

RESUMO

O processo de revisão dos regulamentos internacionais de proteção radiológica tem resultado na adoção de novos conceitos, como os de prática, intervenção, dose evitável e restrição de dose (dose constraint), este último merecedor de destaque especial uma vez que pode implicar na redução, a priori, dos limites de dose estabelecidos tanto para o público como para os indivíduos ocupacionalmente expostos, valores esses que podem ser ainda mais reduzidos, em função da aplicação do princípio de otimização. O presente artigo tem por objetivo apresentar, com clareza, a partir dos critérios adotados para definir valores de restrição de dose para o público, uma metodologia para estabelecer valores de restrição de dose para indivíduos ocupacionalmente expostos, bem como um exemplo da aplicação dessa metodologia à prática de radiografia industrial.

1. INTRODUÇÃO

A Agência Internacional de Energia Atômica - AIEA publicou, em 1996, seu “Regulamento Básico de Proteção Radiológica e de Segurança de Fontes de Radiação”, conhecido como “Basic Safety Standards N° 115” [1] ou, simplesmente, BSS, no qual alguns conceitos novos de proteção radiológica foram introduzidos, destacando-se o de “dose constraint”, traduzido no Brasil por “restrição de dose”. Esse e demais conceitos novos foram incorporados durante o processo de revisão das Diretrizes de Proteção Radiológica da Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, efetivado em 2005 [2].

Assim, por definição, o termo restrição de dose (dose constraint) refere-se a um valor inferior ao limite de dose, estabelecido como uma restrição prospectiva nas doses individuais relacionadas a uma determinada fonte de radiação ionizante, utilizado como limite superior no processo de otimização relativo a essa fonte.

O presente artigo tem por objetivo apresentar um modelo para o estabelecimento de valores de restrição de dose para indivíduos ocupacionalmente expostos, bem como ilustrar a aplicação do modelo aqui proposto à prática de radiografia industrial.

2. BASES RADIOLÓGICAS: BREVE HISTÓRICO

Em 1991, foi publicado um novo documento da Comissão Internacional de Proteção Radiológica, conhecido como ICRP-60 [4], com novas recomendações de proteção radiológica e, de forma inovadora, contendo diversos anexos com explanações sobre o porquê dessas novas recomendações. Merecem destaque os seguintes aspectos:

1. Engenheiro Mecânico, Mestre em Eng. Nuclear, Doutor em Eng. Mecânica- CNEN

2. Engenheira Química, Mestre em Engenharia Química, Ph.D - CNEN

- a) o limite anual de dose efetiva para indivíduos ocupacionalmente expostos é reduzido de 50 mSv para 20 mSv, valor este refletindo a média ponderada em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.
- b) o limite anual de dose efetiva para público é de 1 mSv, sendo que, em circunstâncias especiais, poderá ser autorizado um valor de até 5 mSv em um ano, desde que a média em um período de 5 anos consecutivos não exceda a 1 mSv por ano.
- c) um novo conceito para dose equivalente é introduzido, estando relacionado à dose absorvida média no órgão ou tecido, modificada por fator de ponderação da radiação revisado.
- d) novos valores para os fatores de ponderação de órgão ou tecido são estabelecidos e o termo “dose equivalente efetiva” é substituído por “dose efetiva”.
- e) é estabelecida uma distinção entre prática (atividade humana que introduz fontes de exposição ou vias de exposição adicionais ou estende a exposição a mais pessoas, ou modifica o conjunto de vias de exposição devida a fontes existentes) e intervenção (toda ação adotada com o objetivo de reduzir ou evitar a exposição ou a probabilidade de exposição a fontes que não façam parte de uma prática controlada, ou que estejam fora de controle em consequência de um acidente, terrorismo ou sabotagem);
- f) é introduzido o conceito de “limite superior” (upper bound) que, para fins de exposição ocupacional, representa o valor de dose individual utilizado para limitar o intervalo de opções consideradas no processo de otimização e, para fins de exposição do público, representa o limite superior de dose anual que esse indivíduo pode receber devido à operação planejada de qualquer fonte controlada, recebendo esse conceito o nome de “restrição de dose” (dose constraint);

3. RESTRIÇÃO DE DOSE

O estabelecimento de valores de restrição de dose, tanto para indivíduos do público como para indivíduos ocupacionalmente expostos, tem como objetivo maior garantir que os respectivos limites anuais de dose (limites primários) especificados para esses indivíduos não sejam ultrapassados. Para tanto, devem ser levados em consideração os seguintes aspectos: (i) a possibilidade de exposição de um dado indivíduo a mais de uma “fonte” de radiação ionizante, no presente e no futuro, em função da operação de mais de uma instalação nuclear ou radiativa; (ii) as incertezas associadas à estimativas das doses de radiação a que esse indivíduo possa estar exposto e (iii) o resultado de qualquer processo genérico de otimização da proteção radiológica para a fonte de radiação, para a prática ou para a tarefa que está sendo considerada.

Em situações onde existe um benefício direto ou indireto para o indivíduo exposto a uma única fonte de radiação, e sendo esse indivíduo informado, treinado e monitorado ou avaliado, o valor máximo da restrição de dose pode coincidir com o valor do limite anual de dose estabelecido para indivíduos ocupacionalmente expostos, qual seja, 20 mSv, caso sejam desprezadas as incertezas na estimativa das exposições [3].

Um importante aspecto a ser levado em consideração para a perfeita compreensão do conceito de restrição de dose é a definição de “fonte” como sendo qualquer equipamento ou material que emite ou é capaz de emitir radiação ionizante ou de liberar substâncias ou materiais radioativos.

Exemplos dados pela AIEA para fontes englobam materiais que emitem radônio (fontes naturais) unidades de irradiação gama (fontes aplicadas à prática de conservação de alimentos, esterilização, etc.); centrais nucleares (fontes relacionadas à prática de geração de energia nucleoeleétrica).

Outro aspecto importante para compreensão do conceito de “restrição de dose” é a definição dada pela AIEA, uma vez que acrescenta à definição adotada nas novas Diretrizes de Proteção Radiológica da CNEN, apresentada na introdução a este artigo, o que se segue: Para exposições ocupacionais, a restrição de dose é um valor de dose individual associado a uma fonte, usado para limitar o intervalo de opções consideradas no processo de otimização. Para exposição do público, a restrição de dose é um limite superior para a dose anual que indivíduos do público deveriam receber em função de operação planejada de qualquer fonte controlada. Para exposições médicas, os níveis de restrição de dose devem ser interpretados como níveis para orientação – níveis de referência – exceto quando usados na otimização da proteção de pessoas expostas para fins de pesquisas médicas ou de pessoas, outras que não os indivíduos ocupacionalmente expostos, que assistem no cuidado, no apoio ou conforto de pacientes expostos. *(A prospective restriction on the individual dose delivered by a source, which serves as a bound on the optimization of protection and safety for the source. For occupational exposures, the dose constraint is a source related value of individual dose used to limit the range of options considered in the process of optimization. For public exposure, the dose constraint is an upper bound on the annual doses that members of the public should receive from the planned operation of any controlled source. For medical exposure the dose constraint levels should be interpreted as guidance levels, except when used in optimizing the protection of persons exposed for medical research purposes or of persons, other than workers, who assist in the care, support or comfort of exposed patients.)*

3.1 RESTRIÇÃO DE DOSE PARA INDIVÍDUOS DO PÚBLICO

A referência [5] é um dos documentos da AIEA que mostra claramente como deve ser estabelecido um valor de restrição de dose para público (devido à liberação de efluentes radioativos) e que descreve, em seu item A1, os principais aspectos que devem ser levados em consideração no estabelecimento desse valor, quais sejam:

- (a) a contribuição para dose devido a outras fontes, incluindo as isentas, bem como práticas, levando em conta a possibilidade futura de aparecimento de novas fontes e práticas a nível global e regional;
- (b) a previsão de alteração de qualquer fator futuro que possa influenciar a dose no público, por exemplo devido a mudanças no modo de operação da fonte, mudança nos caminhos críticos, nos hábitos e na distribuição da população, modificação do grupo crítico, etc;
- (c) qualquer incerteza associada, incluindo o conservadorismo utilizado para cálculo das doses, principalmente quando a fonte e o grupo crítico estão separados pela distância e pelo tempo;
- (d) o resultado obtido de qualquer cálculo de otimização e a experiência existente no manuseio e operação de fontes e práticas semelhantes por outros operadores.

Assim, como pode ser observado anteriormente, o estabelecimento de um valor de restrição de dose deve levar em consideração três fatores básicos:

- 1) a possibilidade de exposição de um dado indivíduo a mais de uma “fonte” de radiação ionizante, no presente e no futuro, em função da operação de mais de uma instalação nuclear ou radiativa, conforme item (a);

- 2) as incertezas associadas à estimativas das doses de radiação a que esse indivíduo possa estar exposto, conforme itens (b) e (c);
- 3) o resultado de qualquer processo genérico de otimização da proteção radiológica para a fonte, conforme item (d).

O documento da AIEA [5] ressalta, ainda, que um dos pontos mais importantes que deve ser levado em consideração no estabelecimento de valor de restrição de dose é a possibilidade de construção/operação de novas instalações no mesmo sítio (semelhantes ou diferentes) e que, na prática, muitos países adotam valores individuais de restrição de dose para público como um limite superior para os cálculos de otimização, conforme já citado anteriormente. Outro aspecto importante citado em [5] é que, mesmo no caso de restrição de dose para público, as Autoridades Regulatórias de alguns países estabelecem níveis de restrição diferentes para práticas diferentes (ver Tabela 1).

Tabela 1- Valores de Restrição de Dose Adotados por alguns Países para o Indivíduo do Público

País	Dose (mSv/a)	Fonte de Radiação
Argentina	0,3	Ciclo do Combustível
Bélgica	0,25	Reator Nuclear
Brasil	0,3	Reator Nuclear
Brasil	0,3	Depósito de Rejeitos Próximo à Superfície
China	0,25	Reator Nuclear
Estados Unidos	0,25	Ciclo do Combustível
Inglaterra	0,3	Ciclo do Combustível
Itália	0,1	Reator Nuclear
Luxemburgo	0,3	Ciclo do Combustível
Holanda	0,3	Ciclo do Combustível
Espanha	0,3	Ciclo do Combustível
Suécia	0,1	Reator Nuclear
Ucrânia	0,08	Ciclo do Combustível
Ucrânia	0,2	Reator Nuclear

Intervalos de valores de restrição de dose de 20 a 2 mSv/ano para indivíduos ocupacionalmente expostos, bem como de 1 a 0,1 mSv/ano para indivíduos do público são sugeridos pelo ICRP [3], correspondendo, no máximo, a 1/10 do limite primário adotado.

A AIEA, no entanto, não recomenda valor algum em especial, ou intervalo de valores, para o caso de exposição ocupacional (ver Tabela 2), restringindo-se apenas à recomendação de valores de restrição de dose para indivíduos do público.

Tabela 2- Recomendações da AIEA para Valores de Dose Efetiva

Dose Efetiva	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto	Público
Limite Primário	20 mSv/ano	1 mSv/ano
Restrição de Dose	(a)	0,3 mSv/ano (b)

(a) não existem valores acordados internacionalmente; devem ser estabelecidos de acordo com a circunstância particular, por exemplo, tipo de indústria ou operação.

(b) valor prospectivo para cada nova fonte de exposição.

O próprio ICRP, em sua nova publicação a ser editada, recomenda valores diferentes de restrição de dose, mesmo quando existe uma única fonte dominante de exposição, dependendo do tipo de situação que possa ser controlada (ver Tabela 3) e desprezando incertezas, otimização, etc.

Tabela 3- Novas Recomendações do ICRP para Restrição de Dose [3]

RESTRICÇÃO DE DOSE (mSv/a)	SITUAÇÃO APLICÁVEL
100	Valor máximo em situações de emergência para indivíduos ocupacionalmente expostos, além de situações que impliquem em ações para salvar vidas e para evacuação de indivíduos do público.
20	Valor máximo para situações onde houver um benefício direto ou indireto para o indivíduo ocupacionalmente exposto, que deverá receber treinamento, ser monitorado, etc. Aplica-se também nos casos de profilaxia com iodo em acidentes, controle à exposição radônio e indivíduos que confortam pacientes.
1	Para situações que tragam um benefício social, mas sem trazer benefícios individuais para a pessoa exposta (indivíduo do público), que não é treinada, monitorada, etc.
0,01	Menor valor de qualquer restrição de dose, baseado no princípio “De Minimis” (De Minimis non Curat Praector)

A Figura 1 ilustra, de forma resumida, o modelo proposto pela AIEA para o estabelecimento de valores de restrição de dose para público.

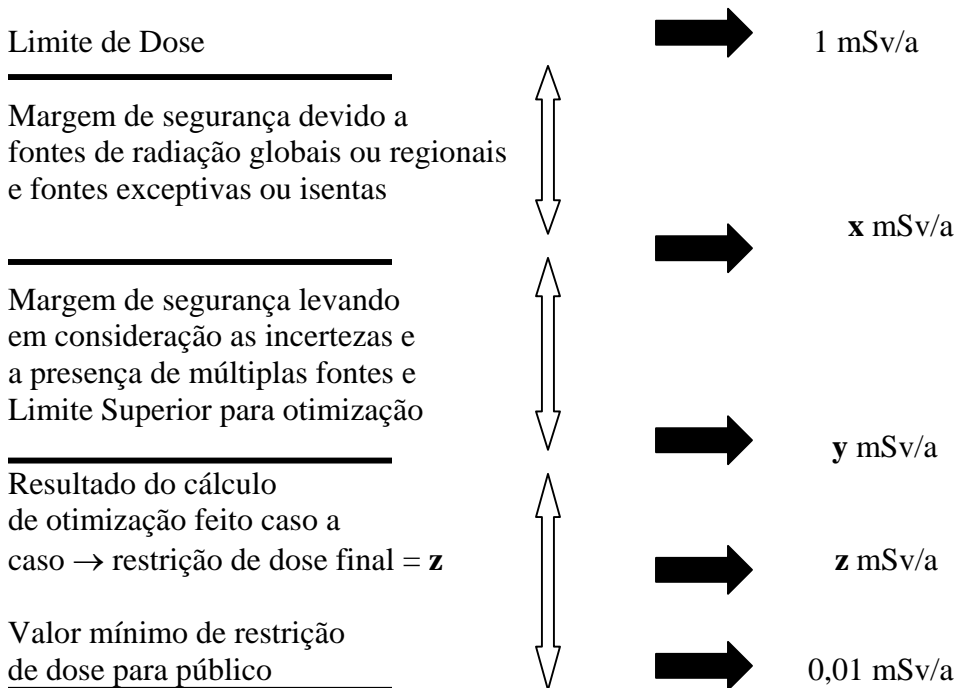


Figura 1- Modelo Proposto pela AIEA para Estabelecimento de Valor de Restrição de Dose para Indivíduos do Público

4. MODELO PROPOSTO PARA O ESTABELECIMENTO DE VALORES DE RESTRIÇÃO DE DOSE OCUPACIONAL

Com base nas informações anteriores, o seguinte modelo é proposto no presente artigo para o estabelecimento de valores de restrição de dose devido à exposição ocupacional. (ver Figura 2).

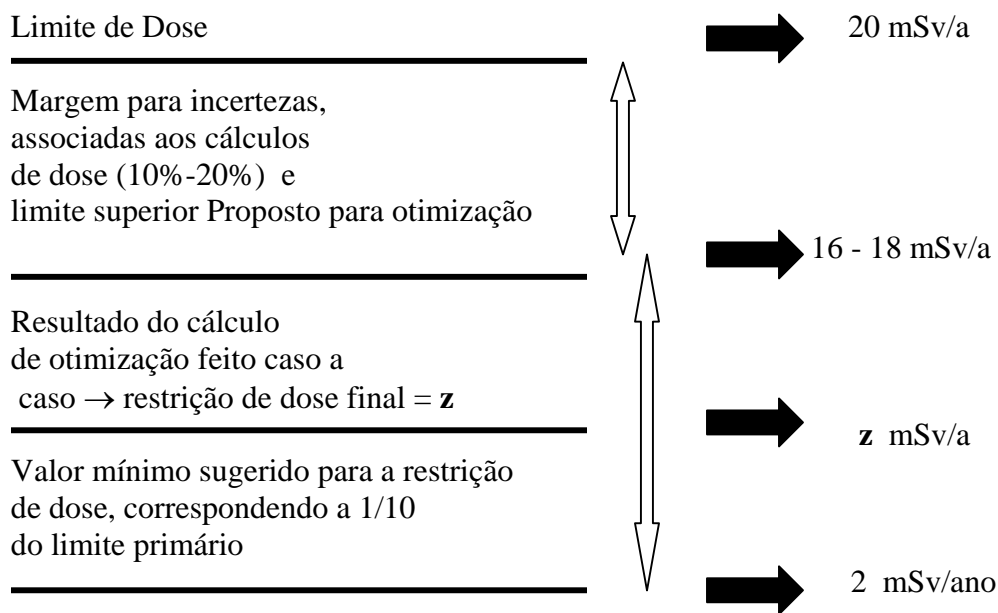


Figura 2- Modelo Proposto para o Estabelecimento de Valores de Restrição de Dose Ocupacional

Pode ser observado que, no presente modelo, não foi incluída a possibilidade de um indivíduo possuir dois empregos com fontes de radiação, em instalações distintas. Existindo essa possibilidade, (caso típico da área médica no Brasil), um novo nível de restrição de dose para o cálculo de otimização relacionado a esse indivíduo deve ser estabelecido, com valores variando entre 9 mSv/a e 8 mSv/a em cada emprego, o que pode facilmente ser alcançado em função da redução da carga horária (emprego em tempo parcial).

O modelo acima é coerente com as doses médias esperadas em várias áreas de utilização da energia nuclear (ver Tabela 4).

Deve ser ressaltado, entretanto, que, em algumas práticas (descomissionamento, por exemplo), as doses médias esperadas para alguns indivíduos podem ser bem superiores às listadas na Tabela 4. A título de exemplo, a Tabela 5 apresenta as doses recebidas pelo pessoal envolvido no descomissionamento da Usina de Santo Amaro (USAM) em São Paulo.

Tabela 4- Doses Médias Ocupacionais por Prática [6]

Prática	Dose (mSv/a)
Mineração de Urânio	4.5
Beneficiamento de Urânio	3.3
Enriquecimento	0.1
Fabricação de Combustível	1.0
Reator Nuclear	1.4
Reprocessamento	1.5
Radiologia	0.5
Odontologia	0.06
Medicina Nuclear	0.8
Radioterapia	0.6
Irradiação Industrial	0.1
Radiografia Industrial	1.6
Produção de Isótopos	1.9
Perfilagem de Poços	0.4
Aceleradores	0.8
Mineração de Carvão	0.7
Mineração de Metais	2.7

Tabela 5 – Doses Relacionadas ao Descomissionamento da Usina de Santo Amaro

Dose	Número de Indivíduos Ocupacionalmente Expostos
>10 mSv	0
> 5 mSv e ≤ 10 mSv	8
> 1 mSv e ≤ 5 mSv	46
> 0.1 mSv e ≤ 1 mSv	30
Não Detectada	50

4.1 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Um exemplo simplificado de cálculo de restrição de dose envolvendo cálculo da blindagem de uma instalação utilizada para a condução da prática de radiografia industrial é apresentado a seguir.

Considere um bunker para realização de radiografias com fontes de Co-60 de 20 Ci de atividade. Sabendo-se que a distância mínima da fonte à parede externa desse bunker é de 3 metros, que a blindagem será construída no sentido da fonte, a partir da distância de 3 metros, e que na área externa trabalharão 20 técnicos monitorados (indivíduos ocupacionalmente expostos), pergunta-se:

(a) qual a espessura de aço que deve ser colocada para reduzir a taxa de exposição do lado externo para 2,5 mR/h ?

(b) com o valor da espessura determinado acima e sabendo-se que o custo de cada centímetro de placa de aço, cuja área superficial é padronizada, é de 1.200 dólares, pergunta-se: o bunker precisa ser otimizado? Qual seria o valor de restrição de dose para este exemplo?

DADOS

Desprezar o fator de build-up, dada a função ilustrativa do exemplo.

Gamão do Co-60 = $1,32 \text{ R.m}^2/(\text{Ci.h})$;

Camada Semi-Redutora para o aço = 2,1 cm

Constante alfa = 10000 US\$ / pessoa-Sv = 100 US\$/pessoa-rem

1 R = 1 rem = 0,01Sv (radiação gama)

Custo da placa de aço = US\$ 1200/cm

Questão (a) - O número de camadas semi-redutoras, n , necessário para reduzir a taxa de exposição inicial, sem blindagem, a 2,5 mR/h é dado por:

$$I_0 / I = 2^n$$

$$I_0 = 1,32 \cdot 20/9 = 2,93 \text{ R/h}$$

$$I = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ R/h}$$

$$2^n = 1172$$

$$n = 10,2$$

Assim, a espessura de aço necessária é dada por:

$$n \cdot \text{CSR} = 21,4 \text{ cm}$$

Questão (b) - Considerando 20 técnicos expostos durante 2000 horas anuais, a dose anual por indivíduo, D , para cada camada semi-redutora é dada por:

$$D = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2000 / 2^n = 5 \text{ rem}/2^n$$

e o detrimento (DETR), portanto, será igual a

$$\text{DETR} = 100 \cdot 20 \cdot 5 / 2^n \text{ US\$/CSR}$$

Como o custo do aço por centímetro é dado como sendo 1200 US\$, o custo máximo, CM , em função de n , para reduzir a dose, é de:

$$CM = (2,1 \cdot n + 21,4) \text{ cm} \cdot 1200 \text{ US\$/cm}$$

A Tabela 6 mostra os valores do custo da proteção radiológica, custo do detrimento e custo total, ou seja, a soma desses dois custos.

Tabela 6 - Cálculo de Otimização Relativo ao Exemplo 4.1

n	Y = αS	X	X + Y
0	10.000,00	25.680,00	35.680
0,1	9.330,33	25.932,00	35.262,33
0,2	8.705,51	26.184,00	34.889,51
0,3	8.122,52	26.436,00	34.558,52
0,4	7.578,58	26.688,00	34.266,58
0,5	7.071,07	26.940,00	34.011,07
0,6	6.597,54	27.192,00	33.789,54
0,7	6.155,72	27.444,00	33.599,72
0,8	5.743,49	27.696,00	33.439,49
0,9	5.358,87	27.948,00	33.306,87
1,0	5.000,00	28.200,00	33.200,00
1,1	4.665,17	28.452,00	33.117,16
1,2	4.352,75	28.704,00	33.056,75
1,3	4.061,26	28.956,00	33.017,26
1,4	3.789,29	29.208,00	32.997,29
1,5	3.535,53	29.460,00	32.995,54
1,6	3.298,77	29.712,00	33.010,77
1,7	3.077,86	29.964,00	33.041,86
1,8	2.871,75	30.216,00	33.087,75
1,9	2.679,43	30.468,00	33.147,43
2,0	2.500,00	30.720,00	33.220,00
2,1	2.332,58	30.972,00	33.304,58
2,2	2.176,38	31.224,00	33.400,38

Assim sendo, o valor ótimo é o menor valor encontrado para a soma, isto é, a empresa deverá investir na blindagem adicional cerca de 1,5 camadas semi-redutoras.

O valor ótimo pode ser diretamente obtido derivando a expressão abaixo em relação a n e igualando a zero.

$$(X+\alpha S) = \{10.000/2^n + (21,42 + 2,1.n) \cdot 1200\}$$

$$\text{Ou seja, para } (X+\alpha S) \text{ mínimo} \Rightarrow d/dn \{10.000/2^n + (21,42 + 2,1.n) \cdot 1200\} = 0$$

Assim,

$$-10.000 \cdot \ln(2)/2^n + 1.200 \cdot 2,1 = 0$$

$$n = \ln(2,75)/\ln(2) = 1,46$$

Como n é diferente de zero, o bunker não está otimizado e sua espessura deverá ser aumentada em, aproximadamente, 3,15 cm ($1,5 \cdot 2,1$), ou seja, de 21,4 cm para cerca de 24,6 cm. Essa blindagem adicional resulta em uma taxa de dose externa inferior a 2,5 mrem/h e igual a cerca de 0,0089 mSv/h (calculada pela expressão $I/I_0 = 2^n$) e, portanto, uma dose individual anual para cada técnico de, no máximo, 17,8 mSv/a (supondo 2000 horas de atividade na proximidade da parede externa).

Esse seria, portanto, o valor de restrição de dose a ser adotado para o presente exemplo, considerando o limite superior para otimização de 18 mSv/a (que leva em conta uma margem de segurança de 10% para o limite de dose anual, devido a incertezas, ver Figura 2).

Se a margem de segurança adotada for de 20%, o limite superior estabelecido para o processo de otimização, qual seja, 16 mSv/a, será o valor de restrição de dose a ser adotado, uma vez que é inferior ao valor calculado de 17,80 mSv/a.

5. CONCLUSÃO

O conceito de restrição de dose introduzido pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica vem sendo adotado internacionalmente para restringir, a priori, as doses a que indivíduos do público venham a estar expostos, em função da proximidade de uma ou mais instalações nucleares ou radiativas, de modo a garantir que o limite anual de dose para público não seja ultrapassado, considerando as incertezas associadas ao cálculo de dose e a possibilidade de exposição a fontes que estejam fora do controle regulatório.

O presente artigo apresentou uma metodologia para estabelecer valores de restrição de dose para indivíduos ocupacionalmente expostos, a partir dos critérios adotados pela AIEA para definir valores de restrição de dose para indivíduos do público, bem como ilustrou a aplicação dessa metodologia à prática de radiografia industrial.

VI - REFERÊNCIAS

- [1] International Atomic Energy Agency, “International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources”, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna, 1996;
- [2] Comissão Nacional de Energia Nuclear, Norma CNEN-NN-3.01 “Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica”, CNEN, 2005.
- [3] International Commission on Radiological Protection, “ICRP2005: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Draft for Consultation”, 2004.
- [4] International Commission on Radiological Protection, Publication 60: “1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, ICRP, 1991.
- [5] International Atomic Energy Agency, “Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment”, WS-G-2.3 Safety Guide, IAEA Vienna, 2000
- [6] International Atomic Energy Agency, “Radiation, People and the Environment”, IAEA, Vienna, 2004.