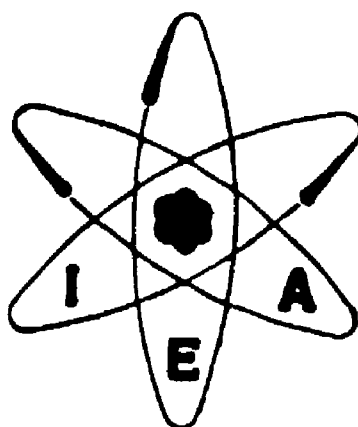




**PROJETO DA CAMARA DE IRRADIAÇÃO PARA UM ACELERADOR
INDUSTRIAL DE ELÉTRONS DE 1,5 MeV e 25 mA**

A. G. C. CASTAGNET, C. SZULAK e S. NAKAHIRA

INFORMAÇÃO IEA N.º 28
Março — 1974

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SAO PAULO — BRASIL

**PROJETO DA CÂMARA DE IRRADIAÇÃO PARA UM ACELERADOR
INDUSTRIAL DE ELÉTRONS DE 1,5 MeV e 25 mA**

A. C. G. Castagnet, C. Szulak e S. Nakahira

**Coordenadoria de Aplicação de Radioisótopos na Engenharia e na Indústria
Instituto de Energia Atômica
São Paulo - Brasil**

**Informação IEA Nº 28
Março - 1974**

Instituto de Energia Atômica

Conselho Superior

Eng^o Roberto N. Jafet – Presidente
Prof.Dr.Emilio Mattar – Vice-Presidente
Prof.Dr.José Augusto Martins
Dr.Affonso Celso Pastore
Prof.Dr.Milton Campos
Eng^o Helcio Modesto da Costa

Superintendente

Rômulo Ribeiro Pieroni

ÍNDICE

SECÇÃO	TEMA	PÁGINA
	RESUMO	1
1.0.0	DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO	1
1.1.0	OBJETIVOS	1
1.2.0	CARACTERÍSTICAS DO ACELERADOR	1
1.2.1	Intervalo de Tensão	1
1.2.2	Corrente do Feixe de Elétrons	1
1.2.3	Varredura do Feixe de Elétrons	1
1.2.4	Componentes Principais do Sistema Dynamitron	2
1.2.4.1	Recipiente de Pressão e Tubo do Feixe Eletrônico	2
1.2.4.2	Oscilador de R. F.	2
1.2.4.3	Sistema de Vácuo e Varredura	2
1.2.4.4	Painel de Controle	2
1.3.0	CÂMARA DE IRRADIAÇÃO.....	4
1.4.0	PROCESSOS DE IRRADIAÇÃO	4
1.4.1	Irradiação com Elétrons	4
1.4.2	Irradiação com Raios X	7
1.5.0	LABORATÓRIOS E SERVIÇOS COMPLEMENTARES	7
2.0.0	CÁLCULO DE BLINDAGENS	7
2.1.0	CRITÉRIOS BÁSICOS	7
2.1.1	Dose Máxima Permissível	8
2.1.2	Energia Média da Radiação X	8
2.2.0	PROTEÇÃO CONTRA A RADIAÇÃO X DIRETA	11
2.2.1	Piso da Câmara de Irradiação (A)	11
2.2.2	Parede Frontal à Sala de Controle (B)	11
2.2.3	Parede Exterior (C)	13
2.2.4	Parades Internas (D) e (D')	13
2.2.5	Teto da Câmara de Irradiação (E)	13
2.3.0	PROTEÇÃO CONTRA A RADIAÇÃO X SECUNDÁRIA	14
2.3.1	Hipótese	14
2.3.2	Parede do Corredor (F).....	16
2.3.3	Parede (D') oposta ao Refletor	17
2.3.4	Parede Frontal (B) da Sala de Controle	17
2.3.5	Parodes Laterais (G) da Sala de Controle	18

3.0.0	EQUIVALÊNCIA EM ATIVIDADE GAMA	18
3.1.0	ATIVIDADE MÉDIA EQUIVALENTE	18
3.2.0	ATIVIDADE EQUIVALENTE PARA $\alpha = 0^\circ$	18
3.3.0	ATIVIDADE EQUIVALENTE PARA $\alpha = 90^\circ$	19
3.4.0	ATIVIDADE EQUIVALENTE PARA $\alpha = 180^\circ$	19
	REFERENCIAS	19

PROJETO DA CÂMARA DE IRRADIAÇÃO PARA UM ACELERADOR INDUSTRIAL DE ELÉTRONS DE 1,5 MeV E 25 mA

A. C. G. Castagnet - C. Szulak - S. Nakahira

RESUMO

O presente relatório contém a descrição preliminar do projeto de uma câmara de irradiação destinada a alojar um acelerador industrial de elétrons "Dynamitron" de 1,5 MeV e 25 mA, recentemente adquirido pelo IEA.

A instalação tem sido projetada com suficiente flexibilidade como para permitir a execução de diferentes processos de irradiação já estabelecidos, a investigação de outros novos e o tratamento de materiais de diversas formas e dimensões.

Descreve-se também o método adotado para o cálculo da blindagem da câmara de irradiação, na hipótese de que o acelerador poderá ser utilizado para produzir deliberadamente raios X e dispor assim de uma fonte intensa de radiação eletromagnética.

1.0.0 - DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO

1.1.0 OBJETIVOS

Trata-se de uma instalação industrial, destinada fundamentalmente ao tratamento de materiais por irradiação com um fluxo intenso de elétrons energéticos. Não obstante existe a possibilidade de se utilizar o acelerador, para produzir raios X, e assim dispor de uma fonte intensa de radiação eletromagnética com uma energia média adequada para sua aplicação prática.

A instalação tem sido projetada com suficiente flexibilidade, para permitir a execução de diferentes processos de irradiação já estabelecidos, a investigação de outros novos assim como o tratamento de materiais de diversas formas e tamanhos.

1.2.0 CARACTERÍSTICAS DO ACELERADOR

O acelerador de elétrons é do tipo "Dynamitron II", produzido pela RADIATION DYNAMICS INC., dos EEUU e possui as seguintes características:

1.2.1 - Intervalo de Tensão

A alta tensão (voltagem de aceleração dos elétrons), pode-se variar continuamente entre 300kV e 1.500kV, através do painel de controle. A voltagem mantém-se constante entre ± 30 kV para $\pm 10\%$ de variação da tensão de linha e corrente máxima e mínima de carga.

1.2.2 - Corrente do Feixe de Elétrons

Varia linearmente de 5 a 25mA entre 300 e 750kV, mantém-se constante em 25mA desde 750 a 1.500kV. Abaixo de 300kV a corrente é de 100 μ A, que é a mínima obtível.

1.2.3 Varredura do Feixe de Elétrons

Realiza-se com uma frequência de 100Hz e amplitude variável desde o painel de controle, até um máximo de 1,20m (no presente caso). A intensidade do feixe deve acomodar-se à amplitude da varredura devido a limitação na potência que pode ser absorvida por cm^2 de janela, na saída do difusor.

A dose recebida por um material que se move perpendicularmente à direção do feixe, a 6'' da janela, é uniforme dentro de $\pm 10\%$ do valor nominal.

1.2.4 Componentes Principais do Sistema Dynamitron

O sistema do acelerador Dynamitron consiste de quatro conjuntos principais esquematizados na fig. 1:

- recipiente de pressão e tubo do feixe eletrônico;
- oscilador de radiofrequência (RF);
- sistema de vácuo e varredura;
- painel de controle.

1.2.4.1. Recipiente de Pressão e Tubo do Feixe Eletrônico:

Contém o transformador de R.F., o retificador em cascata ou fonte de tensão, e a coluna de aceleração dos elétrons. O recipiente está pressurizado com hexafluoreto de enxofre (SF_6), que atua como gás isolante (por suas excelentes propriedades dielétricas).

Os elétrons emitidos pelo cátodo incandescente são focalizados por uma lente de Pierce e acelerados dentro do tubo ao potencial pleno do sistema retificador em cascata. O resultado é um feixe de elétrons monoenergéticos, de seção transversal bem definida.

1.2.4.2 Oscilador de R.F.:

Converte a tensão de 60Hz da linha em 10kV de pico, a 100Hz aproximadamente. Esta é a fonte de alimentação de R.F., para o sistema retificador em cascata. O conjunto do oscilador está contido em um gabinete de aço, dotado com refrigeração por circulação de água sob pressão.

1.2.4.3 Sistema de Vácuo e Varredura:

As condições de vácuo requeridas dentro do tubo de aceleração e do difusor são obtidas com rapidez, e posteriormente mantidas, com um sistema industrial de bombas de vácuo. O controle do vácuo realiza-se por meio de termopares e medidores por ionização.

A varredura do feixe, é executada mediante um defletor eletromagnético de oscilação constante. O feixe é defletado dentro de um difusor de forma triangular terminado em uma delgada janela de titânio. Esta janela é especialmente projetada para manter as condições de alto vácuo dentro do difusor, e simultaneamente proporcionar a mínima atenuação do feixe eletrônico destinado à irradiação dos produtos.

1.2.4.4. Painel de Controle:

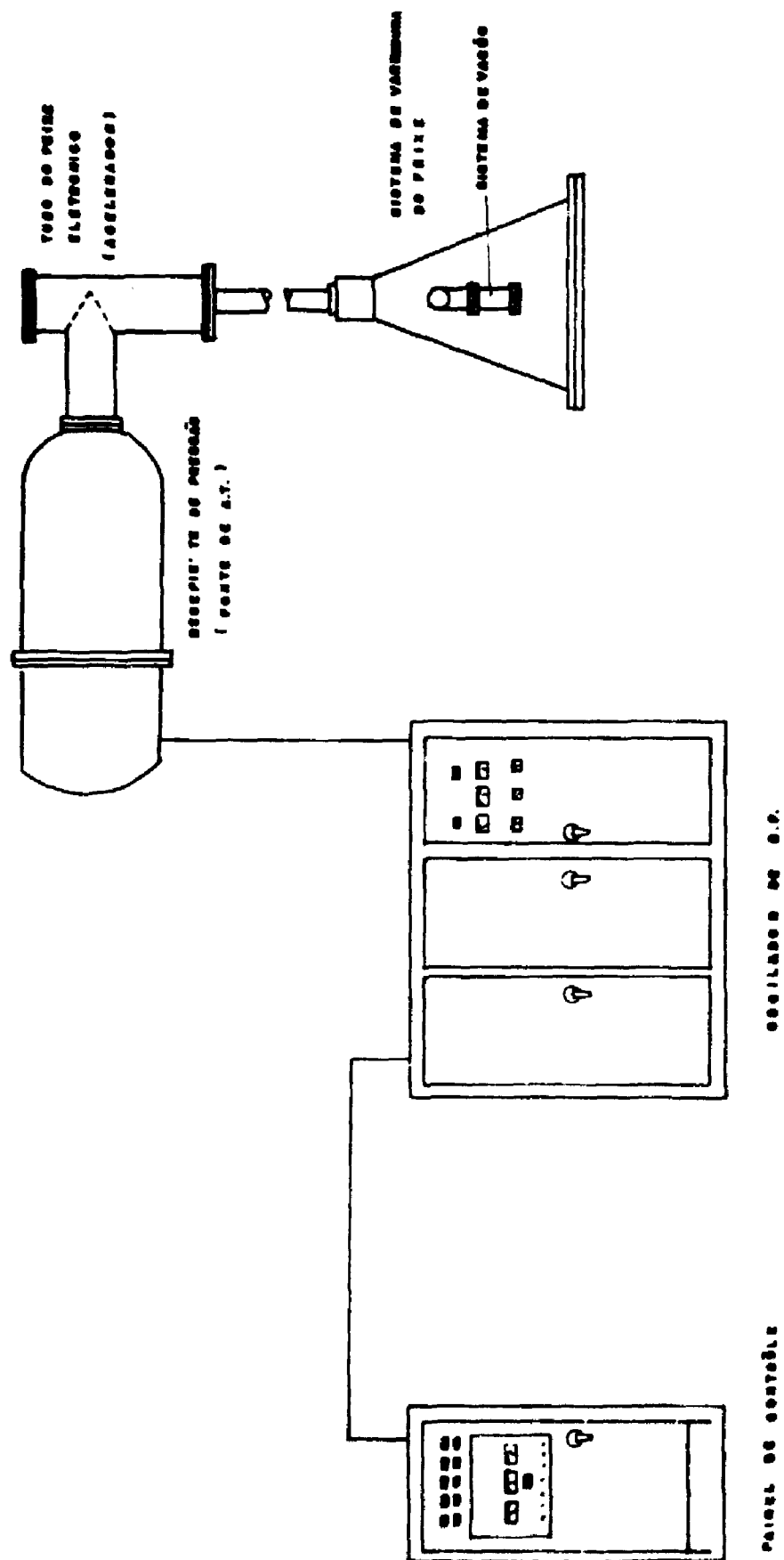


FIG. 1 — CONJUNTOS PRINCIPAIS DE SISTEMA DO ACCELERADOR " DYNAMITRON "

Contém todos os circuitos, instrumentos e comandos para a operação do sistema e detecção de falhas de funcionamento.

1.3.0 CÂMARA DE IRRADIAÇÃO

É uma célula de concreto de $2,35\text{g/cm}^3$ de densidade, construída em forma de labirinto, com as dimensões principais, que se indicam na fig. 2 (A e B).

Tem sido projetada e dimensionada para permitir a instalação e operação de um segundo acelerador, igual ao primeiro.

A câmara possui acessos e saídas localizadas em diferentes pontos, para possibilitar a execução de diversos processos e o tratamento de produtos de várias formas e tamanhos, incluindo a esterilização de materiais de uso médico. Neste último caso, empregar-se-á um sistema de transporte horizontal ("conveyor"), com uma trajetória sinuosa, para irradiar materiais dispostos em bandejas.

Debaixo do corredor principal da câmara, onde está disposto o difusor do acelerador, existe um túnel que se estende como uma canaleta, em toda extensão do edifício. A função deste túnel é proporcionar acessos e saídas de materiais pela parte inferior da câmara, aumentando deste modo sua versatilidade.

A câmara de irradiação, é dotada de um sistema exaustor de ar, de grande capacidade, para eliminar continuamente os gases nocivos gerados pela interação dos elétrons com a atmosfera (O_3 , NO , NO_2 , NO_2H , OH , CO).

A área externa limitada pelas paredes do labirinto da câmara, foi aproveitada para a instalação da sala de controle do acelerador.

Em cima da câmara será construído um segundo pavimento destinado a alojar o recipiente de pressão, oscilador, ventilador, exaustor, bomba de vácuo e equipamentos complementares do sistema, tais como o de transferência e armazenagem de SF_6 . Este local servirá também para efetuar as tarefas de manutenção e reparação do acelerador.

Parte do piso superior, será desmontável para permitir o ingresso do recipiente de pressão.

1.4.0. PROCESSOS DE IRRADIAÇÃO

Serão realizados por conta do IEA, ou como serviços para terceiros. De acordo com o tipo de radiação, podem ser classificados como segue:

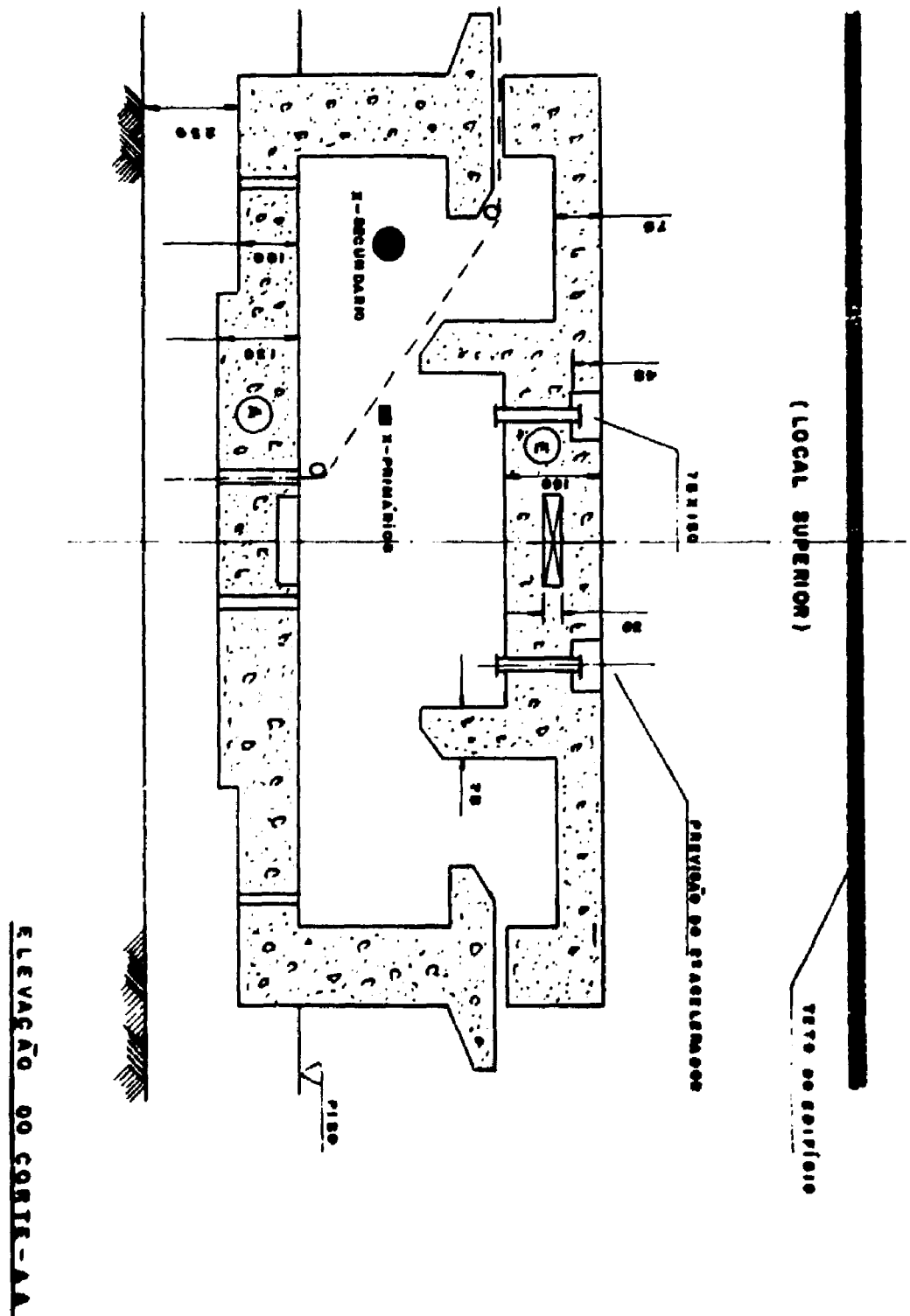
1.4.1. Irradiação com elétrons

Preveu-se a execução de alguns processos já estabelecidos e de outros novos.

Entre os primeiros incluem-se:

- "Cross-linking" de polietileno (cabos e condutores elétricos, espuma de polietileno, materiais encolhíveis, etc.);

FIG - 2.8 - " CAMARA DE IRRADIAÇÃO "



- vulcanização de elastômeros;
- enxertos de monômeros em polímeros (tratamento de fibras e materiais textéis, fabricação de materiais compostos);
- cura instantânea de pinturas e recobrimentos.

Entre os novos processos a serem desenvolvidos, incluem-se a fabricação contínua de laminados plástico-celulósicos e de papéis e cintas abrasivas.

1.4.2 Irradiação com Raios X

Eventualmente, a capacidade de produção de raios X do acelerador, será aproveitada para dispor de uma fonte de radiação eletromagnética de alta intensidade.

Para tais efeitos, utilizar-se-á um alvo de ouro ou tungstênio de desenho especial, acoplado ao mecanismo obturador do feixe eletrônico.

Como se demonstra adiante, este sistema é capaz de proporcionar uma fonte equivalente uns 368.000 Ci de um radioisótopo emissor gama, de 1 MeV/desintegração.

1.5.0. LABORATÓRIOS E SERVIÇOS COMPLEMENTARES

O edifício do acelerador contará com uma série de laboratórios e serviços complementares, tais como:

- formulação e preparação de materiais (pré-irradiação);
- controle dosimétrico e bacteriológico;
- controle de qualidade;
- ensaios tecnológicos;
- armazenagem e transporte de materiais;
- serviços de fábrica;
- serviços de manutenção;
- serviços administrativos.

2.0.0 CÁLCULO DE BLINDAGENS

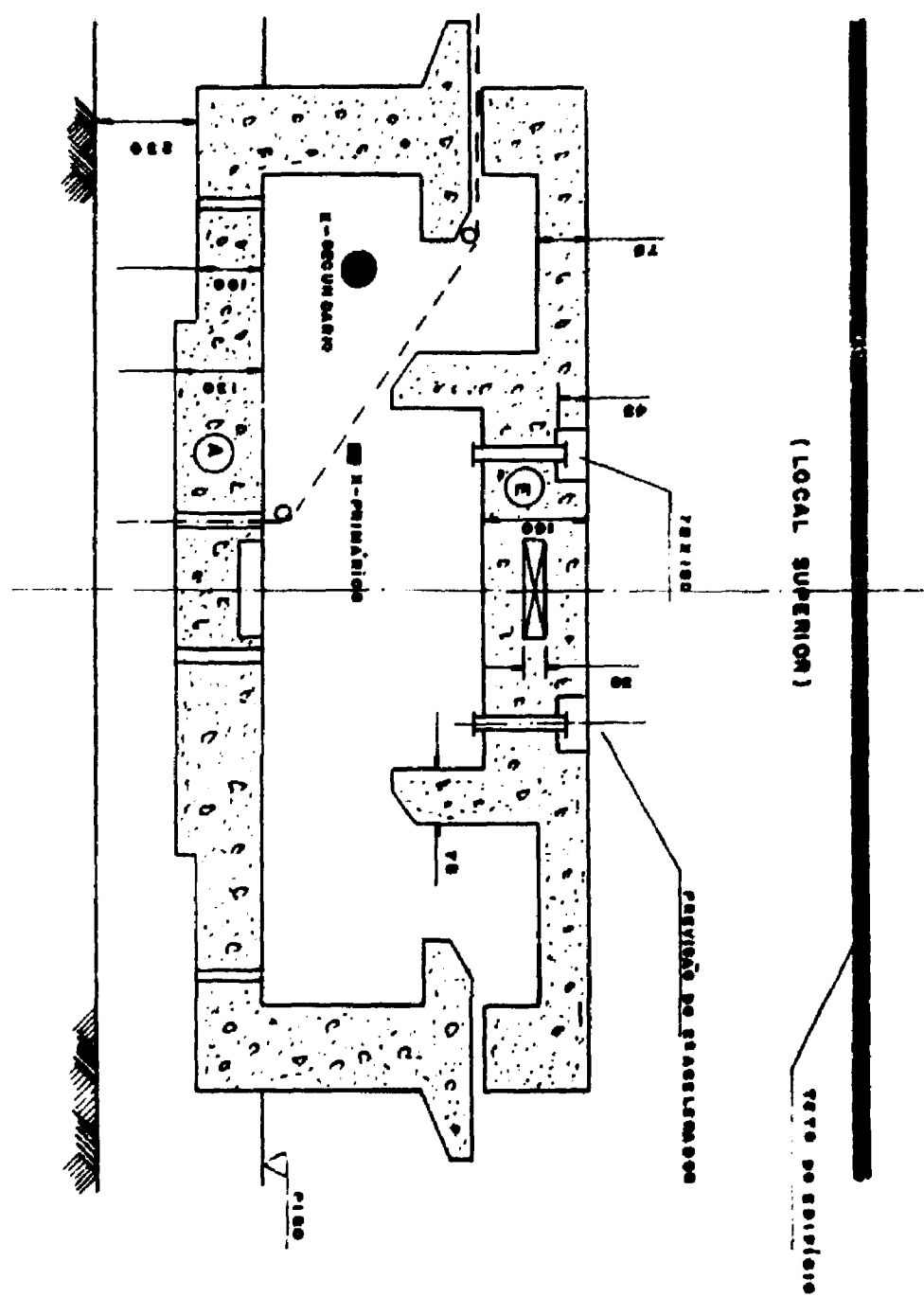
2.1.0. CRITÉRIOS BÁSICOS

Os diferentes materiais irradiados com o acelerador atuarão como "alvos" produtores de raios X. Portanto, do ponto de vista da proteção radiológica, a câmara de irradiação deve ser dimensionada para blindar adequadamente a radiação X gerada pelos elétrons energéticos, ao interagir, com a matéria.

Normalmente, a máxima produção de raios X, ocorrerá quando o obturador de alumínio interceptar o feixe de elétrons. Ocasionalmente, a intensidade será ainda maior quando se processar materiais que contenham elementos de ferro ou cobre.

Entretanto, a condição mais desfavorável, ocorrerá quando o acelerador for utilizado para produzir deliberadamente uma fonte intensa de radiação eletromagnética, por bombardeio de

FIG- 2.8 - " CAMARA DE IRRADIAÇÃO "



- vulcanização de elastômeros;
- enxertos de monômeros em polímeros (tratamento de fibras e materiais têxteis, fabricação de materiais compostos);
- cura instantânea de pinturas e recobrimentos.

Entre os novos processos a serem desenvolvidos, incluem-se a fabricação contínua de laminados plástico-celulósicos e de papéis e cintas abrasivas.

1.4.2 Irradiação com Raios X

Eventualmente, a capacidade de produção de raios X do acelerador, será aproveitada para dispor de uma fonte de radiação eletromagnética de alta intensidade.

Para tais efeitos, utilizar-se-á um alvo de ouro ou tungstênio de desenho especial, acoplado ao mecanismo obturador do feixe eletrônico.

Como se demonstra adiante, este sistema é capaz de proporcionar uma fonte equivalente uns 368.000 Ci de um radioisótopo emissor gama, de 1 MeV/desintegração.

1.5.0. LABORATÓRIOS E SERVIÇOS COMPLEMENTARES

O edifício do acelerador contará com uma série de laboratórios e serviços complementares, tais como:

- formulação e preparação de materiais (pré-irradiação);
- controle dosimétrico e bacteriológico;
- controle de qualidade;
- ensaios tecnológicos;
- armazenagem e transporte de materiais;
- serviços de fábrica;
- serviços de manutenção;
- serviços administrativos.

2.0.0 CÁLCULO DE BLINDAGENS

2.1.0. CRITÉRIOS BÁSICOS

Os diferentes materiais irradiados com o acelerador atuarão como "alvos" produtores de raios X. Portanto, do ponto de vista da proteção radiológica, a câmara de irradiação deve ser dimensionada para blindar adequadamente a radiação X gerada pelos elétrons energéticos, ao interagir, com a matéria.

Normalmente, a máxima produção de raios X, ocorrerá quando o obturador de alumínio interceptar o feixe de elétrons. Ocasionalmente, a intensidade será ainda maior quando se processar materiais que contenham elementos de ferro ou cobre.

Entretanto, a condição mais desfavorável, ocorrerá quando o acelerador for utilizado para produzir deliberadamente uma fonte intensa de radiação eletromagnética, por bombardeio de

um alvo de ouro ou tungstênio. Sendo que a produção e a distribuição espacial dos raios X é similar para ambos elementos, usou-se para os cálculos de blindagem, o campo de radiação X, originado pela irradiação de um alvo grosso de tungstênio, com um feixe de elétrons de 25mA e 1.5MeV.

Por outra parte, admitiu-se a operação simultânea de dois aceleradores de iguais características, nas condições anteriores e nas posições indicadas nas figuras 2A e 2B.

2.1.1 Dose Máxima Permissível

Toda área ocupada ao redor da célula de irradiação, dentro do edifício, estará sujeita a controle radiossanitário.

O pessoal que trabalha nos processos por irradiação, deverá usar filmes dosimétricos, e estará submetido aos controles periódicos estabelecidos pela C.P.R.D.

Portanto, para os efeitos de cálculo de blindagens, aceitou-se como dose máxima permissível (DMP) o valor:

$$DMP = 100 \frac{\text{m rem}}{\text{semana}}$$

Para 40 horas semanais de trabalho, ou 2.400 min/semana, resulta:

$$DMP = 25 \frac{\text{m rem}}{\text{h}} = 0.0416 \frac{\text{m rem}}{\text{min}} = 0.000416 \frac{\text{rem}}{\text{min}}$$

Nas presentes condições, pode-se supor como válida (para as finalidades de cálculo), a equivalência entre exposição em roentgen e dose em rem, é dizer que:

$$1 \text{ R} \equiv 1 \text{ rem}$$

2.1.2 Energia Média da Radiação X

A Figura 5 do apêndice D, na pag. 88 de Ref. 1, mostra que a transmissão em concreto de raios X gerados em tungstênio por elétrons com energias entre 0.5 e 3MeV, segue uma lei exponencial, após a radiação haver atravessado os primeiros centímetros de absorvente.

As curvas de atenuação dessa figura, corresponde a raios não colimados (má geometria) e as exposições a 1 metro sem absorvente (ordenadas E_0 a origem) não foram corrigidas para auto-absorção do alvo.

Extrapolando a parte reta das curvas de atenuação até o eixo de ordenadas, a exposição a 1m por mA poderá expressar-se por uma lei exponencial, tomando para E_0 os novos valores extrapolados.

Os novos valores de E_0 ($\frac{\text{R}}{\text{m n mA}}$), resultam maiores que os indicados na Fig. 5 da Ref. 1, mas menores que os obtidos na Ref. 2, ao corrigir para autoabsorção.

Como na prática existirá realmente autoabsorção no alvo grosso de tungstênio, as retas extrapoladas, da Fig. 5 (Ref. 1), podem ser consideradas uma boa aproximação para os cálculos

subsequentes de exposição e blindagens.

Essas retas foram reproduzidas na Fig. 3, incluindo a correspondente a raios X gerados por elétrons de 1.5MeV. No eixo das abscissas, a espessura de concreto foi expressa em g/cm^2 , para ser independentes os valores da exposição, da densidade do material absorvente.

A interpolação da reta de atenuação correspondente a 1.5MeV, foi efetuado da seguinte maneira:

- a) foram representadas em um gráfico logarítmico as ordenadas na origem para 1, 2 e 3 MeV (extrapoladas das correspondentes retas);
- b) como os três pontos resultaram alinhados sobre uma mesma reta, interpolou-se assim o valor da ordenada na origem para 1.5MeV.
- c) finalmente desde este ponto no gráfico da Fig. 3, traçou-se uma reta com um coeficiente de atenuação obtido como média dos coeficientes para as curvas de 1 e 2MeV.

Os valores assim determinados resultaram:

$$E_0 (1,5\text{MeV}) = 130 \frac{\text{rem}}{\text{mA.min}}$$

$$\mu(1,5\text{MeV}) = 0.053 \text{ cm}^2/\text{g} \equiv 0,125 \text{ cm}^{-1} (\rho = 2.35\text{g/cm}^3)$$

As curvas de atenuação da radiação gama, para fontes não colimadas, apresentam também a forma de exponenciais negativas a partir de uns poucos centímetros de absorvente.

Para determinar a energia de uma fonte gama equivalente aos raios X gerados por elétrons de 1.5MeV em um alvo de tungstênio, procedeu-se da seguinte maneira:

- a) determinou-se da Fig. 3, a espessura de redução por dez na dose unitária correspondente à radiação X de 1.5MeV. Obteve-se:

$$X_{1/10} = 18,3\text{cm}$$

- b) Com os gráficos da Fig. 10, pag. 134 de Ref. 3, e pela tabela 28, pag. 83 da Ref. 1 a energia gama para esta espessura de deci-redução (havendo a radiação atravessado pelo menos uma destas espessuras previamente), corresponde a:

$$E_\gamma \cong 1\text{MeV}$$

Este valor representa 2/3 da energia dos elétrons emitidos pelo acelerador e, portanto, 2/3 da energia máxima do espectro de raios X.

A energia média assim calculada será utilizada posteriormente para determinar a blindagem de proteção contra a radiação secundária e para estabelecer a equivalência em curie-gama, do campo de raios X gerado pelo acelerador.

um alvo de ouro ou tungstênio. Sendo que a produção e a distribuição espacial dos raios X é similar para ambos elementos, usou-se para os cálculos de blindagem, o campo de radiação X, originado pela irradiação de um alvo grosso de tungstênio, com um feixe de elétrons de 25mA e 1.5MeV.

Por outra parte, admitiu-se a operação simultânea de dois aceleradores de iguais características, nas condições anteriores e nas posições indicadas nas figuras 2A e 2B.

2.1.1 Dose Máxima Permissível

Toda área ocupada ao redor da célula de irradiação, dentro do edifício, estará sujeita a controle radiossanitário.

O pessoal que trabalha nos processos por irradiação, deverá usar filmes dosimétricos, e estará submetido aos controles periódicos estabelecidos pela C.P.R.D.

Portanto, para os efeitos de cálculo de blindagens, aceitou-se como dose máxima permissível (DMP) o valor:

$$DMP = 100 \frac{m \text{ rem}}{\text{semana}}$$

Para 40 horas semanais de trabalho, ou 2.400 min/semana, resulta:

$$DMP = 25 \frac{m \text{ rem}}{h} = 0.0416 \frac{m \text{ rem}}{\text{min}} = 0.0000416 \frac{\text{rem}}{\text{min}}$$

Nas presentes condições, pode-se supor como válida (para as finalidades de cálculo), a equivalência entre exposição em roentgen e dose em rem, é dizer que:

$$1 R \equiv 1 \text{ rem}$$

2.1.2 Energia Média da Radiação X

A Figura 5 do apêndice D, na pag. 88 de Ref. 1, mostra que a transmissão em concreto de raios X gerados em tungstênio por elétrons com energias entre 0.5 e 3MeV, segue uma lei exponencial, após a radiação haver atravessado os primeiros centímetros de absorvente.

As curvas de atenuação dessa figura, corresponde a raios não colimados (má geometria) e as exposições a 1 metro sem absorvente (ordenadas E_0 a origem) não foram corrigidas para auto-absorção do alvo.

Extrapolando a parte reta das curvas de atenuação até o eixo de ordenadas, a exposição a 1m por mA poderá expressar-se por uma lei exponencial, tomando para E_0 os novos valores extrapolados.

Os novos valores de E_0 ($\frac{R}{m \cdot n \text{ mA}}$), resultam maiores que os indicados na Fig. 5 da Ref. 1, mas menores que os obtidos na Ref. 2, ao corrigir para autoabsorção.

Como na prática existirá realmente autoabsorção no alvo grosso de tungstênio, as retas extrapoladas, da Fig. 5 (Ref. 1), podem ser consideradas uma boa aproximação para os cálculos

subsequentes de exposição e blindagens.

Essas retas foram reproduzidas na Fig. 3, incluindo a correspondente a raios X gerados por elétrons de 1.5MeV. No eixo das abscissas, a espessura de concreto foi expressa em g/cm^2 , para ser independentes os valores da exposição, da densidade do material absorvente.

A interpolação da reta de atenuação correspondente a 1.5MeV, foi efetuado da seguinte maneira:

- a) foram representadas em um gráfico logarítmico as ordenadas na origem para 1, 2 e 3 MeV (extrapoladas das correspondentes retas);
- b) como os três pontos resultaram alinhados sobre uma mesma reta, interpolou-se assim o valor da ordenada na origem para 1.5MeV.
- c) finalmente desde este ponto no gráfico da Fig. 3, traçou-se uma reta com um coeficiente de atenuação obtido como média dos coeficientes para as curvas de 1 e 2MeV.

Os valores assim determinados resultaram:

$$E_0 (1,5\text{MeV}) = 130 \frac{\text{rem}}{\text{mA.min}}$$

$$\mu(1,5\text{MeV}) = 0.053 \text{ cm}^2/\text{g} \equiv 0,125 \text{ cm}^{-1} (\rho = 2.35\text{g/cm}^3)$$

As curvas de atenuação da radiação gama, para fontes não colimadas, apresentam também a forma de exponenciais negativas a partir de uns poucos centímetros de absorvente.

Para determinar a energia de uma fonte gama equivalente aos raios X gerados por elétrons de 1.5MeV em um alvo de tungstênio, procedeu-se da seguinte maneira:

- a) determinou-se da Fig. 3, a espessura de redução por dez na dose unitária correspondente à radiação X de 1.5MeV. Obteve-se:

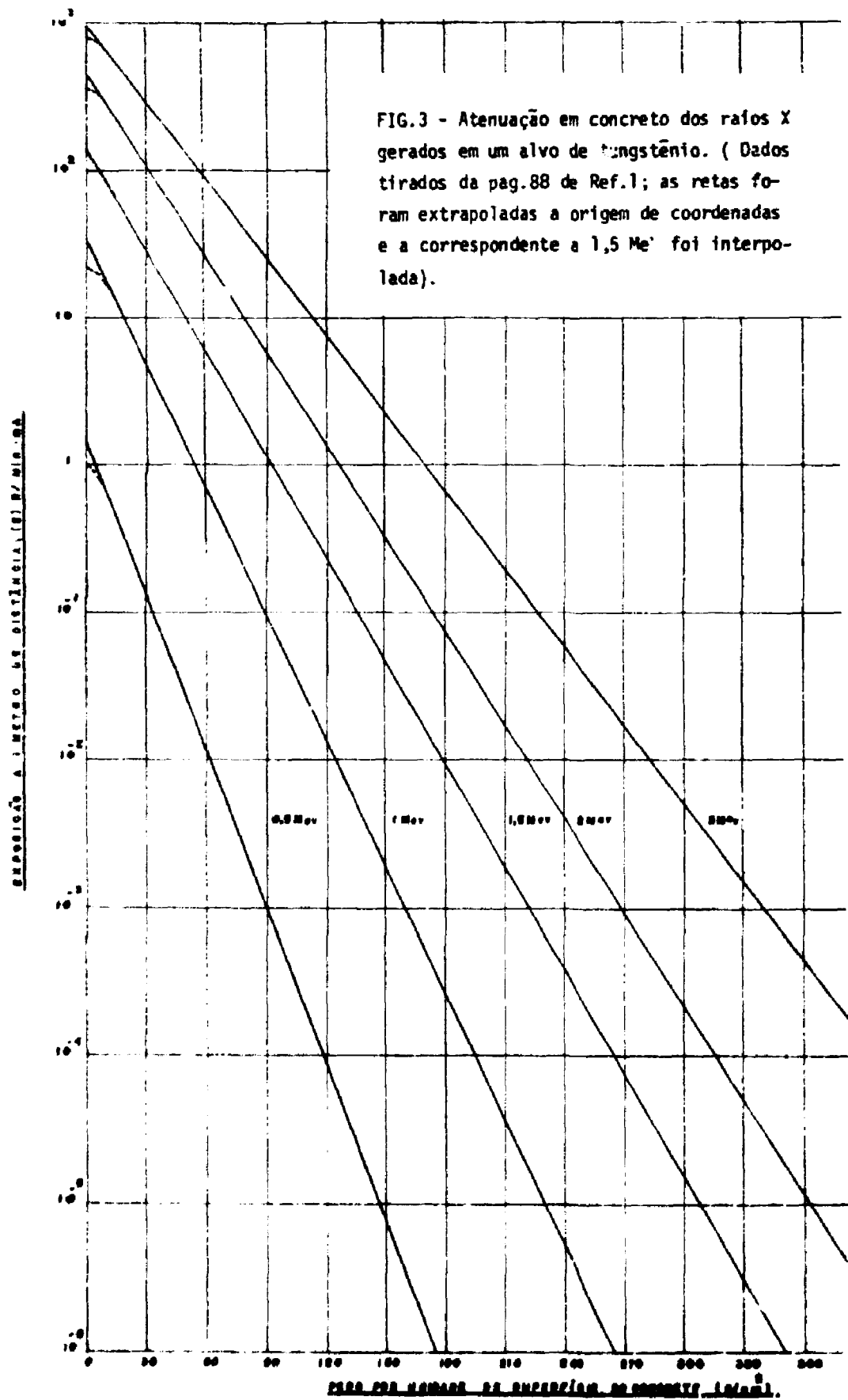
$$X_{1/10} = 18,3\text{cm}$$

- b) Com os gráficos da Fig. 10, pag. 134 de Ref. 3, e pela tabela 2B, pag. 83 da Ref. 1 a energia gama para esta espessura de deci-redução (havendo a radiação atravessado pelo menos uma destas espessuras previamente), corresponde a:

$$E_\gamma \cong 1\text{MeV}$$

Este valor representa 2/3 da energia dos elétrons emitidos pelo acelerador e, portanto, 2/3 da energia máxima do espectro de raios X.

A energia média assim calculada será utilizada posteriormente para determinar a blindagem de proteção contra a radiação secundária e para estabelecer a equivalência em curie-gama, do campo de raios X gerado pelo acelerador.



2.2.0. PROTEÇÃO CONTRA A RADIAÇÃO X DIRETA

2.2.1 Piso da Câmara de Irradiação (A)

Logo abaixo do alvo, o ângulo α de dispersão dos raios X, com relação ao feixe de elétrons é zero. Portanto, aplicam-se diretamente as curvas de atenuação da Fig. 3.

Para uma dose máxima permissível (DMP) de $2,5 \text{ m rem/h} \equiv 0,0000416 \text{ rem/min}$, e supondo que a área ocupada (túnel) está a 2,5 m do alvo, tem-se

$$\frac{\text{DMP}}{\text{mA}} = \frac{0,0000416}{25} = 0,00000167 \frac{\text{rem}}{\text{min.mA}}$$

Da fig. 3, para 1,5 MeV:

$$E_o = 130 \frac{\text{rem}}{\text{min.mA}}$$

Fator de atenuação por distância:

$$G = \frac{1}{(2,5)^2} = \frac{1}{6,25}$$

Dose máxima equivalente a 1m, por mA:

$$\text{DME} = \frac{\text{DMP/mA}}{G} = 0,0000104 \frac{\text{rem}}{\text{min.mA}}$$

Na Fig. 3, para passar de 130 a $0,0000104 \frac{\text{R}}{\text{min.mA}}$ à 1m, requer-se:

$\rho X = 307 \text{ g/cm}^2$ de concreto. Para $\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$ isso equivale a 130,5cm.

Portanto, para o piso (A), debaixo do acelerador, se terá:

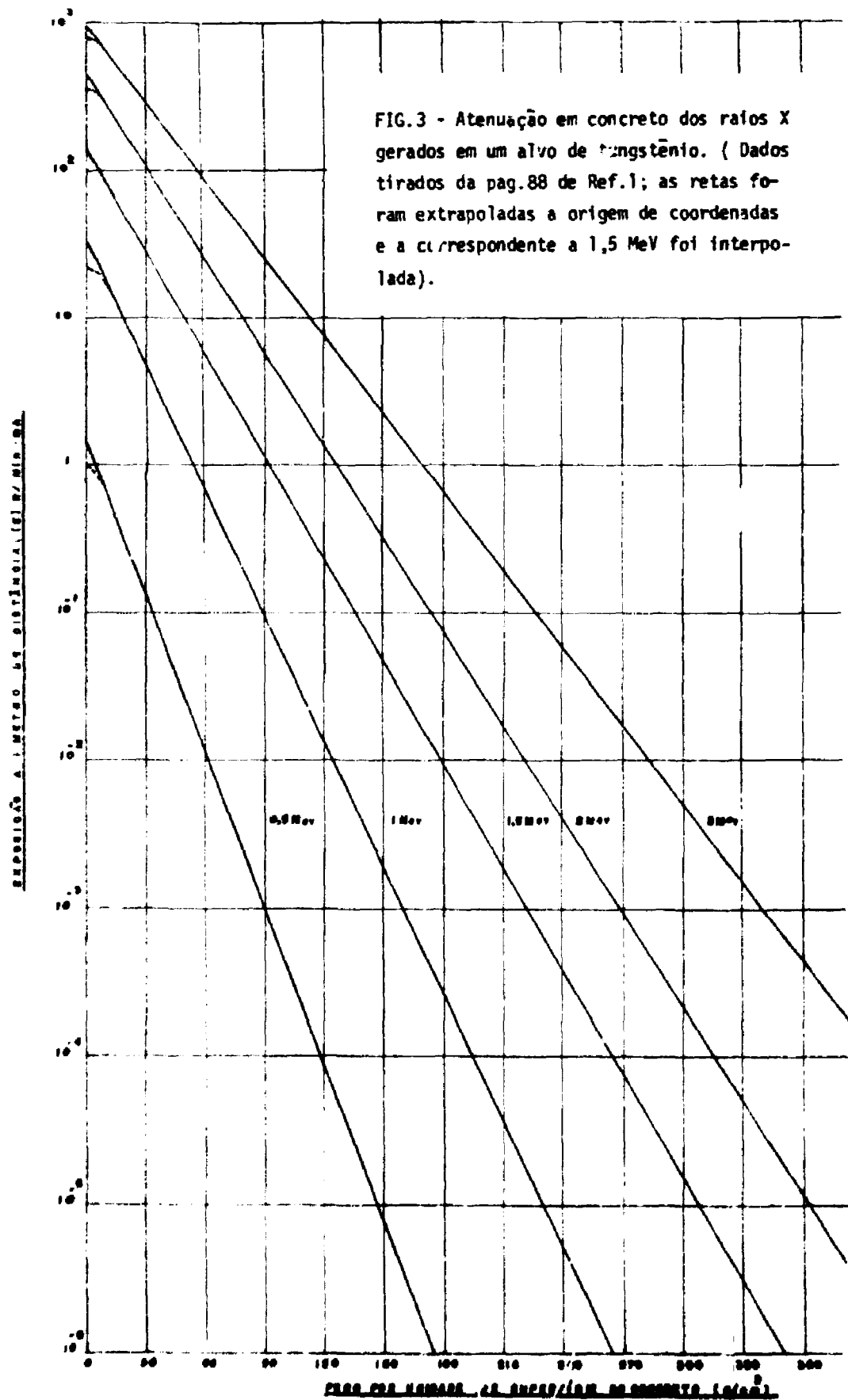
ESPESSURAS REQUERIDAS PARA O PISO (A)

m rem/h	g/cm ²	cm ($\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$)
2.5	307.0	130.5
0.25	350.0	148.8

2.2.2 Parede Frontal à Sala de Controle (B)

A Fig. 4 (extraída de Ref. 2), mostra que a intensidade de radiação X dispersada a 90° representa 37% da intensidade medida para $\alpha = 0$

Supondo que a zona ocupada (sala de controle) ficará a uma distância de 2m em relação ao alvo e tendo em conta o fator de redução devido ao ângulo de dispersão:



2.2.0. PROTEÇÃO CONTRA A RADIAÇÃO X DIRETA

2.2.1 Piso da Câmara de Irradiação (A)

Logo abaixo do alvo, o ângulo α de dispersão dos raios X, com relação ao feixe de elétrons é zero. Portanto, aplicam-se diretamente as curvas de atenuação da Fig. 3.

Para uma dose máxima permissível (DMP) de $2,5 \text{ m rem/h} \equiv 0,0000416 \text{ rem/min}$, e supondo que a área ocupada (túnel) está a 2,5 m do alvo, tem-se:

$$\frac{\text{DMP}}{\text{mA}} = \frac{0,0000416}{25} = 0,00000167 \frac{\text{rem}}{\text{min.mA}}$$

Da fig. 3, para 1,5 MeV:

$$E_0 = 130 \frac{\text{rem}}{\text{min.mA}}$$

Fator de atenuação por distância:

$$G = \frac{1}{(2,5)^2} = \frac{1}{6,25}$$

Dose máxima equivalente a 1m, por mA:

$$\text{OME} = \frac{\text{DMP/mA}}{G} = 0,0000104 \frac{\text{rem}}{\text{min.mA}}$$

Na Fig. 3, para passar de 130 a $0,0000104 \frac{\text{R}}{\text{min.mA}}$ à 1m, requer-se:

$\rho X = 307 \text{ g/cm}^2$ de concreto. Para $\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$ isso equivale a 130,5cm.

Portanto, para o piso (A), debaixo do acelerador, se terá:

ESPESSURAS REQUERIDAS PARA O PISO (A)

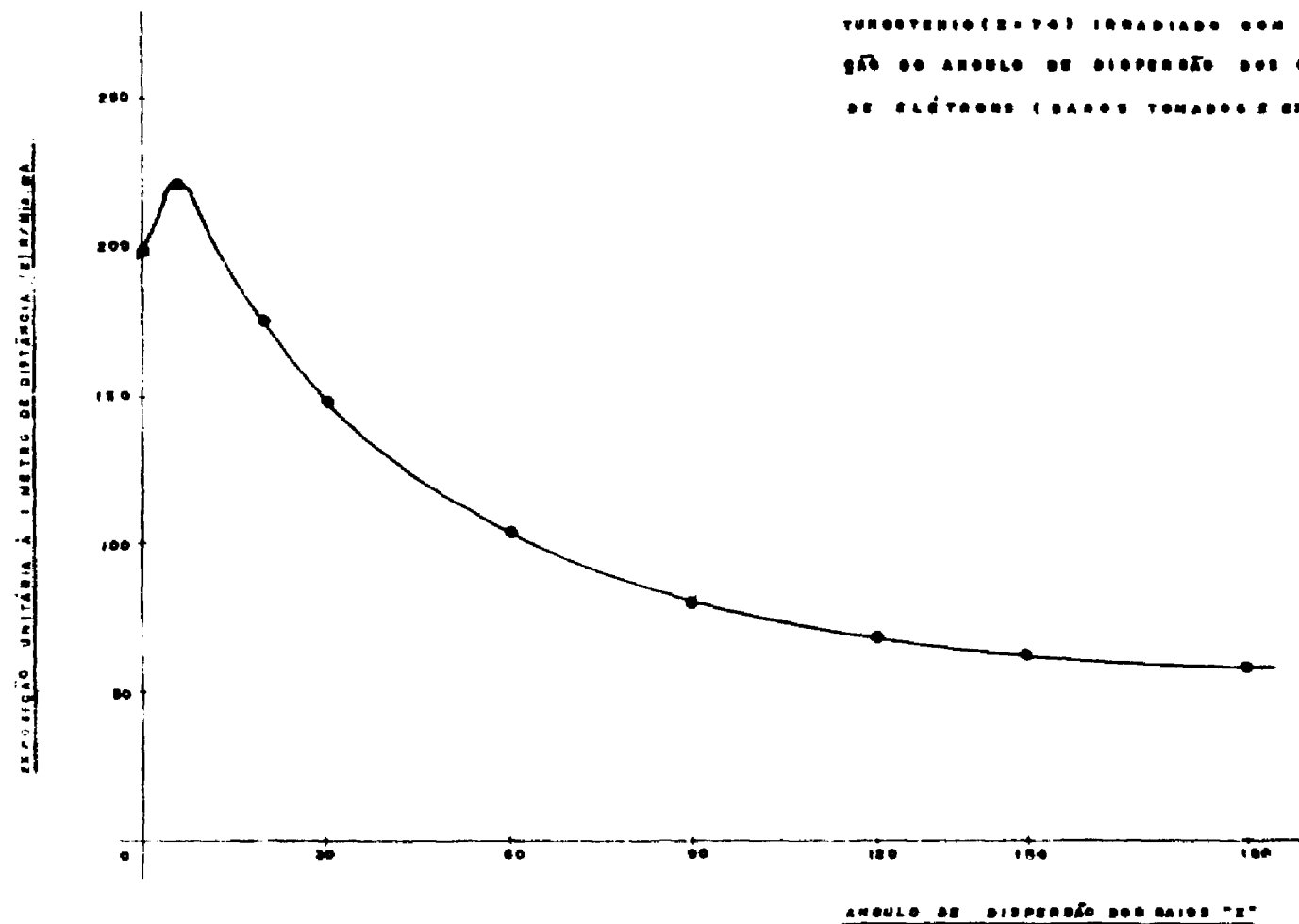
m rem/h	g/cm ²	cm ($\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$)
2.5	307.0	130.5
0.25	350.0	148.8

2.2.2 Parede Frontal à Sala de Controle (B)

A Fig. 4 (extraída de Ref. 2), mostra que a intensidade de radiação X dispersada a 90° representa 37% da intensidade medida para $\alpha = 0$

Supondo que a zona ocupada (sala de controle) ficará a uma distância de 2m em relação ao alvo e tendo em conta o fator de redução devido ao ângulo de dispersão:

FIG-4 - EXPOSIÇÃO DE RAIOS "X" A UM METRO DE DISTÂNCIA DE UM ALVO DE TUNGSTÊNIO ($Z=74$) IRRADIADO COM ELÉTRONS DE 1,5 MV. EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE DISPERÇÃO DOS RAIOS "X" RESPEITO AO FEIXE DE ELÉTRONS (DADOS TOMADOS E EXTRAPOLADOS DE 427-8).



$$DMP = 2,5 \text{ m rem/h}$$

$$DME = \frac{0,00000167 \times 4}{0,37} = 0,0000180 \frac{\text{rem}}{\text{min.mA}} \text{ a 1 metro}$$

ESPESSURAS REQUERIDAS PARA A PAREDE (B)

m rem/h	g/cm ²	cm($\rho = 2,35\text{g/cm}^3$)
2,5	297	126,2
0,25	340	144,5

2.2.3. Parede Exterior (C)

Idem ao caso anterior.

2.2.4. Paredes Internas (D) e (D')

$$\text{Fator de distância: } G = \frac{1}{(5,5)^2} = \frac{1}{30,25}$$

$$\text{Fator de ângulo: } F_{\alpha} = 0,37$$

Para uma DMP = 2,5 m rem/h:

$$DME = \frac{0,00000167 \times 30,25}{0,37} = 0,0001365 \frac{\text{rem}}{\text{mA min}} \text{ a 1 metro}$$

ESPESSURAS REQUERIDAS PARA AS PAREDES (D) E (D')

m rem/h	g/cm ²	cm(2,35g/cm ³)
2,5	259	110
0,25	302	128,3

2.2.5. Teto da Câmara de Irradiação (E)

Da Fig. 4, para $\alpha = 180^\circ$, $F_{\alpha} = 0,28$

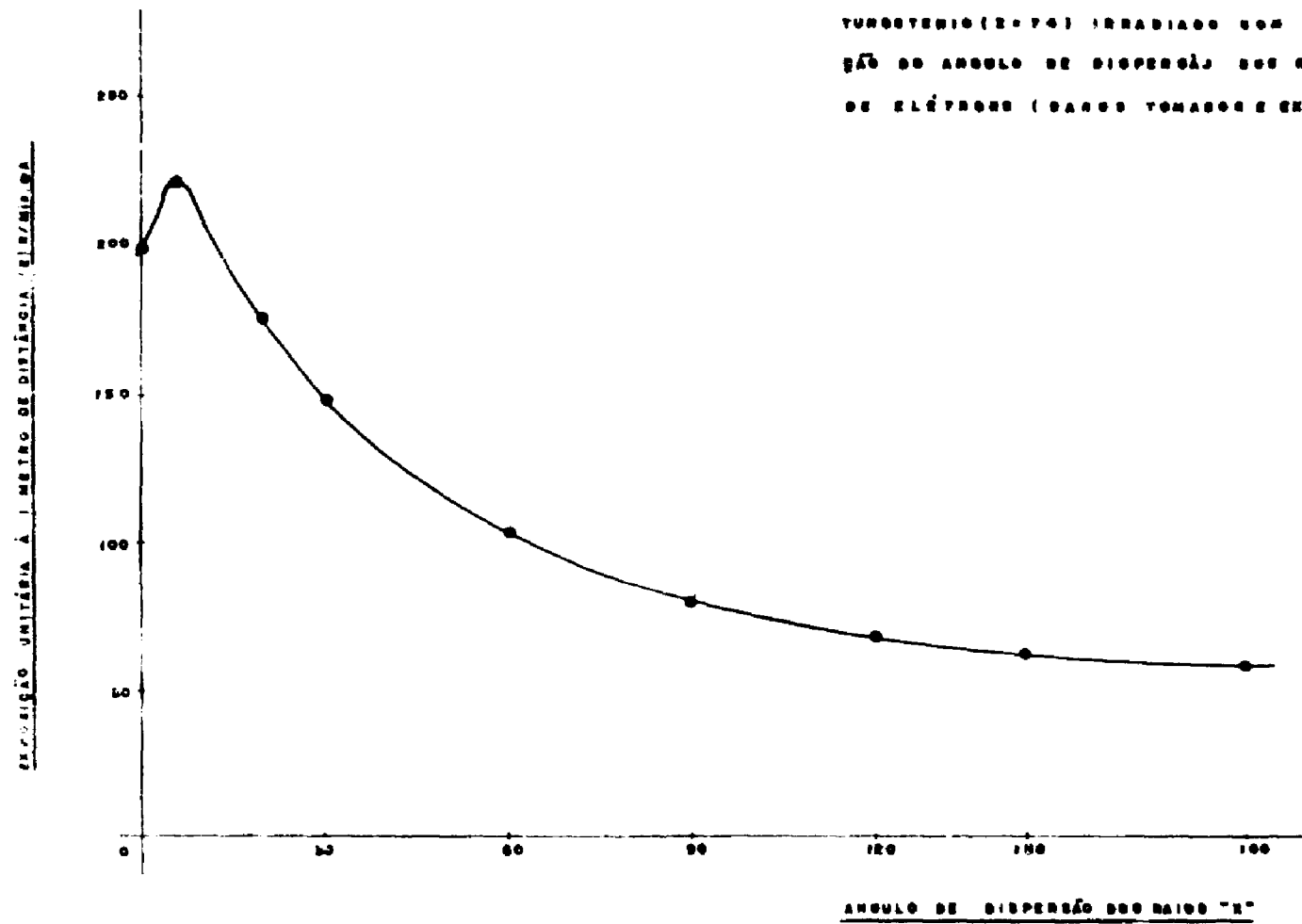
O fator de distância neste caso é:

$$G = \frac{1}{4^2} = \frac{1}{16}$$

Para uma DMP = 2,5 $\frac{\text{m rem}}{\text{h}}$:

$$DME = \frac{0,00000167 \times 16}{0,28} = 0,000103 \frac{\text{rem}}{\text{mA min}} \text{ a 1 metro}$$

FIG- 4 - EXPOSIÇÃO DE RAIOS "X" A UM metro DE DISTÂNCIA DE UM ALVO DE TUNGSTÊNIO (Z=74) IRRADIADO COM ELÉTRONS DE 1,5 MeV. EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE DISPERSÃO DOS RAIOS "X" RESPEITO AO FEIXE DE ELÉTRONS (DADOS TOMADOS E EXTRAPOLADOS DE REF-3).



$$DMP = 2,5 \text{ m rem/h}$$

$$DME = \frac{0,00000167 \times 4}{0,37} = 0,0000180 \frac{\text{rem}}{\text{min.mA}} \text{ a 1 metro}$$

ESPESSURAS REQUERIDAS PARA A PAREDE (B)

m rem/h	g/cm ²	cm($\rho = 2,35\text{g/cm}^3$)
2,5	297	126,2
0,25	340	144,5

2.2.3. Parede Exterior (C)

Idem ao caso anterior.

2.2.4. Paredes Internas (D) e (D')

$$\text{Fator de distância: } G = \frac{1}{(5,5)^2} = \frac{1}{30,25}$$

$$\text{Fator de ângulo: } F_{\alpha} = 0,37$$

Para uma DMP = 2,5m rem/h:

$$DME = \frac{0,00000167 \times 30,25}{0,37} = 0,0001365 \frac{\text{rem}}{\text{mA min}} \text{ a 1 metro}$$

ESPESSURAS REQUERIDAS PARA AS PAREDES (D) E (D')

m rem/h	g/cm ²	cm(2,35g/cm ³)
2,5	259	110
0,25	302	128,3

2.2.5. Teto da Câmara de Irradiação (E)

Da Fig. 4, para $\alpha = 180^\circ$, $F_{\alpha} = 0,26$

O fator de distância neste caso é:

$$G = \frac{1}{4^2} = \frac{1}{16}$$

Para uma DMP = 2,5 $\frac{\text{m rem}}{\text{h}}$:

$$DME = \frac{0,00000167 \times 16}{0,26} = 0,000103 \frac{\text{rem}}{\text{mA min}} \text{ a 1 metro}$$

ESPESSURAS REQUERIDAS PARA O TETO (E)

m rem/h	g/cm ²	cm($\rho = 2,35\text{g/cm}^3$)
2,5	264	112,3
0,25	307	130,6

2.3.0. PROTEÇÃO CONTRA A RADIAÇÃO X SECUNDÁRIA

2.3.1. Hipótese

Seja $\bar{I}_0$ a intensidade média da radiação λ , direta, em watt/cm², medida a 100cm do alvo, sem blindagem. A intensidade $\bar{I}$ a r cm do alvo será:

$$\bar{I}_r = \bar{I}_0 \left(\frac{100}{r} \right)^2 \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$$

Se a partir de r_1 cm existir um material absorvente com coeficiente linear de atenuação μ (cm⁻¹), a intensidade em r (para $r > r_1$) será:

$$\bar{I}'_r = \bar{I}_0 \left(\frac{100}{r} \right)^2 e^{-\mu(r-r_1)} \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$$

A potência absorvida em uma capa esférica de material de raios r_1 e r_2 cm com respeito ao centro do alvo é:

$$W_a = \int_{r_1}^{r_2} \bar{I}'_r \mu_a 4\pi r^2 dr \text{ watt}$$

sendo:

μ_a = coeficiente linear de absorção (cm⁻¹)

A potência absorvida é dissipada logo como calor ou consumida em produzir mudanças estruturais permanentes no material irradiado.

Resolvendo a integral tem-se:

$$W_a = 4\pi \bar{I}_0 10^4 \mu_a \int_{r_1}^{r_2} e^{-(r-r_1)\mu} dr \text{ watt.}$$

$$W_a = 4\pi \bar{I}_0 \frac{\mu_a}{\mu} 10^4 (1 - e^{-\mu \Delta r}) \text{ watt.}$$

donde:

$$\Delta r = r_2 - r_1 \text{ cm}$$

A potência W_t transmitida através da superfície $4\pi r_2^2$ será:

$$W_t = 4\pi r_2^2 \bar{I}_0 e^{-\mu \Delta r} \frac{10^4}{r_2^2} \text{ watt.}$$

Por outra parte, a potência W_i incidente sobre $4\pi r_1^2$ vale:

$$W_i = 4\pi r_1^2 \bar{I}_0 \frac{10^4}{r_1^2} \text{ watt.}$$

Portanto, a potência W_s dispersada ou "irradiada" pela capa esférica é:

$$W_s = W_i - W_t - W_a = 4\pi \bar{I}_0 10^4 \left[1 - e^{-\mu \Delta r} - \frac{\mu_a}{\mu} (1 - e^{-\mu \Delta r}) \right] \text{ watt.}$$

Daqui obtém-se:

$$\frac{W_s}{W_i} = (1 - e^{-\mu \Delta r}) \left(1 - \frac{\mu_a}{\mu} \right)$$

Por experiência sabe-se que a maior contribuição na potência retrodispersada por um refletor de concreto, provem dos 10 primeiros cm de espessura.

Para $\Delta r = 10\text{cm}$ e $E = 1\text{MeV}$, sendo:

$$\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu = 0,15 \text{ cm}^{-1}; e^{-\mu \Delta r} = 0,22$$

$$\mu_a = 0,0705 \text{ cm}^{-1}$$

$$\frac{\mu_a}{\mu} = 0,47$$

Resulta:

$$W_s = 0,78 \times 0,53 W_i \cong 0,41 W_i \text{ watt.}$$

Para simplificar os cálculos subsequentes, supõe-se que esta potência é irradiada por uma fonte virtual colocada no centro de uma esfera de concreto de 10cm de raio.

O centro da esfera será localizado no "foco" da configuração refletora, e aceitar-se-á como energia da radiação secundária, o valor que obtém-se ao aplicar a fórmula de Compton para $\theta = 90^\circ$:

$$E_s = \frac{\bar{E}_0}{1 + \frac{E_0}{0,511} (1 - \cos \theta)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{0,511}} = 0,338 \text{ MeV}$$

O coeficiente mássico de atenuação em concreto para esta energia é:

$$\mu_{ms} = 0,1 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$$

Para $\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$, o coeficiente linear de atenuação resulta:

$$\mu_s = 0,235 \text{ cm}^{-1}$$

A potência irradiada pela configuração refletora, quando esta envolve completamente o alvo será:

$$W_s = 0,41 W_i = 0,41 \cdot 4\pi \cdot \bar{I}_0 \cdot 10^4 \text{ watt.}$$

ESPESSURAS REQUERIDAS PARA O TETO (E)

m rem/h	g/cm ²	cm($\rho = 2,35\text{g/cm}^3$)
2,5	264	112,3
0,25	307	130,6

2.3.0. PROTEÇÃO CONTRA A RADIAÇÃO X SECUNDÁRIA

2.3.1. Hipótese

Seja $\bar{I}_0$ a intensidade média da radiação X direta, em watt/cm², medida a 100cm do alvo, sem blindagem. A intensidade $\bar{I}$ a r cm do alvo será:

$$\bar{I}_r = \bar{I}_0 \left(\frac{100}{r} \right)^2 \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$$

Se a partir de r_1 cm existir um material absorvente com coeficiente linear de atenuação μ (cm⁻¹), a intensidade em r (para $r > r_1$) será:

$$\bar{I}'_r = \bar{I}_0 \left(\frac{100}{r} \right)^2 e^{-\mu(r-r_1)} \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$$

A potência absorvida em uma capa esférica de material de raios r_1 e r_2 cm com respeito ao centro do alvo é:

$$W_a = \int_{r_1}^{r_2} \bar{I}'_r \mu_a 4\pi r^2 dr \text{ watt}$$

sendo:

μ_a = coeficiente linear de absorção (cm⁻¹)

A potência absorvida é dissipada logo como calor ou consumida em produzir mudanças estruturais permanentes no material irradiado.

Resolvendo a integral tem-se:

$$W_a = 4\pi \bar{I}_0 10^4 \mu_a \int_{r_1}^{r_2} e^{-(r-r_1)\mu} dr \text{ watt.}$$

$$W_a = 4\pi \bar{I}_0 \frac{\mu_a}{\mu} 10^4 (1 - e^{-\mu \Delta r}) \text{ watt.}$$

donde:

$$\Delta r = r_2 - r_1 \text{ cm}$$

A potência W_t transmitida através da superfície $4\pi r_2^2$ será:

$$W_t = 4\pi r_2^2 \bar{I}_0 e^{-\mu \Delta r} \frac{10^4}{r_2^2} \text{ watt.}$$

Por outra parte, a potência W_i incidente sobre $4\pi r_1^2$ vale:

$$W_i = 4\pi r_1^2 \bar{I}_0 \frac{10^4}{r_1^2} \text{ watt.}$$

Portanto, a potência W_s dispersada ou "irradiada" pela capa esférica é:

$$W_s = W_i - W_t - W_a = 4\pi \bar{I}_0 10^4 \left[1 - e^{-\mu \Delta r} - \frac{\mu_a}{\mu} (1 - e^{-\mu \Delta r}) \right] \text{ watt.}$$

Daqui obtém-se:

$$\frac{W_s}{W_i} = (1 - e^{-\mu \Delta r}) \left(1 - \frac{\mu_a}{\mu} \right)$$

Por experiência sabe-se que a maior contribuição na potência retrodispersada por um refletor de concreto, provem dos 10 primeiros cm de espessura.

Para $\Delta r = 10\text{cm}$ e $E = 1\text{MeV}$, sendo:

$$\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu = 0,15 \text{ cm}^{-1}; e^{-\mu \Delta r} = 0,22$$

$$\mu_a = 0,0705 \text{ cm}^{-1}$$

$$\frac{\mu_a}{\mu} = 0,47$$

Resulta:

$$W_s = 0,78 \times 0,53 W_i \cong 0,41 W_i \text{ watt.}$$

Para simplificar os cálculos subsequentes, supõe-se que esta potência é irradiada por uma fonte virtual colocada no centro de uma esfera de concreto de 10cm de raio.

O centro da esfera será localizado no "foco" da configuração refletora, e aceitar-se-á como energia da radiação secundária, o valor que obtém-se ao aplicar a fórmula de Compton para $\theta = 90^\circ$:

$$E_s = \frac{\bar{E}_0}{1 + \frac{E_0}{0,511} (1 - \cos \theta)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{0,511}} = 0,338 \text{ MeV}$$

O coeficiente mássico de atenuação em concreto para esta energia é:

$$\mu_{m_s} = 0,1 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$$

Para $\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$, o coeficiente linear de atenuação resulta:

$$\mu_s = 0,235 \text{ cm}^{-1}$$

A potência irradiada pela configuração refletora, quando esta envolve completamente o alvo será:

$$W_s = 0,41 W_i = 0,41 \cdot 4\pi \cdot \bar{I}_0 \cdot 10^4 \text{ watt.}$$

Isto equivale a 1m em ar, a uma intensidade de radiação secundária igual a:

$$I_{os} = \frac{0,41 \cdot 4\pi \cdot \bar{I}_o \cdot 10^4}{4\pi \cdot 10^4} = 0,41 \bar{I}_o \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$$

Como a fonte virtual está atenuada por 10cm de concreto, a intensidade útil a 1m resulta:

$$I'_{os} = 0,41 \bar{I}_o e^{-\mu_s 10} = 0,41 \bar{I}_o e^{-2,35} \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$$

$$I'_{os} = 0,039 \bar{I}_o \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$$

A potência do feixe de elétrons é:

$$W_e = 25 \times 10^{-3} \text{ A} \times 1,5 \times 10^6 \text{ V} = 37,5 \times 10^3 \text{ watt}$$

A eficiência de conversão da energia cinética dos elétrons em radiação eletromagnética, para alvos grossos, está dada pela fórmula de Koch & Motz:

$$\epsilon = \frac{\Delta T_r}{T_e} = \frac{1 - \ln [1 + 1,2 \times 10^{-3} T_e \cdot Z]}{1,2 \times 10^{-3} T_e \cdot Z}$$

sendo neste caso:

$T_e = 1,5 \text{ MeV}$ (energia cinética dos elétrons)

$Z = 74$ (n° atômico do tungstênio)

Portanto:

$$\epsilon = 0,06122 \equiv 6,12\%$$

A potência irradiada como raios X primários (radiação direta) será:

$$W_x = \frac{6,12 \times 37,5 \times 10^3}{100} = 2.300 \text{ watt.}$$

A intensidade média $\bar{I}_o$ a 1m do alvo, no ar, resulta:

$$\bar{I}_o = \frac{2.300}{4\pi 10^4} = 0,0183 \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$$

Em consequência, para um refletor envolvente de concreto de 10 cm de espessura e $\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$:

$$\bar{I}'_{os} \cong 0,04 \times 0,0183 = 0,00073 \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2} \text{ a 1 metro}$$

2.3.2. Parede do Corredor (F)

A configuração refletora está formada pelo piso, o teto e as paredes (C) e (D), na intersecção dos corredores da câmara de irradiação, e envolve aproximadamente 1/8 do ângulo sólido da radiação emitida pelo alvo de tungstênio.

Nestas condições, a intensidade de radiação secundária a 1m da fonte virtual será:

$$\bar{I}_{os}'' = \frac{1}{8} \bar{I}_{os}' = 0,00009 \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$$

A dose por minuto, a 1m resulta:

$$\dot{D}_{os} = 0,00009 \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{10^7 \text{ erg}}{\text{s. watt}} \cdot \frac{1 \text{ rad}}{100 \text{ erg/g}} \cdot \frac{1 \text{ rem}}{\text{rad}} \cdot \left(\frac{\mu_{as}}{\rho}\right) \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \times \frac{60\text{s}}{\text{min}}$$

$$\dot{D}_{os} = 540 \frac{\mu_{as}}{\rho} \frac{\text{rem}}{\text{min}}$$

Para $\bar{E}_\gamma = 0,338 \text{ MeV}$,

$$\left(\frac{\mu_{as}}{\rho}\right)_{\text{água}} \cong 0,03 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$$

em consequência:

$$\dot{D}_{os} \cong 16 \frac{\text{R}}{\text{min}} \text{ a } 1\text{m}$$

Supondo uma distância de 7m, entre a fonte virtual e a área ocupada (corredor interno da planta), a dose através de uma espessura x cm de concreto será:

$$\dot{D}_s = \frac{1}{7^2} \cdot \dot{D}_{os}' \cdot e^{-\mu_s x} B(\mu x) \frac{\text{rem}}{\text{min}}$$

Para $\bar{E} = 0,338 \text{ MeV}$ e $\rho = 2,35$, $\mu_s = 0,22 \text{ cm}^{-1}$. Se $x = 70 \text{ cm}$:

$$\mu_s x = 15,4 \therefore B \cong 125; e^{-\mu_s x} \cong 1,6 \times 10^{-7}$$

$$\dot{D}_s = \frac{16 \times 1,6 \times 10^{-7} \times 125}{49} \cong 6,5 \times 10^{-6} \frac{\text{rem}}{\text{min}}$$

$$6,5 \times 10^{-6} \frac{\text{rem}}{\text{min}} = 0,39 \frac{\text{m rem}}{\text{h}} < 2,5 \frac{\text{m rem}}{\text{h}}$$

Portanto, para a parede (F):

$$\rho x \approx 165 \text{ g/cm}^2; x \equiv 70 \text{ cm } (\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3)$$

2.3.3 Parede (D') oposta ao refletor

Como esta parede terá 127cm de espessura como mínimo, a contribuição da radiação secundária na dose na superfície exterior será totalmente desprezível, pois com relação ao caso anterior tem-se:

- maior distância entre a fonte virtual e área ocupada ($\sim 13 \text{ m}$);
- menor energia média da radiação secundária ($\theta \cong 180^\circ$).

2.3.4 Parede Frontal (B) da Sala de Controle

Neste caso a estrutura refletora estará formada pela parede (C), o piso e o teto, ao redor do difusor do acelerador.

Isto equivale a 1m em ar, a uma intensidade de radiação secundária igual a:

$$I_{os} = \frac{0,41 \cdot 4\pi \cdot \bar{I}_o \cdot 10^4}{4\pi \cdot 10^4} = 0,41 \bar{I}_o \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$$

Como a fonte virtual está atenuada por 10cm de concreto, a intensidade útil a 1m resulta:

$$I'_{os} = 0,41 \bar{I}_o e^{-\mu_s 10} = 0,41 \bar{I}_o e^{-2,35} \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$$

$$I'_{os} = 0,039 \bar{I}_o \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$$

A potência do feixe de elétrons é:

$$W_e = 25 \times 10^{-3} \text{ A} \times 1,5 \times 10^6 \text{ V} = 37,5 \times 10^3 \text{ watt}$$

A eficiência de conversão da energia cinética dos elétrons em radiação eletromagnética, para alvos grossos, está dada pela fórmula de Koch & Motz:

$$\epsilon = \frac{\Delta T_r}{T_e} = \frac{1 - \ln \left[1 + 1,2 \times 10^{-3} T_e \cdot Z \right]}{1,2 \times 10^{-3} T_e \cdot Z}$$

sendo neste caso:

$T_e = 1,5 \text{ MeV}$ (energia cinética dos elétrons)

$Z = 74$ (nº atômico do tungstênio)

Portanto:

$$\epsilon = 0,06122 \cong 6,12\%$$

A potência irradiada como raios X primários (radiação direta) será:

$$W_x = \frac{6,12 \times 37,5 \times 10^3}{100} = 2.300 \text{ watt.}$$

A intensidade média $\bar{I}_o$ a 1m do alvo, no ar, resulta:

$$\bar{I}_o = \frac{2.300}{4\pi 10^4} = 0,0183 \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$$

Em consequência, para um refletor envolvente de concreto de 10 cm de espessura e $\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$:

$$\bar{I}'_{os} \cong 0,04 \times 0,0183 = 0,00073 \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2} \text{ a 1 metro}$$

2.3.2. Parede do Corredor (F)

A configuração refletora está formada pelo piso, o teto e as paredes (C) e (D), na intersecção dos corredores da câmara de irradiação, e envolve aproximadamente 1/8 do ângulo sólido da radiação emitida pelo alvo de tungstênio.

Nestas condições, a intensidade de radiação secundária a 1m da fonte virtual será:

$$\bar{I}_{os}'' = \frac{1}{8} \bar{I}_{os}' = 0,00009 \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$$

A dose por minuto, a 1m resulta:

$$\begin{aligned} \dot{D}_{os} &= 0,00009 \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{10^7 \text{ erg}}{\text{s. watt}} \cdot \frac{1 \text{ rad}}{100 \text{ erg/g}} \cdot \frac{1 \text{ rem}}{\text{rad}} \cdot \left(\frac{\mu_{as}}{\rho}\right) \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \times \frac{60\text{s}}{\text{min}} \\ \dot{D}_{os} &= 540 \frac{\mu_{as}}{\rho} \frac{\text{rem}}{\text{min}} \end{aligned}$$

Para $\bar{E}_s = 0,338 \text{ MeV}$,

$$\left(\frac{\mu_{as}}{\rho}\right) \text{ água} \cong 0,03 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$$

em consequência:

$$\dot{D}_{os} \cong 16 \frac{\text{R}}{\text{min}} \text{ a } 1\text{m}$$

Supondo uma distância de 7m, entre a fonte virtual e a área ocupada (corredor interno da planta), a dose através de uma espessura x cm de concreto será:

$$\dot{D}_s = \frac{1}{7^2} \cdot \dot{D}_{os}' \cdot e^{-\mu_s x} B(\mu x) \frac{\text{rem}}{\text{min}}$$

Para $\bar{E} = 0,338 \text{ MeV}$ e $\rho = 2,35$, $\mu_s = 0,22 \text{ cm}^{-1}$. Se $x = 70 \text{ cm}$:

$$\mu_s x = 15,4 \quad B \cong 125; \quad e^{-\mu_s x} \cong 1,6 \times 10^{-7}$$

$$\dot{D}_s = \frac{16 \times 1,6 \times 10^{-7} \times 125}{49} \cong 6,5 \times 10^{-6} \frac{\text{rem}}{\text{min}}$$

$$6,5 \times 10^{-6} \frac{\text{rem}}{\text{min}} = 0,39 \frac{\text{m rem}}{\text{h}} < 2,5 \frac{\text{m rem}}{\text{h}}$$

Portanto, para a parede (F):

$$\rho x = 165 \text{ g/cm}^2; \quad x \cong 70 \text{ cm} \quad (\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3)$$

2.3.3 Parede (D') oposta ao refletor

Como esta parede terá 127cm de espessura como mínimo, a contribuição da radiação secundária na dose na superfície exterior será totalmente desprezível, pois com relação ao caso anterior tem-se:

- maior distância entre a fonte virtual e área ocupada ($\sim 13 \text{ m}$);
- menor energia média da radiação secundária ($\theta \cong 180^\circ$).

2.3.4 Parede Frontal (B) da Sala de Controle

Neste caso a estrutura refletora estará formada pela parede (C), o piso e o teto, ao redor do difusor do acelerador.

Pode-se supor que sobre a configuração refletora incide 1/4 da potência emitida pelo alvo. Daqui:

$$\dot{D}_{os} = 32 \frac{\text{rem}}{\text{min}} \text{ a } 1\text{m}$$

A 2m de distância, sendo $x \cong 145\text{cm}$:

$$\dot{D}_s = \frac{32}{4} e^{-\mu_s x} \cdot B = 8 e^{-32} \cdot 10^3 \cong 10,4 \times 10^{-11} \frac{\text{rem}}{\text{min}}$$

$$10,4 \times 10^{-11} \frac{\text{rem}}{\text{min}} = 0,624 \times 10^{-5} \frac{\text{m rem}}{\text{h}} \ll 2,5 \frac{\text{m rem}}{\text{h}}$$

Portanto, pode-se desprezar a contribuição da radiação secundária na dose total na sala de controle.

O mesmo critério se aplica ao piso da câmara e ao teto.

2.3.5 Paredes Laterais (G) da Sala de Controle

Mantem-se a espessura de 70cm adotado para a parede (F) do corredor.

3.0.0. EQUIVALÊNCIA EM ATIVIDADE GAMA

3.1.0. ATIVIDADE MÉDIA EQUIVALENTE

Um curie de uma fonte gama de 1MeV, irradia aproximadamente $0,6 \times 10^{-2}$ watt de potência. Neste sentido, o alvo de tungstênio gerando raios X por bombardeio com elétrons de 1,5MeV e 25mA, equivaleria em média a uma atividade:

$$\bar{A} = \frac{W_x}{0,6 \times 10^{-2}} \text{ curie}$$

donde:

W_x = potência emitida como raios X pelo alvo (watt). Neste caso:

$W_x = 2.300$ watt; logo:

$$\bar{A} = \frac{2.300}{0,6 \times 10^{-2}} = 384.000\text{Ci} \quad (\bar{E} \cong 1 \text{ MeV})$$

(sem considerar auto-absorção no alvo).

3.2.0. ATIVIDADE EQUIVALENTE PARA $\alpha \approx 0^\circ$

A dose a 1m do alvo, para $\alpha = 0^\circ$ (Fig. 3):

$$\dot{D} \cong 130 \frac{\text{rem}}{\text{mA min}} \quad (\text{considerando auto-absorção})$$

Para 25mA:

$$\dot{D}_0 = 3.250 \frac{\text{rem}}{\text{h}} = 195.000 \frac{\text{rem}}{\text{h}} \text{ a } 1\text{m}$$

Como $1R \equiv 1 \text{ rem}$, a atividade equivalente será:

$$\bar{A} (0^\circ) = \frac{195.000}{0,53} \cong 368.000 \text{Ci} \quad (\bar{E} \cong 1 \text{MeV})$$

3.3.0. ATIVIDADE EQUIVALENTE PARA $\alpha = 90^\circ$

Neste caso, a dose devida aos raios X, é somente 37% da dose frontal (para $\alpha = 0^\circ$).

Consequentemente, a atividade equivalente resultará:

$$\bar{A} (90^\circ) = 0,37 \times 368.000 = 136.000 \text{Ci} \quad (\bar{E} \cong 1 \text{MeV})$$

3.4.0. ATIVIDADE EQUIVALENTE PARA $\alpha = 180^\circ$

A dose a 180° , é aproximadamente 26% com relação a dose frontal.

$$\bar{A} (180^\circ) = 0,26 \times 368.000 = 95.500 \text{Ci} \quad (\bar{E} \cong 1 \text{MeV})$$

Nota: - Em termos de Co^{60} , as atividades equivalentes seriam aproximadamente a metade dos valores acima calculados, pois o Co^{60} emite 2 fotons de $\sim 1 \text{MeV}$ por desintegração.

ABSTRACT

This report contains a preliminary description on the project of an irradiation vault intended to hold an industrial electron accelerator "Dynamitron" of 1.5 MeV and 25 mA, recently acquired by the Atomic Energy Institute (IEA) of São Paulo, Brazil.

The facility was projected as to permit both the execution of different irradiation processes already established, the research and development of new ones, and the treatment of materials with various shapes and sizes.

The method adopted for calculating the vault shielding, under the assumption that accelerator will be used to deliberately produce X-rays for having available in this way a high intensity source of electromagnetic radiation, is also described.

REFERÊNCIAS

- 1) - NCRP Report nº 34 "Medical X-Ray and Gamma-Ray Protection for energies up to 10MeV Structural Shielding design and Evaluation".
- 2) - W. W. Buechner, R. V. Van de Graaff, E. A. Burnill and A. Superduto "Thick - Target X-Ray Production in the Range from 1250 to 2350 kV Phys. Rev. Vol. 74, nº10, Nov. 15, 1948.
- 3) - The Radiochemical Manual, Second Ed, 1966, The Radiochemical Centre, Amersham.