3143	299,9	95,6
#4	<sup>214</sup> Pb, <sup>211</sup> Bi	3657	357,5	101,2	3686	355,6	109,3	3702	355,6	106,7
#5	<sup>214</sup> Bi	6181	613,3	49,5	6270	614,9	53,0	6230	607,2	52,1
Tempo directo (s)		78770			246984			151012		
Tempo real (s)		79195			248355			151863		

# 7. Considerações sobre os resultados obtidos

## 7.1. Níveis de radiação presentes nas escombreliras

Após a análise das cartografias com os níveis de radiação de fundo e a 1m de distância do solo podem observar-se vários aspectos.

Verificaram-se que na generalidade, os valores obtidos no solo foram superiores aos valores obtidos a 1m de altura, porque existe maior concentração de radionuclídeos no solo. Contudo, nalguns pontos esta diferença foi bastante significativa, chegando a ser mais do dobro da diferença (por exemplo, ponto 20 e ponto 58 - anexo 1). A justificação pode ser a existência de uma zona com radionuclídeos muito concentrados e que os materiais radioactivos limitam-se a alguns locais e não a todo o solo.

Na Mina da Carrasca, os locais que apresentaram valores com maior radioactividade situam-se nas zonas próximas ao poço de ventilação. Do lado oposto da estrada, também se obtiveram valores acima da radiação de fundo junto dos terrenos agrícolas (como por exemplo, no ponto 26, em que a radiação gama no solo foi de  $1,33\mu\text{Sv}$  e a 1m de altura foi de  $1,35\mu\text{Sv}$ ). Devido a estes valores, existe a possibilidade dos terrenos estarem contaminados e que a radiação é mais generalizada. Junto destes terrenos também transcorre um curso de água proveniente das escombreliras, que por sua vez também poderá ter elementos radioactivos.

Na Mina de Vale d'Arca, foram obtidos valores de radiação semelhantes, e aqui existe a particularidade da Ribeira de Quarta-feira passar junto às escombreliras. Na figura 37, pode observar-se uma escombrelira em que o talude apresenta sinais de instabilidade, direccionado para a Ribeira de Quarta-feira.



Figura 37 - Escombrelira da Mina de Vale d'Arca com sinais de instabilidade no talude.

## **7.2. Análise dos ensaios de mecânica dos solos**

Os valores do teor de humidade do solo da Mina da Carrasca foram em média ligeiramente superiores aos de Vale d'Arca. Esta pequena discrepância pode estar associada à diferente natureza dos solos ou ao facto das amostras serem recolhidas em dias diferentes.

Os ensaios de corte concluíram que as duas amostras (3 e D), pertencentes a duas explorações mineiras diferentes, tiveram resultados semelhantes. Curiosamente, os valores obtidos de 36,9° para a amostra 3 (Carrasca) e 35,4° para a amostra D (Vale d'Arca) coincidem com grande parte dos ângulos de inclinação dos taludes das escombreyras. Em Vale d'Arca foram medidos ângulos entre 32° e 38° na escombreyra direccionada para a ribeira (figura 38) e na Mina da Carrasca obtiveram-se em determinados locais (nomeadamente, junto ao poço de ventilação) inclinações superiores a 40°. Com estes resultados, verifica-se que pode existir instabilidade nos taludes por haver inclinações iguais ou superiores ao ângulo de atrito.

## **7.3. Actividade das diferentes classes granulométricas**

Após analisar a actividade radioactiva das diferentes classes granulométricas, concluiu-se que foram as granulometrias mais finas que apresentaram níveis mais elevados de actividade radioactiva, embora com pequenas excepções (figuras 31 e 32).

Esta fracção do solo pode mais facilmente ser mobilizada pelos cursos de água que correm nos locais (quer pela água de escorrência de superfície, quer pelo vento). A existência de terrenos agrícolas perto das escombreyras da Carrasca e a proximidade das populações (como a povoação de Quarta-feira) pode eventualmente levar ao surgimento de questões de saúde.

A presença de maior radiação nas granulometrias finas tem também a particularidade de os grãos se poderem dispersar mais facilmente, nomeadamente nas fases de transporte para recuperação ambiental.

## **7.4. Discussão dos ensaios de espectrografia gama por cintilometria**

Para analisar os radionuclídeos presentes nas escombreyras, foram escolhidas várias classes granulométricas de algumas amostras e realizaram-se ensaios de espectrografia. Após a realização de diversas calibrações, chegou-se à conclusão que os picos obtidos nos espectrogramas das diferentes classes granulométricas foram semelhantes.

Após obter as energias electromagnéticas de cada pico procedeu-se à identificação dos radionuclídeos. Como os solos analisados são provenientes de escombrelras de antigas minas de urânio, utilizou-se para comparação uma amostra com ponteiros de relógio com verniz de rádio. Após a análise dos picos obtidos nos ponteiros, verificou-se que estes foram os mesmos obtidos para as amostras (figura 38). Como o rádio é um descendente da série do urânio, é possível concluir que os picos observados nos espectrogramas das amostras são descendentes do rádio.

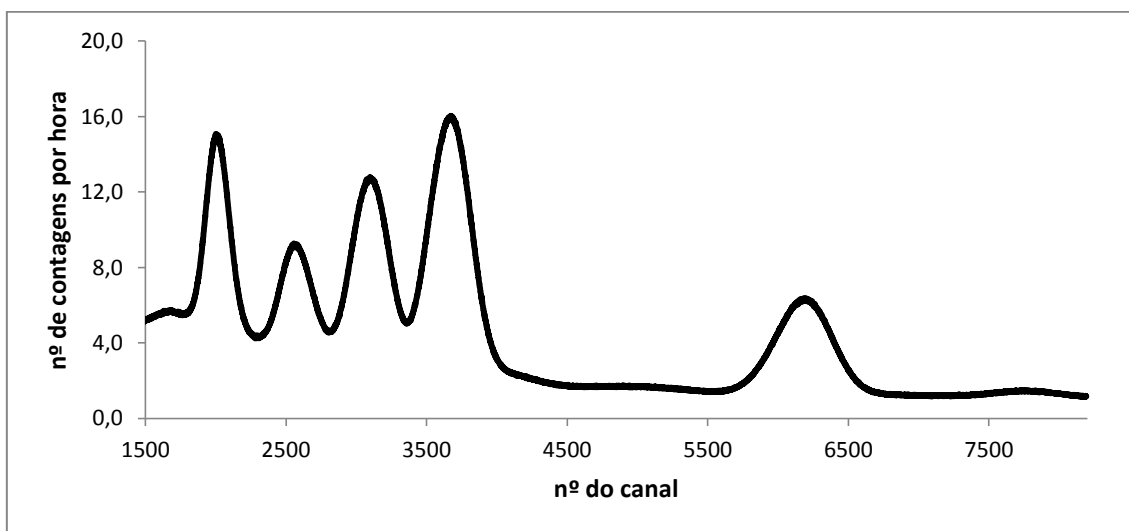


Figura 38 - Espectrograma dos ponteiros de relógio com rádio.

Nos espectrogramas analisados só foram consideradas as energias entre o canal 1500 e 8191. Os canais entre 0 e 1500 apresentaram um número de contagens muito elevadas nalgumas energias, pelo que justificou uma análise à radiação de fundo. Como se pode comprovar na figura 39 existe uma clara concentração de contagens nos canais entre 0 e 1500. Considerou-se que estes valores devem-se à presença de ruído de fundo e por isso não se apresentaram os valores entre 0 e 1500.

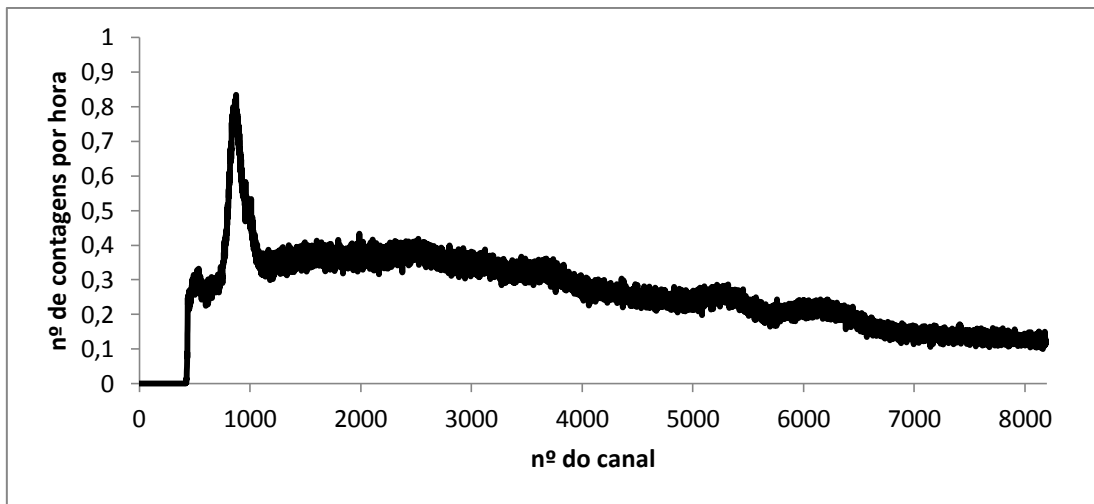


Figura 39 - Espectrograma da radiação de fundo.

Após a consulta dos radionuclídeos correspondentes dos picos, verificou-se que estes tiveram um ligeiro desvio. Esta causa pode ser devido a problemas de calibração do equipamento.

Além da espectrografia gama, as amostras foram submetidas a ensaios de difracção por raios X, mas os resultados obtidos não foram conclusivos.

## 8. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Na realização deste trabalho foram propostos vários objectivos, de onde se tiraram as seguintes conclusões.

Os valores de radiação gama obtidos nas escombreyras foram consideravelmente superiores à radiação de fundo. Na exploração mineira de Vale d'Arca observaram-se níveis superiores a 3 $\mu$ Sv/h a 1 metro do solo. Por outro lado, na Mina da Carrasca foram detectados valores de 1 $\mu$ Sv/h junto a terrenos agrícolas.

Em relação à mobilização dos materiais verificou-se instabilidade nos taludes pelos cálculos realizados dos ensaios de corte directo. Também foram visíveis casos de ravinamento e processos de "creeping" na curvatura de árvores.

Concluiu-se também que as classes granulométricas mais finas dos solos apresentaram maior actividade de radionuclídeos, embora estas diferenças foram mais visíveis para a amostra 3 (Mina da Carrasca) e para a amostra D (Mina de Vale d'Arca).

Através dos ensaios de espectrografia por cintilometria, foi possível identificar os radionuclídeos presentes no solo das escombreyras. Após diversas calibrações com fontes de bário e cézio, foram identificados elementos descendentes das séries de decaimento do urânio.

Finalmente os ensaios de detecção de raios X, não apresentaram resultados conclusivos.

Após a realização desta dissertação, podem ser desenvolvidos outros trabalhos relacionados com a contaminação radioactiva na região de Quarta-feira.

Alguns dos locais estudados situam-se junto a terrenos agrícolas ou cursos de água. Propõe-se uma eventual análise das águas ou dos produtos agrícolas cultivados. Outra proposta seria um estudo demográfico das populações próximas, com um historial de casos de doenças relacionados com a contaminação de elementos radioactivos.

Na altura da conclusão deste trabalho, iniciaram-se os trabalhos de reabilitação ambiental das antigas minas. O material depositado foi removido, e em Vale d'Arca foi construída uma barreira de terra junto à Ribeira de Quarta-feira, para evitar uma eventual contaminação da água.

# Bibliografia

1. Yoshimura E. Física das Radiações: Interção da radiação com a matéria. Revista Brasileira de Física Médica. 2009 Março: p. 57-67.
2. Semat H. Física Atômica y Nuclear Madrid: Aguilar; 1971.
3. Burcham W. Física Nuclear: Editorial Reverté, S.A.; 1974.
4. Martinho E, Oliveira J. Reactores Nucleares de Cisão. Sacavém: Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial; 1980.
5. Kwan-Hoong N. Non-Ionizing Radiations-Sources, Biological Effects, Emissions and Exposures. Kuala Lumpur: University of Malaya, Department of Radiology; 2003.
6. ICRU Report 19. International Commission on Radiation Units and Measurement. 1971..
7. Argonne National Laboratory. Ionizing Radiation. Human Health Fact Sheet. 2005 August.
8. Knoll G. Radiation Detection and Measurement. Second Edition ed. New York: John Wiley & Sons; 1998.
9. Martin A, Harbison S. An Introduction to Protection. Second Edition ed. New York: John Wiley & Sons; 1979.
10. Merril E. Environment Radioactivity. Third Edition ed. New York: Academic Press Inc; 1987.
11. Disponível em :  
[http://www.profpc.com.br/Qu%C3%ADmica%20Nuclear%20x%20F%C3%ADsica%20Nuclear/F%C3%ADsica%20Nuclear/Desintegra%C3%A7%C3%A3o\\_radioativa.htm](http://www.profpc.com.br/Qu%C3%ADmica%20Nuclear%20x%20F%C3%ADsica%20Nuclear/F%C3%ADsica%20Nuclear/Desintegra%C3%A7%C3%A3o_radioativa.htm).
12. ICRP Publication 60. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection Oxford: Pergamon; 1990.
13. International Atomic Energy Agency. Radiation Safety. In IAEA, Radiation Safety; 1996; Austria.
14. Krane S. Introductory Nuclear Physics: John Wiley & Sons; 1988.
15. Tipler P, Llewellyn R. Física Moderna: LTC Editora; 2001.

16. Szeles M. Avaliação da Contaminação Radiológica de um Solo Agrícola nas Proximidades de uma Mina de Urânio. São Paulo:, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares; 2004.
17. Harb S. On the human radiation exposure as derived from the analysis of natural and man-made radionuclides in soils. Hannover: Universität Hannover; 2004.
18. Laboratório de Radioatividade Natural. 2009 Novembro.
19. Gusmão C. Caracterização da Radioatividade Ambiente e Contributo para Análise de Risco. Aplicação à Área da Antiga Mina da Freixiosa. Monte da Caparica: Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Ciências da Terra; 2008.
20. Argonne National Laboratory, EVS. Natural Decay Series: Uranium, Radium, and Thorium. Human Health Fact Sheet. 2005 August.
21. Singh B, Walker A. Microbial degradation of organophosphorus compounds. In ; 2006.
22. Neves L, Pereira A. Radioatividade natural e ordenamento do território: o contributo das Ciências da Terra. Geonovas nº18. 2004: p. 103-111.
23. Laboratório de Analisis de Radiaciones. Información xeral sobre o gas radón. Universidade de Santiago de Compostela.
24. Amgarou K, Domingo C, Albarracín D, Fernández F, C B. Effect of Soil Parameters on Radon entry into a Building by Means of the Transrad Numerical Model. Universitat Autònoma de Barcelona; 2002.
25. Barros-Dios J, Barreiro M, Ruano-Ravina A, Figueiras A. Exposure to Residential Radon and Lung Cancer in Spain: A Population-based Case-control Study. American Journal of Epidemiology nº6. 2002.
26. Decreto-Lei 79/2006 de 4 de Abril. Diário da República. 2006.
27. Gerscovich D. Estabilidade de Taludes. Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia; 2009.
28. Dyminski A. Noções de Estabilidade de Taludes e Contenções. Brasil: Universidade Federal de Paraná.
29. Disponível em: <http://etg.ufmg.br/~gustavo/arquivos/estabilidadedetaludes.pdf>.
30. Matteis A. Estabilidad de Taludes. Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura; 2003.

31. World Nuclear Assotiation. World Uranium Mining. 2010.
32. Oliveira V. Modelação hidrológica da área mineira abandonada de Castelejo (Guarda). Universidade de Lisboa, Departamento de Geologia; 2010.
33. Estévez C. Restauración de antiguas minas de uraio. Recuperando naturaleza. Departamento de Proyectos de ENRESA.
34. Empresa de Desenvolvimento Mineiro, SA. Disponível em: <http://www.edm.pt>.
35. EXMIN, Companhia de Industria e Serviços Mineiros e Ambientais. Recuperação Ambiental da Área Mineira da Urgeiriça..
36. IGEOE-SIG. Instituto Geográfico do Exército. Disponível em: <http://www.igeoe.pt/igeoearcweb/igeoesig/default.asp>.
37. Teixeira C. Carta geológica de Portugal - Notícia explicativa da folha 21-A (Sabugal) Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal; 1965.
38. Via Michelin. Disponível em: <http://www.viamichelin.com>.
39. [Online]. Available from: <http://maps.google.com/>.
40. Santos B. Aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica como ferramenta de apoio ao combate de Incêndios Florestais no Concelho da Guarda. Dissertação de Mestrado. Universidade da Beira Interior; 2010.
41. Disponível em: <http://www.aesap.edu.pt/Geografia/climas.htm>.
42. Matias C. Radioactividade na Guarda. Primeiras pesquisas, exploração e eventos. Jornal Nova Guarda. 2011 Setembro.
43. Slater D. Gamma-rays of radionuclides in order of increasing energy Washington: Butterworth; 1962.

# Anexos

ANEXO I - Níveis de radiação gama obtidos nas explorações mineiras da Carrasca e Vale d'Arca.

Níveis de Radiação gama nas escombreyras da Mina da Carrasca				
Ponto	Coordenadas Forma UTM	Recolha de amostras	Localização do equipamento	Nível de radiação gama ( $\mu\text{Sv/h}$ )
1	29T 0652901		Ao nível do solo	0,34
	4468092		1m de altura	0,29
2	T29 0653003		Ao nível do solo	0,32
	4468203		1m de altura	0,33
3	T29 0653009		Ao nível do solo	0,94
	4468215		1m de altura	0,99
4	T29 0653009		Ao nível do solo	2,03
	4468230		1m de altura	1,51
5	T29 0653026		Ao nível do solo	0,37
	4468239		1m de altura	0,42
6	T29 0653018		Ao nível do solo	2,86
	4468243		1m de altura	2,12
7	T29 0653028		Ao nível do solo	0,41
	4468258		1m de altura	0,45
8	T29 0653068		Ao nível do solo	0,47
	4468271		1m de altura	0,56
9	T29 0653076		Ao nível do solo	3,46
	4468286		1m de altura	2,10
10	T29 0653100		Ao nível do solo	0,82
	4468267		1m de altura	1,16
11	T29 0653114		Ao nível do solo	0,43
	4468274		1m de altura	0,41
12	T29 0653114		Ao nível do solo	0,53
	4468308		1m de altura	0,38
13	T29 0653124		Ao nível do solo	0,36
	4468337		1m de altura	0,40
14	T29 0653182		Ao nível do solo	0,42
	4468382		1m de altura	0,55
15	T29 0653216		Ao nível do solo	0,44
	4468404		1m de altura	0,41
16	T29 0653193	Amostra 1	Ao nível do solo	2,66
	4468410		1m de altura	2,02
17	T29 0653155		Ao nível do solo	1,94
	4468375		1m de altura	0,99
18	T29 0653104		Ao nível do solo	2,67
	4468331		1m de altura	1,77
19	T29 0653099	Amostra 2	Ao nível do solo	1,16
	4468304		1m de altura	1,24

### Níveis de Radiação gama nas escomboreiras da Mina da Carrasca

Pontos	Coordenadas Forma UTM	Recolha de amostras	Localização do equipamento	Nível de radiação gama ( $\mu\text{Sv/h}$ )
20	T29 0653083	Amostra 3	Ao nível do solo	5,87
	4468280		1m de altura	2,60
21	T29 0653048		Ao nível do solo	1,83
	4468271		1m de altura	1,25
22	T29 0653001		Ao nível do solo	0,52
	4468264		1m de altura	0,46
23	T29 0652967		Ao nível do solo	3,42
	4468247		1m de altura	1,55
24	T29 0652948		Ao nível do solo	0,45
	4468248		1m de altura	0,41
25	T29 0653022		Ao nível do solo	1,71
	4468291		1m de altura	2,28
26	T29 0653082		Ao nível do solo	1,33
	4468326		1m de altura	1,35
27	T29 0653066		Ao nível do solo	2,65
	4468378		1m de altura	1,61
28	29T 0653080		Ao nível do solo	1,17
	4468323		1m de altura	1,20
29	29T 0653105		Ao nível do solo	1,49
	4468360		1m de altura	1,03
30	29T 0653131		Ao nível do solo	1,64
	4468388		1m de altura	0,98
31	29T 0653163		Ao nível do solo	0,54
	4468399		1m de altura	0,59
32	29T 0653161		Ao nível do solo	0,46
	4468423		1m de altura	0,48
33	29T 0653202		Ao nível do solo	0,48
	4468432		1m de altura	0,41
34	29T 0653211		Ao nível do solo	0,46
	4468421		1m de altura	0,39
35	29T 0653231		Ao nível do solo	0,32
	4468423		1m de altura	0,28
36	29T 0653201		Ao nível do solo	0,46
	4468454		1m de altura	0,42
37	29T 0653200		Ao nível do solo	0,72
	4468462		1m de altura	0,54
38	29T 0653136		Ao nível do solo	0,55
	4468422		1m de altura	0,53

### Níveis de Radiação gama nas escomboreiras da Mina da Carrasca

Pontos	Coordenadas Forma UTM	Recolha de amostras	Localização do equipamento	Nível de radiação gama ( $\mu\text{Sv/h}$ )
39	29T 0653100		Ao nível do solo	0,84
	4468388		1m de altura	0,56
40	29T 0653051		Ao nível do solo	0,90
	4468323		1m de altura	0,79
41	29T 0653011		Ao nível do solo	1,51
	4468298		1m de altura	1,19
42	29T 0652976		Ao nível do solo	0,74
	4468285		1m de altura	0,57
43	29T 0652944		Ao nível do solo	0,62
	4468266		1m de altura	0,38
44	29T 0653101		Ao nível do solo	1,08
	4468403		1m de altura	0,96
45	29T 0653145		Ao nível do solo	0,47
	4468449		1m de altura	0,41
46	29T 0653105		Ao nível do solo	1,42
	4468436		1m de altura	1,11
47	29T 0653040		Ao nível do solo	0,69
	4468401		1m de altura	0,49
48	29T 0653028		Ao nível do solo	1,21
	4468370		1m de altura	0,65
49	29T 0653055		Ao nível do solo	2,74
	4468354		1m de altura	1,82

### Níveis de Radiação gama nas escombreyras da Mina de Vale d'Arca

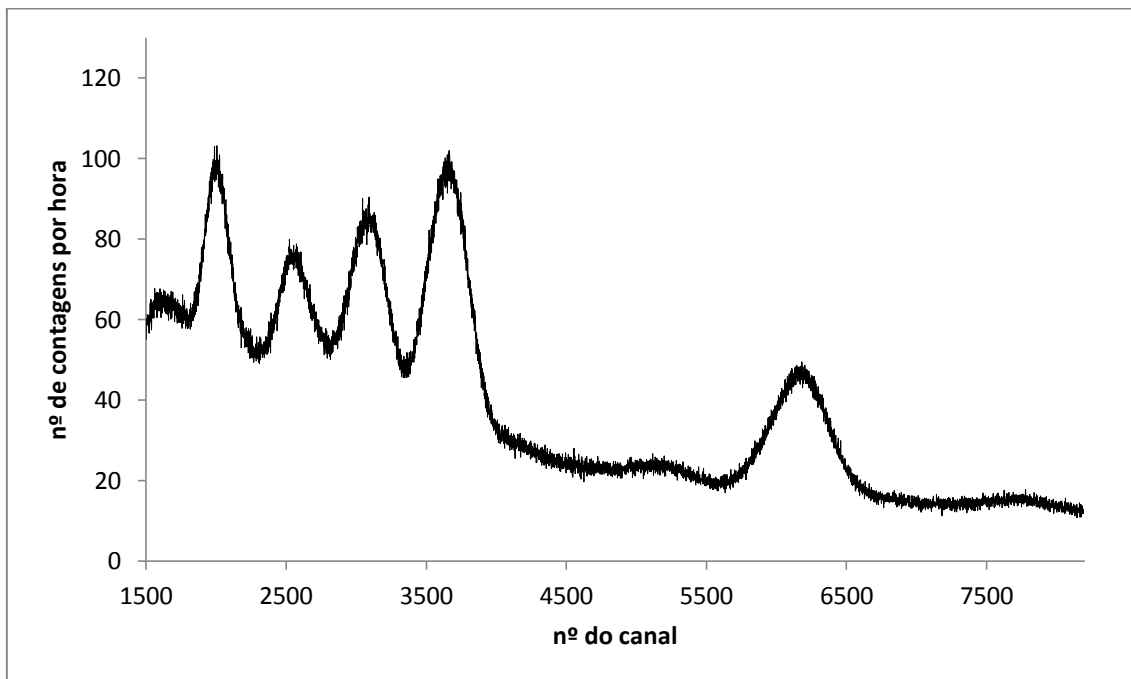
Pontos	Coordenadas Forma UTM	Recolha de amostras	Localização do equipamento	Nível de radiação gama ( $\mu\text{Sv/h}$ )
50	29T 654166		Ao nível do solo	3,00
	4470401		1m de altura	2,21
51	29T 654192		Ao nível do solo	2,96
	4470423		1m de altura	2,15
52	29T 654187	Amostra A e AmostraB	Ao nível do solo	2,97
	4470434		1m de altura	2,38
53	29T 654223		Ao nível do solo	2,10
	4470442		1m de altura	1,28
54	29T 654252		Ao nível do solo	0,33
	4470483		1m de altura	0,39
55	29T 654172		Ao nível do solo	0,63
	4470492		1m de altura	0,57
56	29T 654207	Amostra C	Ao nível do solo	2,20
	4470458		1m de altura	1,96
57	29T 654172		Ao nível do solo	1,88
	4470447		1m de altura	1,44
58	29T 654121	Amostra D	Ao nível do solo	6,57
	4470415		1m de altura	3,03
59	29T 654094		Ao nível do solo	0,39
	4470377		1m de altura	1,49
60	29T 654105		Ao nível do solo	3,91
	4470395		1m de altura	2,51

ANEXO II - Tabelas com os valores obtidos das análises granulométricas, distribuídos por mina.

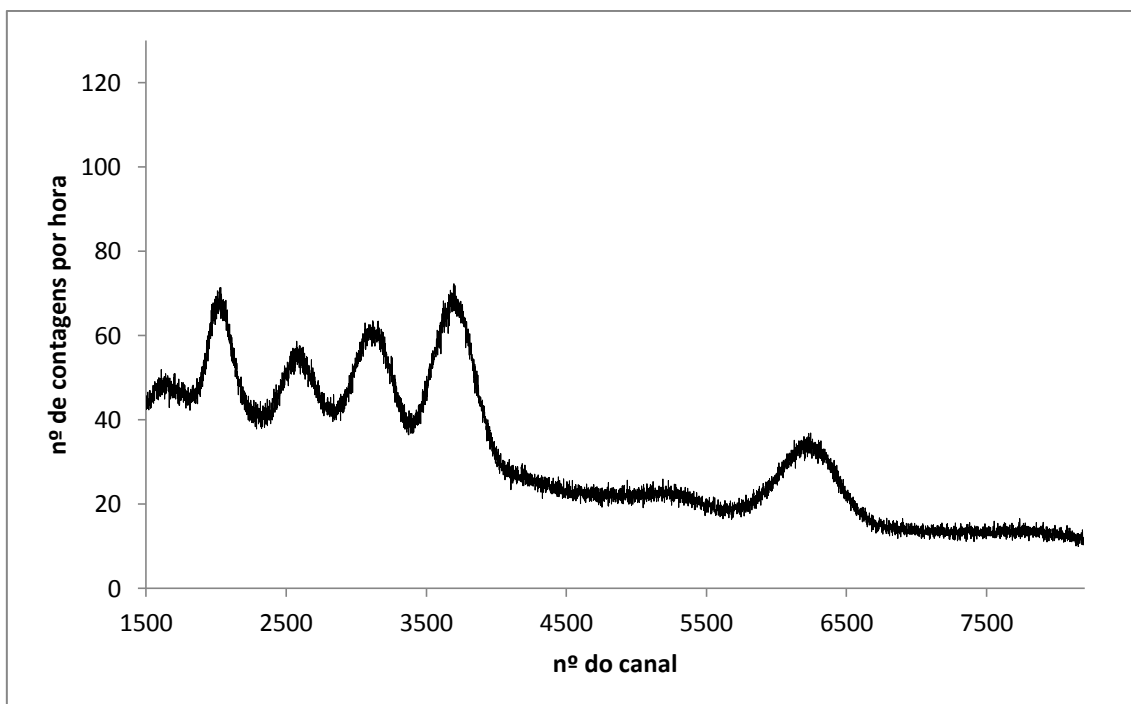
Mina da Carrasca						
Peneiros	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
	% retidos	% retidos acumulada	% retidos	% retidos acumulada	% retidos	% retidos acumulada
25,40mm	13,3	13,3	0,0	0,0	11,8	11,8
19,00mm	2,2	15,4	1,8	1,8	6,3	18,0
9,51mm	10,4	25,9	3,6	5,4	9,7	27,7
4,76mm	15,4	41,2	8,1	13,5	9,0	36,7
2,00mm	19,5	60,8	27,1	40,6	18,2	55,0
0,841mm	16,9	77,7	26,1	66,7	17,2	72,2
0,420mm	10,1	87,8	13,6	80,4	9,3	81,5
0,250mm	5,3	93,1	8,3	88,7	5,7	87,2
0,105mm	4,5	97,6	7,8	96,5	7,0	94,2
0,074mm	1,1	98,6	1,3	97,8	1,8	96,0
<0,074mm	2,10	100	2,29	100	4,39	100

Mina de Vale d'Arca								
Peneiros	Amostra A		Amostra B		Amostra C		Amostra D	
	% retidos	% retidos acumulada	% retidos	% retidos acumulada	% retidos	% retidos acumulada	% retidos	% retidos acumulada
25,40mm	4,1	4,1	3,4	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0
19,00mm	5,1	9,1	1,1	4,6	1,7	1,7	0,0	0,0
9,51mm	23,5	32,6	11,6	16,2	10,9	12,6	7,5	7,5
4,76mm	14,3	47,0	17,2	33,5	16,6	29,2	18,8	26,3
2,00mm	15,2	62,1	19,9	53,4	20,6	49,8	25,8	52,1
0,841mm	10,3	72,4	14,6	68,0	14,8	64,7	17,4	69,5
0,420mm	6,7	79,1	8,3	76,3	10,2	74,8	8,8	78,3
0,250mm	5,1	84,2	6,4	82,7	6,8	81,6	6,6	85,0
0,105mm	7,2	91,4	7,9	90,6	8,6	90,3	7,0	91,9
0,074mm	2,1	93,4	2,4	93,0	2,3	92,6	1,6	93,5
<0,074mm	6,5	100	6,7	100	7,3	100	6,25	100

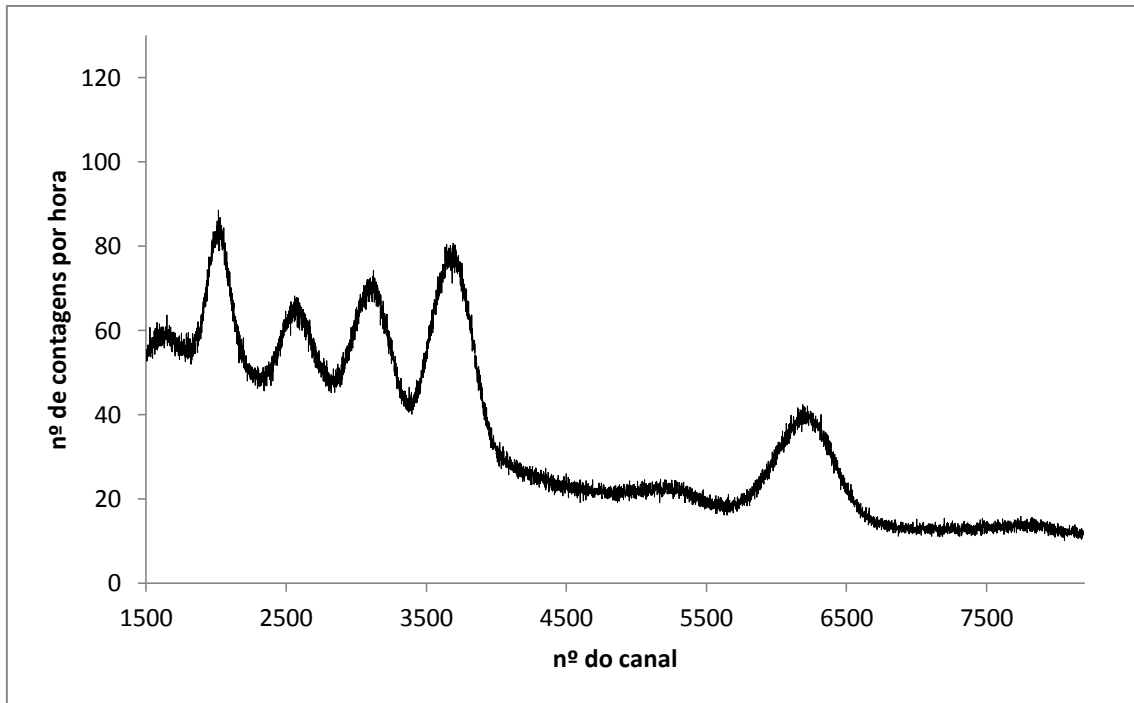
ANEXO III - Espectrogramas obtidos para diferentes classes granulométricas (não estão representados valores inferiores ao canal 1500).



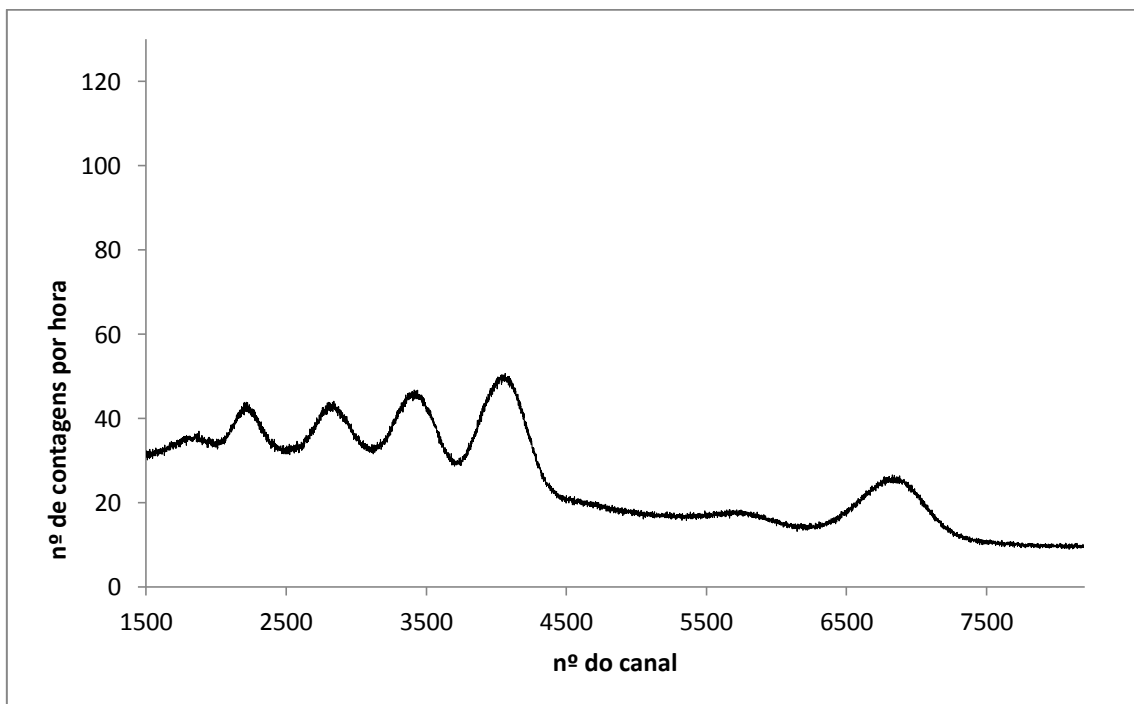
ANEXO III.1 - Espectrograma da classe 0,105 a 0,250mm da amostra 3 (Carrasca).



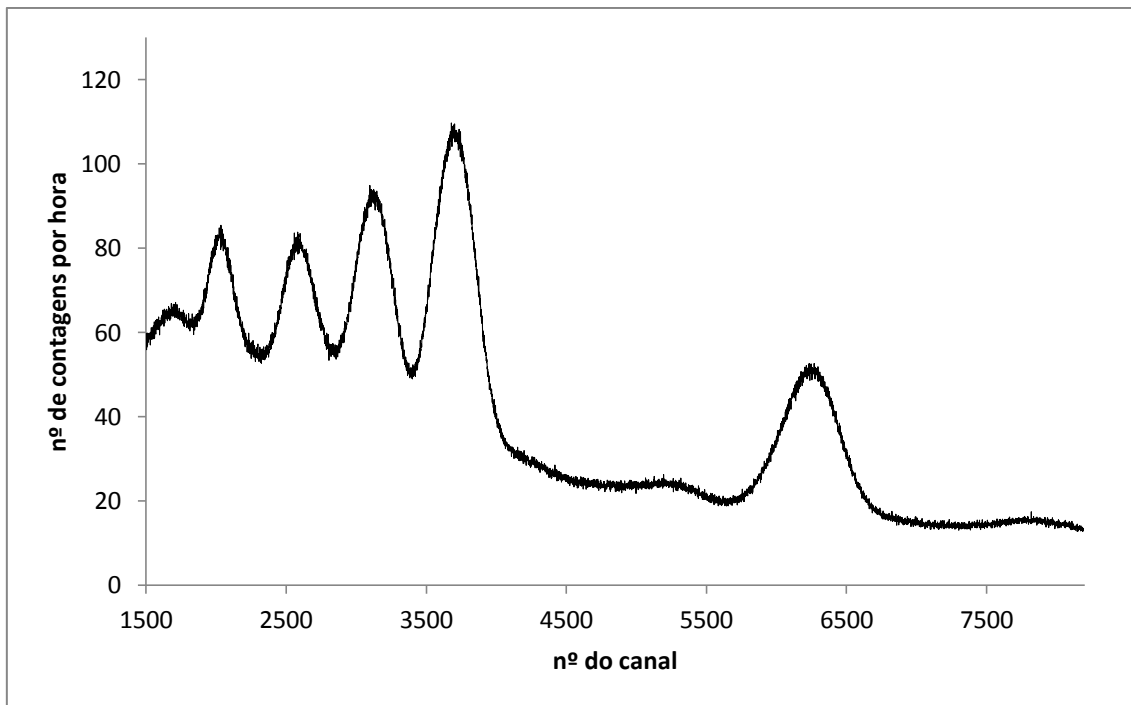
ANEXO III.2 - Espectrograma da classe 0,074 a 0,105mm da amostra 3 (Carrasca).



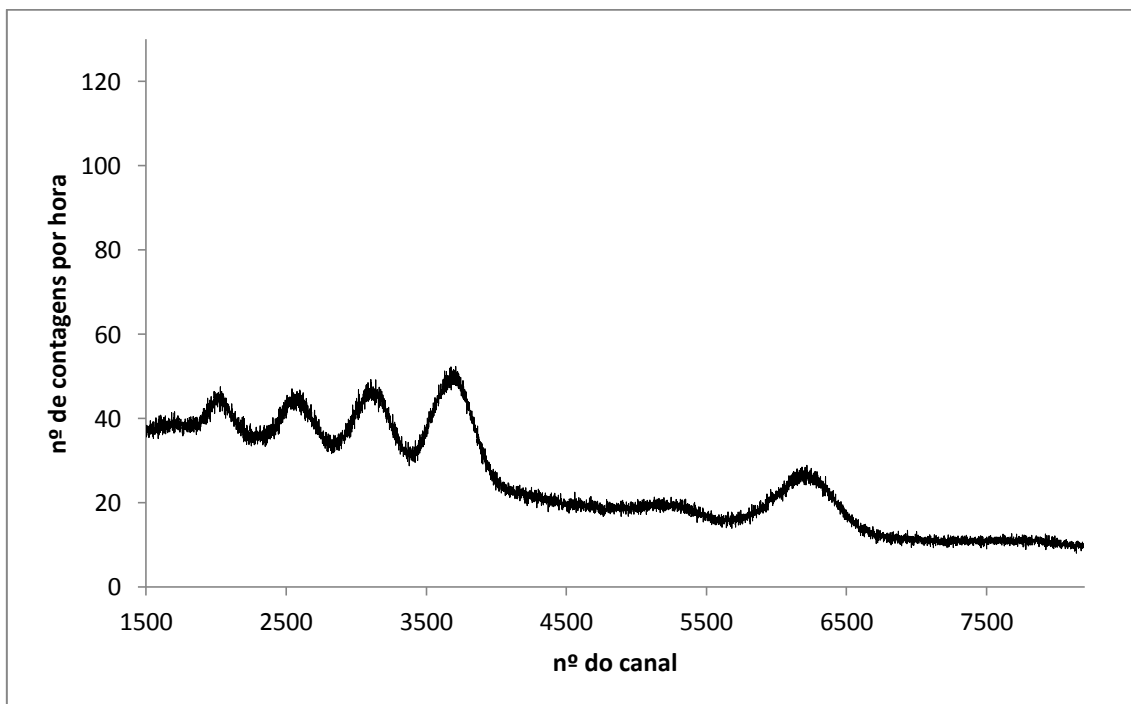
ANEXO III.3 - Espectrograma da classe  $<0,074\text{mm}$  da amostra 3 (Carrasca).



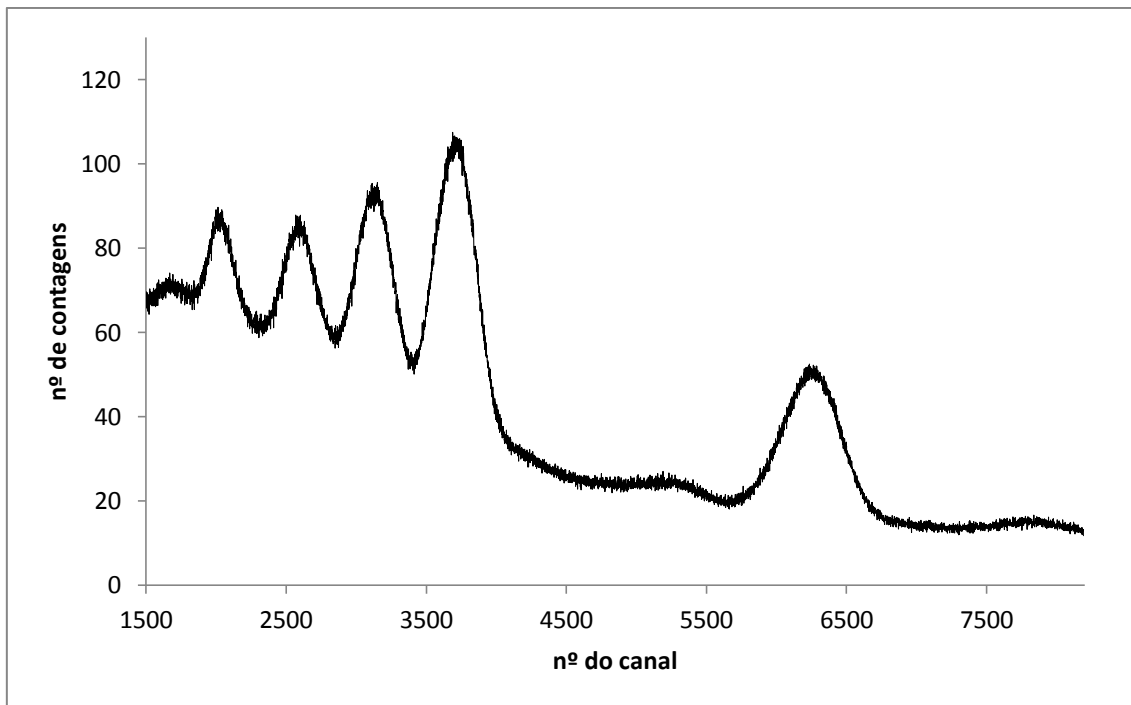
ANEXO III.4 - Espectrograma da classe 0,105 a 0,250mm da amostra C (Vale d'Arca).



ANEXO III.5 - Espectrograma da classe <0,074mm da amostra C (Vale d'Arca).



ANEXO III.6 - Espectrograma da classe 0,074 a 0,105mm da amostra D (Vale d'Arca).



ANEXO III.7 - Espectrograma da classe <0,074mm da amostra D (Vale d'Arca).