

**Instituto de Radioproteção e Dosimetria - IRD**

**Risco de Câncer em Trabalhadores Ocupacionalmente  
Expostos da Indústria Nuclear**

**Anderson Costa do Rosário  
Caroline Helena de Souza Dantas  
Fabrício de Oliveira**

**Rio de Janeiro**

**2011**

**Instituto de Radioproteção e Dosimetria - IRD**

**Risco de Câncer em Trabalhadores Ocupacionalmente  
Expostos da Indústria Nuclear**

**Anderson Costa do Rosário  
Caroline Helena de Souza Dantas  
Fabrício de Oliveira**

**Rio de Janeiro**

**2011**

Rosário, A. C. et al

Risco de câncer em trabalhadores ocupacionalmente expostos da indústria nuclear. / Anderson Costa do Rosário; Caroline Helena de Souza Dantas; Fabrício de Oliveira. – Rio de Janeiro: IRD, 2011.

X páginas.

Orientadora: Dr<sup>a</sup> Lene Holanda Sadler Veiga

Monografia (Lato-Sensu) – Instituto de Radioproteção e Dosimetria.

Referências bibliográficas: f. 31-34

1. Risco de Câncer. 2. Radiação Ionizante. 3. Ciclo de Combustível Nuclear. 4. Exposição Ocupacional I. Instituto de Radioproteção e Dosimetria. II. Título.

## Dedicatória

Dedico este trabalho a minha querida mãe e minha amada noiva Tábata

*Anderson Costa do Rosário*

Dedico à minha mãe, Lena Dantas, pelo apoio irrestrito em todas as etapas da minha vida. Ao meu amor, Gilbert Junior, por me incentivar sempre e pela compreensão e companheirismo nos momentos mais complicados.

*Caroline Helena de Souza Dantas*

Dedico a minha amada esposa Michele e ao meu filho Lucas, que diariamente estão ao meu lado, sendo a minha inspiração, a minha força e alegria.

*Fabício de Oliveira*

## Agradecimentos

Agradecemos primeiramente à nossa orientadora, Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lene H. S. Veiga, pela paciência e a amizade durante a realização deste trabalho. Também pelos nossos professores e equipe técnica, que dividiram parte dos seus conhecimentos e saberes conosco, durante a realização deste curso. Aos nossos amigos de turma, pelos dias passados juntos.

Agradeço a Deus pela oportunidade de me desenvolver como ser humano, a minha amada e querida mãe Vânia Maria, aos meus irmãos Alan Rosário e Alessandro Rosário que sempre estiveram do meu lado me apoiando em todos os momentos da minha vida, o meu sogro e minha sogra, por todo o apoio, que me prestaram, agradeço a minha amada noiva Tábata, pela paciência e dedicação prestadas a mim. Agradeço também aos meus companheiros de classe Caroline e Fabrício por toda a dedicação, para a realização desse trabalho.

*Anderson Costa do Rosário*

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado o dom da vida. À minha mãe Lena Dantas, por me ensinar o caminho e a lutar pelos meus objetivos. Ao meu amor Gilbert Junior, por todo incentivo, apoio, compreensão e amor dedicados.

Aos meus amigos em especial: Walkíria Nascimento, André Valladão e Anderson Rosário, por estarem comigo nos momentos importantes, não me deixando desistir nunca e sempre me apoiando durante todo o curso.

*Caroline Helena de Souza Dantas*

Agradeço à Deus, pelas oportunidades de crescimento e amadurecimento. Ao Hospital Naval Marcílio Dias, pela liberação para a realização deste curso. Aos amigos que muito me ajudaram e que sem eles teria sido muito mais difícil:

André Valadão, Arthur, Douglas, Gustavo e Wellington.

*Fabrício de Oliveira*

## Resumo

Muitos indivíduos são expostos a radiação ionizante no decorrer de sua jornada de trabalho e os estudos epidemiológicos destes grupos ocupacionalmente irradiados, oferecem uma importante oportunidade para complementar as estimativas de riscos para a saúde resultantes da exposição à radiação. Os trabalhadores da Indústria Nuclear, compreendido desde a mineração até o processo de reprocessamento ou armazenamento dos rejeitos do elemento combustível, estão diretamente expostos aos riscos da exposição prolongada ao baixo nível da radiação, situação de grande preocupação dos Serviços de Proteção Radiológica, devido aos riscos de efeitos estocásticos envolvidos.

O grande número de trabalhadores da Indústria Nuclear ao redor do mundo representa uma grande possibilidade de risco para a proteção radiológica. As primeiras evidências epidemiologicamente sólidas dos efeitos estocásticos da radiação são referidas aos mineiros que inalaram grande quantidade de radônio e os seus subprodutos do decaimento, com risco aumentado para câncer de pulmão radioinduzido. Através dos estudos destes trabalhadores é possível se obter, cientificamente, estimativas confiáveis do risco aos quais estão expostos e uma oportunidade de se estudar os possíveis efeitos somáticos na saúde além do câncer que é objeto de muita discussão no momento.

Tendo em conta estes aspectos, este trabalho de conclusão do curso de Pós-Graduação, tem por objetivo fazer um levantamento bibliográfico das evidências epidemiológicas relativo ao risco de câncer em trabalhadores da área nuclear, após exposição à radiação ionizante realizou uma revisão bibliográfica de forma que se pudesse demonstrar o risco de cancer em trabalhadores da Industria Nuclear. Da revisão realizada, concluímos que no geral, os estudos de exposição à radiação ionizante no local de trabalho fornece um apoio valioso para estudos desses grupos expostos em outras circunstâncias, e em alguns casos efetivamente oferecer a única fonte direta de evidência epidemiológica sobre os riscos.

Palavras- Chave: Risco de Cancer. Trabalhadores Nucleares. Ciclo Combustível.

## Abstract

Many individuals are exposed to ionizing radiation during their work day and epidemiological studies of occupationally irradiated groups offer an important opportunity to complement the estimates of health risks from exposure to radiation. Workers in the nuclear industry, from mining to understand the process of reprocessing or storage of waste fuel element are directly exposed to the risks of prolonged exposure to low level radiation, a situation of great concern for Radiological Protection Services because of the risks of stochastic effects involved.

The large number of workers in the nuclear industry around the world represents a great risk for the possibility of radiological protection. The first solid epidemiological evidence of stochastic effects of radiation are referred to the miners who inhaled large amounts of radon and its decay products, with increased risk for radiation-induced lung cancer. The studies of these workers is possible to obtain scientifically reliable estimates of the risk they are exposed and an opportunity to study the possible effects on somatic health than cancer that is the subject of much discussion at this time.

Considering these aspects, this work of completing the course Graduate, aims to review the literature of epidemiological evidence on the risk of cancer in workers in the nuclear area after exposure to ionizing radiation conducted a literature review so that it could be shown the risk of cancer in workers in the nuclear industry. The review undertaken, we conclude that in general, studies of exposure to ionizing radiation in the workplace provides valuable support for studies of groups exposed in other circumstances, and in some cases actually provide the only direct source of epidemiological evidence about the risks.

Keywords: Risk of Cancer. Nuclear Workers. Fuel Cycle

## Lista de Abreviaturas

AIEA: Agência Internacional de Energia Atômica.

BSS *International Basic Safety Standards*.

CNEN: Comissão Nacional de Energia Nuclear.

IARC: *International Agency for Research on Cancer*.

ICRP: *International Commission on Radiological Protection*.

IRD: Instituto de Radioproteção e Dosimetria.

LLC: leucemia linfocítica crônica.

OIT: Organização Internacional do Trabalho.

<sup>222</sup>Rn: Radônio-222, encontrado naturalmente no ambiente.

UF<sub>6</sub>: hexafluoreto de urânio.

UF<sub>4</sub>: tetrafluoreto de urânio.

UO<sub>2</sub>: óxido de urânio.

U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>: octaóxido de triurânio, também conhecido como “*yellow cake*”.

<sup>235</sup>U: Urânio-235, corresponde a 0,7% do encontrado na natureza.

<sup>238</sup>U: Urânio-238.

UNSCEAR: *United Nations Scientific Committee on the Effects of Radiation*.



## Glossário

DDREF (*Dose and dose-rate effectiveness factor*) – Fator de eficiência da dose e da taxa de dose. É um fator de redução que se aplica nos coeficientes de risco de cancer advindos de estudos de altas taxas de dose de radiação de baixo LET para a estimativa dos coeficientes de risco para baixas taxas de dose de radiação de baixo LET. O DDREF leva em consideração a eficácia biológica geralmente mais baixas (por unidade de dose) das exposições às radiações em doses baixas e taxas de dose baixas em comparação com exposições em doses elevadas e taxas de dose altas. A ICRP recomenda, para propósitos de radioproteção um valor conservativo de DDREF=2.

“*Efeito Trabalhador Sadio*” – Efeito observado na maioria das coortes ocupacionais onde as taxas de mortalidade por todas as causas são significativamente menores que as taxas esperadas pela mortalidade da população em geral, refletindo a seleção de um grupo mais saudável (aptos para o trabalho). Este efeito tende a diminuir com o tempo de trabalho.

Estudos de Coorte - São estudos observacionais onde os indivíduos são classificados (ou selecionados) segundo o status da exposição, sendo acompanhados por um determinado período de tempo para avaliar a incidência da doença.

Risco Relativo (RR) – Risco é a probabilidade de ocorrência de um determinado evento. Risco relativo é a razão entre o risco de um evento ocorrer no “grupo exposto” e o risco deste evento ocorrer no grupo de “não expostos”. Em epidemiologia, é comumente interpretado como o risco de desenvolver uma doença (ou de morrer) relativo à uma determinada exposição.

$$RR = \frac{R_{\text{exposto}}}{R_{\text{não exposto}}}$$

Onde,

$R_{\text{expostos}}$  – Probabilidade de um evento ocorrer no grupo de “expostos” ou risco de um evento no grupo “exposto”

$R_{\text{não expostos}}$  Probabilidade de um evento ocorrer no grupo de “não expostos” ou risco de um evento no grupo “não exposto”

RR= 1, a probabilidade do evento ocorrer nos dois grupos (“expostos” e “não expostos”) é igual. Não há risco.

RR < 1, a probabilidade do evento ocorrer no grupo de “não expostos” é maior do que no grupo de “expostos”. A exposição é fator de proteção.

RR > 1, a probabilidade do evento ocorrer no grupo de “expostos” é maior do que no grupo de “não expostos”. A exposição é fator de risco.

Excesso de Risco Relativo (ERR) – É o excesso de risco, dado por:

$$\boxed{ERR = RR - 1}$$

uma vez que RR=1 é ausência de risco. Como, em estudos envolvendo radiação, geralmente se dispõe de informação sobre a dose, o ERR também pode ser expresso por unidade de dose de radiação (ERR/Gy ou ERR/Sv).

Gray (Gy) – O nome especial para a unidade SI de dose absorvida: 1 Gy = 1J kg<sup>-1</sup>.

Sievert (Sv) – O nome especial para a unidade SI de dose equivalente, dose efetiva e dose de quantidades operacionais. A unidade é Joule por quilograma (J kg<sup>-1</sup>).

Razão de Mortalidade Padronizada ou “[\*Standardised Mortality Ratio\*](#)” (SMR) – é a razão de óbitos observados para óbitos esperados, onde óbitos esperados são calculados para a população de estudo tendo como base as taxas de incidência/mortalidade por sexo e faixa etária de uma população de referência. Desta forma, estima-se o número de eventos esperados na população de estudo, caso esta população apresente a mesma magnitude de mortalidade ou incidência da população de referência.

Working Level Month – WLM – É uma unidade de exposição acumulada aos produtos de decaimento do radônio. É o produto das concentrações dos filhos do radônio em “Working Level” (WL) e o tempo de exposição (historicamente quantificado em blocos de 170 h, definido como 1 mês de trabalho). A unidade “Working Level” (WL) é definida como qualquer combinação dos filhos de radônio de meia-vida curta em 1 litro de ar que resulta na liberação de  $1.3 \times 10^5$  MeV de energia alfa potencial. No Sistema Internacional de Unidades, 1 WL é igual a  $2,08 \times 10^{-5} \text{ J.m}^{-3}$ .

## Tabelas

Tabela 1. Média anual da Dose Efetiva por etapas do ciclo combustível...	19
Tabela 2. Estudos de mortalidade de trabalhadores a indústria nuclear com estimativa de Excesso de Risco por Sv para mortalidade por todos os cânceres excluindo leucemia.....	21
Tabela 3 Estudos de mortalidade e incidência de câncer dos trabalhadores da indústria nuclear que não apresentaram resultados de ERR/Sv.....	22
Tabela 4. Risco Relativo (RR) estimado a exposição de 100 mSv.....	25
Tabela 5. Limites de Doses Anuais.....	29

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
METODOLOGIA.....	14
RESULTADOS E DISCUSSÃO	
Definição de indústria nuclear.....	15
Mineração e beneficiamento do minério de urânio.....	16
Conversão e enriquecimento do urânio.....	17
Operação de reatores.....	17
Reprocessamento do combustível nuclear.....	18
Rejeitos.....	18
Avaliação das evidências epidemiológicas do risco de câncer..	20
Sistema de proteção radiológica para trabalhadores.....	27
CONCLUSÃO.....	30
REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	31

## 1. INTRODUÇÃO

A radiação ionizante é um fator de risco bem estabelecido para o desenvolvimento de câncer em seres humanos, sendo as estimativas de risco baseadas principalmente nos estudos com grupos expostos a altas doses e/ou altas taxas de doses como os sobreviventes da bomba atômica de Hiroshima e Nagasaki e grupos expostos a radiação médica (ICRP, 2007; UNSCEAR, 2008; NRC, 2000).

Por outro lado, as estimativas de risco para baixas doses e baixas taxas de dose ainda são feitas através da extrapolação dos resultados obtidos para altas doses e/ou altas taxas de dose (UNSCEAR, 2008). Estas estimativas de risco se constituem na base das recomendações de proteção radiológica, muito embora ainda existam várias incertezas associadas a esta extrapolação.

Estudos com trabalhadores expostos à radiação durante o curso de suas atividades constituem uma boa oportunidade para estudar diretamente os efeitos na saúde em decorrência da exposição prolongada a baixas doses de radiação ionizante. Vários estudos envolvendo coortes com trabalhadores da indústria nuclear já foram realizados (UNSCEAR, 2008, NRC, 2007). No entanto, o tamanho da amostra nestes estudos tem limitado os resultados e a precisão das estimativas dos riscos. Recentemente, dois estudos epidemiológicos envolvendo um grande número de trabalhadores ocupacionalmente expostos a radiação ionizante (CARDIS et al, 2005 e MUIRHEAD et al, 2009) apresentaram estimativas mais precisas a cerca do risco de mortalidade e desenvolvimento de câncer após exposição ocupacional a radiação, indicando fortes evidências de um risco aumentado advindo desta exposição. O pequeno excesso de risco de câncer observado foi estatisticamente compatível com a estimativa de risco derivada da extrapolação dos coeficientes de risco obtidos para altas taxas de dose que são utilizados atualmente para fins de proteção radiológica.

Os trabalhadores da área nuclear constituem um excelente grupo para este tipo de estudo, uma vez que possuem histórico dos registros

de dose ao longo da sua trajetória ocupacional, além de informações quanto ao local e duração de trabalho. Estas informações podem ser utilizadas para estimar a dose acumulada ao longo do tempo de trabalho. Outra importante vantagem dos estudos com trabalhadores é o fato de geralmente serem um grupo mais fácil de ser rastreado quanto ao status vital, uma vez que se encontram cadastrados em vários bancos nacionais vinculados ao trabalho (contribuição previdenciária, cadastro da empresas, etc...).

Com o objetivo de contribuir para o conhecimento dos riscos advindos da exposição a baixas doses e baixas taxas de dose, o Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) está iniciando um projeto de pesquisa para avaliar o risco de mortalidade por câncer em trabalhadores da área nuclear no Brasil. O IRD possui desde 1987 um banco de dados com o registro de doses (GDOSE) de todos os trabalhadores ocupacionalmente expostos a radiação ionizante no Brasil. A partir das informações demográficas e ocupacionais contidas no GDOSE, será constituída uma coorte nacional de trabalhadores da área nuclear. A determinação do padrão de mortalidade por todas as causas e por causas específicas de câncer será realizada através de um seguimento retrospectivo utilizando as mesmas estratégias propostas por Veiga et al (2005) em uma coorte brasileira de trabalhadores de uma mineração subterrânea de carvão expostos ao radônio.

Desta forma, este trabalho final do Curso *Lato-Sensu* em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas tem como objetivo fazer um levantamento bibliográfico das evidências epidemiológicas relativo ao risco de câncer em trabalhadores da área nuclear, após exposição à radiação ionizante, servindo como fundamentação teórica ao referido projeto.

## 2. METODOLOGIA

Inicialmente foram consultados os documentos da United Nations Scientific Committee on the Effects of Radiation – UNSCEAR (UNSCEAR, 2008), Committee on Biological Effects of Ionizing Radiation- BEIR (NRC, 2000) e o da International Commission on Radiological Protection –ICRP (ICRP,2007), sobre os riscos da exposição ocupacional de trabalhadores da área nuclear e os trabalhos mencionados nestes documentos. Em seguida, foi realizado um levantamento bibliográfico na base de publicações científicas da PUBMED, utilizando as palavras chaves “*nuclear workers/nuclear industry and cancer risk/cancer mortality/ cancer incidence*” e *as referências dos artigos citados*. Para a seleção dos artigos adotou-se os seguintes critérios de inclusão para este projeto de revisão: a) estudos com estimativas individuais de dose e b) estudos envolvendo somente trabalhadores do ciclo do combustível nuclear. A princípio foram encontrados 116 (cento e dezesseis artigos), que após a leitura dos resumos e aplicação dos critérios acima reduziu-se a apenas 31 (trinta e um) artigos.

Para a organização das informações selecionadas, foi utilizada a leitura flutuante dos resumos dos trabalhos, identificando-se o objeto, os objetivos do estudo e os resultados do mesmo, os dados foram registrados sob a forma de fichas de leitura.

Uma leitura detalhada foi realizada nos artigos de maior interesse, de forma que pudéssemos fazer uma avaliação crítica dos resultados reportados e de alguns conceitos. Para que pudéssemos ter um melhor entendimento dos conceitos e problemas que envolvem a proteção radiológica dos trabalhadores ocupacionalmente expostos, o trabalho foi dividido nas seguintes etapas: 1) Definição do conceito de indústria nuclear; 2) avaliação das faixas de doses recebidas por trabalhadores de cada uma destas indústrias; 3) Avaliação das evidências de risco de câncer nos estudos envolvendo trabalhadores destas indústrias e 3) Impacto destas evidências no sistema de proteção radiológica para trabalhadores.



Os trabalhos de revisão de literatura, nestes tempos de grande volume de informações, possibilitam uma visão ampla do estado-da-arte sobre um tema específico, demonstrando idéias, sub-temas e métodos que têm recebidos maior ou menor ênfase nas pesquisas publicadas. Desta forma evidencia novos campos que necessitam de pesquisas (NORONHA & FERREIRA, 2000).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 – Definição de indústria nuclear

A UNSCEAR (2008) ao definir o que é exposição ocupacional, considerou as definições estabelecidas pela Organização Internacional do Trabalho (OIT) e o estabelecido pela *International Basic Safety Standards* (BSS), como “todas as exposições dos trabalhadores incorridos durante o seu trabalho, com exceção das exposições excluídas das normas e as exposições das práticas ou fontes isentas pelas normas”.

As exposições ocupacionais à radiação ionizante foram classificadas em seis grandes grupos: práticas envolvendo elevados níveis de exposição a fontes naturais de radiação, ciclo do combustível nuclear, uso médico da radiação, uso industrial, atividades militares e uso diverso (UNSCEAR, 2008). Delimitamos este estudo ao grupo de trabalhadores envolvidos no ciclo do combustível nuclear, que envolve um complexo conjunto de atividades, incluindo a mineração e o beneficiamento do urânio, o enriquecimento do urânio, a fabricação do elemento combustível, a operação de reatores, o reprocessamento do combustível, o manejo e disposição dos resíduos, e a área de pesquisa do ciclo do combustível nuclear (UNSCEAR, 2008).

A exposição a radiação ionizante tem sido associada com um aumento do risco de câncer em inúmeras populações, não só a de trabalhadores da área nuclear. Entretanto, estes apresentam uma particularidade, a exposição contínua, por um longo período de vida no trabalho, podendo chegar a algumas décadas, e também por esta exposição ser a baixas doses e baixas taxas de doses, o que a princípio não é um

problema, somente quando contabilizado ao final de sua vida laboral. A AIEA considera baixas doses exposição menores a 100 mSv (PRESTON, 1998).

Em comparação com as outras áreas, o ciclo do combustível nuclear é bem documentado e uma quantidade considerável de dados das distribuições das doses ocupacionais é disponível (UNSCEAR, 2008). Entretanto, de acordo com os trabalhos analisados a maioria dos estudos epidemiológicos engloba os trabalhadores da área nuclear como um todo. Sendo raros os estudos específicos para cada fase do ciclo do combustível. Os poucos trabalhos publicados que mencionam trabalhadores de etapas específicas do ciclo combustível, em sua grande maioria, refere-se aos mineradores expostos ao radônio e seus produtos de decaimento.

### 3.1.1 – Mineração e beneficiamento do minério de urânio

Na mineração e no beneficiamento do minério de urânio, os trabalhadores estão suscetíveis à exposição interna e externa. Na mineração, em particular pela poeira compostas por partículas de diferentes tamanhos, que se tornam dispersas no ambiente da mina, dando origem a possibilidade da inalação. Conseqüentemente, há um risco potencial da incorporação das partículas deste aerosol contaminado com  $^{238}\text{U}$  e dos produtos de seu decaimento. A dose interna varia consideravelmente com as condições do local, da concentração do minério e do tamanho das partículas no ar. Nas minas subterrâneas, a principal fonte de exposição interna é provavelmente o  $^{222}\text{Rn}$  e os produtos do decaimento, devido às limitações na ventilação. Em minas a céu-aberto, a inalação de poeira de minério radioativo é a maior fonte de exposição interna, embora as doses tendam a ser menor (UNSCEAR, 2008).

A média da dose efetiva anual, medida nos trabalhadores da mineração expostos aos produtos do decaimento do radônio e a poeira do minério do urânio, tem diminuído significativamente com o passar dos anos, tendência observada mundialmente devido, principalmente, pela operação mais eficiente de tais mineradoras. Dados da UNSCEAR mostram que as doses efetivas dos trabalhadores em minas subterrâneas são pelo menos duas vezes

mais elevadas do que em minas a céu-aberto (1,0-3,1 mSv, minas subterrâneas; 0,3-1,3 mSv, mina a céu aberto) (UNSCEAR, 2008).

### 3.1.2 – Conversão e enriquecimento do urânio

É o processo no qual o  $\text{UO}_2$  é produzido para a fabricação do elemento combustível do reator. Alguns reatores utilizam combustível levemente enriquecido a 3% de  $^{235}\text{U}$ , em contraste ao natural encontrado a 0,7% de  $^{235}\text{U}$ . O  $\text{U}_3\text{O}_8$  do processo de beneficiamento é convertido em  $\text{UO}_2$  pela reação de redução com  $\text{H}_2$ . O  $\text{UO}_2$  é convertido a  $\text{UF}_4$  pela adição de ácido fluorídrico – HF, e depois para hexafluoreto de urânio –  $\text{UF}_6$  usando flúor –  $\text{F}_2$ , em seguida ele é enriquecido em  $^{235}\text{U}$ , através da difusão gasosa ou pela técnica de centrifugação. Uma vez completado o processo de enriquecimento, o gás de  $\text{UF}_6$  é reconvertido em  $\text{UO}_2$  para a fabricação do elemento combustível.

A média da dose efetiva anual dos trabalhadores da etapa do enriquecimento é baixo, em torno de 0,1 mSv e não apresentou alterações nos últimos anos (UNSCEAR, 2008).

### 3.1.3 – Operação de reatores

Os tipos de reatores utilizados para a geração de energia são caracterizados pelo seu sistema refrigerante e pelo moderador utilizado. A exposição ocupacional pode variar significativamente de reator para reator e são influenciados pelo seu tamanho, idade e tipo. O *design* e a programação de reabastecimento podem contribuir, também, para a exposição do trabalhador a radiação ionizante. Entretanto, independente das características que diferenciam os reatores, a irradiação externa por raios gama é o contribuinte mais significativo para a exposição ocupacional, que ocorre, principalmente, durante a manutenção e/ou interrupção do reabastecimento. Tais exposições são devidas a produtos de ativação, como o  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$  e  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ , no entanto, quando ocorre falhas no combustível, produtos de fissão, como  $^{95}\text{Zr}$  e o  $^{137}\text{Cs}$ , podem contribuir, também, para a exposição externa (UNSCEAR, 2008).

De modo geral, a exposição ocupacional de trabalhadores em reatores nucleares tem diminuído continuamente nas últimas décadas, a dose efetiva anual caiu de 4,1 para 1,0 mSv. Fato explicado pelas melhorias dos *designs* das usinas, melhorias na química da água e dos procedimentos de treinamento e de operação e pela participação da equipe no controle de suas próprias doses.

No Brasil existem dois reatores nucleares para a produção de energia do tipo PWR – reatores com água pressurizada. Este tipo de reator é encontrado na maioria das instalações nucleares existentes no mundo, ou seja, cerca de 67% do total de reatores (UNSCEAR, 2008).

#### 3.1.4 – Reprocessamento do combustível nuclear

A principal razão em optar pelo reprocessamento é para recuperar o urânio e o plutônio não utilizado pelos combustíveis irradiados. A segunda razão é para reduzir o volume de material a ser disposto como resíduo de alto nível. Além disso, o reprocessamento recupera urânio e plutônio evitando o desperdício de um recurso valioso, podendo ser economizado até 30% do urânio natural que seria necessário para a produção do combustível (UNSCEAR, 2008).

Observa-se uma grande diminuição da dose efetiva recebida pelo trabalhador nesta etapa, de 7,1 na década de setenta para 0,9 mSv atualmente. Influenciado diretamente pelos avanços tecnológicos na área (UNSCEAR, 2008).

#### 3.1.5 – Rejeitos

Os rejeitos radioativos estão presentes em todas as fases do ciclo do combustível nuclear. São classificados como resíduos de baixo, intermediário e alto-nível, correspondendo a 90%, 07% e 03%, respectivamente, do resíduo radioativo produzidos no mundo (UNSCEAR, 2008).

A média anual da dose efetiva para os trabalhadores envolvidos na gestão segura do combustível irradiado está na faixa de 0,2 a 11

mSv. O nível de exposição é menor para os trabalhadores envolvidos na gestão de resíduos, onde a média anual da dose efetiva está na faixa de 0,2 a 3 mSv (UNSCEAR, 2008).

A Tabela 1 apresenta os valores médios das doses em cada etapa do ciclo combustível ao longo do tempo (UNSCEAR 2008). Na grande parte pode se observar uma grande diminuição destes valores, com o passar dos anos, causados principalmente pelos avanços tecnológicos na área de proteção radiológica.

**Tabela 1.** Média anual da dose efetiva por etapas do ciclo combustível.

Média anual da Dose Efetiva (mSv)							
Período	Mineração	Beneficiamento	Enriquecimento	Fabricação do combustível	Operação de reatores	Reprocessamento	Disposição dos rejeitos
1975-1979	5,5	10,1	0,46	1,8	4,1	7,1	3,53
1980-1984	5,1	5,1	0,18	1,0	3,6	4,9	3,10
1985-1989	4,4	6,3	0,08	0,8	2,5	2,5	0,30
1990-1994	4,5	3,3	0,10	1,0	1,4	1,5	0,20
1995-1999	3,9	1,6	0,08	1,4	1,5	1,1	0,15
2000-2002	1,9	1,1	0,09	1,6	1,0	0,9	0,18

Fonte adaptada de: UNSCEAR (2008), tabelas 58, 62, 64, 65, 66, 69 e 71.

As etapas de mineração e beneficiamento apresentam as maiores doses ao longo do tempo. Vale ressaltar que é na fase da mineração que os trabalhadores do ciclo do combustível nuclear estão mais expostos ao risco de contaminação interna, de difícil e demorada mensuração (UNSCEAR, 2008).

### 3.2 – Avaliação das evidências epidemiológicas do risco de câncer

A Tabela 2 e 3 apresentam um resumo dos principais resultados obtidos nos 31 estudos selecionados. Os resultados de excesso de

risco relativo por Sievert (ERR/Sv) para mortalidade por câncer são apresentados na Tabela 3. Para estudos onde não foi possível estimar o ERR/Sv, um resumo dos principais resultados é apresentado na Tabela 4.

**Tabela 2.** Estudos de mortalidade de trabalhadores a indústria nuclear com estimativa de Excesso de Risco por Sv para mortalidade por todos os cânceres excluindo leucemia

População de estudo	Referências	Nº de mortes por todos os cânceres	ERR/Sv (90% CI)	Comentários
<b>Estados Unidos</b>				
Hanford	Gilbert et al. (1993b)	1413	-0,0 (<0,1,9)	
ORNL	Richardson and Wing (1999a)	879		Leucemia incluída Restrição de dose recebida após a idade de 45 anos
OAK Ridge Y-10, X-12	Frome et al. (1997)	1134	<b>1,45 (0,15, 3,48)<sup>a</sup></b>	Leucemia incluída
<b>Reino Unido</b>				
AEA	Fraser et al (1993)	720	0,8(-1,0, 3,1) <sup>a</sup>	
Capenhurst	McGeoghegan and Brinks (2000)	174	-1,3 (<0, 2,4)	Homens somente
Sellafield	Douglas et al. (1994)	567	0,11 (-0,4, 0,8)	
Springfields	McGeoghegan and Brinks (2000)	939	0,64 (-0,95, 2,7)	Homens somente
<b>Canadá</b>				
AECL	Gribbin et al. (1993)	221	0,049 (-0,68, 2,17)	
Registro nacional de dose	Sont et al. (2001)		<b>2,5 (1,2-4,0)</b>	
<b>Coortes Combinadas</b>				
NDR Canadense	Ashmore et al. (1998)	1632	3,0 (1,1, 4,8)	
Trabalhadores Nucleares Canadenses	Zablotska et al. (2004)	531	2,80 (-0,038, 7,13) <sup>a</sup>	
Combinado UK nuclear industry workforce	Carpenter et al. (1994, 1998)	1824	-0,02 (-0,5, 0,6) <sup>a</sup>	
Registro Nacional de doses – Reino Unido NRRW	Muirhead et al. (1999) Muirhead et al. (2007)	3020	0,086 (-0,28, 0,52) <sup>a</sup> <b>0.275 (0.02, 0.56)</b>	Leucemia excluída
Hanford ORNL, Rock flats	Gilbert et al. (1993a)	1789	0,0 (<0,8) <sup>a</sup>	
Trabalhadores de Instalações Nucleares US	Howe et al. (2004)	368 <sup>c</sup>	0,506 (-2,01, 4,64) <sup>a</sup>	
Análise combinada 11 estudos de coorte – mineiros expostos ao radônio	Lubin et al. (1994)	2700	ERR/WLM <sup>b</sup> <b>0.49 (0.2-10.0)</b>	Mortes por câncer de pulmão
Análise combinada Internacional – 15 estudos	Cardis et al. (1995) Cardis et al. (2007)	3830	<b>0.97 (0.27, 1.80)</b>	Leucemia excluída
<b>França</b>				

CEA-AREVA NC	Samson et al. (2011)	224	<b>1,12 (0,94, 1,31)</b>	Leucemia incluída
--------------	----------------------	-----	--------------------------	-------------------

Nota- ERR/Sv em negrito são estatisticamente significantes.

<sup>a</sup> 95% de intervalo de confiança.

<sup>b</sup> Excesso de risco relativo por Working Level Month.

**Tabela 3.** Estudos de mortalidade e incidência de câncer dos trabalhadores da indústria nuclear que não apresentaram resultados de ERR/Sv.

País	Instalação	Nº de pessoas	Mortalidade		Mortalidade Leucemia	
			Todos os Cânceres	Resultados (90% CI)	Nº de mortes	Resultados (90% CI)
Alemanha	German Nuclear Power (Hammer et al 2008)	4844	24	SMR=0.66 ( 95% CI: 0.43 - 0.95)	1	Nenhuma associação
Estados Unidos	Mound (Wiggs et al. 1991, 1991)	3229	66	Nenhuma associação	4	Tendência Significativa (P < 0,01)
	Los Alamos (Wiggs et al. 1994)	15727	732	Nenhuma associação	44	Nenhuma associação
	Portsmouth Naval shipyard (Rinsk et al. 1981)	7615	201	Nenhuma associação	7	Nenhuma associação
	Rocketdyne (Ritz et al. 1999)	4563	258	Associação positiva (P = 0,036)	28 <sup>a</sup>	Associação positiva (P = 0,03)
Reino Unido	BNFL (McGeoghegan et al. 1999)	2467	— <sup>b</sup>	Associação Significativa quando a dose cumulativa inclui um “lag” de 15 anos (P < 0,01)	— <sup>b</sup>	Nenhuma associação
	AWE (Atkinson et al. 2004)	26395	1560	Nenhuma associação	38	Nenhuma associação
Eslováquia	Jaslovske Bohunice power plant (Gulis 2003)	2776	14	Nenhuma associação	0	
França	Electricité de France (Rogel et al. 2005)	23395	116	Nenhuma associação	5	Nenhuma associação

<sup>a</sup> câncer hematopoiético e linfocítico.

<sup>b</sup> não especificado.

Dos 31 estudos selecionados, somente 6 apresentaram evidência de excesso de risco significativo para mortalidade por câncer. Destes 6 estudos, 1 envolve basicamente exposição ao radônio entre mineiros de minas subterrâneas (LUBIN et al, 1994).

Para uma avaliação completa das evidências do câncer em trabalhadores da indústria nuclear, é necessário que se leve em consideração todos os riscos potenciais associados em cada etapa do ciclo combustível.



Desta forma, faremos inicialmente uma avaliação do risco entre trabalhadores da área de mineração e trabalhadores da área nuclear em geral, excluindo mineração.

**Mineração de urânio** - A exposição ao radônio é uma preocupação na mineração, pois contribui com 60% da dose efetiva total, independente do tipo de mina. Já no caso do urânio, a exposição passa a ser preocupante quando presente em concentração superior a 3% de  $U_3O_8$  (UNSCEAR, 2008).

As evidências sobre radônio e câncer de pulmão estão atualmente disponíveis vários estudos epidemiológicos envolvendo trabalhadores de minas subterrâneas. Lubin et al (1994) realizaram uma análise combinada de onze estudos de coorte em mineiros, incluindo cerca de 68.000 trabalhadores e mais de 2.700 casos de mortes por câncer de pulmão. Este estudo provê informações quantitativas na relação exposição-resposta entre radônio e risco de câncer de pulmão e representa atualmente o estudo mais completo no assunto. O resultado desta análise conjunta confirma que o Excesso de Risco Relativo (ERR) para câncer de pulmão apresenta uma relação linear com a exposição acumulada aos produtos de decaimento radônio, estimada em *Working Level Months* (WLM). O ERR/WLM combinado para todos os estudos foi de 0,49 (IC: 95%: 0,2 - 10,0). No entanto, esta relação ERR/WLM é fortemente modificada por vários fatores: decrescendo com a idade alcançada, com o tempo decorrido desde que a exposição ocorreu e com o tempo decorrido depois de cessada a exposição.

**Trabalhadores da indústria nuclear em geral** - Em um estudo realizado com trabalhadores da indústria nuclear alemã, 4844 trabalhadores foram acompanhados por um tempo médio de 6,4 anos. As doses anuais variaram de 0 a 55 mSv, seguindo uma distribuição assimétrica, com uma média aritmética de 0,85 mSv. A dose acumulativa média foi de 31,1 mSv, 27,8 mSv entre todos os empregados atuais e 46,0 mSv, entre os mais antigos (HAMMER et al, 2008). Durante o período de observação, ocorreram 68 mortes, destas 24 foram por câncer, o mais comum foi o câncer de pulmão (6 casos), seguido pelo de pâncreas (4 casos), cólon (3 casos) e o melanoma maligno de pele (2 casos). Apenas um caso de leucemia foi observado. A

Razão de mortalidade padronizada foi computada para todas as causas de mortes e por todos os tipos de câncer. Um forte efeito “trabalhador sadio” foi observado (SMR=0.54, IC: 95%: 0.42 - 0.67) e não foi observado nenhum aumento na mortalidade por câncer (SMR=0.66, IC: 95%: 0.43 - 0.95).

Sanson et al (2011) realizaram uma pesquisa com dois grupos ocupacionais diferentes da indústria nuclear francesa: trabalhadores expostos somente a exposição externa (n=14.796) e trabalhadores expostos também a irradiação interna ou a nêutrons (n=14.498). Entre 1968 e 1994, o número de óbitos nos dois grupos foi de 645 e 1197, respectivamente. O efeito “Trabalhador sadio” foi observado em ambos os grupos. Entre os trabalhadores expostos unicamente às radiações de fótons externos, uma significativa relação dose-efeito foi observada para leucemia (exceto Leucemia Linfocítica Crônica - LLC). Para o outro grupo de trabalhadores expostos também a radiação interna e/ou nêutrons, foi observado uma relação dose-efeito para todos os cânceres e outras doenças relacionadas ao fumo ou álcool (SANSON et al, 2011).

Os resultados do risco de câncer após a exposição a baixas doses e baixas taxas de doses podem sofrer interferências quando associados com outros fatores cancerígenos, como o tabaco e o álcool, como demonstrado por Sanson et al (2011) ao estudar as mortes por câncer dos trabalhadores da indústria nuclear francesa. A Tabela 4 apresenta os resultados de risco relativo destes trabalhadores para cânceres relacionados e não relacionados ao fumo.

**Tabela 4.** Risco Relativo (RR) estimado a exposição de 100 mSv.

Causa de morte	Tipo de exposição			
	Somente radiação externa		Qualquer tipo de radiação (interna e/ou externa)	
	RR	(90%IC)	RR	(90%IC)
Câncer relacionado ao fumo	0,06	0,00-1,35	1,35	1,09-1,62 <sup>#</sup>
Boca e faringe	1,42	0,00-6,64	1,77	1,17-2,42 <sup>#</sup>
Pâncreas	0,07	0,00-6,74	1,22	0,45-2,16
Pulmão	0,01	0,00-2,16	1,77	1,17-2,42 <sup>#</sup>
Câncer não relacionado ao fumo	1,87	0,51-3,99	0,85	0,62-1,12
Fígado e vesícula biliar	1,34	0,00-13,04	0,66	0,11-1,84
Próstata	0,35	0,00-13,79	0,94	0,42-1,63
Linfomas e leucemias	4,36	1,27-10,18 <sup>#</sup>	0,68	0,20-1,47
Leucemias exceto LLC	6,23	2,30-15,49 <sup>#</sup>	0,26	0,00-1,84

Fonte: Sanson et al (2011), p. 633 (modificada).

# Estatisticamente significativa

Trabalhadores expostos a qualquer tipo de radiação (interna e externa) apresentaram um risco estatisticamente significativo para os cânceres relacionados ao fumo (RR=1,35;90%CI:1,09-1,62), com um risco estatisticamente significativo para o câncer de pulmão e de boca e faringe. Trabalhadores expostos somente a exposição externa apresentaram um risco estatisticamente significativo para linfoma e leucemias (RR=1,27;90%CI:1,27-10,18), e para todas as leucemias (exceto LLC) em separado (RR=6,23;90%CI:2,30-15,49).

Os dois maiores estudos envolvendo trabalhadores ocupacionalmente expostos a radiação que apresentam resultados consistentes e com poder estatístico, são: 1) Estudo multicêntrico coordenado pela *International Agency for Research on Cancer* – IARC através de uma análise combinada de 15 estudos envolvendo trabalhadores da área nuclear (CARDIS ET AL, 2005) e; 2) Estudo de coorte de trabalhadores do Banco Nacional de registro de doses do Reino Unido (MUIRHEAD et al, 2009). As tabelas 8 e 9 apresentam os principais resultados destes dois estudos.

No estudo multicêntrico coordenado pela IARC, foram incluídos 407.391 trabalhadores de 154 instalações da indústria nuclear de 15 países. Os resultados deste estudo forneceram estimativas diretas do risco de câncer em trabalhadores ocupacionalmente expostos a radiação ionizante. Foram incluídas várias indústrias, sendo a maioria composta pelas indústrias de produção de energia nuclear seguida por indústrias de pesquisa, gerência de resíduos, produção de combustível, isótopos e de armas. A mineração não foi incluída, provavelmente pelo maior risco de contaminação por via interna, de difícil e demorada mensuração. Este estudo considerou somente os riscos de câncer provenientes da exposição externas a radiação ionizante (CARDIS et al, 2007).

Durante a realização do estudo, 24.158 (5,9%) trabalhadores morreram. Destes 6.519 devido a outros cânceres que não a leucemia e 196 devido a leucemia (excluída a LLC - por ser considerada fracamente associada à exposição à radiação).

Noventa por cento desses trabalhadores receberam dose cumulativa inferior a 50 mSv e menos de 0,1% recebeu dose cumulativa superior a 500 mSv. A maioria destas doses foi recebida nos primeiros anos da indústria nuclear, quando os padrões de proteção eram menos rigorosos do que atualmente. Os homens representaram 90% dos trabalhadores e 98% da dose coletiva recebida, de modo que o estudo pode fornecer poucas informações do risco para as mulheres. Portanto, as estimativas de risco apresentadas por este estudo refletem, sobretudo, os riscos em homens.

Para todos os cânceres sólidos, o excesso de risco relativo foi de 0,97 por Sv e foi significativamente diferente de zero (95%IC: 0,14-1,97). Esta estimativa corresponde ao risco relativo de 1,10 para uma dose de 100 mSv. O excesso de risco relativo para leucemia, excluída a LLC foi de 1,93 por Sv (IC: 95%; <0 – 8,47), representando um risco relativo de 1,19 para uma dose de 100 mSv (CARDIS et al, 2007). Porém não estatisticamente significativo.

Os autores demonstraram diretamente em uma população de trabalhadores da indústria nuclear um excesso de risco de câncer, embora

pequeno, em decorrência da exposição ocupacional a baixas doses e baixas taxas de dose de radiação.

A mortalidade e incidência de câncer foram também estudadas no registro de doses de trabalhadores do Reino Unido que inclui registro para 174.541 trabalhadores (MUIRHEAD et al, 2009). A dose média durante toda a vida foi de 24,9 mSv, variando consideravelmente entre os empregadores. Seis por cento dos trabalhadores possuem uma dose média para toda a vida de 100 mSv ou mais, contribuindo 59% da dose coletiva. Além de um forte efeito trabalhador sadio, os resultados mostraram que a mortalidade e a incidência de leucemias (exceto LCC) e de todos os cânceres (exceto leucemia) aumentam com a dose de radiação recebida.

Estes dois estudos (CARDIS et al, 2005 e MUIRHEAD, 2009) fornecem as estimativas mais precisas do risco de morte e câncer após exposição ocupacional a radiação ionizante.

### 3.3 – Sistema de proteção radiológica para trabalhadores.

O sistema de proteção radiológica recomendado pela Comissão Internacional sobre Proteção Radiológica (ICRP), é baseado em um modelo dose-resposta para câncer radioinduzido que é linear em baixas doses e não tem limite, o modelo linear sem limiar de dose (LNT). A inclinação desta curva dose-resposta linear fornece o coeficiente de risco (risco de câncer por unidade de dose de radiação recebida).

O coeficiente de risco para baixas doses é obtido de grupos expostos de moderada a altas doses, principalmente os sobreviventes de Hiroshima e Nagasaki, com o coeficiente de risco para alta taxa de dose sendo reduzido pela metade (DDREF=2) para dar conta da reduzida eficiência carcinogênica das exposições a baixas doses e baixas taxas de dose que são as principais preocupações da proteção radiológica.

Os valores de excesso de risco de câncer fatal atualmente adotado pela ICRP para fins de proteção radiológica são de 5% por Sv para o público em geral e de 4% por Sv para os trabalhadores em situações de exposição a baixas doses e baixas taxas de doses.

Muito embora o excesso de risco de câncer observado nos dois maiores estudos epidemiológicos envolvendo trabalhadores ocupacionalmente expostos (CARDIS et al, 2005; MUIRHEAD et al, 2009) seja maior do que os valores de risco adotados para fins de proteção radiológica, estes são estatisticamente compatíveis. Se considerarmos todas as incertezas envolvidas nestes estudos, o fato dos coeficientes de risco estimado ser compatíveis é de extrema importância, pois demonstra que as estimativas realizadas através da extrapolação dos dados de altas taxas de dose para baixas taxas de dose não subestimaram ou superestimaram o risco, isto é, os riscos estimados são compatíveis com um DDREF de 2 e logo, compatíveis com os valores de coeficiente de risco assumidos para fins de proteção radiológica (WAKEFORD, 2009).

A recomendação feita para os trabalhadores ocupacionalmente expostos é feita de maneira que a dose acumulada em 5 anos não exceda 100 mSv, sendo 20 mSv por ano, numa média de 5 anos (ICRP, 2007).

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) possui uma norma direcionada para a Proteção Radiológica – Norma CNEN-NN-3.01 Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica, cujo objetivo é estabelecer os requisitos básicos de proteção radiológica em relação à exposição à radiação ionizante.

Esta norma se aplica a práticas, incluindo todas as fontes associadas. As práticas para que esta norma seja aplicada inclui:

- Manuseio, produção, posse, utilização, transporte, armazenamento e deposição de materiais radioativos, abrangendo todas as atividades que envolvam ou possam envolver a exposição à radiação;
- Práticas que envolvam fontes naturais, cujo controle seja considerado necessário pela CNEN.

Os requisitos desta Norma se aplicam às exposições ocupacionais, exposições médicas e exposições do público, em situações de exposições normais ou exposições potenciais.

A exposição normal dos indivíduos deve ser restringida de tal modo que nem a dose efetiva nem a dose equivalente nos órgãos ou tecidos de interesse, causadas pela possível combinação de exposições originadas por práticas autorizadas, excedam o limite de dose especificado na tabela a seguir, salvo em circunstâncias especiais, autorizadas pela CNEN.

Na tabela 5 estão discriminadas as doses limites aplicadas para a exposição ocupacional, segundo as recomendações da ICRP 103 (2007), que são as mesmas adotadas pela CNEN, através da NN 3.01 (2011).

**Tabela 5.** Limites de Doses Anuais

<b>Limite de Dose Anuais (a)</b>		
<b>Grandeza</b>	<b>Órgão</b>	<b>Indivíduo ocupacionalmente exposto</b>
<b>Dose efetiva</b>	Corpo inteiro	20 mSv (b)
	Cristalino	150 mSv
<b>Dose equivalente</b>	Pele (c)	500 mSv
	Mãos e pés	500 mSv

[a] Para controle administrativo da CNEN, o termo dose anual deve ser considerado no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano;

[b] Média 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano;

[c] Valor médio em 1 cm<sup>2</sup> de área, na região mais irradiada.

Fonte: CNEN-NN.3.01 (2005).

#### 4. CONCLUSÃO

Os resultados dos estudos com trabalhadores da área nuclear sugerem que existe um risco de câncer mesmo com as baixas doses e baixas

taxas de doses normalmente recebidas pelos trabalhadores ocupacionalmente expostos a radiação ionizante. Este excesso de risco é compatível com as estimativas de risco adotadas no sistema de proteção radiológica. Isto é, os limites de doses estabelecidos para o trabalhador ocupacionalmente exposto garantem que o risco destes trabalhadores não seja maior do que o risco aceitável para este limite de dose.



## REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ASHMORE, J. P.; KREWSKI, D.; ZIELINSKI, J. M.; et al. **First analysis of mortality and occupational radiation exposure based on the National Dose Registry of Canada.** Am. J. Epidemiol. 148:564–574.1998.

ATKINSON, W. D.; LAW, D. V.; BROMLEY, K. J.; et al. **Mortality of employees of the United Kingdom Atomic Energy Authority, 1946-97.** Occup Environ Med, 61: 577-585. 2004.

BERAL, V.; FRASER, P.; CARPENTER, L.; et al. **Mortality of employees of the Atomic Weapons Establishment, 1951-1982.** Brit Med J, 297: 757-770. 1988.

CALDAS, M. A. E. **Estudos de revisão de literatura: fundamentação e estratégia metodológica.** São Paulo: Hucitec, 1986.

CARDIS, E.; GILBERT, E. S.; CARPENTER, L.; et al. **Effects of low doses and low doses rates of external ionizing radiation: cancer mortality among nuclear industry workers in three countries.** Radiat Res, 142: 117-132. 1995.

CARDIS, E.; VRIJHEID, M.; BLETNER, M.; et al. **Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries.** Br. Med Journal. 331: 77-82, 2005.

CARDIS E. et al. **The 15-country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: estimates of radiation related cancer risks.** Radiat Res.167:396–416, 2007.

CARPENTER, L.; HIGGINS, C.; DOUGLAS, A.; et al. **Combined analysis of mortality in three United Kingdom nuclear industry workforce, 1946-1988.** Radiat Res, 138: 224-238. 1994.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica – NN 3.01.** Rio de Janeiro, 2011.

DOUGLAS, A. J.; OMAR, R. Z.; SMITH, P. G. **Cancer mortality and morbidity among workers at the Sellafield plant of British Nuclear Fuels.** Brit J Cancer, 70: 1232-1243. 1994.

FINK, C. A. & BATES, M. N. **Melanoma and ionizing radiation: is there a causal relationship?** Radiat Res, (164) 5:701-710, 2005.

FRASER, P.; CARPENTER, L.; MACONOCHIE, N.; HIGGINS, C.; et al. **Cancer mortality and morbidity in employees of the United Kingdom Atomic Energy Authority, 1946-86.** Brit J Cancer, 67: 615-624. 1993.

GILBERT, E. S. **Studies of workers exposed to low doses of radiation.** Am. J. Epidemiol. 153:319–322. 2001.

GRIBBIN, M. A.; WEEKS, J. L.; HOWE, G. R. **Cancer mortality (1956-1985) among male employees of Atomic Energy of Canada Limited with respect to occupational exposure to external low-linear-energy-transfer ionizing radiation.** Radiat Res, 133: 375-380. 1993.

GULIS, G. **Cancer occurrence among radiation workers at Jaslovske Bohunice nuclear power plant.** Cent. Eur. J. Public Health 11:91–97. 2003.

HABIB, R. R.; ABDALLAH, S. M.; LAW, M.; KALDOR, J. **Cancer incidence among Australian Nuclear Industry Workers.** J Occup Health, 48:358-365, 2006.

HAMMER, G.; FEHRINGER, F.; SEITZ, G.; et al. **Exposure and mortality in a cohort of German nuclear power workers.** Radiat Environ Biophys, 47:95–99. 2008.

HOWE, G. R.; ZABLOTSKA, L. B.; FIX, J. J.; et al. **Analysis of the mortality experience amongst U.S. nuclear power industry workers following chronic low-dose exposure to ionizing radiation.** Radiat Res, 162: 517-526. 2004.

ICRP – International Commission on Radiological Protection – 107. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.** Ann ICRP, 37:2–3, 2007.

INSKIP, H.; BERAL, V.; FRASER, P.; et al. **Further assessment of the effects of occupational radiation exposure in the United Kingdom Atomic Energy Authority mortality study.** Br. J. Ind. Med. 44:149–160.1987.

LUBIN, J.H.; BOICE, J.D.; EDLING, C. **Radon and lung cancer risk: A joint analysis of 11 underground miners studies.** NIH Publication No. 94-3644.

McGEOGHEGAN, D. & BINKS, K. **The mortality and cancer morbidity experience of employees at the Chapelcross plant of British Nuclear Fuels Ltd, 1955-1995.** Pp 261-264 in Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Achievements and Challenges: Advancing Radiation Protection into the 21<sup>st</sup> Century, Southport, M.C. Thorne, ed. London: Society for Radiological Protection. 1999.

McGEOGHEGAN, D. & BINKS, K. **The mortality and cancer morbidity experience of workers at the Springfields uranium production facility, 1946-95.** J Radiol Prot, 20: 111-137. 2000<sup>a</sup>.

McGEOGHEGAN, D. & BINKS, K. **The mortality and cancer morbidity experience of workers at the Capenhurst uranium enrichment facility, 1946-95.** J Radiol Prot, 20: 381-401. 2000<sup>b</sup>.

MOREIRA, W. **Revisão de Literatura e Desenvolvimento Científico: conceitos e estratégias para confecção.** Janus, Lorena, ano 1, nº 1, 2<sup>o</sup> semestre de 2004.

MUIRHEAD, C. R.; O'HAGAN, J. A.; HAYLOCK, R. G. E.; et al. **Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: third analysis of the National Registry for Radiation Workers.** Brit J Cancer, 100:206-212, 2009.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. **Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation** BEIR VII, Phase 2 Board on Radiation Effects Research. The National Academies Press: Washington. 2006.

NORONHA, D. P.; FERREIRA, S. M. S. P. Revisões de literatura. In: CAMPELLO, B. S.; CONDÓN, B. V.; KREMER, J. M. (orgs.) **Fontes de**

**informação para pesquisadores e profissionais.** Belo Horizonte: UFMG, 2000.

PRESTON, D. L. Low dose radiation and human health: risk estimates. In: **Low doses of Ionizing Radiation: Biological Effects and Regulatory Control: invited papers and discussions.** Organizations by the International Atomic Energy Agency and World Health Organization. Viena: International Atomic Energy Agency, 1998. p. 217-229.

RINSKY, R. A.; ZUMWALDE, R. D.; WAXWEILER, R. J.; et al. **Cancer mortality at a naval nuclear shipyard.** *Lancet*, 1: 231-235. 1981.

RITZ, B.; MORGENSTERN, H.; FROINES, J.; et al. **Effects of exposure to external ionizing radiation on cancer mortality in nuclear workers monitored for radiation at Rocketdyne/Atomics International.** *Am J Ind Med*, 35: 21-31. 1999.

ROGEL, A.; CARRE, N.; AMOROS, E.; et al. **Mortality of workers exposed to ionizing radiation at the French National Electricity Company.** *Am. J. Ind. Med.* 47:72–82. 2005.

SANSON, E.; TELLE-LAMBERTON, M.; CAËR-LOHO, S.; et al. **Cancer mortality among two different populations of French nuclear workers.** *Int Arch Occup Environ Health*, 84:627–634. 2011.

SHIN, H.; RAMSAY, T.; KREWSKI, D.; ZIELINSKI, J. M. **The effect of censoring on cancer risk estimates based on the Canadian National Dose Registry of occupational radiation exposure.** *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.* 15:398–406. 2005.

SMITH, P. G.; DOUGLAS, A. J. **Mortality of workers at the Sellafield Plant of British Nuclear Fuels.** *Br. Med. J. (Clin. Res. Ed.)*, 293:845–854. 1986.

SONT, W. N.; ZIELINSKI, J. M.; ASHMORE, J. P.; et al. **First analysis of cancer incidence and occupational radiation exposure based on the National Dose Registry of Canada.** *Am. J. Epidemiol*, 153:309–318. 2001.

United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation – UNSCEAR. **Exposures of the Public and Workers from Various Sources of Radiation.** Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I, Annex B, New York, 2008.

UNITED NATIONS. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation – UNSCEAR. **Epidemiological studies of radiation and cancer.** Effects of ionizing Radiation. Volume II, Annex A, New York, 2006.

VEIGA, L.H.S.; MELO, V.P.; AMARAL, E.C.S.; KOIFMAN, S. **Feasibility study of for a long-term follow-up in a historical Cohort of Brazilian Coal Miners.** *Journal of Radiological Protection*, 27:349-360. 2007

VRIJHEAD, M.; CARDIS, E.; BLETTNER, M.; et al. **The 15-Country Collaborative Study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: Design, epidemiological methods and descriptive results.** *Radiat. Res.* 167:361–379. 2007.

WIGGS, L. D.; COX-DE VORE, C. A.; VOELZ, G. L. **Mortality among a cohort of workers monitored for <sup>210</sup>Po exposure: 1944-1972.** *Health Phys*, 61: 71-76. 1991<sup>a</sup>.

WIGGS, L. D.; COX-DE VORE, C. A.; WILKINSON, G. S.; et al. **Mortality among workers exposed to external ionizing radiation at a nuclear facility in Ohio.** J occup Med, 33: 632-637. 1991<sup>b</sup>.

WIGGS, L. D.; JOHNSON, E.; COX-DE VORE, C. A.; et al. **Mortality through 1990 among white male workers at the Los Alamos National Laboratory: considering exposures to plutonium and external ionizing radiation.** Health Phys, 67: 577-588. 1994.

WING, S.; SHY, C. M.; WOOD, J. L.; WOLF, S.; CRAGLE, D. L.; FROME, E. L. **Mortality among workers at Oak Ridge National Laboratories – evidence of radiation effects in follow-up through 1984.** J. Am. Med. Assoc., 265:1397–1402. 1991.

WING, S.; RICHARDSON, D.; WOLF, S.; MIHLAN, G. **Plutonium-related work and cause-specific mortality at the United States Department of Energy Hanford Site.** Am. J. Ind. Med., 45:153–164. 2004.

ZABLOTSKA, L. B.; ASHMORE, J. P.; HOWE, G. R. **Analysis of mortality among Canadian nuclear power industry workers after chronic low-dose exposure to ionizing radiation.** Radiat. Res., 161:633–641. 2004.