



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**Projeto estrutural de uma construção enterrada tipo bunker, destinada à instalação  
de equipamento acelerador linear de elétrons**

**PATRICIA DE ALMEIDA**

Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Mestre em Ciências na Área  
de Tecnologia Nuclear - Aplicações

Orientador:  
**Prof. Dr. Carlos Alberto Zeituni**

São Paulo  
**2018**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**Projeto estrutural de uma construção enterrada tipo bunker, destinada à instalação  
de equipamento acelerador linear de elétrons**

**PATRICIA DE ALMEIDA**

Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Mestre em Ciências na Área  
de Tecnologia Nuclear - Aplicações

Orientador:  
**Prof. Dr. Carlos Alberto Zeituni**

**Versão Corrigida**  
Versão Original disponível no IPEN

**São Paulo**  
**2018**

Ao meu marido, por toda ajuda com seus conhecimentos.  
Aos meus filhos, pelas incessantes palavras de incentivo.  
A minha mãe pelos seus esforços para me dar a melhor educação.  
Ao meu padrasto que me ilumina com amor pela engenharia civil.  
As minhas irmãs, pelo apoio para vencer mais esta etapa.  
Ao meu orientador pelos ensinamentos e bom humor.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Zeituni, por toda a experiência transmitida tanto na área de tecnologia nuclear, como de conhecimentos das legislações e práticas no mercado da construção de instalações de radioterapia. Agradeço o incentivo e por acreditar em meus conhecimentos e potencial.

Ao IPEN a oportunidade de fazer esta pós-graduação, extensivo a todos os funcionários que vivenciaram esta rotina, desde o início.

Aos professores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN e da Escola Politécnica da USP, que propiciaram todo o amadurecimento e conhecimento para que o trabalho pudesse vir a ser finalizado com êxito.

Aos participantes da banca examinadora, pelas importantes contribuições.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Ao meu marido, filhos, mãe, padrasto, irmãs e colegas de trabalho pelo incentivo, apoio e conhecimentos.

## RESUMO

ALMEIDA, Patricia. *Projeto estrutural de uma construção enterrada tipo bunker, destinada à instalação de equipamento acelerador linear de elétrons.* 2018. 75 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

A radioterapia externa ocupa lugar de destaque nos tratamentos de câncer. As construções das salas que abrigam os aceleradores lineares são custosas e este fator é limitante para que sejam instalados mais equipamentos. Faz-se necessária a pesquisa de opções construtivas com objetivo de redução de custos, mantendo-se a estabilidade estrutural e a barreira de proteção radiológica. Para a blindagem destas instalações podem ser empregados diversos materiais para a atenuação de radiação. O concreto armado é empregado em muitas destas instalações, seja pelo seu custo ou a prática construtiva no Brasil, face ao notório conhecimento deste material e abundância de matéria prima. Foram elaborados dois projetos estruturais de *bunker* em concreto armado. O projeto denominado *bunker* enterrado foi concebido com estrutura localizada no subsolo e dimensionado levando-se em conta inclusive os esforços decorrentes do solo adjacente às paredes. Foi adotada blindagem de concreto no teto. As demais faces da construção tem atenuação de radiação por solo compactado. O projeto do *bunker* não enterrado considerou a geometria de um projeto padrão do Ministério da Saúde e o acesso é pelo pavimento térreo. Em função da espessura necessária de blindagem, foi projetada uma estrutura com dimensões que contemplam a barreira no teto e paredes. Os resultados obtidos neste estudo foram satisfatórios quanto aos dois modelos estruturais propostos, com vantagens e desvantagens. Foi mostrada a diferença de custos entre uma estrutura de edificação enterrada e outra não enterrada. A estrutura enterrada mostrou-se mais viável, pois aproveita o solo compactado adjacente para atenuação da radiação.

**Palavras-chave:** *bunker; estrutura; construção; enterrado; radioterapia.*

## ABSTRACT

ALMEIDA, Patricia. **STRUCTURAL DESIGN OF A BUNKER INTENDED FOR INSTALLATION OF A LINEAR ACCELERATOR OF ELETRONS.** 2018. 75 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

External radiotherapy occupies a prominent place in cancer treatments. The constructions of the rooms that shelter the linear accelerators are costly and this is a limiting factor to have more equipment installed. It is necessary to research construction options with the objective of reducing costs, maintaining the structural stability and the radiological protection barrier. For the shielding of these installations, various materials can be used for the attenuation of radiation. Reinforced concrete is used in many of these facilities, either for its cost or the constructive practice in Brazil, due to the know-how of this material and abundance of raw material. Two structural bunker structural projects were developed. The buried bunker project was designed with a structure located underground and dimensioned taking into account including the efforts from the soil adjacent to the walls. Concrete shield was used in the ceiling. The other faces of the construction have radiation attenuation by compacted soil. The not buried bunker project considered the geometry of a standard design of the Health Ministry and its access is by the ground floor. Due to the required thickness of shielding, a structure with dimensions that contemplate the barrier in the ceiling and walls was designed. The results obtained in this study were satisfactory, regarding the two proposed structural models, taking in consideration advantages and disadvantages. The difference in costs of a buried structure and not buried one was provided. The buried structure proved to be more viable, since it utilizes adjacent compacted soil to attenuate the radiation.

**Keywords:** *bunker; structure; construction; buried; radiotherapy*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro eletromagnético relacionando os diferentes comprimentos e frequências de ondas .....	3
Figura 2 – Tratamentos com uso de radioterapia: superficial e profundo .....	5
Figura 3 – Esquema de um acelerador linear de elétrons.....	6
Figura 4 – Interação dos elétrons incidentes com os elétrons mais externos: produção de calor .....	7
Figura 5 – Radiação de Freamento.....	8
Figura 6 - Distribuição de energia relativa aos fótons gerados da radiação de freamento, ou Bremsstrahlung em equipamento de radiodiagnóstico .....	9
Figura 7 – Radiação característica.....	10
Figura 8 – Esquema de um acelerador linear utilizado na radioterapia .....	10
Figura 9 - Acelerador Linear.....	11
Figura 10 - Sala de Controle .....	11
Figura 11 – Efeito fotoelétrico .....	13
Figura 12 – Efeito Compton .....	13
Figura 13 – Produção de pares.....	14
Figura 14 – Predominância das interações.....	15
Figura 15 – Processos integrados de interação .....	15
Figura 16 – Principais fatores da proteção radiológica .....	18
Figura 17 – Barreira primária e secundária.....	22
Figura 18 – Espessura de barreira primária como função da distância da fonte para concreto convencional, aço e chumbo para energia fixa de 6 MeV ....	32
Figura 19 – Espessura de barreira primária como função da energia da fonte para concreto comum, aço e chumbo .....	32
Figura 20 - <i>Layout</i> interno padrão (LIP) para <i>bunker</i> de acelerador linear-Planta .....	37
Figura 21 - <i>Layout</i> interno padrão (LIP) para <i>bunker</i> de acelerador linear-Cortes .....	37
Figura 22 – Foto aérea do local previsto para instalação do <i>bunker</i> enterrado e não enterrado.....	39
Figura 23 – Esquema típico de viga parede.....	42
Figura 24 – Muro de contenção com uso de contrafortes .....	43
Figura 25 – Imagem de muro de contenção com uso de contrafortes .....	44
Figura 26 – Imagens tridimensionais da estrutura do <i>bunker</i> enterrado .....	44

Figura 27 – Características de blocos de estacas e transferência de esforços .....	53
Figura 28 – Imagens tridimensionais da estrutura .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de radioterapia.....	4
Tabela 2 – Propriedades físicas de materiais utilizados em blindagem .....	24
Tabela 3 - Peso específico do compósito – concreto comum .....	25
Tabela 4 - Concretos Leves e Concretos Pesados .....	27
Tabela 5 – Níveis de referência e alturas entre níveis .....	41
Tabela 6 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal.....	45
Tabela 7 – Tabela dos cobrimentos adotados no projeto do <i>bunker</i> .....	46
Tabela 8 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto. ....	46
Tabela 9 – Características do concreto.....	46
Tabela 10 – Características do aço.....	47
Tabela 11 – Coeficientes de Ponderação de ações.....	48
Tabela 12 – Considerações e Carregamentos nas lajes do pavimento das escadas.....	49
Tabela 13 – Considerações e Carregamentos nas lajes do pavimento Cobertura <i>Bunker</i> .....	49
Tabela 14 – Considerações e Carregamentos nas lajes do pavimento Cobertura ...	49
Tabela 15 – Níveis de referência e alturas entre níveis .....	51
Tabela 16 – Dimensões das seções dos pilares .....	53
Tabela 17 – Tabela dos cobrimentos adotados no projeto do <i>bunker</i> .....	54
Tabela 18 – Considerações e Carregamentos nas lajes do pavimento das escadas.....	55
Tabela 19 – Parâmetros adotados para consideração do vento .....	56
Tabela 20 – Forças estáticas aplicadas nos pavimentos da estrutura devido ao vento .....	56
Tabela 21 – Análise dos projetos de bunker enterrado e não enterrado.....	57
Tabela 22 – Custo da estrutura – <i>bunker</i> enterrado e não enterrado .....	58

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	METODOLOGIA UTILIZADA.....	2
2.1	Pesquisa no local.....	2
2.2	Pesquisa bibliográfica.....	2
2.3	Cálculos estruturais .....	2
3	RADIOTERAPIA .....	3
4	ACELERADOR LINEAR .....	4
4.1	Princípio de Funcionamento .....	5
4.2	Interações dos elétrons acelerados com o alvo.....	7
4.3	Movimentação e operação do equipamento .....	10
5	RADIAÇÃO E SUA INTERAÇÃO COM A MATÉRIA.....	12
5.1	Efeito fotoelétrico .....	12
5.2	Efeito Compton .....	13
5.3	Produção de pares .....	14
5.4	Predominância de cada interação .....	14
6	PROTEÇÃO RADIOLÓGICA.....	16
6.1	Princípios .....	16
6.2	Métodos de redução de exposição às radiações .....	17
6.3	Classificação das áreas de trabalho .....	19
6.4	Normatização e aspectos legais .....	19
7	BLINDAGEM NA INSTALAÇÃO DE UM <i>BUNKER</i> .....	20
7.1	Aspectos do Projeto Preliminar.....	20
7.2	Classificação da blindagem com relação ao posicionamento das paredes .....	21
7.3	Materiais utilizados como blindagem .....	22
8	CONCRETO SIMPLES.....	25
8.1	Elementos constituintes .....	25

8.2 Fatores que influenciam na qualidade do concreto: .....	28
<b>9 CONCRETO ARMADO.....</b>	<b>28</b>
9.1 Viabilidade no uso deste material .....	28
9.2 Vantagens como material estrutural .....	29
9.3 Restrições como material estrutural .....	30
9.4 Providências a serem tomadas como material estrutural .....	30
9.5 Propriedades e Características do concreto .....	30
9.6 Propriedades Radioativas.....	31
<b>10 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL .....</b>	<b>33</b>
10.1 Concepção estrutural .....	33
10.2 Estruturas de edificações .....	33
10.3 Estados Limites.....	34
<b>11 PROJETOS DO BUNKER – ASPECTOS COMUNS NOS DOIS PROJETOS ..</b>	<b>36</b>
11.1 Considerações prévias de projeto.....	38
11.2 Locação da Planta.....	38
<b>12 PROJETO DO <i>BUNKER</i> ENTERRADO .....</b>	<b>39</b>
12.1 Projeto preliminar de arquitetura .....	39
12.2 Projeto de estrutura – Especificações Técnicas.....	39
<b>13 PROJETO DO <i>BUNKER</i> NÃO ENTERRADO .....</b>	<b>50</b>
13.1 Projeto preliminar de arquitetura .....	50
13.2 Projeto de estrutura – Especificações Técnicas.....	50
<b>14 CONCLUSÕES.....</b>	<b>57</b>
<b>15 SUGESTÕES PARA OUTROS TRABALHOS.....</b>	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO A – PROJETOS: Plantas e Cortes .....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO B – QUANTITATIVOS DE MATERIAIS E SERVIÇOS.....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO C – Planilhas de Custo .....</b>	<b>74</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Segundo a *International Agency for Research on Cancer* (IARC), a estimativa mundial realizada em 2012 apontou que, dos 14 milhões<sup>1</sup> de casos novos estimados de câncer, mais de 60% ocorreram em países em desenvolvimento. Com base no relatório 2014 da IARC, é inquestionável que o câncer é um problema de saúde pública, especialmente entre os países em desenvolvimento, onde é esperado que, nas próximas décadas, o impacto do câncer na população corresponda a 80% dos mais de 20 milhões de casos novos estimados para 2025.

[1]

A radioterapia é essencial no conjunto de tratamentos de Alta Complexidade de neoplasias malignas. Este tratamento é utilizado em até 70% dos casos. Muitas dificuldades geram a incapacidade de oferecer aos pacientes este tratamento. Entre as dificuldades temos: burocracia dos órgãos governamentais; carência de pessoal técnico, médico e físico especializado; baixa remuneração dos procedimentos realizados; não reconhecimento de procedimentos mais atuais pelo Governo Federal ou Agencia Nacional de Saúde e o alto custo de implantação destes equipamentos. [2]

A portaria 3535/GM/MS, no final do seu anexo II, recomenda a implantação de um equipamento de radioterapia para cada 500 novos casos anuais. Assim sendo, é desejável um razoável número de novas máquinas, ou seja: de 366 no ano 2001 para 686 em 2020. Considerando os atuais serviços de radioterapia no Brasil, aproximadamente 140, segundo o Relatório Radioterapia – 2000, da Associação Brasileira de Física Médica (ABFM), têm-se atualmente 1,2 máquinas/milhão de habitantes. Ressalte-se ainda que nos EUA este número atinge 12 máquinas/milhão de habitantes (DIRAC 2000 – IAEA). [3]

Os avanços tecnológicos com relação às instalações destes equipamentos precisam acompanhar as disciplinas técnicas relacionadas a esta modalidade de tratamento e de proteção das pessoas.

Para atendimento as normas nacionais e internacionais, as instalações devem atender a dimensões recomendadas sob a ótica dos indivíduos ocupacionalmente expostos e do público, de forma que estes não fiquem expostos a valores de dose que ultrapassam as recomendações propostas de radioproteção.

---

<sup>1</sup> Exceto câncer de pele não melanoma.

Uma das formas de se reduzir a exposição às radiações é a utilização de barreiras de proteção. Em função das robustas construções hoje utilizadas no atendimento da proteção por blindagem, temos estruturas de custo significativo na tomada de decisões de instalação deste equipamento.

O trabalho desta pesquisa é um estudo de projeto estrutural para uma instalação do tipo *bunker* que se destina a abrigar um acelerador linear de elétrons para fins de pesquisa. Esta estrutura foi projetada para funcionar junto às novas construções do Centro Tecnológico das Radiações-CTR, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN. Foi feito um estudo comparativo entre uma opção construtiva enterrada e não enterrada para obter dados técnicos e de custo destas modelagens estruturais.

## **2 METODOLOGIA UTILIZADA**

### **2.1 Pesquisa no local**

Estudo e levantamentos geométricos no local escolhido, para locação e adequação a um sistema estrutural adequado.

### **2.2 Pesquisa bibliográfica**

Pesquisa teórica a normas, livros e outros trabalhos acadêmicos relacionados ao tema. Pesquisa de projetos estruturais realizados próximos ao local.

### **2.3 Cálculos estruturais**

Foram utilizados conhecimentos teóricos dentro das disciplinas de resistência dos materiais, sistemas estruturais e dimensionamento de concreto armado, para o cálculo de esforços atuantes e dimensionamento dos elementos resistentes. Os cálculos foram processados no programa de cálculo estrutural Eberick da AltoQi e planilhas de cálculo, com objetivo de obter valores de dimensionamento dos elementos, contemplando as normas técnicas vigentes.

### 3 RADIOTERAPIA

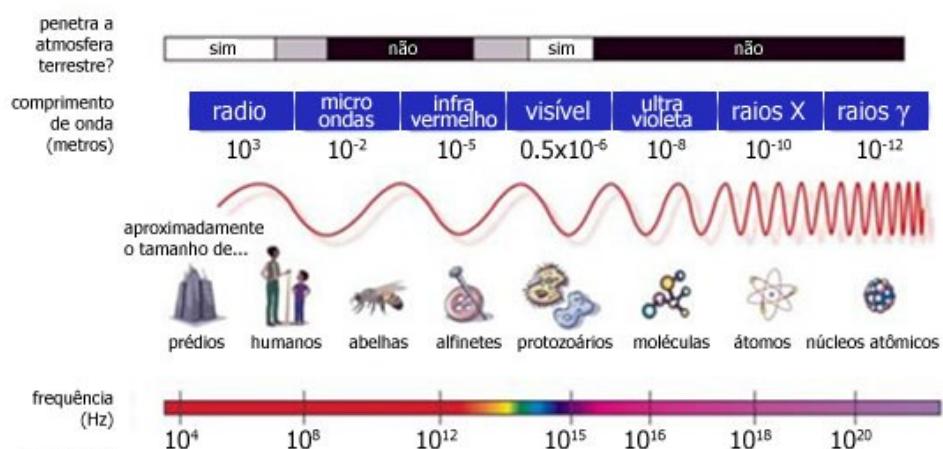
A radioterapia é a modalidade terapêutica que utiliza as radiações ionizantes no combate aos agentes neoplásicos com objetivo de atingir células malignas, impedindo sua multiplicação e/ou determinando a morte celular. [4]

Quando radiações corpusculares ou eletromagnéticas, interagindo em um meio, transferem aos elétrons do meio, energia suficiente para removê-los do átomo, ocorre um processo de ionização. São então denominadas radiações ionizantes. Dizemos que o elétron ejetado (-) e o átomo remanescente (+) formam um par de íons. [5]

As radiações ionizantes mostradas na Figura 1 possuem energia suficiente capaz de ionizar átomos e moléculas. Estas radiações têm frequência superior à da luz visível e menor comprimento de onda, mas transportam mais energia e são fornecidas por radioisótopos, ou através de aceleradores lineares. [6]

Figura 1 - Espectro eletromagnético relacionando os diferentes comprimentos e frequências de ondas

### O Espectro Eletromagnético



Fonte: [http://men5185.ced.ufsc.br/trabalhos/63\\_lampadas/incand/funciona03.htm](http://men5185.ced.ufsc.br/trabalhos/63_lampadas/incand/funciona03.htm)

A partir da década de 40, com a publicação de vários resultados de observações clínicas, relacionando o efeito das radiações sobre os tecidos e com os progressos da física e da engenharia nuclear, desenvolveram-se materiais radioativos e, especialmente, equipamentos cada vez mais complexos para a emissão de radiações de forma controlada. [3]

As radiações ionizantes podem ser obtidas através de elementos radioativos sintéticos ou naturais e através de aparelhos que convertem outras formas de energia (geralmente energia elétrica) em radiação ionizante. [7]

Os tipos de radioterapia utilizados estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Tipos de radioterapia em relação ao posicionamento da fonte radioativa

TIPOS DE RADIOTERAPIA	DEFINIÇÃO	
Radioterapia externa (Teleterapia)	A fonte de radiação localiza-se externamente ao local a irradiar, através de radioisótopos ou de aceleradores nucleares	
Radioterapia interna (Braquiterapia)	<b>Radioterapia intersticial</b>	Através de implantes radioativos intersticiais temporários (ex. tumores da mama, vagina, períneo e de cabeça e pescoço)
	<b>Radioterapia intracavitária</b>	A fonte radioativa é colocada em cavidades anatómicas através de aplicadores (ex. útero e vagina)
	<b>Radioterapia metabólica (braquiterapia com fontes de radiação não seladas)</b>	A fonte de radiação é administrada através soluções ou cápsulas (ex. tratamento da tiroide através de isótopo $^{131}\text{Iodo}$ )

Fonte: <http://www.interacoes-ismt.com/index.php/revista/article/view/334/346>

De acordo com a localização do tumor, a radioterapia é feita por Teleterapia ou Radioterapia Externa e por Braquiterapia ou Radioterapia de Contato. [4]

#### 4 ACELERADOR LINEAR

O acelerador linear é um dispositivo utilizado no serviço de radioterapia externa e tem como função emitir a radiação utilizada em diversos tratamentos. As radiações emitidas por ele são os raios X de alta energia ou elétrons acelerados (partículas beta) e ambos são provenientes do processo de conversão de energia elétrica em energia magnética. [8]

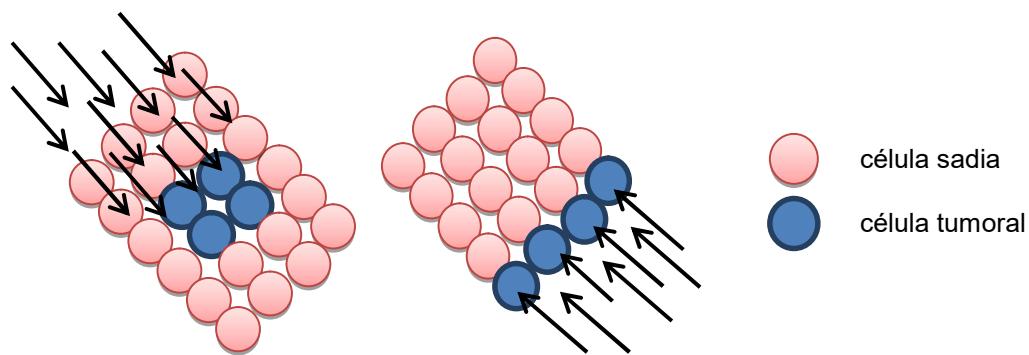
Os aceleradores lineares, equipamentos de alta complexidade, constituem atualmente a tecnologia mais avançada para aplicação em radioterapia.

Por meio dessa tecnologia é possível irradiar tecidos ou órgãos neoplásicos com precisão, tanto na localização quanto na intensidade do feixe, de forma que os tecidos sadios em sua volta possam ser preservados. [6]

A radiação X é produzida quando elétrons rápidos se chocam com a eletrosfera de um átomo (alvo). A energia cinética desse elétron é transformada em energia eletromagnética. A origem dessa energia é extranuclear. [4]

Os raios X são ondas eletromagnéticas que tem um grande poder de penetração em tecidos humanos. Os elétrons são radiações corpusculares, possuem um menor poder de penetração com relação aos raios X e são geralmente indicados para tratamentos superficiais, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Tratamentos com uso de radioterapia: superficial e profundo



Fonte: Autor da tese/dissertação

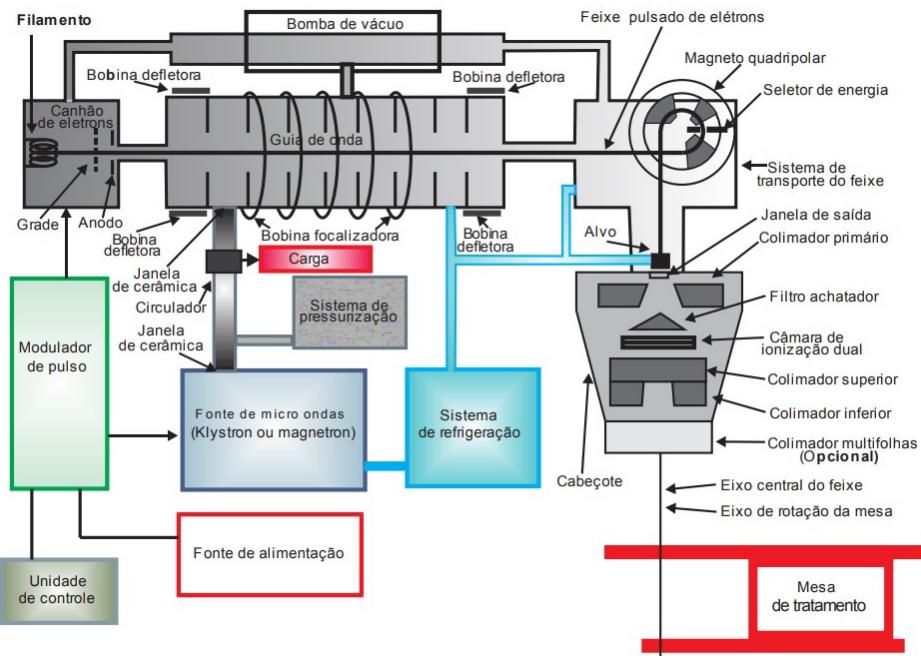
#### 4.1 Princípio de Funcionamento

A ideia fundamental na geração da alta energia para radioterapia é acelerar elétrons com energia correspondente a milhares de elétrons-volt antes de colidir com um alvo. Para acelerar elétrons, estes são sujeitos a um campo elétrico enquanto viajam através de uma estrutura constituída por anéis metálicos (eletrodos) ligados a uma fonte de RF (radiofrequência). Conforme pode ser visto na Figura 3, o dispositivo possui um catodo incandescente (filamento) que gera o fluxo de elétrons de alta energia. Este processo inicial é chamado de emissão termiônica.

As dimensões dos eletrodos, a distância entre eles e o valor da frequência de RF são calculados de forma que as partículas sofram uma aceleração enquanto estiverem entre os eletrodos. [3]

Os elétrons acelerados por diferença de potencial atingem o ânodo ou placa. O ânodo é confeccionado, em geral, em tungstênio que suporta temperaturas que vão até 3340°C. Além disso, o tungstênio é usado porque possui um razoável valor de número atômico, o que é útil para o fornecimento de átomos para colisão com os elétrons vindos do catodo (filamento).

Figura 3 – Esquema de um acelerador linear de elétrons



Fonte: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/45/073/45073465.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073465.pdf)

Os elétrons são bruscamente freados ao atingirem o alvo, perdendo uma parte da energia adquirida durante a aceleração. O resultado das colisões e da frenagem é a energia transferida dos elétrons para os átomos do elemento alvo. [9]

Este alvo se aquece bruscamente, pois em torno de 99% da energia do feixe eletrônico, é dissipada nele. A brusca desaceleração de uma carga eletrônica gera a emissão de um pulso de radiação eletromagnética. [3]

Estes equipamentos devem atender dois requisitos importantes:

- produzir um feixe de propriedades dosimétricas e geométricas bem definidas;
- permitir dispositivos de ajuste do feixe e da mesa de tratamento do paciente, assegurando assim que o feixe de radiação intercepte o volume de tratamento com precisão.

## 4.2 Interações dos elétrons acelerados com o alvo

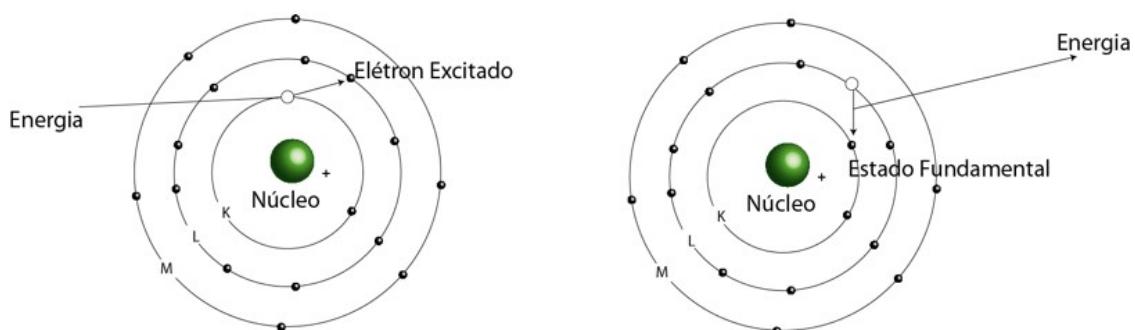
As formas de colisão do feixe eletrônico no alvo se dão em diferentes níveis energéticos devido às variações das colisões ocorridas. Como existem várias formas possíveis de colisão devido à angulação de trajetória, o elétron não chega a perder a totalidade da energia adquirida num único choque, ocorrendo então geração de um amplo espectro de radiação cuja gama de frequências é bastante larga, e com diversos comprimentos de onda. [9]

Essa conversão de energias depende em que parte do átomo do material o elétron vai interagir. Os elétrons acelerados em direção ao anodo podem interagir tanto com o núcleo dos seus átomos, como com os elétrons das suas diversas camadas orbitais. Na interação com o alvo (anodo) pode ocorrer produção de calor, radiação de freamento e radiação característica. [10]

### 4.2.1 Produção de Calor

Quando a interação ocorre com os elétrons mais externos das camadas orbitais, a energia cinética é convertida em radiação infravermelha, conforme ilustrado na Figura 4. A energia transferida excita os elétrons para um nível de energia mais elevado, porém imediatamente eles retornam a seus níveis normais de energia (estado fundamental) com liberação de radiação infravermelha. [10]

Figura 4 – Interação dos elétrons incidentes com os elétrons mais externos: produção de calor



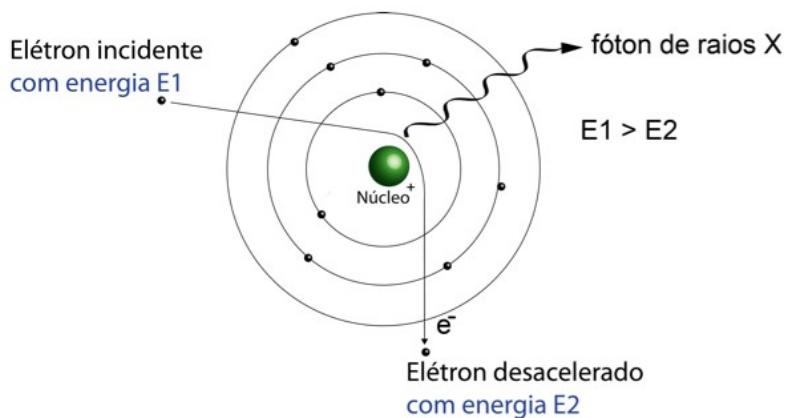
Fonte: <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologia-convencional/tecnologia-e-funcionamento-dos-equipamentosrx/tubo-de-raios-x/interacoes-no-anodo#produ%C3%A7%C3%A3o-de-calor>

### 4.2.2 Radiação de Freamento ("Bremsstrahlung")

A radiação de freamento é originalmente conhecida como "Bremsstrahlung", que se traduz como Bremsen=frear e Strahlung=radiação.

Quando partículas carregadas, principalmente elétrons, interagem com o campo elétrico de núcleos de número atômico elevado ou com a eletrosfera, elas reduzem a energia cinética, mudam de direção e emitem a diferença de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas, denominadas de raios X de freamento ou —bremsstrahlung, conforme mostrado na Figura 5. [11]

Figura 5 – Radiação de Freamento



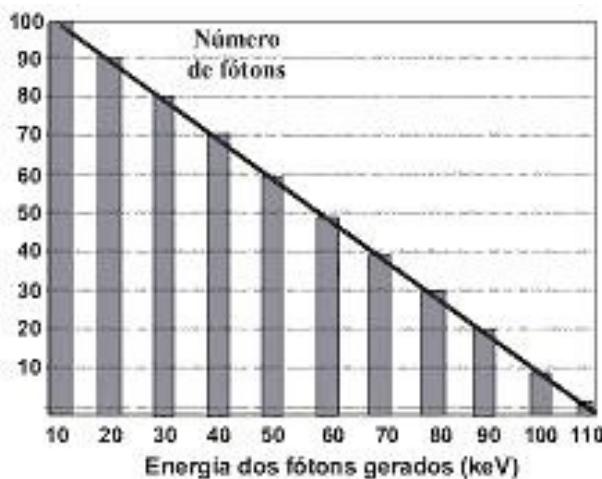
Fonte: <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologia-convencional/tecnologia-e-funcionamento-dos-equipamentosrx/tubo-de-raios-x/interacoes-no-anodo#raios-x-de-freamento>

A energia dos raios X de freamento depende fundamentalmente da energia da partícula incidente. Como o processo depende da energia e da intensidade de interação da partícula incidente com o núcleo e de seu ângulo de saída, a energia da radiação produzida pode variar de zero a um valor máximo, sendo contínuo seu espectro em energia. [11]

A energia de pico é a energia máxima que pode ser produzida, que é definida pela tensão selecionada no painel de controle.

A quantidade de energia cinética perdida depende da distância de interação do elétron com o núcleo do átomo. A força de atração aumenta com o inverso do quadrado da distância da interação, então para distâncias menores, a força de atração do elétron aumenta, causando uma mudança de trajetória e perda de energia maior, produzindo raios X de freamento com altas energias formando um espectro de emissão contínuo, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Distribuição de energia relativa aos fótons gerados da radiação de freamento, ou Bremsstrahlung em equipamento de radiodiagnóstico



Fonte: [http://www.tecnologiaradiologica.com/materia\\_fisica\\_rx.htm](http://www.tecnologiaradiologica.com/materia_fisica_rx.htm)

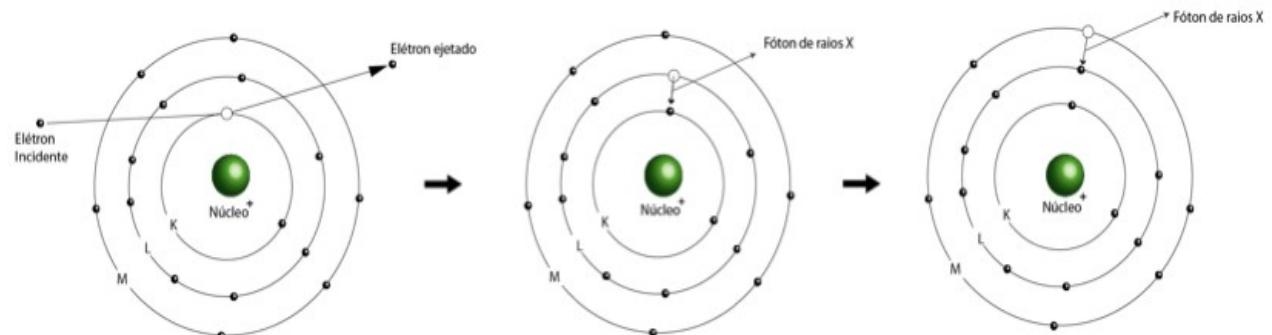
#### 4.2.3 Radiação característica

Na produção de radiação eletromagnética, são produzidos também raios X característicos, referentes ao material com o qual a radiação está interagindo (alvo ou anodo). Esses raios X característicos somam-se ao espectro de raios X de freamento. [11]

A radiação característica ocorre quando os elétrons em movimento chocam-se com elétrons da camada mais interna (camada K) dos átomos do alvo de tungstênio, conforme ilustrado na Figura 7, e os deslocam, provocando a sua ejeção para fora do átomo, com isso a camada de energia que este elétron ocupava fica vaga. Este átomo, agora ionizado, precisa se estabilizar. Para isto um elétron de uma camada mais externa migra para a lacuna da camada mais interna, liberando neste processo uma determinada e bem precisa quantidade de fótons na forma de raios X.

O fenômeno é chamado de radiação característica, já que essa energia das camadas é particular de cada elemento. Cada material emite um nível definido de radiação característica, dependendo de seu número atômico, como são os casos do tungstênio (radiologia convencional) que possui radiações características da ordem de 70 keV. [11]

Figura 7 – Radiação característica



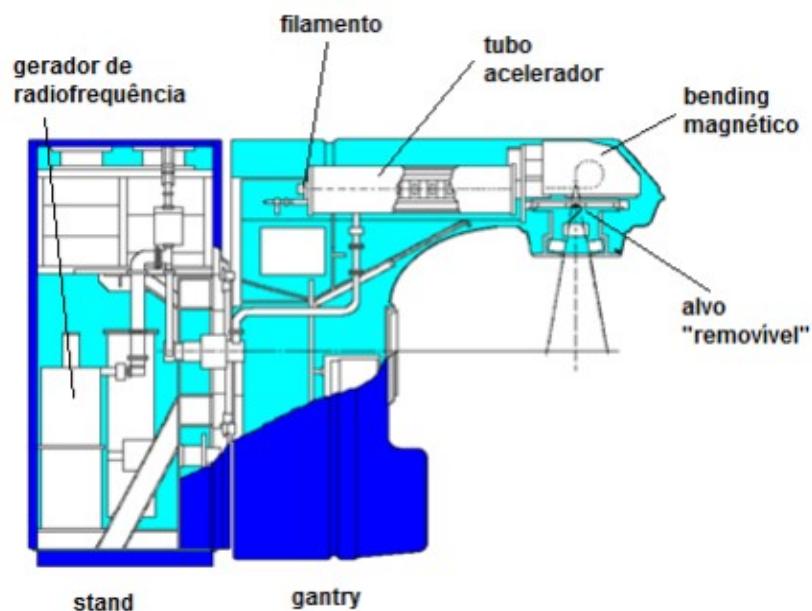
Fonte: <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologia-convencional/tecnologia-e-funcionamento-dos-equipamentosrx/tubo-de-raios-x/interacoes-no-anodo#raios-x-caracter%C3%ADsticos>

#### 4.3 Movimentação e operação do equipamento

A Figura 8 apresenta um esquema simplificado de acelerador linear utilizado nos tratamentos de radioterapia.

O equipamento mostrado na Figura 9 é um típico de acelerador de elétrons utilizado na radioterapia. O braço em forma de L movimenta-se ao redor do leito para direcionar o feixe de fótons em direção ao local escolhido para tratamento.

Figura 8 – Esquema de um acelerador linear utilizado na radioterapia



Fonte: <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/images/documentos/Radioterapia.pdf>

Figura 9 - Acelerador Linear



Fonte: <https://mastologia.wordpress.com/tag/acelerador-linear/> em 01/07/2017

A sala de controle é o local onde se localizam as estruturas responsáveis pelo controle do feixe de radiação gerado no LINAC. A Figura 10 apresenta uma ilustração de sala de controle.

Figura 10 - Sala de Controle



Fonte: <http://www.farodevigo.es/portada-ourense/2009/12/09/sergas-amplia-dependencias-hospital-dia-oncologico-centro-sanitario-ourense/393697.html>

## 5 RADIAÇÃO E SUA INTERAÇÃO COM A MATÉRIA

Quando uma radiação muito energética interage com a matéria, ela desencadeia um número grande de processos que envolvem a transferência de energia para outras partículas assim como a criação de outros tipos de partículas que, por sua vez, também vão interagir com a matéria [11].

As principais interações da radiação com a matéria ocorrem na forma de efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares.

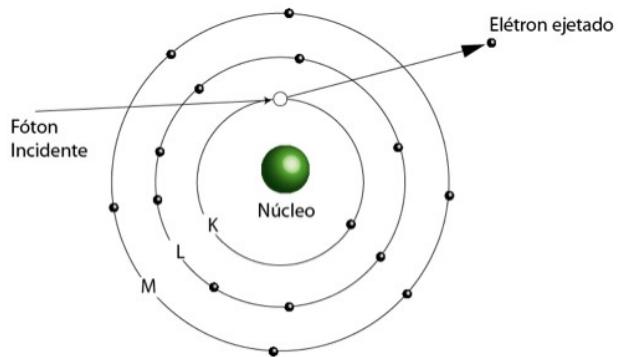
A ocorrência dos efeitos Fotoelétricos, Compton e Produção de Pares dependem da energia da radiação incidente e do número atômico do material que irá absorvê-la.

### 5.1 Efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico ocorre quando um fóton incide em elétron orbital, fortemente ligado ao núcleo atômico, conforme mostrado na Figura 11. Nesse caso, a energia será totalmente absorvida pelo elétron e o fóton deixará de existir. O elétron é ejetado do átomo, provocando ionização. Esse tipo de interação depende muito do número atômico do material. Se o átomo tiver número atômico alto terá mais elétrons fortemente ligados. Como a interação fotoelétrica ocorre com elétrons fortemente ligados, a probabilidade de ocorrer efeito fotoelétrico com núcleos de número atômico alto é muito maior. O fóton incidente é totalmente absorvido pelo elétron orbital, portanto o fóton deve, obrigatoriamente, ter energia maior do que a energia de ligação do elétron. As energias de ligação estão na faixa de poucos eV até algumas dezenas de keV, portanto é nessa faixa de energia que predomina o efeito fotoelétrico.

Se o fóton tiver energia acima de 1 MeV, a probabilidade de ocorrer efeito fotoelétrico já é muito pequena. Combinando os dois fatores, energia do fóton e número atômico do núcleo, haverá muito mais interações fotoelétricas para fótons de energia baixa incidindo em material de número atômico alto. [12]

Figura 11 – Efeito fotoelétrico



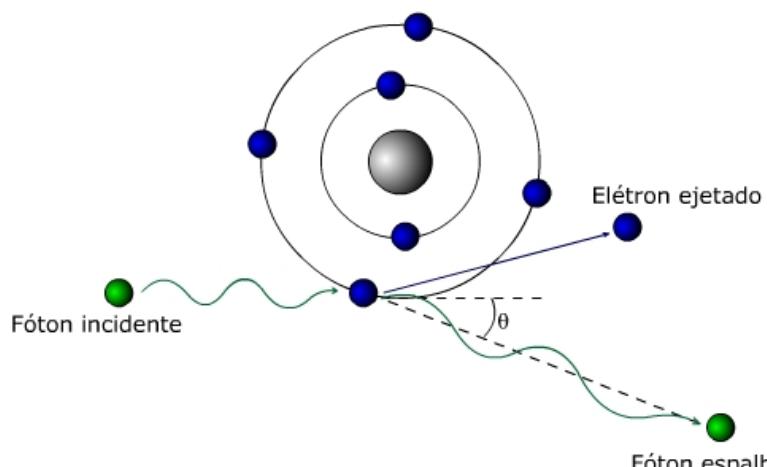
Fonte: <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologia-convencional/principios-fisicosrx/interacao-da-radiacao-ionizante-com-a-materia/efeito-photoeltrico/100-radioterapia>

## 5.2 Efeito Compton

Efeito Compton ou espalhamento ocorre quando um fóton interage com um elétron fracamente ligado ao núcleo do átomo. Nesse caso, o fóton perde uma fração de sua energia e muda sua trajetória original, conforme mostrado na Figura 12. O elétron é ejetado do átomo ao adquirir energia. Neste caso, também ocorre uma ionização.

A quantidade de elétrons fracamente ligados não depende muito do número atômico do material. Portanto, a probabilidade de ocorrer uma interação Compton não é muito dependente do número atômico do material em que incide a radiação. Em relação à energia, como qualquer fóton usado em Radioterapia tem energia relativamente alta, a probabilidade de interação também não depende muito da energia do fóton incidente. [10]

Figura 12 – Efeito Compton



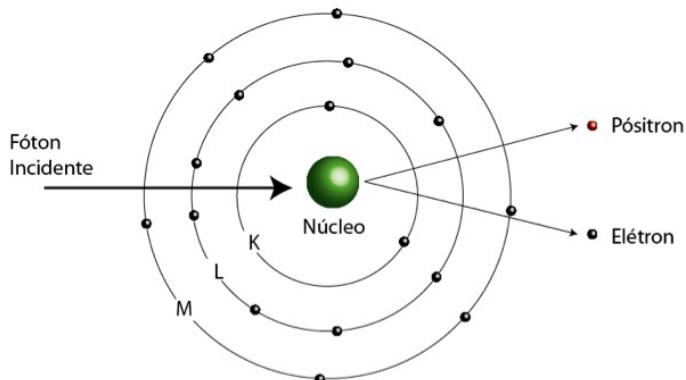
Fonte: <https://efeitofotoeletricoecompton.webnode.com.br/efeito-compton/>

### 5.3 Produção de pares

A Produção de Pares ocorre quando um fóton se aproxima bastante do núcleo atômico, conforme mostrado na Figura 13. Ao interagir com o campo nuclear, ocorrerá uma grande mudança que “transforma” a energia do fóton em massa, pela famosa relação  $E = mc^2$ . Quando o fóton sofre esse tipo de interação, aparecem duas partículas em seu lugar e ele desaparece. Essas partículas são um elétron de carga elétrica negativa e um pósitron. Esse elétron de carga positiva recebe o nome de pósitron. A massa de um elétron é equivalente a 511 keV. Como o pósitron é igual a um elétron, a exceção de sua carga elétrica, a energia necessária para produzir um par elétron-pósitron é igual a 1022 keV. [10]

Sendo assim, nenhum fóton com energia menor que esse limiar de 1022 keV poderá sofrer uma interação de produção de pares. Quanto maior a energia do fóton, maior a probabilidade de ocorrer esse tipo de interação. A energia excedente ao valor necessário para produzir as partículas será sua energia cinética após a interação. Como a interação depende do campo nuclear, quanto maior o número atômico, maior a probabilidade de interação.

Figura 13 – Produção de pares



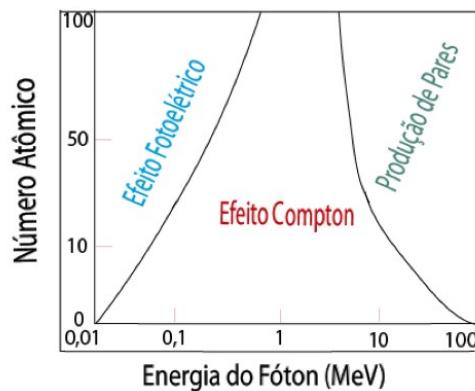
Fonte: <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologia-convencional/principios-fisicosrx/interacao-da-radiacao-ionizante-com-a-materia/efecto-fotoelétrico/100-radioterapia#produ%C3%A7%C3%A3o-de-pares>

### 5.4 Predominância de cada interação

A Figura 14 mostra que para energias baixas predomina o efeito fotoelétrico, especialmente se o número atômico do material for alto. Conforme a energia do fóton aumenta, o efeito fotoelétrico passa a ser cada vez menos

importante, especialmente para número atômico baixo. Começa, assim, a ser importante o efeito Compton, já que a produção de pares ainda é impossível. A produção de pares começa a ser importante a partir de 5 MeV, principalmente se o número atômico for alto. [10]

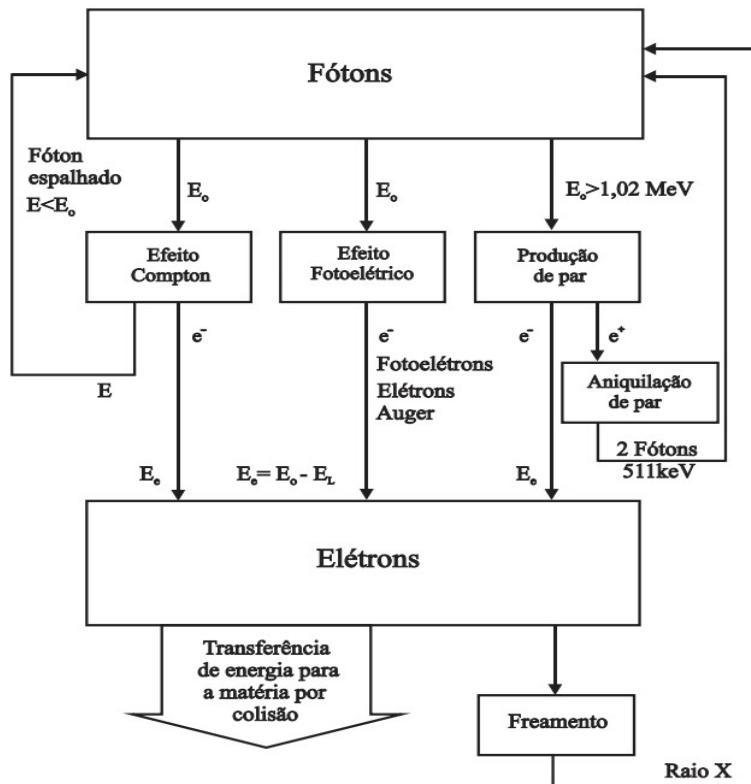
Figura 14 – Predominância das interações



Fonte: <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologia-convencional/principios-fisicosrx/interacao-da-radiacao-ionizante-com-a-materia/efeito-fotoeletrico/100-radioterapia#predominancia-de-cada-interacao>

A Figura 15 ilustra processos integrados de interação das radiações com a matéria.

Figura 15 – Processos integrados de interação



Fonte: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/45/073/45073465.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073465.pdf)

## 6 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

A Proteção Radiológica ou Radioproteção pode ser definida como um conjunto de medidas que visam proteger o homem e o ecossistema de possíveis efeitos indesejáveis causados pelas radiações ionizantes. [11]

### 6.1 Princípios

#### 6.1.1 Justificação

Os objetivos da proteção contra as radiações são a prevenção ou a diminuição dos seus efeitos somáticos, ou seja, aqueles que produzem danos nas células do corpo, e a redução da deterioração genética dos povos, onde o problema das exposições crônicas adquire importância fundamental. [11]

Considera-se que a dose acumulada num período de vários anos seja o fator preponderante, mesmo que as doses intermitentes recebidas durante esse período sejam pequenas. As doses resultantes da radiação natural e dos tratamentos médicos com raios X, não são consideradas nas doses acumuladas.

Em suma, nenhuma prática deve ser autorizada a menos que produza suficiente benefício para o indivíduo exposto ou para a sociedade. A exposição médica deve resultar em um benefício real para a saúde do indivíduo e/ou para a sociedade. Deve-se considerar a eficácia, os benefícios e riscos de técnicas alternativas disponíveis com o mesmo objetivo, mas que envolvam menos ou nenhuma exposição às radiações ionizantes. [13]

#### 6.1.2 Otimização

O princípio básico da proteção radiológica ocupacional estabelece que todas as exposições devem ser mantidas tão baixas quanto razoavelmente exequíveis, resumido com a palavra de origem na língua inglesa “ALARA” (*As Low As Reasonably Achievable*). [11]

Esta otimização, em termos quantitativos, pode ser realizada com base numa análise de custo-benefício.

### 6.1.3 Limitação da dose individual

As doses de radiação não devem ser superiores aos limites estabelecidos pelas normas de radioproteção de cada país. Esse princípio não se aplica para limitação de dose ao paciente, mas sim para trabalhadores ocupacionalmente expostos à radiação ionizante e para o público em geral. Incide sobre o indivíduo considerando todas as exposições decorrentes de todas as práticas que o indivíduo possa estar exposto.

Dessa forma, impõe-se que as doses individuais de Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOE) e de indivíduos do público não devem exceder os limites anuais de doses estabelecidos pelas normas de radioproteção. [13]

## 6.2 Métodos de redução de exposição às radiações

Os principais métodos adotados para redução de exposição às radiações levam em conta o tempo, distância e blindagem. [15]

### 6.2.1 Tempo

A dose acumulada por uma pessoa que trabalha numa área exposta a uma determinada taxa de dose é diretamente proporcional ao tempo em que ela permanece na área. Essa dose pode ser controlada pela limitação desse tempo.

$$\text{Dose} = \text{Taxa} \times \text{Tempo}$$

A redução do tempo de exposição à radiação representa a vantagem de dispensar proteções especiais e onerosas com relação às instalações, mas tem o aspecto limitador quanto ao tempo de uso do equipamento, podendo representar um prejuízo em termos práticos, na sua utilização.

### 6.2.2 Distância

Para uma fonte puntiforme, emitindo radiações em todas as direções, o fluxo, que é proporcional à taxa de dose numa determinada distância d da fonte, é inversamente proporcional ao quadrado dessa distância. [11]

A lei do inverso do quadrado é dada por:

$$I = 1 / d^2$$

Onde I = intensidade de radiação e d=distância da fonte emissora.

Note-se que duplicando a distância entre a fonte e o detector, reduz-se a taxa de dose a 1/4 de seu valor inicial. Dessa forma, o modo mais fácil de evitar exposição às radiações ionizantes é ficar longe da fonte.

Em suma, o aumento da distância entre os indivíduos e a fonte emissora de radiação pode ser utilizado sempre que o espaço disponibilizado ao projeto seja suficiente para garantir a proteção.

#### 6.2.3 Blindagem

As pessoas que trabalham com fontes ou geradores de radiação ionizante devem dispor de procedimentos técnicos bem elaborados de modo que o objetivo da tarefa seja concretizado e sua segurança esteja garantida contra exposições desnecessárias ou acidentais. Nesses procedimentos, os fatores tempo e distância em relação às fontes radioativas estão implícitos na habilidade e destreza de um técnico bem treinado para a tarefa. [11]

Em certas situações, principalmente quando se opera com fontes intensas ou níveis elevados de radiação, além de colimadores, aventais, labirintos e outros artefatos, é necessário introduzir outro fator de segurança: a blindagem. A escolha do material de blindagem depende do tipo de radiação, atividade da fonte e da taxa de dose que é aceitável fora do material de blindagem.

Um projeto que envolve a instalação de um equipamento emissor de radiações exige um projeto que considere a proteção às radiações ionizantes. Este projeto, além de considerar todos os esforços estáticos aplicados, deve acrescentar aspectos dimensionais, ambientais e econômicos para sua viabilidade e otimização.

A Figura 16 apresenta os três tópicos explicados anteriormente.

Figura 16 – Principais fatores da proteção radiológica



Fonte: <http://universoradiologico.blogspot.com.br/p/falacias-adiologicas.html>

### **6.3 Classificação das áreas de trabalho**

Para fins de gerenciamento da Proteção Radiológica numa instalação, as áreas de trabalho com material radioativo ou geradores de radiação, devem ser classificadas como Área Controlada, Área Supervisionada e Área Livre, definidas na norma CNEN-NN-3.01 [13].

#### **6.3.1 Área Controlada**

Área sujeita a regras especiais de proteção e segurança, com a finalidade de controlar as exposições normais, prevenir a disseminação de contaminação radioativa e prevenir ou limitar a amplitude das exposições potenciais. As áreas controladas devem ter controle restrito e estar sinalizadas com o símbolo internacional das radiações ionizantes. Os trabalhadores devem estar individualmente identificados e monitorados e, na maioria das vezes, portando equipamento de proteção individual (EPI). Para uma área ser considerada controlada, sob o ponto de vista radiológico, deve apresentar, em média, um nível de exposição maior que 3/10 do limite máximo permitido pela norma da CNEN.

#### **6.3.2 Área Supervisionada**

Área para a qual as condições de exposição ocupacional são mantidas sob supervisão, mesmo que medidas de proteção e segurança específicas não sejam normalmente necessárias. As áreas supervisionadas devem possuir monitores de área, controle de acesso e nível de exposição maior que 1 mSv/ano.

#### **6.3.3 Área Livre**

Área que não seja classificada como área controlada ou supervisionada. As áreas consideradas livres devem apresentar um nível de exposição menor do que 1 mSv/ano.

### **6.4 Normatização e aspectos legais**

O relatório NCRP-151 [14] emitido pelo *National Council on Radiation Protection and Measurements* apresenta recomendações e informações técnicas

relacionadas ao projeto e instalação de blindagem estrutural para instalações de radioterapia de Raios X de megavoltagem e raios Gama.

Todas as atividades que envolvam radiações devem ser monitoradas e licenciadas pelos organismos responsáveis: Comissão Nacional de Energia Nuclear-CNEN e Secretarias de Saúde Estaduais [16].

A aplicação dos regulamentos e Normas, no campo da radioproteção, constitui um pré-requisito para o uso de fontes de radiação. As autoridades competentes de cada país devem estabelecer as regras necessárias aplicáveis para as práticas, instalações, fontes e equipamentos de radiação, como também para profissionais, indivíduos do público e meio ambiente em função do grau de risco associado. [17]

No Brasil, as atividades de controle regulatório no uso e nas aplicações de fontes radioativas estão a cargo da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN. Compete à CNEN as atividades regulatórias das instalações nucleares, emissão de regulamentos técnicos relativos à proteção radiológica e segurança nuclear, fiscalização e autorização do funcionamento de instalações que utilizam produtos radioativos, controle do comércio desses produtos e armazenamento dos resíduos radioativos. [18]

## 7 BLINDAGEM NA INSTALAÇÃO DE UM BUNKER

### 7.1 Aspectos do Projeto Preliminar

A implementação de uma instalação que envolva emissões de radiações ou radioterapias é um processo que envolve uma equipe multidisciplinar de profissionais. A equipe responsável pelo projeto e construção desta instalação, de considerável complexidade, contempla diversos profissionais que contribuem ao sucesso do empreendimento desde sua concepção até o seu efetivo funcionamento.

Geralmente o grupo encarregado do projeto e construção é composto por: Contratante, Arquiteto, Médico, Físico, Engenheiro Civil, Engenheiro Eletricista, Engenheiro Mecânico, Construtor e o Representante de Venda dos Equipamentos. Para assegurar que o processo transcorra sem problemas é vital que a interação entre esses profissionais seja clara e permanente. [16]

## 7.2 Classificação da blindagem com relação ao posicionamento das paredes

Chamamos de blindagem ou barreira todo o material com capacidade de absorver ou atenuar um feixe de radiação que nela incide. Tratando-se de radiação corpuscular (alfa e beta, por exemplo), a blindagem provavelmente será capaz de absorver a totalidade das partículas, muito embora não impeça a radiação de freamento que poderá ser produzida.

Uma blindagem normalmente não é capaz de impedir totalmente a transmissão da radiação eletromagnética ionizante gama e raios X, mas apenas atenuá-la.

O grau de atenuação depende de vários fatores tais como: natureza do material que compõe a blindagem, geometria da medição a ser feita, a forma geométrica da fonte, a energia da radiação incidente e espessura da barreira. As barreiras de proteção ou blindagem são classificadas, para efeito de dimensionamento, em Barreira de Proteção Primária (BPP) e Barreira de Proteção Secundária (BPS). [19]

### 7.2.1 Barreira de Proteção Primária (BPP)

A barreira de proteção primária, posicionada entre a fonte e o indivíduo a ser protegido, tem a finalidade de atenuar o feixe útil.

### 7.2.2 Barreira de Proteção Secundária (BPS)

A barreira de proteção secundária, posicionada entre a fonte e o indivíduo a ser protegido, tem a finalidade de atenuar a radiação de fuga do equipamento e a radiação espalhada pelo paciente.

A figura 17 ilustra uma barreira de proteção primária (BPP) protegendo um indivíduo em A de um feixe útil de raio X oriundo da fonte localizada em F, a uma distância d, dada pela equação 1 e 2. [19]

A barreira de proteção secundária (BPS) protege um indivíduo em B da radiação de fuga do cérebro e espalhada pelo paciente de um feixe útil de raios X oriundo da fonte F a uma distância d' de B, dada pela equação 2. [19]

$$d = d_{fi} + d_{ia} \quad (1)$$

$$d' = d_{sec} \quad (2)$$

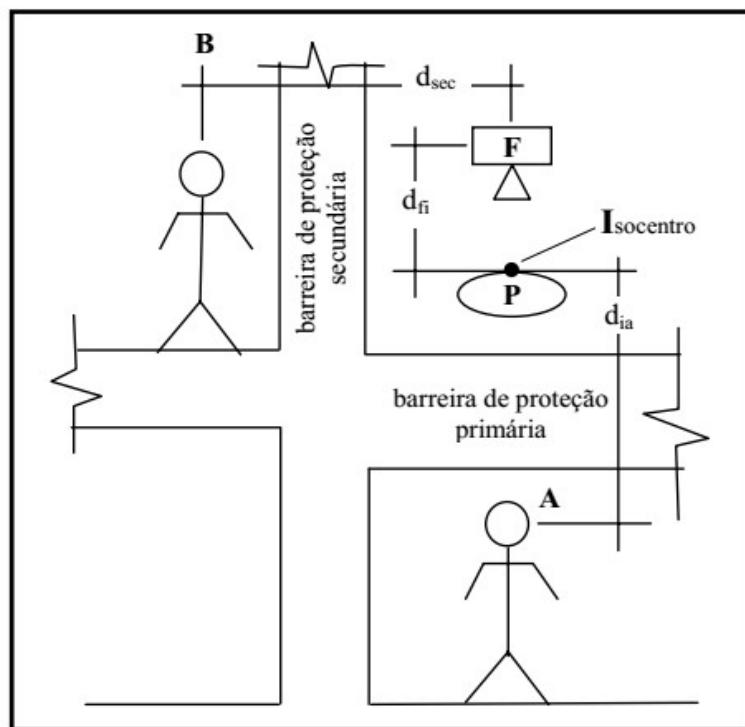
onde:

$d_{fi}$  =distância entre a fonte e o isocentro

$d_{ia}$ =distância entre isocentro e a superfície externa da barreira de proteção primária acrescida de 30 cm.

$d_{sec}$ =distância entre fonte e a superfície externa da barreira de proteção secundária acrescida de 30 cm.

Figura 17 – Barreira primária e secundária



Fonte: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2005/full/449.pdf>

O cabeçote do gerador de raios X gira em torno de um eixo, de modo que pode ser direcionado para duas paredes, piso e teto. Deste modo, as superfícies ortogonais ao feixe primário em função do posicionamento do equipamento funcionarão com BPP. As demais paredes da sala de radioterapia funcionarão como BPS.

### 7.3 Materiais utilizados como blindagem

Diversos materiais podem ser utilizados em blindagem, contanto que seja empregada uma espessura suficiente para atenuar a intensidade da radiação dentro de limites autorizados. As características principais dos materiais a serem consideradas levam em conta:

- Área (espaço físico) disponível para a instalação;
- Estudo de opções de blindagem para vários tipos de radiação;
- Espessura e peso próprio da barreira após definição dos materiais;
- Decisão de projeto para uso múltiplo (blindagem e estrutura portante);
- Cuidados executivos para uniformidade e homogeneidade com os materiais escolhidos;
- Características especiais no dimensionamento e comportamento estrutural;
- Custos da construção.

Entre os materiais mais utilizados como blindagem, pode-se citar:

#### 7.3.1 Concreto convencional ou comum, com lançamento manual ou bombeável

O concreto convencional, assim denominado por não possuir em sua composição, adições especiais do que é utilizado no dia a dia da construção civil, tem a vantagem do baixo custo e da facilidade de construção. A blindagem em concreto convencional é estimada com uma grande espessura, devido ao número atômico adotado neste compósito e densidade relativamente baixos. Este é o material adotado, quando espaço não é uma limitação.

A dosagem do concreto fresco ou não endurecido deve ser cuidadosa e os ensaios com corpos de prova normatizados devem assegurar a necessária densidade, resistência à compressão e à tração e propriedades elásticas. O controle de temperatura é essencial para evitar perda rápida de água [16].

#### 7.3.2 Concreto de alta densidade ou concreto pesado

O concreto de alta densidade, que utiliza agregados graúdos com massa específica maior que do utilizado concreto convencional, é usado quando o espaço disponível para o projeto é limitado. Entretanto, seu custo relativamente alto e a necessidade de curvas de atenuação normatizadas, contraindicam sua utilização como rotina. O uso da relação de densidades comparativas na correção do cálculo da barreira, superestima a espessura necessária. Caso seja indicado o uso do concreto de alta densidade, deve-se medir ou obter as curvas de atenuação para a energia empregada e usá-las na determinação das espessuras de blindagem [16].

Este material apresenta complexidade executiva com relação à garantia de homogeneidade do material, para confiabilidade em relação à densidade e atenuação projetada.

### 7.3.3 Aço

O aço de baixo teor de carbono apresenta características favoráveis de blindagem. Devido às características de resistência mecânica, pode também ser usado como elemento estrutural. Placas de aço podem ser usadas de forma complementar ao concreto, quando o espaço é limitado para a construção. É um material utilizado em marcos, contramarcos e portas, bem como no preenchimento de recessos nas paredes.

### 7.3.4 Chumbo

O uso deste material é aconselhado na blindagem das portas. Embora esse material seja de alta densidade ( $11340 \text{ kg/m}^3$ ), lençóis ou lâminas de chumbo são difíceis de manusear, possuem baixa resistência mecânica e representam parcela considerável no custo de projetos construtivos.

### 7.3.5 Terra compactada

É um material de baixo custo e pode ser usada em encostas, com diminuição da espessura necessária da barreira de concreto, desde que seja assegurado, que esta terra não seja removida. A atenuação oferecida pela terra depende da densidade e composição, que pode ser bastante variável de um local para outro.

A tabela 2 mostra algumas propriedades físicas dos materiais mais utilizados em blindagem. [16]

Tabela 2 – Propriedades físicas de materiais utilizados em blindagem

Material	Densidade ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Nº atômico	Custo relativo
Concreto comum	2,3 - 2,4	11	1,0
Concreto denso	3,0 - 4,8	26	5,8
Aço de baixo C	7,87	26	3,0
Chumbo	11,35	82	22
Terra (seca-compacta)	1,5	-	baixo

Fonte: Blindagem em Radioterapia - Instituto Nacional de Câncer-INCA

Com relação ao concreto comum, tratando-se de um material compósito, foi obtida no artigo publicado no *Physical Measurement Laboratory* (PML) [20], a distribuição dos elementos componentes principais do concreto, com percentagens individuais em peso. Por estes dados foi possível a montagem da Tabela 3, que evidencia uma confirmação do número atômico equivalente apresentado na Tabela 2.

Tabela 3 - Peso específico do compósito – concreto comum

CONCRETO COMUM			Dens=2,3 g/cm <sup>3</sup>
Z	Elemento	Composição Z: fração por peso	Z equivalente
1	H	0,02210	0,02
6	C	0,00248	0,01
8	O	0,57493	4,60
11	Na	0,01521	0,17
12	Mg	0,00127	0,02
13	Al	0,01995	0,26
14	Si	0,30463	4,26
19	K	0,01005	0,19
20	Ca	0,04295	0,86
26	Fe	0,00644	0,17
Total			<b>10,56</b>

Fonte: <https://www.physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tabc1.html>

## 8 CONCRETO SIMPLES

### 8.1 Elementos constituintes

O concreto simples ou hidráulico é um material de construção constituído por mistura de um aglomerante com um ou mais materiais inertes e água. Os materiais básicos que o constituem são: cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água. Os aditivos adicionados à mistura têm a finalidade de melhorar ou obter propriedades especiais ao conjunto, tais como impermeabilidade da massa, diminuição do calor de hidratação, aumento da durabilidade, maior plasticidade quando fresco ou rápido aumento da resistência quando endurecido. [21]

O cimento e a água formam a denominada *pasta*, que preenche os espaços vazios entre os agregados. Quando a pasta endurece, forma um material sólido.

Os agregados são considerados materiais inertes e a pasta é o material ligante que une as partículas. As propriedades ligantes da pasta ocorrem por reações químicas entre o cimento e a água.

Os agregados constituem de 60% a 75% do volume do concreto, portanto a seleção deste material deve ser adequada, não contendo materiais com efeitos prejudiciais, boa resistência à compressão e desgaste, bem graduados para obtenção de material com preenchimento de vazios adequado.

#### 8.1.1 Cimento

Os cimentos Portland são cimentos hidráulicos produzidos pela pulverização de clínquer, formado essencialmente por silicatos de cálcio hidratados, com adição de sulfatos de cálcio (gesso) e outros compostos.

Alterando-se a composição do cimento é possível obter variações quanto ao tempo de pega, calor de hidratação, resistência mecânica, resistência a sulfatos, entre outras.

#### 8.1.2 Agregados miúdos

Nesta classificação estão as areias, divididas em grossas, médias, finas e muito finas. Os valores de finura característicos estão indicados na Norma ABNT NBR-7211/09, que especifica os requisitos exigíveis para recepção e produção dos agregados miúdos e graúdos destinados à produção de concretos de cimento Portland. [22]

#### 8.1.3 Agregados graúdos

Denominadas britas, os agregados graúdos são classificados conforme os tamanhos das partículas componentes. Estas dimensões são classificadas em diâmetros mínimos e máximos. As classificações variam entre Brita 0 com diâmetro de 4,8 a 9,5 mm e Brita 5, com diâmetro de 76 a 100 mm. O concreto comum utiliza em sua composição a Brita 1 e Brita 2, que variam entre diâmetro de 9,5 mm a 25 mm. [22]

O peso específico médio de agregados da composição do concreto comum é:

- Areia fina seca - 1,5 tf/m<sup>3</sup>
- Areia grossa seca - 1,8 tf/m<sup>3</sup>

- Brita 1 ou 2 - 1,4 tf/m<sup>3</sup>

A Tabela 4 apresenta valores de densidade de alguns agregados utilizados nas composições de concretos leves e pesados. A densidade do compósito resultante é apresentada na tabela.

Tabela 4 - Concretos Leves e Concretos Pesados

Agregado	Granulometria (mm)	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Utilização	Densidade (tf/m <sup>3</sup> )
<b>Vermiculite</b>	2 – 3	300	Isolamento térmico	0,6
<b>Vermiculite</b>	6 – 12	150	Isolamento térmico	0,3
<b>Pedras-Pomes</b>	2 – 8	200	Isolamento térmico	1
<b>Pedras-Pomes</b>	2 – 20	150	Isolamento térmico	0,8
<b>Magnetita</b>	0 – 30	300	Proteção radiatividade	3,9
<b>Barita</b>	0 – 30	300	Proteção radiatividade	3,9
<b>Ferro fundido</b>	10 – 30	300	Proteção radiatividade	4,7
<b>Sucata</b>	10 – 30	300	Proteção radiatividade	5,5

Fonte: Materiais de Construção [23]

#### 8.1.4 Água

A água deve ser preferencialmente potável, não devendo conter substâncias orgânicas ou industriais. A água, com a finalidade de hidratar o cimento recebe o nome de “água de amassamento”. A relação entre peso da água e o peso do cimento numa dosagem de concreto é denominada fator água/cimento (a/c).

Quando se realiza uma dosagem de concreto deve-se ter o cuidado de utilizar um fator a/c que permita a promoção da hidratação do cimento sem excesso ou insuficiência de água na mistura, permitindo que o concreto atinja sua resistência máxima. Caso a quantidade de água seja inferior à necessária, não ocorre hidratação de todo o cimento, não permitindo que o concreto atinja sua resistência plena. Caso haja água em quantidade superior à necessária, após ocorrida toda a

hidratação do cimento, esta água em excesso migrará para a superfície da massa do concreto, pelo processo de exudação, formando capilares em seu interior, responsáveis pela queda na resistência mecânica e pelo aumento da permeabilidade do concreto. [24]

## 8.2 Fatores que influenciam na qualidade do concreto:

- Seleção cuidadosa dos materiais: cimento, agregado, água e aditivos quanto ao tipo, qualidade e uniformidade.
- Proporcionamento correto do aglomerante em relação ao inerte, do agregado graúdo em relação ao agregado miúdo, da quantidade de água quanto ao material seco, do aditivo em relação ao aglomerante ou à água utilizada.
- Manipulação adequada quanto à mistura, transporte, lançamento e adensamento.
- Cura cuidadosa.

Depois de endurecer, o concreto apresenta:

- boa resistência à compressão;
- baixa resistência à tração;
- comportamento frágil, isto é, rompe com pequenas deformações.

Para suprir as deficiências do concreto, há várias alternativas. A baixa resistência à tração pode ser contornada com o uso de adequada armadura, em geral constituída de barras de aço, obtendo-se o concreto armado.

## 9 CONCRETO ARMADO

Usualmente é utilizado o concreto armado que é o concreto simples com uma armadura, constituída por barras de aço. Os dois materiais devem resistir solidariamente aos esforços solicitantes. [21]

### 9.1 Viabilidade no uso deste material

A viabilidade técnica do uso de concreto armado nos projetos possui três razões básicas: [25]

### 9.1.1 Trabalho conjunto do concreto e do aço

Esta característica é assegurado pela aderência entre os dois materiais. Essa característica, comprovada por ensaios tecnológicos de aderência, é o que tornou este material confiável em termos de transferência de esforços do aço para o concreto e vice-versa. Nas regiões onde o concreto possui tensões de tração, o concreto transfere os esforços, após sua deformação, para as barras de aço da região tracionada. As barras de aço absorvem estes esforços, impedindo a ruína da peça estrutural.

### 9.1.2 Coeficientes de dilatação térmica do aço e concreto similares

Utiliza-se o valor médio deste coeficiente  $\alpha=1,0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$  para o concreto e  $\alpha=1,2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$  para o aço. Considerando que o gradiente térmico nas estruturas é inferior a  $50^\circ\text{C}$  e que este gradiente ocorre de forma lenta, torna esta transferência de tensões internas aço-concreto desprezível nestas condições. Considera-se ainda que apenas uma pequena parcela desta variação térmica alcançará o aço, graças à dissipação de calor que ocorrerá no trecho do concreto. Adota-se em geral um coeficiente de dilatação linear do concreto armado de  $\alpha=1,0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ .

### 9.1.3 Proteção contra a oxidação do aço pelo concreto, garantindo a durabilidade da estrutura.

O concreto exerce uma dupla proteção ao aço: proteção física pelo cobrimento e proteção química, considerando que em ambiente alcalino, surge uma camada quimicamente inibidora em torno da armadura. Este ambiente alcalino é causado presença da cal que se forma durante a pega do concreto, dissolvendo-se na água dos vazios.

## 9.2 Vantagens como material estrutural

- Moldável e durável;
- Boa resistência à vários tipos de solicitação;
- Estrutura monolítica, desde que corretamente executado;
- Baixo custo dos materiais - água e agregados graúdos e miúdos;
- Baixo custo de mão-de-obra;

- Processos construtivos conhecidos e facilidade de execução;
- Gastos de manutenção reduzidos;
- Pouco permeável à água;
- Material seguro contra fogo;
- Resistente a choques e vibrações, a efeitos térmicos, atmosféricos e a desgastes mecânicos.

### **9.3 Restrições como material estrutural**

O concreto apresenta algumas restrições, que precisam ser analisadas. Devem ser tomadas as providências adequadas para atenuar suas consequências.

As principais são:

- Baixa resistência à tração;
- Peso próprio elevado, da ordem de  $2,5 \text{ t/m}^3$ ;
- Corrosão das armaduras;
- Dificuldade para demolição e alterações no projeto;
- Prejuízos ambientais em função da geração de resíduos na construção e demolição.

### **9.4 Providências a serem tomadas como material estrutural**

A fissuração deste compósito pode ser contornada ainda na fase de projeto, com armação adequada e limitação do diâmetro das barras e da tensão na armadura.

### **9.5 Propriedades e Características do concreto**

A densidade dos concretos comuns realizados com os agregados normais varia segundo o processo de adensamento utilizado na sua fabricação, sofrendo também influência menor do meio ambiente em que são mantidos em razão da variação da proporção de águas contida nos seus poros. [23]

- Concreto não adensado:  $2,1 \text{ tf/m}^3$
- Concreto comprimido:  $2,2 \text{ tf/m}^3$
- Concreto socado:  $2,25 \text{ tf/m}^3$
- Concreto adensado:  $2,3 \text{ a } 2,4 \text{ tf/m}^3$

A densidade do concreto armado varia, também, com a proporção de aço das armaduras contidas.

A Norma Brasileira NBR-6118 [26], que trata de Projetos de Estruturas de Concreto, aplica-se somente a concretos de massa específica normal, aqueles que, depois de secos em estufa, têm massa específica compreendida entre 2,0 e 2,8 tf/m<sup>3</sup>. Se a massa específica real não for conhecida, para efeito de cálculo, pode-se adotar para o concreto simples o valor 2,4 tf/m<sup>3</sup> e para o concreto armado 2,5 tf/m<sup>3</sup>.

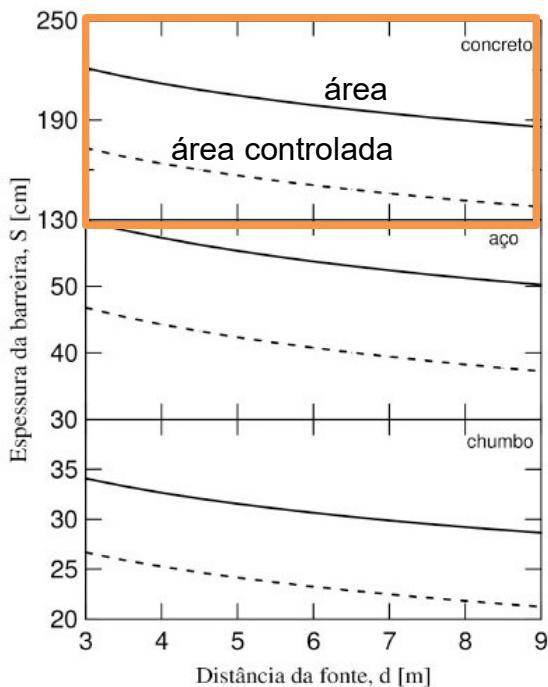
## 9.6 Propriedades Radioativas

Os concretos utilizados para a finalidade de barreira radiológica podem ser o de agregado convencional ou com adição de agregados de alta densidade, para a obtenção de um concreto com maior densidade. Dados considerados:

- Densidade do chumbo = 11,35 g/cm<sup>3</sup>
- Densidade do aço = 7,87 g/cm<sup>3</sup>
- Densidade do concreto comum = 2,35 g/cm<sup>3</sup>

De forma simplificada, a espessura da parede necessária é inversamente proporcional à densidade do concreto utilizado. A água utilizada na mistura também contribui de maneira importante na atenuação da energia radioativa. Em geral, pode-se dizer que concretos com densidade próxima a 4, absorvem duas vezes mais radiações que os concretos usuais da construção civil. [23]

Figura 18 – Espessura de barreira primária como função da distância da fonte para concreto convencional, aço e chumbo para energia fixa de 6 MeV



Fonte: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172014000300011](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172014000300011)

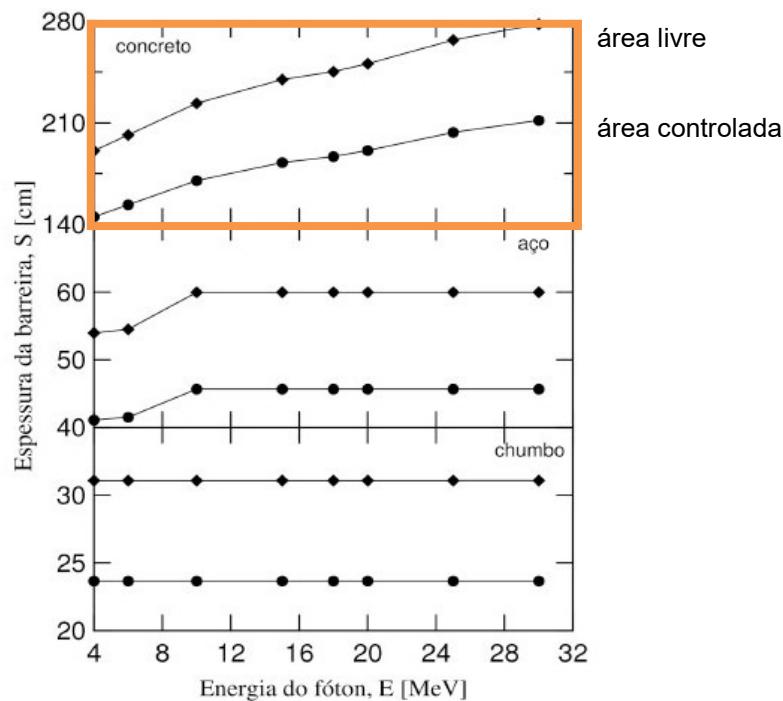
A figura 18 apresenta um estudo de espessura de barreira primária adotada para os materiais concreto comum, aço e chumbo, com fonte de energia fixa de 6 MeV. Observam-se as curvas de espessura tanto de áreas controladas como de áreas livres. [27]

É mostrado na figura 19, a variação da espessura da barreira primária em relação a energia do feixe de fótons. A distância da fonte a cada material de teste foi fixada em 5,5 m. [27]

Os valores apresentados em tabelas e trabalhos publicados em sua geometria são justificados pelas dimensões de blindagem usualmente adotadas.

Em função do vasto conhecimento tecnológico na utilização deste material no Brasil e da aplicabilidade das normas brasileiras vigentes, foi escolhido o concreto comum e concreto armado como material de blindagem, sendo o último dimensionado também como estrutura. A partir desta escolha, tratou-se de apresentar no trabalho as características e conceitos básicos de dimensionamento estrutural utilizando este material.

Figura 19 – Espessura de barreira primária como função da energia da fonte para concreto comum, aço e chumbo



Fonte: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172014000300011](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172014000300011)

## 10 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

### 10.1 Concepção estrutural

A concepção estrutural, também chamada de lançamento da estrutura, consiste em escolher um sistema estrutural que constitua a parte resistente da construção. Essa etapa, uma das mais importantes no projeto estrutural, implica em escolher os elementos a serem utilizados e definir suas posições, de modo a formar um sistema estrutural eficiente, capaz de absorver os esforços oriundos das ações atuantes e transmiti-los ao solo de fundação. [26]

### 10.2 Estruturas de edificações

Estrutura é a parte resistente da construção e tem as funções de resistir às ações e as transmitir para o solo. Em edifícios, os elementos estruturais principais são:

#### 10.2.1 Lajes

São placas que, além das cargas permanentes, recebem as ações de uso e as transmitem para os apoios.

### **10.2.2 Vigas**

São elementos horizontais que delimitam as lajes, suportam paredes e recebem ações das lajes ou de outras vigas e as transmitem para os apoios.

### **10.2.3 Pilares**

São elementos verticais que recebem as ações das vigas ou das lajes e as transmitem para os elementos inferiores ou para a fundação.

### **10.2.4 Fundação**

São elementos da infraestrutura denominados blocos, sapatas, estacas, tubulações, entre outros, com a função de transferir os carregamentos da superestrutura para o solo.

## **10.3 Estados Limites**

Segundo a NBR 6118/2014, o critério de segurança das estruturas baseia-se na Norma NBR 8681/2004 onde são detalhados os Estados Limites necessários ao dimensionamento: estados limites últimos (ELU) e estados limites de serviço (ELS).

### **10.3.1 Estados limites últimos (ELU)**

A segurança das estruturas de concreto deve sempre ser verificada em relação aos seguintes estados limites últimos [28]:

- a) estado limite último da perda do equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido;
- b) estado limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, devido às solicitações normais e tangenciais, admitindo-se a redistribuição de esforços internos, desde que seja respeitada a capacidade de adaptação plástica definida também na Norma, e admitindo-se, em geral, as verificações separadas das solicitações normais e tangenciais;
- c) estado limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando os efeitos de segunda ordem;
- d) estado limite último provocado por solicitações dinâmicas;

- e) estado limite último de colapso progressivo;
- f) outros estados limites últimos que eventualmente possam ocorrer em casos especiais.

#### 10.3.2 Estados limites de serviço (ELS)

Estados limites de serviço são aqueles relacionados à durabilidade das estruturas, aparência, conforto do usuário e à boa utilização funcional das mesmas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos utilizados. Em construções especiais pode ser necessário verificar a segurança em relação a outros estados limites de serviço não definidos nesta Norma.

#### 10.3.3 Ações

Classificação das ações atuantes: permanentes, variáveis e excepcionais. Para cada tipo de construção, as ações a considerar devem respeitar suas peculiaridades e as normas aplicáveis.

- a) Ações permanentes: são as que ocorrem com valores praticamente constantes durante toda a vida da construção. Também são consideradas como permanentes as ações que crescem no tempo e tendem a um valor limite constante. As ações permanentes devem ser consideradas com seus valores representativos mais desfavoráveis para a segurança. As ações permanentes subdividem-se em:
  - b) Ações permanentes diretas: constituídas pelo peso próprio da estrutura e pelos pesos dos elementos construtivos fixos e das instalações permanentes, entre as quais peso próprio, peso dos elementos construtivos fixos e de instalações permanentes e empuxos permanentes (terra não removível).
  - c) Ações permanentes indiretas: constituídas pelas deformações impostas por retração e fluênciia do concreto, deslocamentos de apoio, imperfeições geométricas e pretensão, retração do concreto e fluênciia do concreto.
- d) Ações variáveis: são aquelas cujos valores têm variação significativa em torno da média, durante a vida da construção. Podem ser fixas ou móveis, estáticas ou dinâmicas, pouco variáveis ou muito variáveis. São exemplos: cargas de uso (pessoas, mobiliário, veículos etc.) e seus efeitos (frenagem, impacto, força centrífuga), vento, variação de temperatura e empuxos de água, etc.

- e) Ações excepcionais: são ações de duração extremamente curta e muito baixa probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, mas que devem ser consideradas no projeto de determinadas estruturas. São, por exemplo, as ações decorrentes de explosões, choques de veículos, incêndios, enchentes ou abalos sísmicos excepcionais.

#### 10.3.4 Segurança

Uma estrutura apresenta segurança se tiver condições de suportar todas as ações possíveis de ocorrer, durante sua vida útil, sem atingir um estado limite. A ideia consiste em:

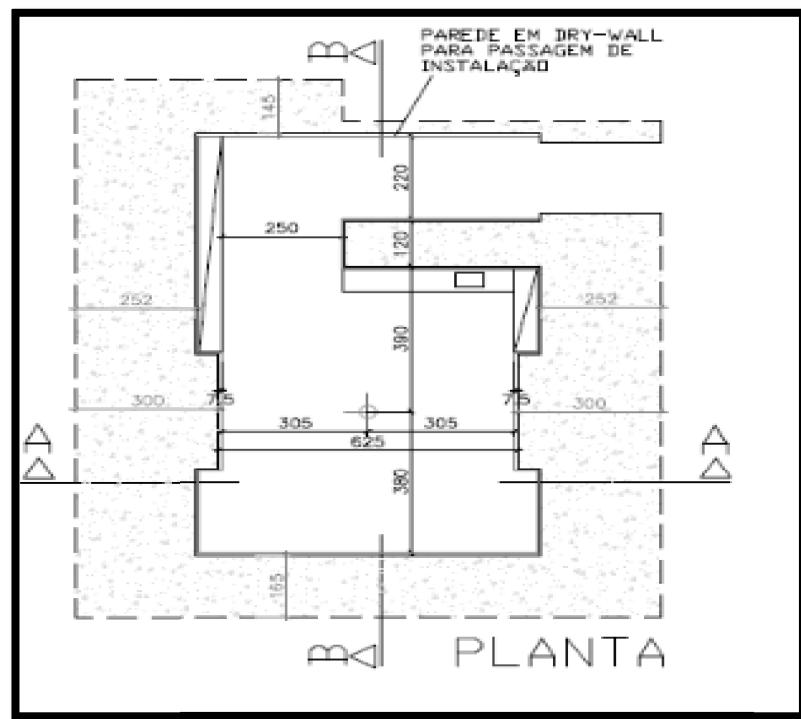
- a) Majorar ações e esforços solicitantes (valores representativos das ações), resultando nas ações e solicitações de cálculo, de forma que a probabilidade desses valores serem ultrapassados é pequena.
- b) Reduzir os valores característicos das resistências ( $f_k$ ), resultando nas resistências de cálculo, com pequena probabilidade dos valores reais atingirem esse patamar;
- c) Equacionar a situação de ruína, fazendo com que o esforço solicitante de cálculo seja igual à resistência de cálculo.

### 11 PROJETOS DO BUNKER – ASPECTOS COMUNS NOS DOIS PROJETOS

Foram elaborados dois projetos estruturais de *bunker* em concreto armado. O projeto denominado *bunker* enterrado, foi concebido com estrutura localizada no subsolo e dimensionado levando-se em conta também os esforços decorrentes do solo adjacente às paredes. Foi adotada blindagem de concreto no teto. As demais faces da construção tem atenuação de radiação por solo compactado. O projeto denominado *bunker* não enterrado considerou uma estrutura acima da superfície do solo. Em função da espessura necessária de blindagem, foi concebida uma estrutura com dimensões apropriadas para que tivessem também a função de barreira de proteção no teto e paredes.

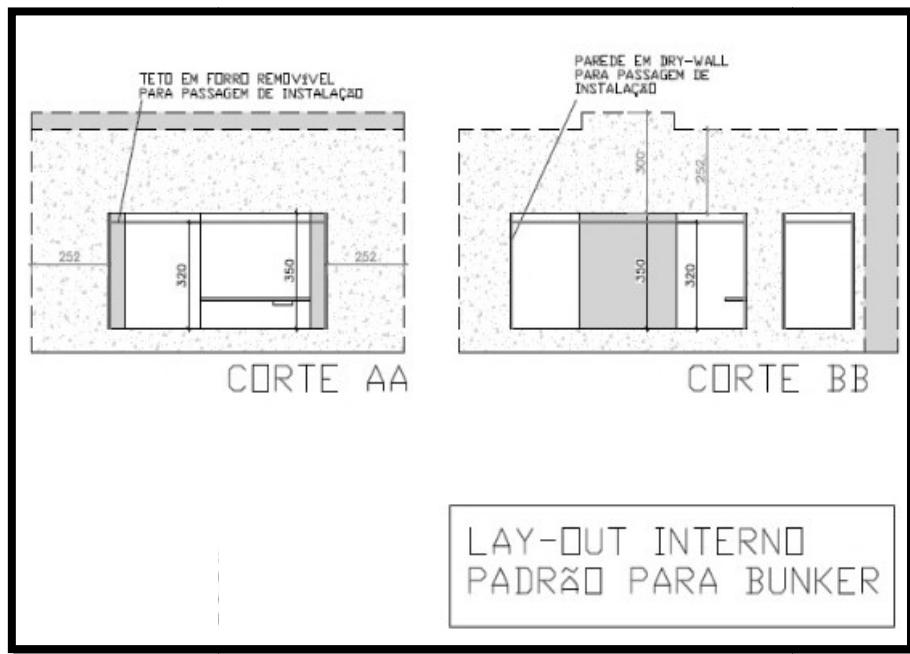
O *layout* interno e dimensões de parede e teto mostradas nas figuras 20 e 21, foram obtidos em documentação pública licitatória do Ministério da Saúde, quando da execução do pregão 05/2013 contemplando “80 soluções de radioterapia” [29].

Figura 20 - Layout interno padrão (LIP) para bunker de acelerador linear-Planta



Fonte: Edital do Pregão Presencial n.05/2013 do Ministério da Saúde

Figura 21 - Layout interno padrão (LIP) para bunker de acelerador linear-Cortes



Fonte: Edital do Pregão Presencial n.05/2013 do Ministério da Saúde

## **11.1 Considerações prévias de projeto**

Os dois projetos desenvolvidos nesta pesquisa consideraram premissas técnicas necessárias com relação às barreiras de blindagem necessárias e material para estruturas e barreiras.

11.1.1 Acelerador linear de elétrons a ser instalado com energia de até 25MeV.

11.1.2 A área do projeto foi classificada como área de trabalho livre, para fins de gerenciamento da Proteção Radiológica.

11.1.3 O compósito Concreto Armado foi utilizado no dimensionamento estrutural.

11.1.4 Como barreira de proteção no teto foi utilizado o concreto armado.

11.1.5 Não foi considerada laje estrutural de piso.

A estrutura dimensionada foi concebida nas disciplinas específicas da engenharia civil, considerando também as Normas Técnicas Brasileiras vigentes.

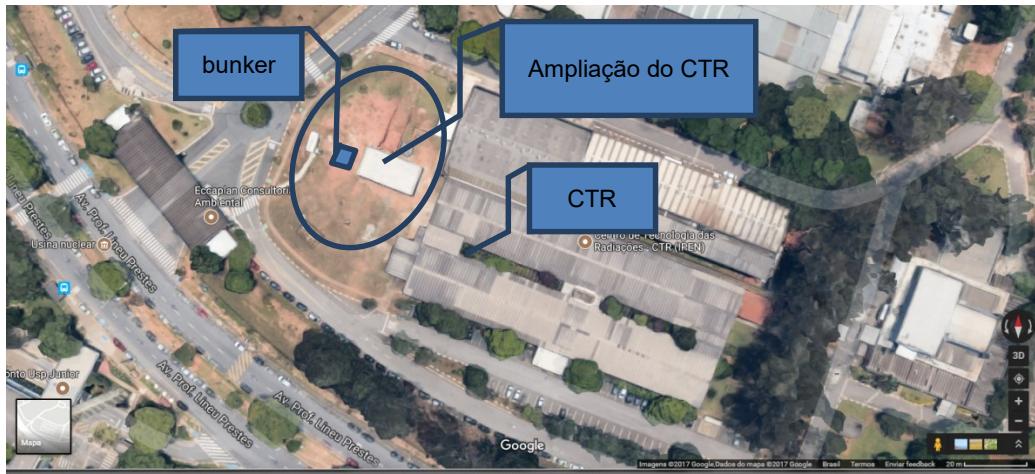
Não foi considerada laje estrutural de piso nas duas opções de projeto, em virtude de este elemento ser dimensionado e fornecido pelos fabricantes do acelerador linear. O equipamento de radioterapia é instalado em fundações e estruturas próprias e individuais. A fundação dos *bunkers* foi projetada com estrutura independente do piso, de forma a não interferir com o funcionamento do equipamento.

## **11.2 Locação da Planta**

O estudo deste projeto teve início com o conhecimento do local para a escolha mais adequada da localização. Foi estudada a localização, considerando os prédios existentes e interferências prováveis com instalações e fundações enterradas. Foi feito estudo do projeto na área próxima ao do prédio da ampliação do Centro Tecnológico das Radiações-CTR, conforme mostra a figura 22.

A planta de arquitetura preliminar dos dois projetos foi desenvolvida no espaço adjacente a esta ampliação do CTR, em posicionamentos similares.

Figura 22 – Foto aérea do local previsto para instalação do *bunker* enterrado e não enterrado.



Fonte: <https://www.google.com.br/maps/@-23.5664635,-46.7369586,164m/data=!3m1!1e3>

## 12 PROJETO DO *BUNKER* ENTERRADO

### 12.1 Projeto preliminar de arquitetura

O projeto foi iniciado com um projeto preliminar de arquitetura, onde foi definido o acesso, escadas, dimensões do *bunker* e níveis de projeto. O projeto preliminar é peça importante nas definições iniciais para escolha e lançamento posterior das peças estruturais. Este projeto também tem a importância no atendimento das necessidades dos usuários do equipamento. As discussões e alterações foram efetuadas nesta fase do trabalho.

A concepção arquitetônica teve como modelo, o layout padrão do Ministério da Saúde mostrado nas figuras 20 e 21 com relação às dimensões internas. Este projeto possui blindagem de concreto somente na laje do teto. Em função de o acelerador linear ter sido posicionado no subsolo, foi denominado *bunker* enterrado e acrescentado detalhe de acesso ao local por escadas. As plantas e cortes constam no Anexo A.

### 12.2 Projeto de estrutura – Especificações Técnicas

O objetivo da memória de cálculo é a apresentação das especificações de materiais adotados no projeto, critérios de cálculo e o modelo estrutural para o dimensionamento dos elementos da estrutura em concreto armado.

### 12.2.1 Níveis de referência

O projeto foi subdivido em quatro pavimentos referenciais, conforme descrito a seguir:

- Piso Bunker

Este pavimento é o nível mais baixo de referência do projeto. Foi adotado o valor de 93,95 m. O nível referencial inicial foi o do térreo do prédio existente (100,50m - piso acabado), obtido no projeto de arquitetura fornecido. O piso do *bunker* encontra-se, portanto, a 6,55 m abaixo deste pavimento de referência, conforme se pode observar nas plantas e cortes do Anexo A. Neste local foi prevista a instalação do acelerador linear. Deste nível para cima, todos os elementos são considerados como superestruturas, onde estão inclusas lajes, vigas e pilares. Deste nível para baixo estão os elementos da infraestrutura, ou seja, as fundações.

A estrutura deste piso não consta no projeto, pois os elementos de suporte dos equipamentos são independentes da estrutura do *bunker*. O projeto dos elementos de suporte e fundações é fornecido pelos fabricantes dos aceleradores lineares, em função da especificidade no funcionamento deste equipamento.

- Acessos / Escadas

No nível 97,55m, referente ao subsolo da construção existente, foi projetada a saída para o acesso às escadas do *bunker*. Esta localização é a mais próxima que se pode alcançar, sem a necessidade de construções e blindagens adicionais. A dimensão entre este nível e o piso do *bunker*, ou seja, a altura a vencer por este acesso levou em conta a espessura da blindagem do teto, acrescida da altura do pé direito da sala do equipamento. Foi prevista também no nível 97,55, a instalação da sala de controle das operações do Acelerador Linear. A estratégia da localização desta sala de controle também foi planejada com relação à segurança, sem detimento da necessidade de uma porta com controle de acesso automatizado.

- Cobertura Bunker

O Nível 98,25 m refere-se à face superior da estrutura de suporte da cobertura, 4,30 m acima do piso do *bunker*. Cabe ressaltar que este não é o nível da face superior da blindagem adotada, em concreto armado, que está no nível 100,45m na faixa de incidência dos feixes primários e 99,97 m na face superior dos

demais segmentos da cobertura. A camada de concreto sobre a estrutura, denominado concreto-massa, atua como blindagem da sala e representa uma sobrecarga sobre a estrutura do teto.

- Cobertura

O Nível 100,45 m refere-se à cobertura das escadas. Este nível coincide com a face superior da blindagem de maior espessura, considerada para o *bunker*. O piso acabado do prédio existente foi 100,50 m e considerados 5 cm para execução de impermeabilização e proteção mecânica desta cobertura, mantendo-se assim o alinhamento com a construção existente. Este nível pode então continuar a ser usado como pátio externo livre e contíguo ao prédio existente. Não foi considerada sobrecarga para manobra de veículos ou uso como pátio de estacionamento.

Para melhor entendimento destes níveis, foi elaborada a Tabela 5 com as informações das distâncias entre níveis.

Tabela 5 – Níveis de referência e alturas entre níveis

Pavimento	Altura (cm)	Nível (m)
Cobertura	220	100,45
Cob <i>Bunker</i>	70	98,25
Piso Acessos/escada	360	97,55
Piso <i>Bunker</i>	100	93,95

Fonte: Autor da tese/dissertação

### 12.2.2 Normas relacionadas ao projeto

Os principais critérios adotados neste projeto, referente aos materiais utilizados e dimensionamento das peças de concreto estão respeitados conforme normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT. Foram utilizadas as normas NBR 6118/2014 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, NBR 6120/2000 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – Procedimento, NBR 6122/2010 – Projeto e execução de fundações e NBR 8681/2004 - Ações e segurança nas estruturas – Procedimento.

### 12.2.3 Sistema Estrutural

O sistema estrutural adotado contou com os seguintes elementos:

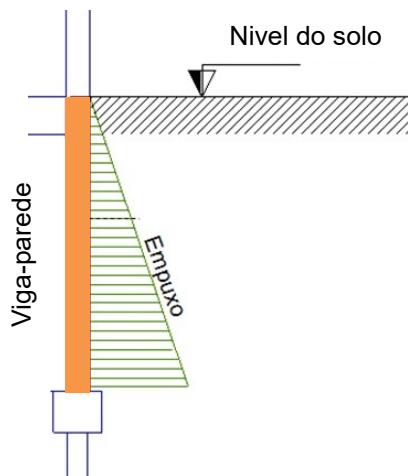
- Vigas-parede apoiadas em contra-fortes;
- Contra-fortes;
- Fundações em tubulões;
- Escadas, lajes e vigas;
- Sem laje no piso inferior;

### 12.2.4 Características dos elementos adotados na estrutura

- Vigas-parede

De acordo com a norma brasileira de projeto de estruturas de concreto NBR 6118/2014 [26], são consideradas vigas-parede, as vigas altas em que a relação entre o vão e a altura ( $l/h$ ) é inferior a 2, em vigas com dois apoios, e inferior a 3, em vigas contínuas. As vigas-parede neste projeto tem tanto a função de receber os esforços dos elementos que nelas se apoiam na face superior, como também de contenção lateral, em função do empuxo de terra. O empuxo de terra é a solicitação do solo sobre as estruturas que interagem com o maciço terroso. Não foi considerada a existência de água na área de influência da construção. Esta consideração foi devida a não identificação do lençol freático no nível de fundação da construção existente da ampliação. A Figura 23 exemplifica um corte de viga-parede com indicação do esforço devido ao empuxo ativo de terra.

Figura 23 – Esquema típico de viga parede



Fonte: Autor da tese/dissertação

A espessura destes elementos foi dimensionada somente como elemento estrutural, pois a blindagem considerada nesta construção foi terra adensada, adjacente às paredes. As vigas-parede são elementos de concreto armado, dimensionados tanto para os esforços devidos aos elementos que neles se apoiam, tais como lajes, peso próprio e esforços horizontais do maciço de terra. Os esforços decorrentes do peso próprio e cargas aplicadas são distribuídos para os contrafortes. O projeto utilizou vigas-parede, denominadas em planta conforme consta no Anexo A, como Paredes 1 a 8, largura de 25 cm, alturas de 4,60 m a 6,80 m e vãos entre apoios de 2,50 m a 4,20 m.

- Contraforte

Este elemento é utilizado em muros de contenção de terra. No caso específico, os contrafortes foram dimensionados tanto para os esforços axiais de peso próprio, esforços decorrentes dos elementos que nele se apoiam, como também para resistir aos esforços decorrentes de flexão em função do empuxo de terra. Estes elementos contribuem para aumentar a estabilidade contra o tombamento. Os contrafortes utilizados no projeto têm dimensões de  $65 \times 38 \text{ cm}^2$  e  $50 \times 50 \text{ cm}^2$ . A Figura 24 ilustra um exemplo de muro de contenção com contrafortes em concreto armado.

Figura 24 – Muro de contenção com uso de contrafortes



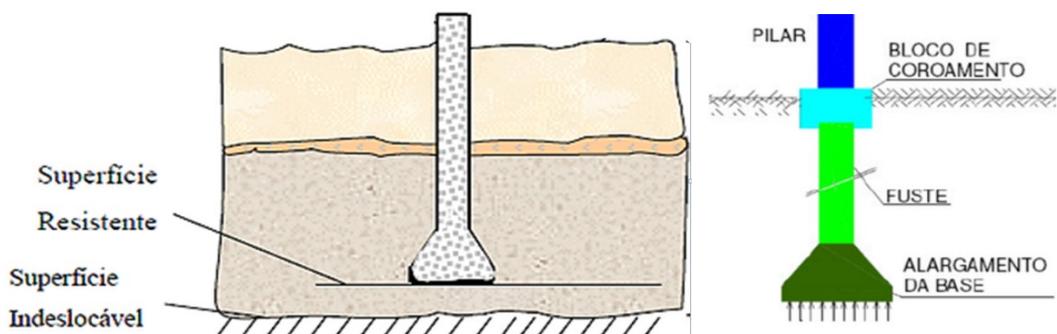
Fonte: <http://www.archiexpo.fr/prod/farcimar/product-149371-1653178.html>

- Fundação: Tubulão

A fundação escolhida para este projeto foi o tubulão. Este tipo de fundação também é a fundação utilizada no prédio de ampliação do CTR. Conforme

descreve a NBR 6122/2010 [30], este é um elemento de fundação profunda, cilíndrico e pode ser feito a céu aberto ou sob ar comprimido (pneumático) e pode ter ou não base alargada. A fundação do tipo tubulão pode ser utilizada quando há necessidade da estrutura suportar esforços combinados de carga axial e momento fletor, em função da rigidez como elemento resistente. É considerado um elemento de custo baixo entre as fundações profundas comumente utilizadas em projetos. A Figura 25 ilustra um tubulão típico e nomenclaturas dos segmentos de dimensionamento. Na Figura 25 o tubulão tem base alargada como utilizado no projeto do *bunker*.

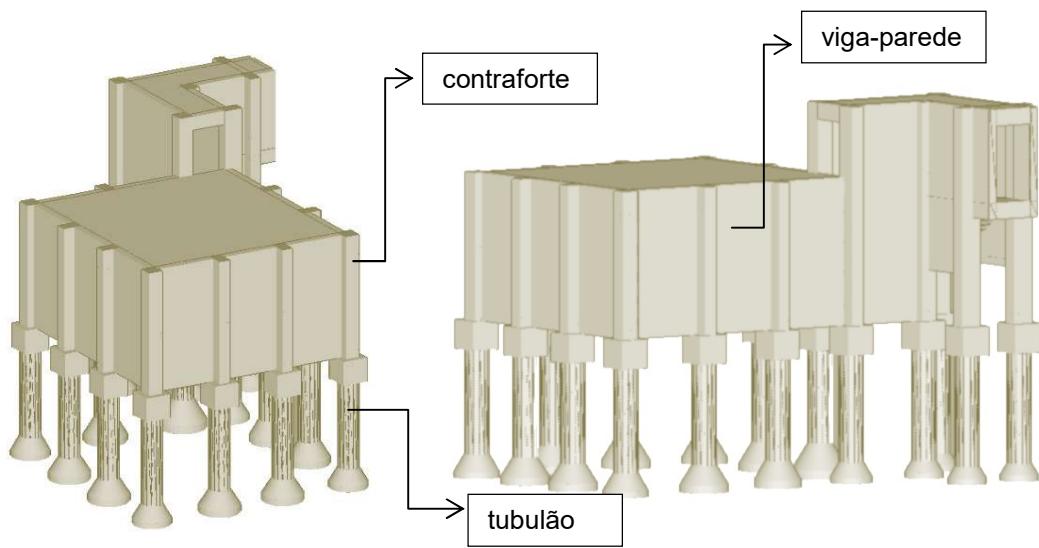
Figura 25 – Imagem de muro de contenção com uso de contrafortes



Fonte: <https://www.fundacoes.org/aula-07>

Conforme se pode visualizar na Figura 26, a estrutura contempla os elementos estruturais descritos e ilustra com vistas tridimensionais a superestrutura e infraestrutura adotadas.

Figura 26 – Imagens tridimensionais da estrutura do *bunker* enterrado



Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

### 12.2.5 Critérios para durabilidade

Visando garantir a durabilidade da estrutura com adequada segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à vida útil da estrutura, foram adotados critérios em relação à classe de agressividade ambiental (CAA) e valores de cobrimentos das armaduras. Entende-se por vida útil de projeto o período de tempo durante o qual se mantém as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor. [31]

A Classe de agressividade ambiental escolhida no projeto foi “moderada” (II), cuja classificação refere-se ao ambiente urbano, cujo risco de deterioração é pequeno. Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda para ambientes internos secos ou em locais cuja umidade relativa do ar seja menor ou igual a 65%.

### 12.2.6 Cobrimentos das armaduras

A durabilidade das estruturas é dependente das características do concreto e da espessura e qualidade do concreto do cobrimento da armadura. Devem ser atendidos parâmetros mínimos relacionados à durabilidade da estrutura conforme Tabela 6, extraída da NBR 6118/2014.

Tabela 6 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo -	30		40	50

Fonte: NBR 6118/2014

Os valores selecionados no projeto do *bunker* enterrado estão reunidos na Tabela 7.

Tabela 7 – Tabela dos cobrimentos adotados no projeto do *bunker*

	<b>Peças externas</b>	<b>Peças internas</b>	<b>Peças em contato com o solo</b>
Vigas	3.00	2.50	3.00
Pilares	3.00	2.50	4.50
Lajes	2.50	-	3.00
Blocos	-	-	4.50
Tubulões	-	-	4.50

Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

### 12.2.7 Propriedades do concreto

Segundo a NBR 6118/2014, ensaios comprobatórios de desempenho da durabilidade da estrutura frente ao tipo de agressividade prevista em projeto devem estabelecer os parâmetros mínimos a serem atendidos. Devido à existência de uma forte correspondência entre a relação água/cimento e a resistência à compressão do concreto e sua durabilidade, permite-se que sejam adotados os valores da tabela 8.

Tabela 8 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

<b>Concreto <sup>a</sup></b>	<b>Tipo <sup>b, c</sup></b>	<b>Classe de agressividade (Tabela 6.1)</b>			
		<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

<sup>a</sup> O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.  
<sup>b</sup> CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.  
<sup>c</sup> CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

O concreto considerado neste projeto e que será empregado na construção deve atender as características da Tabela 9.

Tabela 9 – Características do concreto

<b>fck</b>	<b>Ecs</b>	<b>fct</b>	<b>Abatimento</b>
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(cm)
25	24150	3	5.00

Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto à compressão

$E_{cs}$  = Módulo de elasticidade secante

$f_{ct}$  = resistência do concreto à tração direta

abatimento = valor adequado com relação à consistência e trabalhabilidade (*slump-test*).

No ensaio de abatimento do concreto, é medida a sua consistência que tem uma relação direta com a trabalhabilidade na obra.

#### 12.2.8 Propriedades do aço

O aço considerado neste projeto para dimensionamento das peças em concreto armado e que será empregado na construção deve atender as características da Tabela 10.

Tabela 10 – Características do aço

Categoria	Massa específica	Módulo de elasticidade	$f_{yk}$
	(kgf/m <sup>3</sup> )	(MPa)	(MPa)
CA50	7850	210000	500
CA60	7850	210000	600

Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

$f_{yk}$  = resistência característica ao escoamento do aço

#### 12.2.9 Ações de carregamento

Para obtenção dos valores de cálculo das ações, foram definidos coeficientes de ponderação, conforme apresentado na Tabela 11. Estes coeficientes foram obtidos da NBR 6118/2014 e são recomendados para o cálculo das ações atuantes no estado limite último (ELU) em cada caso de carregamento. São definidos três valores:

- "Desfavorável" é aquele que se aplica nos casos usuais para dimensionamento;
- "Favorável" se a ação for Permanente. Se for considerado o dimensionamento considera também as ações com efeito favorável;
- "Fundações" é o valor dos coeficientes para cálculo das cargas de fundação da estrutura.

Os fatores de combinação para ações acidentais são utilizados nos seguintes casos:

- $\Psi_0$ : valor utilizado para a redução do valor da ação acidental, quando não principal para a combinação, considerando baixa a probabilidade de ocorrência simultaneamente às demais ações acidentais;
- $\Psi_1$ : fator de redução da ação para estado limite de serviço para combinações frequentes;
- $\Psi_2$ : fator de redução da ação para estado limite de serviço para combinações quase permanentes;

Tabela 11 – Coeficientes de Ponderação de ações

Ação	Coeficientes de ponderação			Fatores de combinação		
	Desfavorável	Favorável	Fundações	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Peso próprio (G1)	1.30	1.00	1.00	-	-	-
Adicional (G2)	1.40	1.00	1.00	-	-	-
Solo (S)	1.30	1.00	1.00	-	-	-
Acidental (Q)	1.40	-	1.00	0.70	0.60	0.40
Água (A)	1.10	-	1.00	1.00	1.00	1.00
Vento X+ (V1)	1.40	-	1.00	0.60	0.30	0.00
Vento X- (V2)	1.40	-	1.00	0.60	0.30	0.00
Vento Y+ (V3)	1.40	-	1.00	0.60	0.30	0.00
Vento Y- (V4)	1.40	-	1.00	0.60	0.30	0.00
Desaprumo X+ (D1)	1.40	1.00	1.00	-	-	-
Desaprumo X- (D2)	1.40	1.00	1.00	-	-	-
Desaprumo Y+ (D3)	1.40	1.00	1.00	-	-	-
Desaprumo Y- (D4)	1.40	1.00	1.00	-	-	-
Subpressão (AS)	1.10	-	1.00	1.00	1.00	1.00
Carga Extra (CE)	1.40	-	1.00	0.80	0.70	0.60

Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

### 12.2.10 Combinações de ações

A partir das ações de carregamento definidas, foram processadas no programa de cálculo todas as combinações previstas na NBR 6118/2014, para análise e dimensionamento da estrutura, nos estados limites últimos (ELU) e de serviço (ELS).

### 12.2.11 Carregamentos das lajes

As Tabelas 12, 13 e 14 resumem os dados considerados nos carregamentos das lajes conforme plantas do Anexo A.

Tabela 12 – Considerações e Carregamentos nas lajes do pavimento das escadas

Nome	Tipo	Lajes		Dados	
		Altura (cm)	Elevação (cm)	Peso próprio (tf/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga (tf/m <sup>2</sup> )
LE1	Maciça	12	0	0.30	0.41
LE2	Maciça	12	-162	0.59	0.41
LE3	Maciça	12	-162	0.30	0.41
LE4	Maciça	12	0	0.60	0.41

Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

Tabela 13 – Considerações e Carregamentos nas lajes do pavimento Cobertura *Bunker*

Nome	Tipo	Lajes		Dados	
		Altura (cm)	Peso próprio (tf/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga max (tf/m <sup>2</sup> )	
L1	Maciça	80	2.00	5.05	

Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

Tabela 14 – Considerações e Carregamentos nas lajes do pavimento Cobertura

Nome	Tipo	Lajes		Dados	
		Altura (cm)	Elevação (cm)	Peso próprio (tf/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga (tf/m <sup>2</sup> )
L1	Maciça	12	0	0.30	0.41
L2	Maciça	12	0	0.30	0.41

Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

### 12.2.12 Ação do vento

O efeito do vento sobre a edificação foi desconsiderado, tendo em vista a construção ser enterrada.

### 12.2.13 Modelo de análise

A análise da estrutura foi realizada a partir da criação de um modelo de pórtico, sendo a estrutura formada por pilares e vigas admitidos como elementos lineares representados por seus eixos longitudinais em alguns casos e em outras como vigas paredes, em função da geometria adotada. A modelagem das lajes de concreto do pavimento foi realizada pelo processo da analogia de grelha, onde as lajes são discretizadas em faixas substituídas por elementos estruturais de barras,

obtendo-se assim uma grelha de barras plana interconectadas. As vigas-parede foram analisadas também com ações decorrentes do empuxo ativo relativo ao aterro.

## 13 PROJETO DO *BUNKER* NÃO ENTERRADO

### 13.1 Projeto preliminar de arquitetura

Este segmento do trabalho foi iniciado com um projeto preliminar de arquitetura, onde foi escolhida a localização de uma estrutura térrea que melhor atendesse às condições de segurança e acesso, além da avaliação do espaço construtivo disponível. Para um rápido acesso ao *bunker*, foi considerada a possibilidade de ser feita abertura de um acesso no prédio construído. Caso isso não seja importante, o acesso se dará circundando a construção existente em seus acessos já previstos. O projeto preliminar é peça importante nas definições iniciais, para escolha e lançamento posterior das peças estruturais. Este projeto também tem a importância no atendimento das necessidades dos usuários do equipamento. As discussões e alterações foram efetuadas nesta fase do trabalho.

A concepção arquitetônica teve como referência o layout padrão da licitação do Ministério da Saúde, constante nas Figuras 20 e 21, em relação às dimensões internas e externas. Este projeto possui blindagem de concreto na laje de cobertura e paredes. Os pilares têm dimensões compatíveis com a barreira de proteção do projeto padrão. Em função de este modelo servir como base comparativa ao projeto do *bunker* enterrado, recebeu a denominação de “não enterrado”. Foi mantido o corredor de acesso, denominado labirinto, que propicia uma proteção radiológica adicional aos que acessem o *bunker*. As plantas e cortes constam no Anexo A.

### 13.2 Projeto de estrutura – Especificações Técnicas

O objetivo desta memória de cálculo é apresentar as especificações de materiais adotados no projeto, critérios de cálculo, o modelo estrutural e os principais resultados da análise e dimensionamento dos elementos da estrutura em concreto armado.

### 13.2.1 Níveis de referência

O projeto foi subdivido em dois pavimentos referenciais, conforme descrito a seguir:

- Piso

Este pavimento é o nível mais baixo de referência do projeto. Foi adotado o valor de referência do nível térreo acabado do prédio existente, 100,50m. O piso acabado do *bunker* foi considerado neste nível, conforme se pode observar nas plantas e cortes do Anexo A. Neste local foi prevista a instalação do acelerador linear. Deste nível para cima, todos os elementos são considerados como superestruturas, onde estão inclusas lajes, vigas e pilares. Deste nível para baixo estão os elementos da infraestrutura, ou seja, fundações.

A estrutura deste piso não consta no projeto, pois os elementos de suporte dos equipamentos são independentes da estrutura do *bunker*. O projeto dos elementos de suporte e fundações é fornecido pelos fabricantes dos aceleradores lineares, em função da especificidade no funcionamento deste equipamento.

- Cobertura

O Nível 105,10m refere-se à face superior da estrutura de suporte da cobertura, estando 4,30 m acima do piso acabado do *bunker*. Cabe ressaltar que este não é o nível da face superior da blindagem utilizada, também de concreto, que apresenta dois níveis: 107,30m na faixa de incidência dos feixes primários e 106,82m na face superior dos demais segmentos da cobertura. O concreto sobre a estrutura da laje, denominado concreto-massa, atua como blindagem da sala e representa uma sobrecarga sobre a estrutura da laje.

Para melhor entendimento destes níveis, foi elaborada a Tabela 15 com as informações das distâncias entre níveis.

Tabela 15 – Níveis de referência e alturas entre níveis

Pavimento	Altura (cm)	Nível (m)
Cobertura	460	105,1
Piso	100	100,5

Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

### 13.2.2 Normas relacionadas ao projeto

Os principais critérios adotados neste projeto, referente aos materiais utilizados e dimensionamento das peças de concreto estão respeitados conforme normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT. Foram utilizadas as normas NBR 6118/2014 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, NBR 6120/2000 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – Procedimento, NBR 6122/2010 – Projeto e execução de fundações e NBR 8681/2004 - Ações e segurança nas estruturas – Procedimento e NBR 6123/2017 – Forças devidas ao vento em edificações.

### 13.2.3 Sistema Estrutural

O sistema estrutural adotado contou com os seguintes elementos:

- Vigas-parede apoiadas em pilares;
- Pilares com as dimensões definidas pela geometria da barreira de proteção;
- Fundações de blocos e estacas;
- Sem laje no piso inferior;

### 13.2.4 Características dos elementos adotados na estrutura

- Vigas-parede

De acordo com a norma brasileira de projeto de estruturas de concreto NBR 6118/2014 [26], são consideradas como vigas-parede, as vigas altas em que a relação entre o seu vão e a sua altura ( $l/h$ ) é inferior a 2, em vigas com dois apoios, e inferior a 3, em vigas contínuas. As vigas-parede neste projeto tem a função de receber os esforços dos elementos que nelas se apoiam na face superior e peso próprio, bem como ações externas como vento.

O projeto utilizou vigas-parede, denominadas em planta conforme consta no Anexo A, como Paredes 1 a 6. As paredes 2 a 6 têm largura de 2,52 m e altura de 4,60 m. Os vãos entre apoios variam de 1,80 m a 7,0 m. A Parede 1, localizada na região do labirinto de entrada apresenta largura de 25 cm e altura de 4,60 m.

- Pilares

Estes elementos foram dimensionados tanto para receber os esforços oriundos dos demais elementos estruturais, lajes e paredes, como também para o

peso próprio. O dimensionamento destes elementos, não levou em conta as dimensões mínimas necessárias aos esforços atuantes e sim as dimensões do projeto de arquitetura com barreiras de proteção. Os momentos decorrentes dos esforços horizontais (vento) foram considerados, em função de ser uma estrutura acima da superfície do solo. Os pilares apresentam seções conforme Tabela 16.

Tabela 16 – Dimensões das seções dos pilares

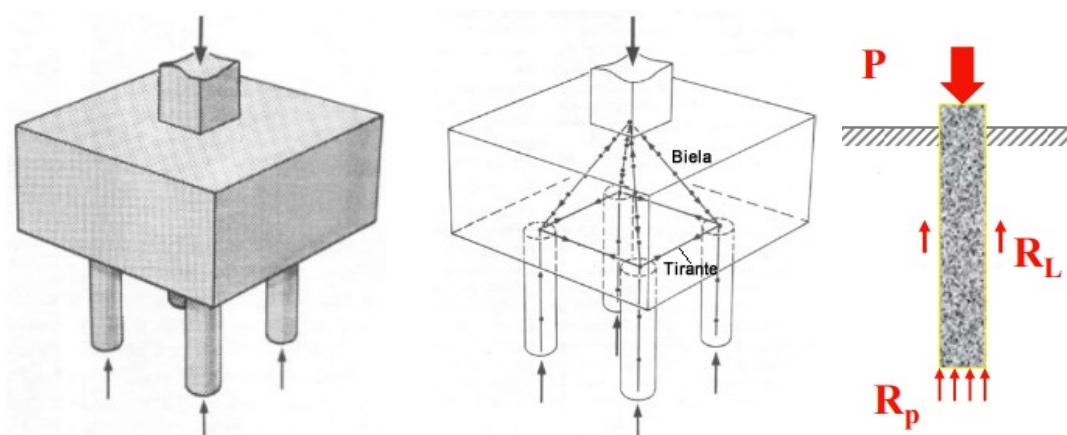
Pilares	L	H
	cm	cm
1	145	550
2	60	252
3	120	660
4	300	400
5	165	252
6	165	252

Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

- Fundação: Blocos e estacas

Os pilares apoiam-se em fundações profundas de estacas com blocos de coroamento. Este tipo de fundação foi adotado em função da melhor distribuição dos esforços axiais, respeitando o espaço interno necessário para a instalação dos equipamentos, fundações e piso independentes. Os blocos tem a função de distribuir as cargas provenientes dos pilares para os elementos de fundação, estacas. As estacas, com 60 cm de diâmetro, foram espaçadas a cada 2,5 diâmetros. A Figura 27 ilustra o modelo de fundação escolhido.

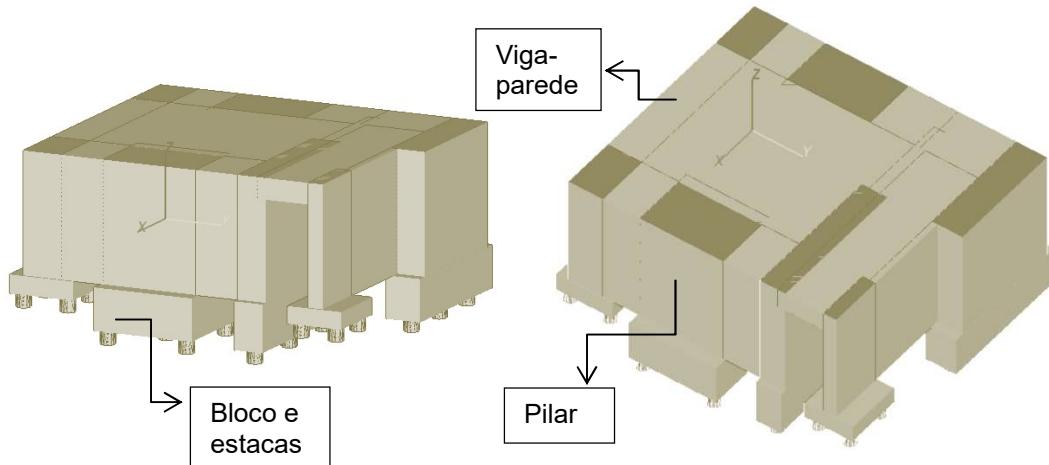
Figura 27 – Características de blocos de estacas e transferência de esforços



Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

Conforme se pode visualizar na Figura 28, a estrutura contempla os elementos estruturais descritos e ilustra com vistas tridimensionais a superestrutura e infraestrutura adotadas.

Figura 28 – Imagens tridimensionais da estrutura



Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

### 13.2.5 Critérios para durabilidade

Foram adotados os mesmos critérios de durabilidade utilizados no projeto de *bunker* enterrado.

### 13.2.6 Cobrimentos das armaduras

Os valores adotados no projeto do *bunker* estão reunidos na Tabela 17.

Tabela 17 – Tabela dos cobrimentos adotados no projeto do *bunker*

	Peças externas	Peças internas	Peças em contato com o solo
Vigas	3.00	2.50	3.00
Pilares	3.00	2.50	4.50
Lajes	2.50	-	3.00
Blocos	-	-	4.50

Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

### 13.2.7 Propriedades do concreto

Foi considerado fator água/cimento = 0,6 e concreto da Classe C25.

### 13.2.8 Propriedades do aço

O aço considerado neste projeto para dimensionamento das peças em concreto armado e que será empregado na construção são os mesmos empregados no projeto de *bunker* enterrado, ou seja, Categorias CA50 e CA60, conforme mostrado na Tabela 10.

### 13.2.9 Ações de carregamento

Para obtenção dos valores de cálculo das ações, foram definidos coeficientes de ponderação, conforme apresentado na tabela 11. Estes coeficientes foram definidos na NBR 6118/2014 para o cálculo das ações atuantes no estado limite último (ELU) para cada caso de carregamento. Os coeficientes de ponderação foram os mesmos utilizados no projeto do *bunker* enterrado.

### 13.2.10 Carregamentos das lajes

A Tabela 18 resume os dados considerados nos carregamentos das lajes conforme plantas do Anexo A.

Tabela 18 – Considerações e Carregamentos nas lajes do pavimento das escadas

Lajes			Dados	
Nome	Tipo	Altura	Peso próprio	Sobrecarga
		(cm)	(tf/m <sup>2</sup> )	(tf/m <sup>2</sup> )
L1	Maciça	80	2.00	3.99
L2	Maciça	80	2.00	5.05 (parcial)

Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

### 13.2.11 Ação do vento

O efeito do vento sobre a edificação foi avaliado a partir de diversos parâmetros que permitem definir as forças aplicadas sobre a estrutura. A Tabela 19 ilustra as considerações efetuadas neste projeto, com relação aos carregamentos considerados do vento.

Tabela 19 – Parâmetros adotados para consideração do vento

Parâmetros	Valor adotado	Observações
Velocidade ( $V_o$ )	42.00m/s	-
Maior dimensão horizontal ou vertical (S2)	Menor que 20 m	-
Rugosidade do terreno (S2)	Categoria III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.
Fator topográfico (S1)	1.0	Demais casos (que não sejam encostas e cristas de morros e vales profundos, quando são adotados valores diferentes.)
Fator estatístico (S3)	1.00	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.
Ângulo do vento em relação à horizontal	0°	Direção dos eixos x e y convencionais.
Direções de aplicação do vento	Vento X+ (V1)	Combinações de ações.
	Vento X- (V2)	
	Vento Y+ (V3)	
	Vento Y- (V4)	

Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

A velocidade básica considerada foi de  $V_o=42$  m/s, equivalente a um valor de 151 km/h e consta do Mapa das Isopletas da NBR 6123/2013 para a região de São Paulo. [32]

As forças estáticas devido ao vento foram calculadas para cada direção a partir dos parâmetros definidos, conforme apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 – Forças estáticas aplicadas nos pavimentos da estrutura devido ao vento

Pavimento	Fachada X	Fachada Y	Nível	S2	Coef.	Coef.	Força X	Força Y
	(cm)	(cm)	(cm)		Arrasto X	Arrasto Y	(tf)	(tf)
Cobertura	1327.50	1210.00	460.00	0.84	1.00	1.00	2.38	2.17
Piso	1327.50	1210.00	0.00	0.41	1.00	1.00	0.55	0.51

Fonte: Programa Eberick da Alto Qi

### 13.2.12 Modelo de análise

A análise da estrutura foi realizada a partir da criação de um modelo de pórtico, sendo a estrutura formada por pilares e vigas admitidos como elementos lineares representados por seus eixos longitudinais em alguns casos e em outras como vigas paredes, em função da geometria adotada. A modelagem das lajes de

concreto do pavimento foi realizada pelo processo da analogia de grelha, onde as lajes são discretizadas em faixas substituídas por elementos estruturais de barras, obtendo-se assim uma grelha de barras plana interconectadas.

## 14 CONCLUSÕES

Os dois projetos atendem as premissas iniciais de proteção radiológica por blindagem. A concepção dos dois projetos de arquitetura, considerando o *bunker* enterrado e não enterrado são viáveis em termos de funcionalidade para abrigar o acelerador linear de elétrons.

Os dois projetos podem ser analisados pela Tabela 21 em algumas de suas características, vantagens e desvantagens.

Em função de ter sido utilizado o concreto armado nos dois projetos, foi feito um estudo do custo de construção das duas modalidades estruturais, considerando que estas duas opções são viáveis em termos de geometria no espaço escolhido para a implantação deste equipamento. Não foi considerado no orçamento itens tais como: acabamentos, vedações, instalações hidráulicas, elétricas, esgoto, ar condicionado, impermeabilização, incêndio ou itens relacionados à operação, tais como de automatização e segurança. Estes itens são comuns as duas modalidades e representam peso equivalente no custo final.

Tabela 21 – Análise dos projetos de *bunker* enterrado e não enterrado

BUNKER ENTERRADO	BUNKER NÃO ENTERRADO
Área externa acima da construção liberada para utilização.	Área externa ocupada com a construção.
Estrutura mais esbelta - menor custo.	Estrutura mais robusta - maior custo.
Uso da terra adjacente às paredes - proteção radiológica e barreira de concreto no teto. Recomendável ser garantida a não construção de outro projeto no entorno.	Não utiliza terra como proteção radiológica. Barreira de blindagem em concreto armado em todas as superfícies externas com espessuras recomendadas.
Acessibilidade dificultada pela necessidade de uso de escadas. Possibilidade de colocação de elevador.	Acessibilidade facilitada – acesso pelo pavimento térreo.
Para a troca do equipamento, menor volume de demolição. Necessidade de escavação de terra.	Para a troca do equipamento, maior volume de demolição. Não há necessidade de escavação de terra.
Menos sujeita às variações climáticas.	Mais sujeita às variações climáticas.
Licenciamento da edificação sujeito a análise especial pela CNEN.	Licenciamento facilitado pela CNEN, pois considera o modelo padrão já conhecido de blindagem.

Fonte: Autor da tese/dissertação

No Anexo B foram mostrados os quantitativos de fôrmas, concreto e aço estrutural do *bunker* enterrado e do *bunker* não enterrado. As planilhas de custos constam no Anexo C. As planilhas de custos do Anexo C permitiram a obtenção de um custo total, dentre os itens considerados. Estes valores constam na Tabela 22.

Tabela 22 – Custo da estrutura – *bunker* enterrado e não enterrado

<b>BUNKER ENTERRADO</b>	<b>BUNKER NÃO ENTERRADO</b>
R\$ 240.555,35	R\$ 954.682,02
US\$ 67.571,72	US\$ 268.169,11

Fonte: Autor da tese/dissertação

Pode-se concluir, com relação aos custos mostrados na Tabela 22 que o custo da estrutura do *bunker* enterrado é 25% (vinte e cinco pontos percentuais) do custo da estrutura do *bunker* não enterrado. O valor em dólar americano foi feito na conversão de US\$ 1,00 = R\$ 3,56.

Com relação à atenuação de radiação, deve-se ressaltar que, na modalidade de projeto enterrado, deve ser assegurado que não se retire a terra ao longo do perímetro das paredes.

A análise com relação à colocação e retirada do acelerador linear, no caso do *bunker* enterrado, é de que pode ser feito acesso pela caixa das escadas, cujo conjunto pode ser estruturado de forma modular, para colocação e retirada dos equipamentos.

As estruturas de fundação relativas ao equipamento acelerador linear propriamente dito, não considerados neste projeto de pesquisa, bem como os elementos de apoio fixados nestas fundações, tais como chapas metálicas, com a devida qualificação, podem ser uniformizadas e tornar a eventual troca de equipamento, seja por manutenção ou por atualização, sustentável e viável, aproveitando-se a construção existente total ou parcialmente.

Alternativas adicionais ao processo desenvolvido nesta pesquisa deve ter análise do custo-benefício, seja por valor ou complexidade executiva.

O avanço tecnológico na fabricação dos aceleradores lineares de radioterapia tem garantido uma maior eficiência nos tratamentos e custos inferiores na aquisição e manutenção, mercado este focado em uma variedade tecnológica, relacionada em função das decisões tomadas na aquisição. O estudo de alternativa à limitação executiva de instalação de novas salas de radioterapia em função da complexidade construtiva e/ou custos relacionados tem foco neste projeto.

A opção do modelo enterrado tem como principais vantagens a utilização da área externa sem controle ou supervisão e custo da estrutura representando 25% do modelo não enterrado. A opção *bunker* enterrado foi considerada mais adequada entre os dois projetos estudados.

## 15 SUGESTÕES PARA OUTROS TRABALHOS

Para fins de continuidade e aprofundamento deste trabalho, os sistemas estruturais da construção enterrada e não enterrada podem ser estudados com outros materiais empregados na construção civil no Brasil, tais como o concreto pesado ou o aço, ou estruturas mistas contemplando perfis de aço e concreto.

O projeto com utilização do concreto pesado deve levar em conta que a norma de projetos de estrutura de concreto, NBR 6118/14, não prevê procedimentos de cálculo utilizando-se este compósito, já que se aplica somente aos concretos de massa específica normal, aqueles que, depois de secos em estufa, têm massa específica compreendida entre 2,0 e 2,8 tf/m<sup>3</sup>. Os programas de cálculo hoje utilizados no Brasil para dimensionamento das estruturas de concreto levam em conta a NBR 6118/14, portanto deve-se considerar a necessidade de cálculos especiais.

Outra vertente de extensão desta pesquisa é com relação à fase executiva de um bunker, cujas dimensões das peças tenham sido definidas pela barreira de proteção. Os procedimentos construtivos destas instalações, o controle tecnológico dos materiais empregados, as precauções para não ocorrência de patologias durante as fases de concretagem e endurecimento do concreto, podem ser objeto de estudo aprofundado, com a análise das precauções necessárias para prevenir patologias e garantir a barreira de proteção projetada.

Cabe também um aprofundamento junto aos fabricantes de aceleradores lineares, para elaboração de um projeto detalhado, com um sistema estrutural que possibilite a manutenção e aproveitamento futuro desta instalação, em casos de necessidade de substituição deste equipamento. Modelos construtivos racionais e seguros, com possibilidade de troca dos equipamentos, são vertentes para uma extensão desta pesquisa, considerando a particularidade destas instalações, desde a concepção.

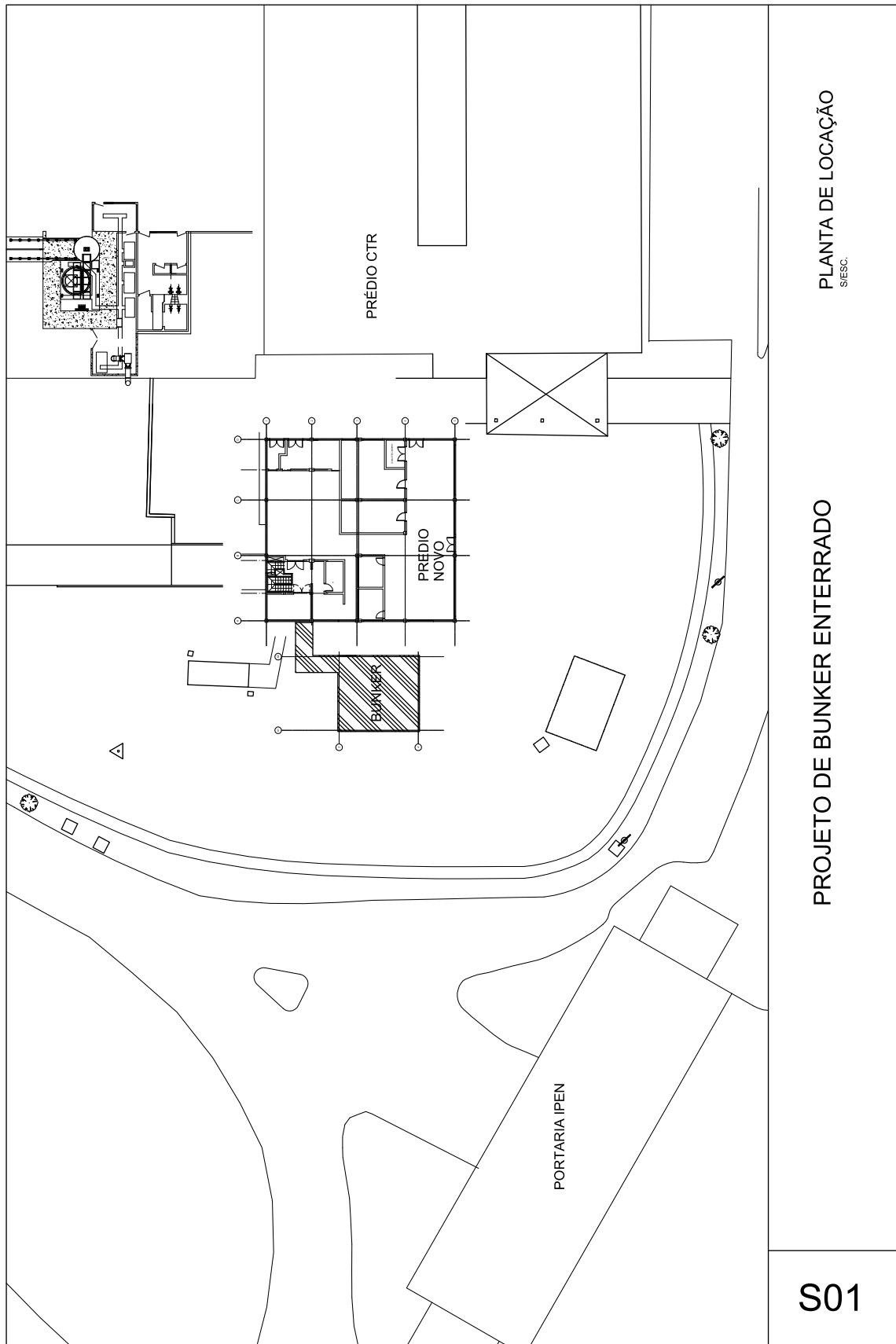
## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

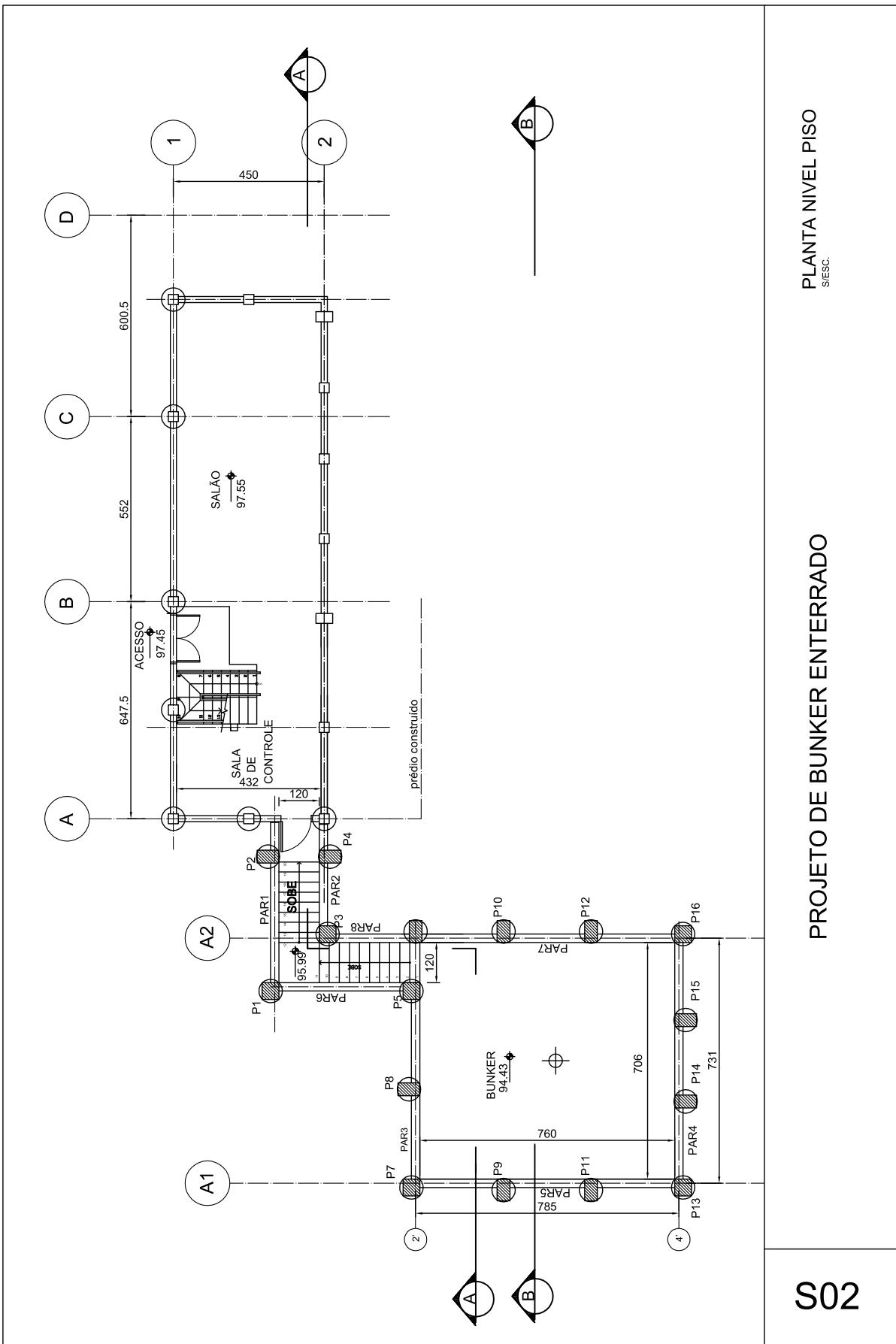
1. INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER JOSÉ ALENCAR GOMES DA SILVA - INCA. **Estimativa/2016 – Incidência do câncer no Brasil.** INCA. Rio de Janeiro. 2016.
2. SALVAJOLI, J. V. E. O. **Radioterapia em oncologia.** Rio de Janeiro: EDITORA ATHENEU RIO, 2013.
3. NANDI, D. M. **Estudo de Funcionalidade e Segurança para Aceleradores Lineares Utilizados em Radioterapia - Uma contribuição para a Gestão de Tecnologia Médico-Hospitalar.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 123. 2004.
4. INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER JOSÉ ALENCAR GOMES DA SILVA - INCA. Biblioteca Virtual em Saúde. **Bases do tratamento do câncer:** livro 5, 1994. Disponível em: <<http://pesquisa.bvsalud.org/bvsms/resource/pt/mis-3080>>. Acesso em: 29 abr. 2018.
5. SCAFF, L. A. M. **FÍSICA DA RADIOTERAPIA.** São Paulo: Sarvier Editora de Livros Médicos Ltda., 1997. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/outros/22044.pdf>>.
6. SALGADO, N. A Radioterapia no Tratamento Oncológico: Prática Clínica e Sensibilidade Cultural. **Interações: Sociedade e as novas modernidades**, n. 22, 2013. ISSN 0873-0725. Disponível em: <<http://www.interacoes-ismt.com/index.php/revista/article/view/334>>. Acesso em: 15 fev 2018.
7. ALMEIDA, F. B. D. Acelerador Linear. **Brasil Escola.** Disponível em: <<http://www.brasilescola.com/fisica/acelerador-linear.htm>>. Acesso em: 21 Outubro 2015.
8. MARTINS, H. L. Princípios físicos da radioterapia. Disponível em: <<http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/images/documentos/Radioterapia.pdf>>. Acesso em: 13 Outubro 2017.
9. COLLACITE, A. L. Levantamento Radiométrico, Cálculo de Blindagem e Planejamentos Rotineiros Realizados no Instituto de Radioterapia do Vale do Paraíba e no Hospital Regional de Taubaté no Período de 2006, 2007 e 2008. **UNESP**, 2008. Disponível em: <[http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/118704/collacite\\_al\\_tcc\\_bot.pdf?sequence=1](http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/118704/collacite_al_tcc_bot.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 13 Outubro 2017.
10. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Biblioteca Ferramenta - Radiologia Convencional. **Tecnico em radiologia.** Disponível em: <<http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologia-convencional/tecnologia-e-funcionamento-dos-equipamentosrx/tubo-de-raios-x/interacoes-no-anodo>>. Acesso em: 13 Maio 2017.
11. TAUHATA, L. E. O. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. **Site da IAEA**, Novembro 2013. Disponível em: <[http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/45/073/45073465.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073465.pdf)>. Acesso em: 13 Outubro 2017.
12. BERTOLDO, L. **Efeito Fotoelétrico.** São Paulo: Editora Clube de Autores, 2010. 61 p.
13. CNEN. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica.** COMISSÃO NACIONAL

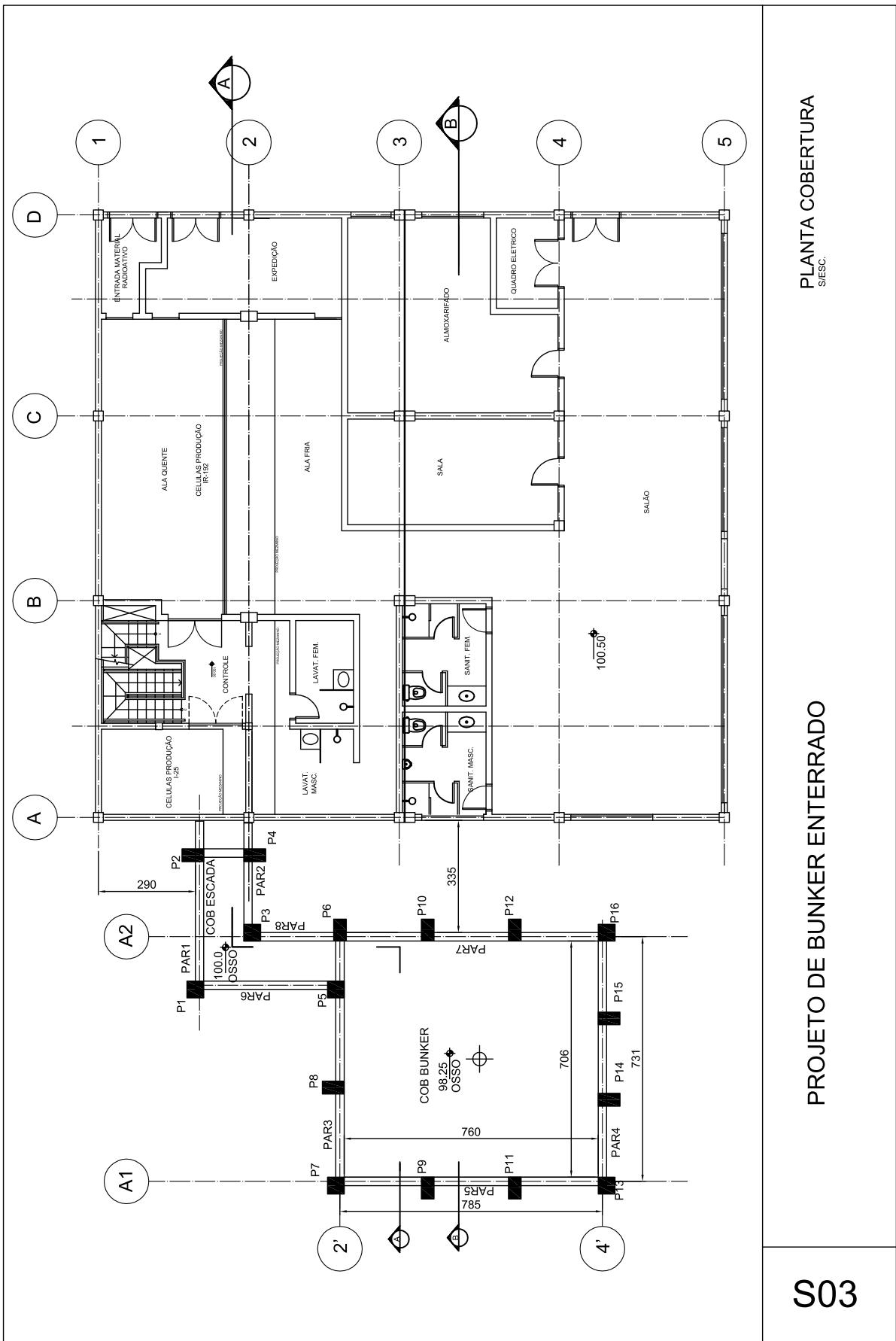
- DE ENERGIA NUCLEAR. Rio de Janeiro. 2011.
14. NCRP151. **Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X-and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities**. Nacional Council on Radiation Protection and Mesurements. Washington D.C. 2005.
  15. ALBUQUERQUE, S. M. **Estudo para o desenvolvimento e caracterização de concretos de massa específica elevada para proteção às radiações gama e X**. Dissertação (Doutorado) - IPEN. São Paulo, p. 156. 2014.
  16. VIGNA E., F. R. C. Blindagem em Radioterapia - Técnicas e Normas, 2000. Disponível em: <[www.fisica.net/nuclear/blindagem\\_em\\_radioterapia.pdf](http://www.fisica.net/nuclear/blindagem_em_radioterapia.pdf)>. Acesso em: 20 Setembro 2015.
  17. COSTA, P. R. **Modelo para Determinação de Espessuras de Barreiras Protetoras em Salas para Radiologia Diagnóstica**. IPEN- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, p. 143. 1999.
  18. BARROS, G. A. S. J. **Projeto de um Laboratório Integrado de Calibração de Instrumentos no IPEN**. IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, p. 85. 2009.
  19. PEDROSA, P. S.; GAVAZZA, S. **Cálculo de Blindagem para Instalações de Radioterapia por Raios X com Auxílio de Computador**. Instituto Militar de Engenharia – IME. Rio de Janeiro. 2004.
  20. HUBBELL, J. H.; SELTZER, S. M. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients. **PHYSICAL MEASUREMENT LABORATORY-PML**, GAITHERSBURG, 1996.
  21. PETRUCCI, E. G. **Concreto de Cimento Portland**. 2<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1973.
  22. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 11. 2009.
  23. BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. SÃO PAULO: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1972.
  24. HELENE, P. T. P. **MANUAL DE DOSAGEM E CONTROLE DO CONCRETO**. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.
  25. SUSSEKIND, J. C. **Curso de Concreto**. 2<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Editora Globo, v. I, 1981. 376 p.
  26. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.
  27. PAIVA, E. Princípios do cálculo de blindagem em radioterapia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Rio de Janeiro, set 2014.
  28. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681 - Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 18 p.
  29. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Pregão Presencial n.05/2013**. Brasilia/ DF, p. 166. 2013.
  30. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122 - Projeto e Execução de Fundações**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 91. 2010.
  31. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6118: Projeto de**

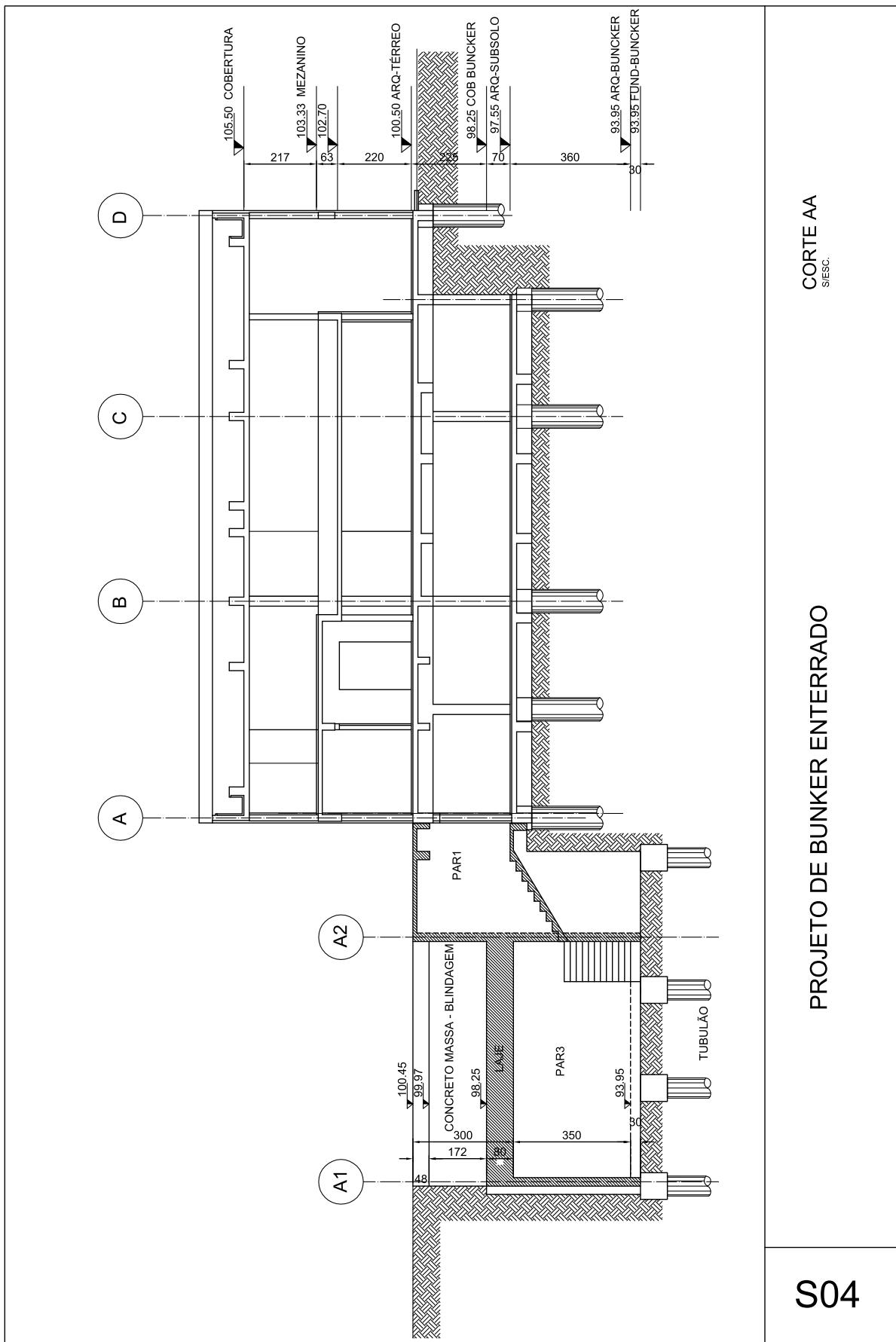
- estruturas de concreto — Procedimento.** Rio de Janeiro, p. 238. 2014.
32. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações.** ABNT. Rio de Janeiro, p. 66. 2013.
33. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.** Rio de Janeiro: ABNT, 2000. 5 p.

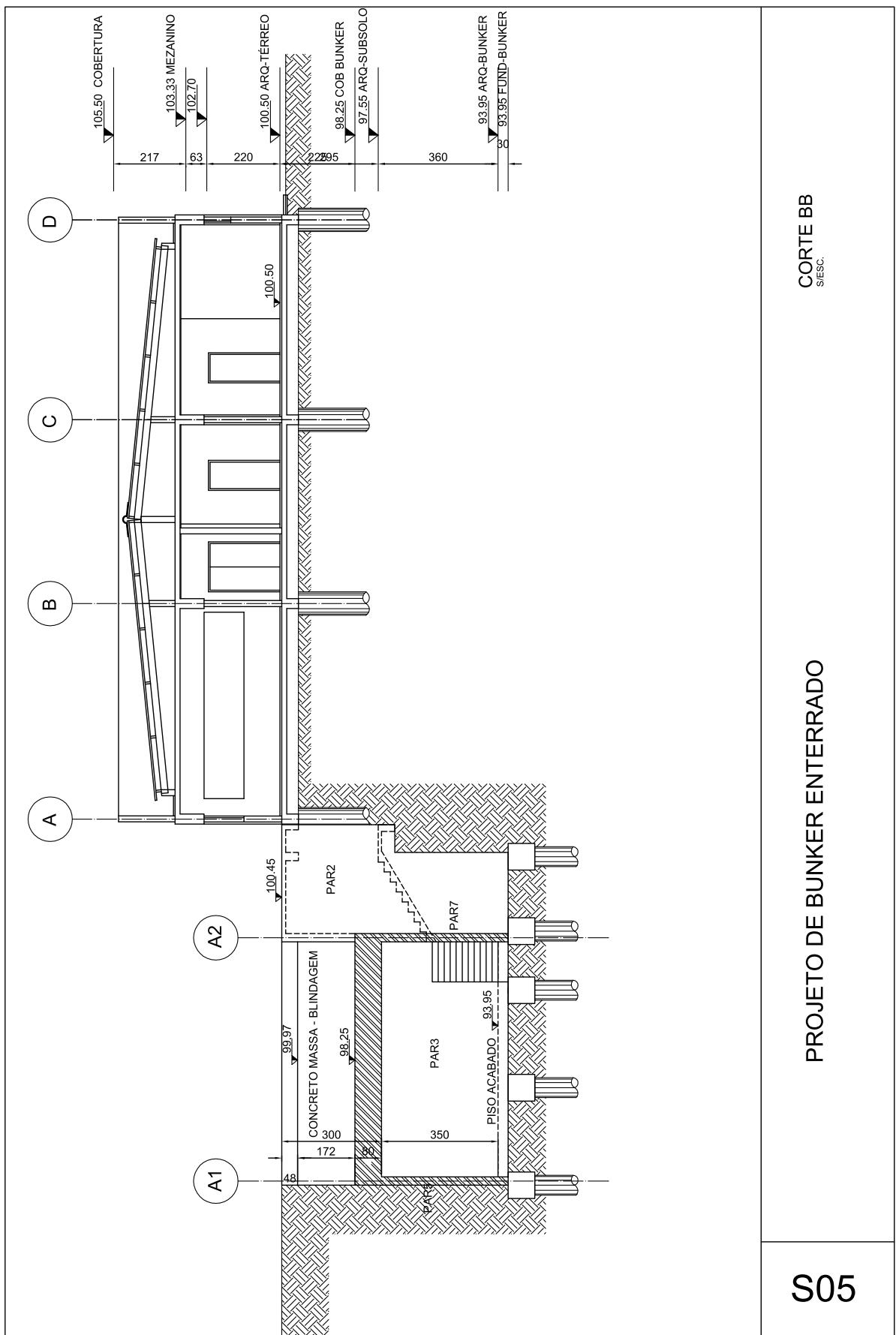
## ANEXO A – PROJETOS: Plantas e Cortes

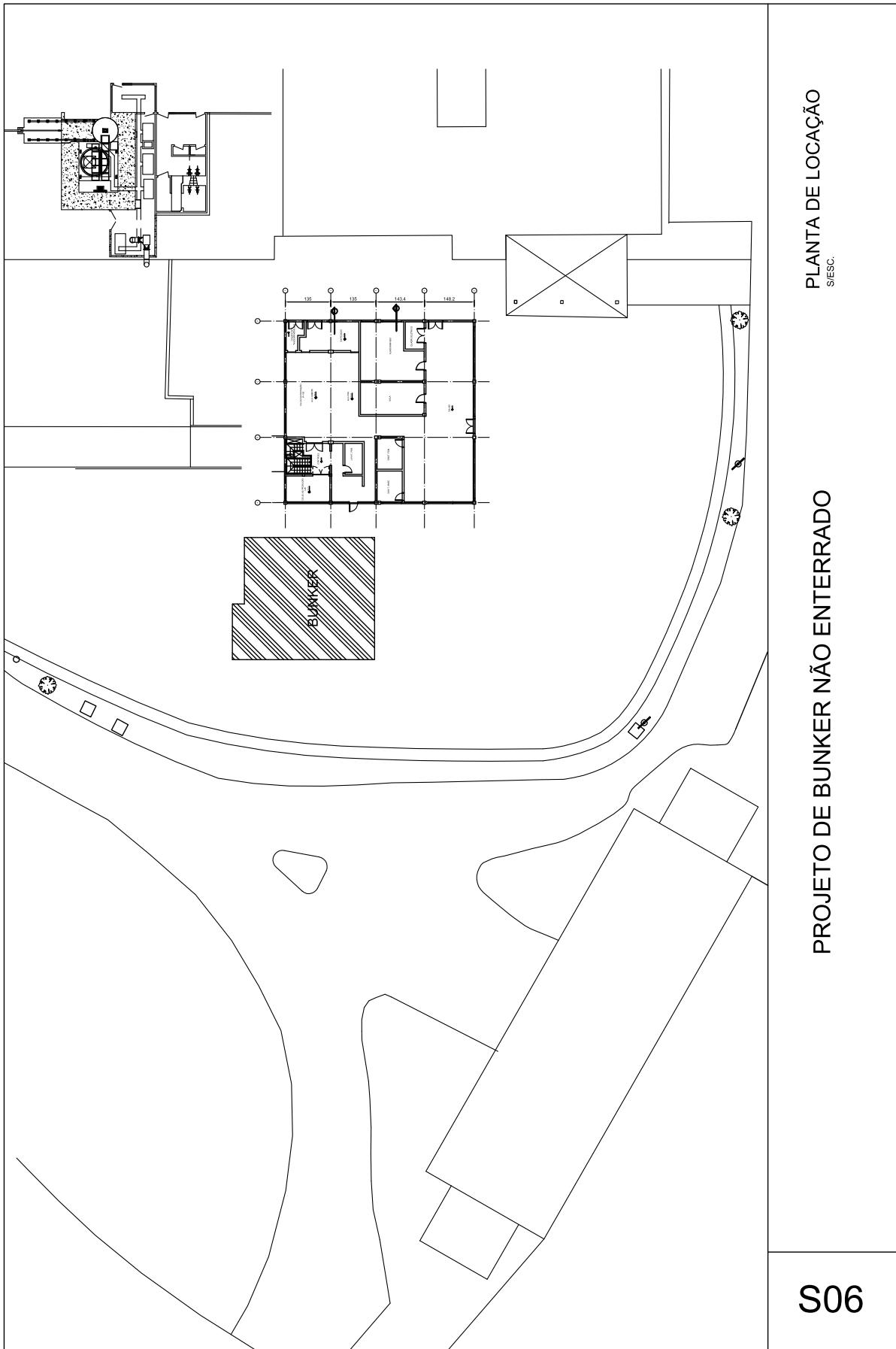


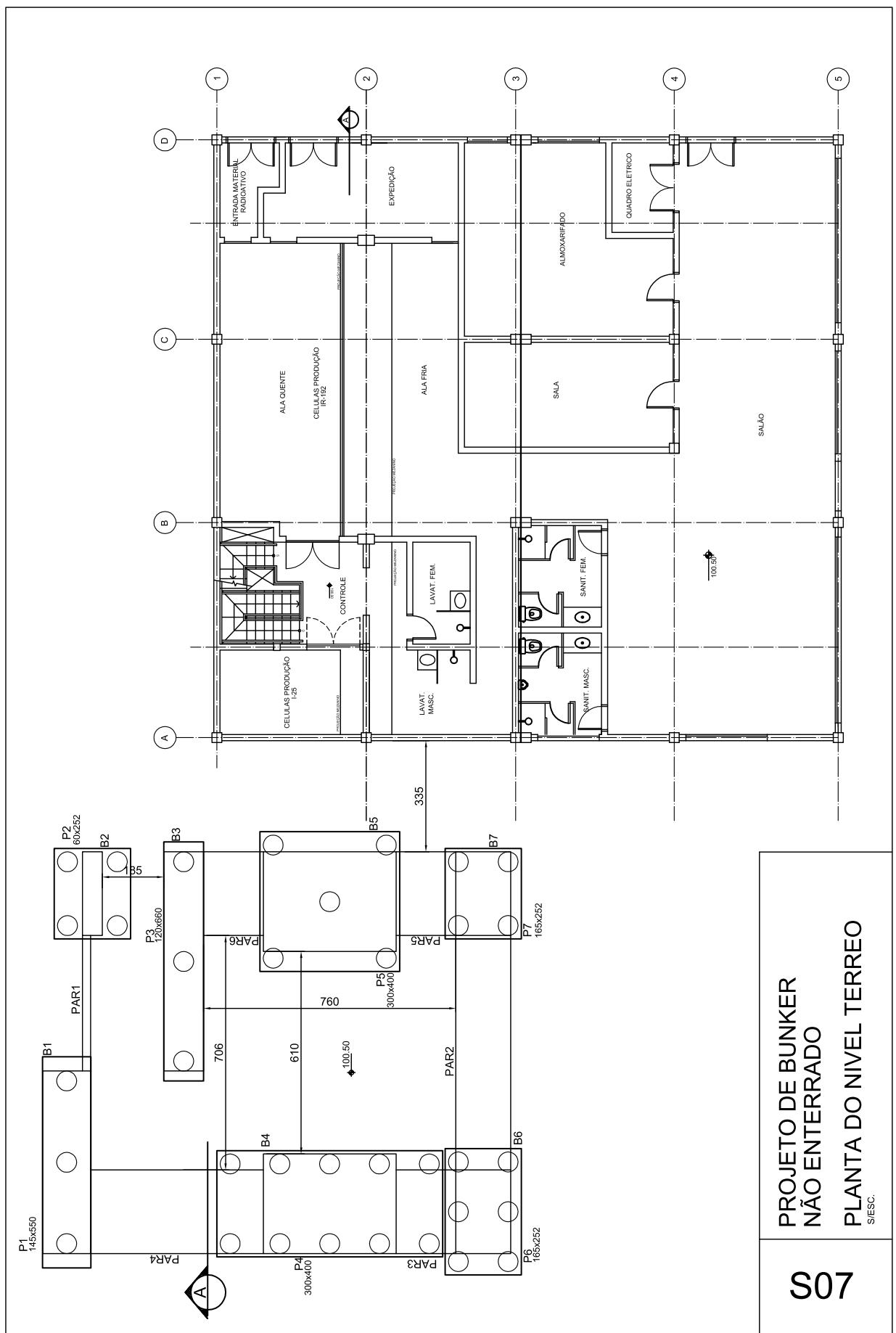


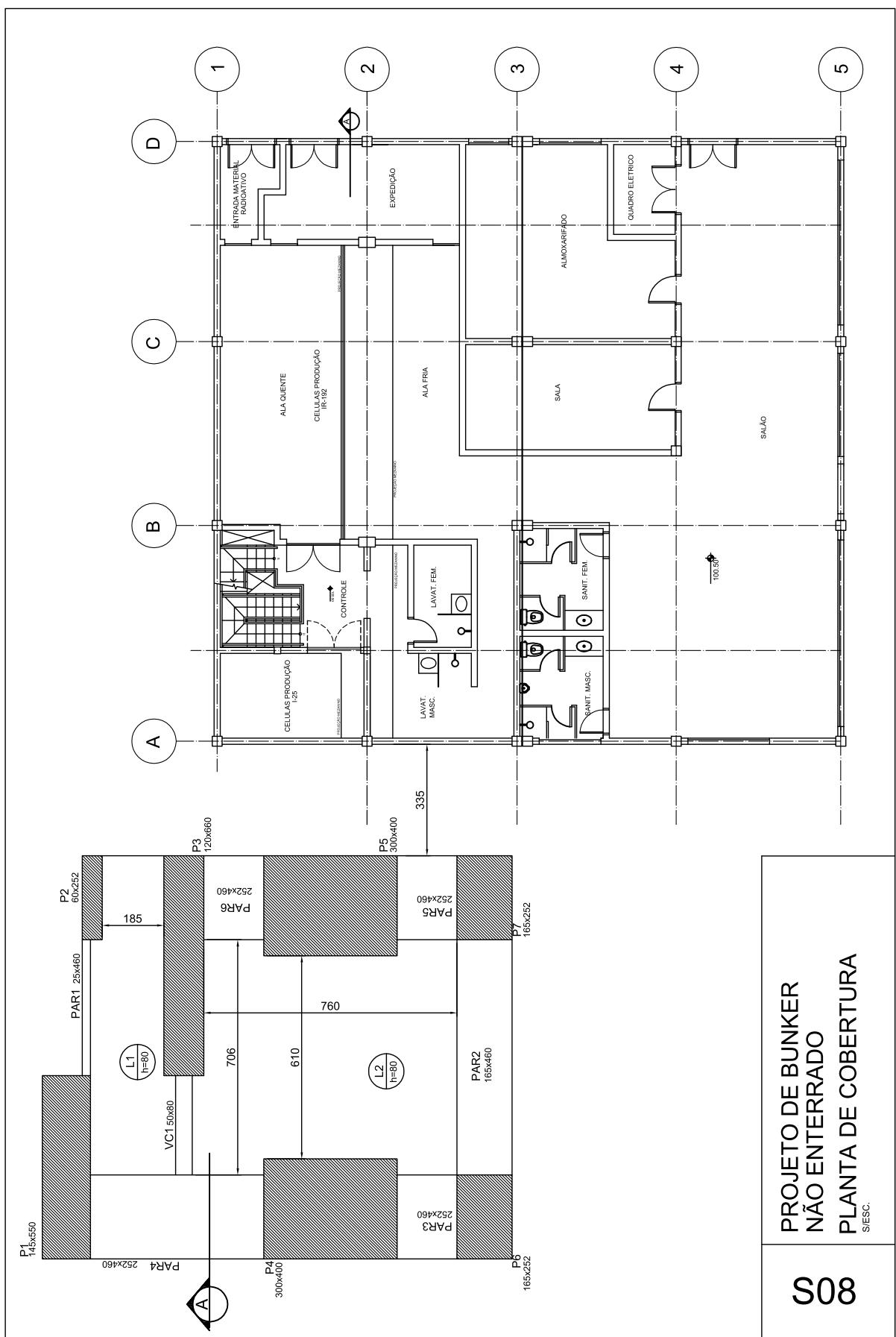


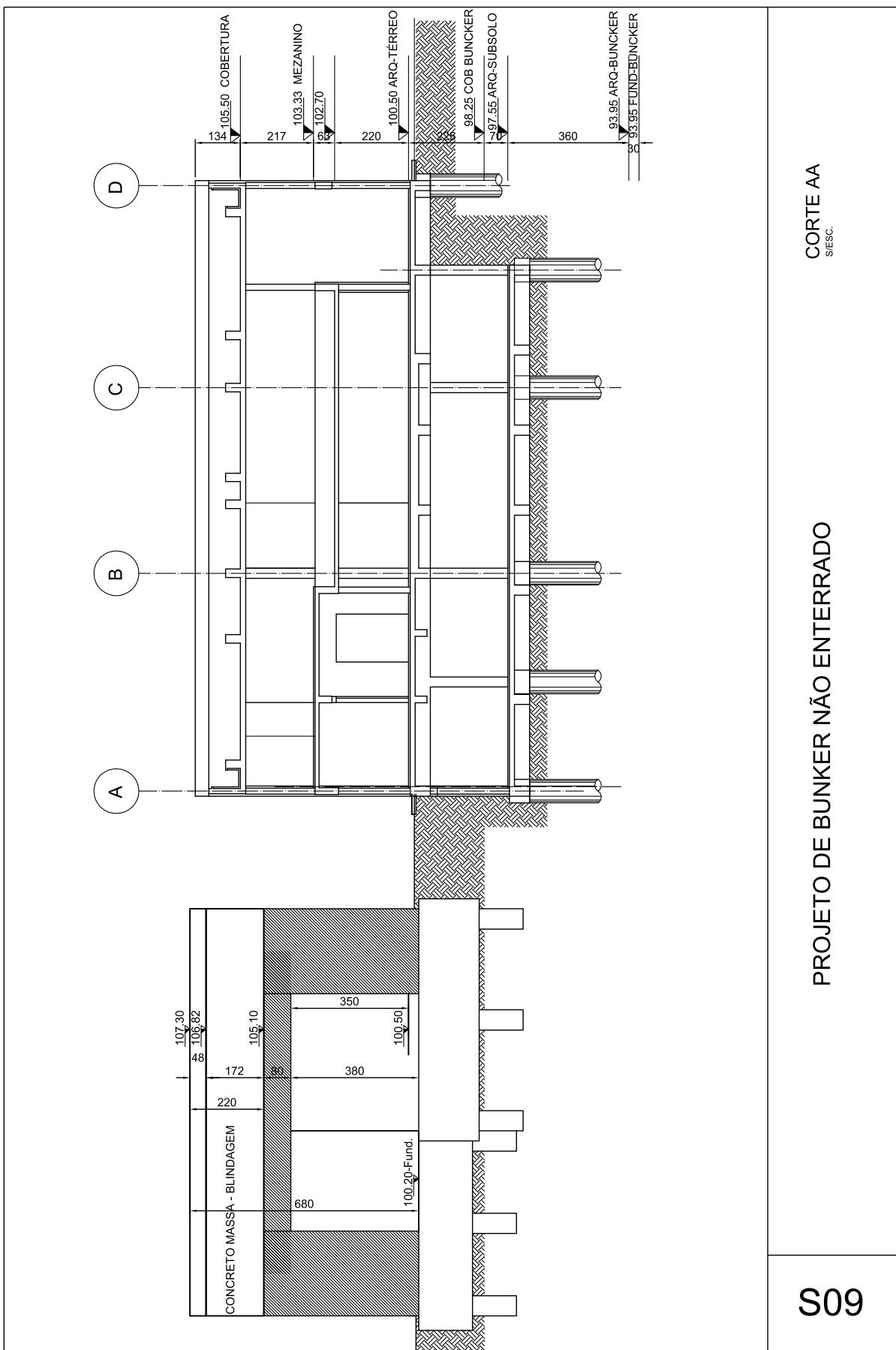












## ANEXO B – QUANTITATIVOS DE MATERIAIS E SERVIÇOS

### Bunker enterrado

Resumo de Materiais (Moldados in Loco)  
AltoQi Eberick V10 Plena

Pavimento	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m³)	Área de forma (m²)	Consumo de aço (kg/m³)
cobertura	Vigas	1141.2	17.6	147.2	64.8
	Pilares	236.4	3.3	26.8	72.1
	Lajes	54.7	1.0	8.6	53.1
	Escadas	0.0	0.0	0.0	0.0
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0
	Total	1432.2	21.9	182.6	65.3
cobBunker	Vigas	2026.3	36.2	297.1	56.1
	Pilares	226.5	2.8	22.8	81.5
	Lajes	1812.1	42.9	55.1	42.2
	Escadas	0.0	0.0	0.0	0.0
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0
	Total	4065.0	81.9	375.0	49.7
pisoSala/esc	Vigas	412.7	7.5	65.7	55.1
	Pilares	1060.9	14.3	117.4	74.2
	Lajes	0.0	0.0	0.0	0.0
	Escadas	95.4	2.0	20.3	47.2
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0
	Total	1569.1	23.8	203.4	65.9
pisoBunker	Vigas	6.9	0.2	2.2	39.2
	Pilares	345.2	4.6	37.5	75.6
	Lajes	0.0	0.0	0.0	0.0
	Escadas	0.0	0.0	0.0	0.0
	Fundações	1194.9	44.1	51.8	27.1
	Total	1546.9	48.9	91.5	31.7

Aço	Diâmetro (mm)	Peso + 10 % (kg)					
		Vigas	Pilares	Lajes	Escadas	Fundações	Total
CA50	6.3	1445.1	18.6	27.5	20.1	25.9	1537.2
CA50	8.0			654.0	27.2	76.8	757.9
CA50	10.0	74.3	561.1		48.1	900.1	1583.6
CA50	12.5	9.5	134.7	888.9		8.4	1041.6
CA50	16.0	201.7	678.4				880.0
CA50	20.0	1605.5					1605.5
CA50	25.0	175.1					175.1
CA60	5.0	75.9	476.3	296.4		183.7	1032.3

	Vigas	Pilares	Lajes	Escadas	Fundações	Total
Peso total + 10% (kg)	CA50	3511.3	1392.7	1570.4	95.4	1011.2
	CA60	75.9	476.3	296.4		183.7
	Total	3587.1	1869.0	1866.8	95.4	1194.9
Volume concreto (m³)	C-25	61.4	24.9	44.0	2.0	44.1
Área de forma (m²)		512.1	204.5	63.7	20.3	51.8
Consumo de aço (kg/m³)		58.4	75.0	42.5	47.2	27.1
						48.8

## Bunker não enterrado

Resumo de Materiais (Moldados in Loco)  
AltoQi Eberick V10 Plena

Pavimento	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m³)	Área de forma (m²)	Consumo de aço (kg/m³)
cobert	Vigas	17930.3	483.9	628.2	37.1
	Pilares	12637.0	228.7	369.9	55.2
	Lajes	6341.3	71.6	91.7	88.6
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0
	Total	36908.6	784.2	1089.8	47.1
Piso	Vigas	0.0	0.0	0.0	0.0
	Pilares	4246.8	66.3	103.0	64.0
	Lajes	0.0	0.0	0.0	0.0
	Fundações	7523.3	102.3	131.5	73.5
	Total	11770.1	168.7	234.5	69.8

Aço	Diâmetro (mm)	Peso + 10 % (kg)				
		Vigas	Pilares	Lajes	Fundações	Total
CA50	6.3	2246.1	3057.0		41.1	5344.2
CA50	8.0	1802.4	1624.8	1193.9	237.8	4858.9
CA50	10.0	20.5			153.5	174.0
CA50	12.5	25.2		4506.6	344.7	4876.6
CA50	16.0	38.0			100.8	138.8
CA50	20.0	403.3	326.6		5363.4	6093.3
CA50	25.0	13372.0	11822.4			25194.4
CA60	5.0	22.8	53.0	640.8	1282.1	1998.6

		Vigas	Pilares	Lajes	Fundações	Total
Peso total + 10% (kg)	CA50	17907.5	16830.8	5700.5	6241.2	46680.1
	CA60	22.8	53.0	640.8	1282.1	1998.6
	Total	17930.3	16883.8	6341.3	7523.3	48678.8
Volume concreto (m³)		C-25	483.9	295.1	71.6	102.3
Área de forma (m²)			628.2	473.0	91.7	131.5
Consumo de aço (kg/m³)			37.1	57.2	88.6	73.5
						51.1

## ANEXO C – Planilhas de Custo

Unidade: IPEN/USP  
 Assunto: BUNKER ENTERRADO  
 Endereço: ANEXO CTR

Nº do Item	Natureza dos Serviços	Un	Qtde	Preço Unit	Preço Total
<b>01.00.00 SERVICOS PRELIMINARES</b>					
<b>01-03-00 MOVIMENTO DE TERRA MECANIZADO</b>					
01-03-03	CORTE E CARREGAMENTO PARA BOTA-FORA, INCLUSIVE TRANSPORTE ATÉ 1KM	M3	652,80	13,63	8.897,66
01-03-04	FORNECIMENTO DE TERRA, INCLUSIVE CORTE, CARGA, DESCARGA E TRANSPORTE ATÉ 1KM	M3	153,14	15,97	2.445,65
<b>02.00.00 FUNDACOES</b>					
<b>02-01-00 FUNDAÇÃO PROFUNDA</b>					
02-01-34	TUBULÃO A CÉU ABERTO FCK=20 MPA	M3	44,10	502,12	22.143,49
<b>02-03-00 FUNDAÇÃO - FORMA</b>					
02-03-04	FORMA COMUM DE TÁBUAS DE PINUS - NÃO RECUPERÁVEL	M2	51,80	56,12	2.907,02
<b>02-04-00 FUNDAÇÃO - ARMADURA</b>					
02-04-04	ARMADURA EM AÇO CA-50	KG	1.011,20	7,12	7.199,74
02-04-07	ARMADURA EM AÇO CA-60	KG	183,70	7,60	1.396,12
<b>02-05-00 FUNDAÇÃO - CONCRETO</b>					
02-05-10	CONCRETO FCK=25MPA - USINADO	M3	44,10	323,54	14.268,11
<b>03.00.00 ESTRUTURA</b>					
<b>03-01-00 ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO - FORMAS</b>					
03-01-15	FORMA ESPECIAL DE CHAPAS RESINADAS (12MM) - PLANA	M2	800,60	69,08	55.305,45
Vígas			512,10		
Pilares			204,50		
Lajes			63,70		
Escadas			20,30		
<b>03-02-00 ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO - ARMADURA</b>					
03-02-04	ARMADURA EM AÇO CA-50	KG	6.569,80	7,12	46.776,98
Vígas			3.511,30		
Pilares			1.392,70		
Lajes			1.570,40		
Escadas			95,40		
03-02-07	ARMADURA EM AÇO CA-60	KG	848,60	7,60	6.449,36
Vígas			75,90		
Pilares			476,30		
Lajes			296,40		
<b>03-03-00 ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO - CONCRETO</b>					
03-03-16	CONCRETO FCK = 20,0MPA - USINADO E BOMBEÁVEL	M3	119,97	298,24	35.779,85
Concreto massa proteção radiológica na cobertura			119,97		
03-03-18	CONCRETO FCK = 25,0MPA - USINADO E BOMBEÁVEL	M3	132,30	307,20	40.642,56
Vígas			61,40		
Pilares			24,90		
Lajes			44,00		
Escadas			2,00		
03-03-30	BOMBEAMENTO DE CONCRETO	M3	252,27	30,47	7.686,67
Vígas			61,40		
Pilares			24,90		
Lajes			44,00		
Escadas			2,00		
Concreto massa proteção radiológica na cobertura			119,97		
<b>TOTAL</b>					<b>R\$ 240.555,35</b>
BDI 25%					<b>R\$ 60.138,84</b>
<b>TOTAL COM BDI</b>					<b>R\$ 300.694,19</b>

BDI - Benefícios e Despesas Indiretas

TABELA DE PREÇO COM BASE EM JANEIRO DE 2018

VALORES COM BASE NA TCPO - Tabela de Composições e Preços para Orçamento/ EDITORA PINI

Unidade: IPEN/USP  
Assunto: BUNKER NÃO ENTERRADO  
Endereço: ANEXO CTR

Nº do Item	Natureza dos Serviços	Un	Qtde	Preço Unit	Preço Total
<b>02.00.00</b>	<b>FUNDACOES</b>				
<b>02-01-00</b>	<b>FUNDAÇÃO PROFUNDA</b>				
02-01-85	ESTACA ESCAVADA HÉLICE CONTÍNUA - DIÂMETRO 60CM	M	525,00	150,02	<b>78.760,50</b>
<b>02-02-00</b>	<b>VALAS</b>				
02-02-02	ESCAVAÇÃO MANUAL COM PROFUNDIDADE SUPERIOR A 1,50M	M3	289,60	51,90	<b>15.030,24</b>
02-02-16	LASTRO DE CONCRETO - 150KG CIM/M3	M3	9,05	313,99	<b>2.841,61</b>
<b>02-03-00</b>	<b>FUNDAÇÃO - FORMA</b>				
	FORMA COMUM DE TÁBUAS DE PINUS - NÃO RECUPERÁVEL	M2	131,50	56,12	<b>7.379,78</b>
<b>02-04-00</b>	<b>FUNDAÇÃO - ARMADURA</b>				
02-04-04	ARMADURA EM AÇO CA-50	KG	6.241,20	7,12	<b>44.437,34</b>
02-04-07	ARMADURA EM AÇO CA-60	KG	1.282,10	7,60	<b>9.743,96</b>
<b>02-05-00</b>	<b>FUNDAÇÃO - CONCRETO</b>				
02-05-10	CONCRETO FCK=25MPA - USINADO	M3	102,30	323,54	<b>33.098,14</b>
<b>03.00.00</b>	<b>ESTRUTURA</b>				
<b>03-01-00</b>	<b>ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO - FORMAS</b>				
03-01-15	FORMA ESPECIAL DE CHAPAS RESINADAS (12MM) - PLANA	M2	1.192,90	69,08	<b>82.405,53</b>
	Vigas		628,20		
	Pilares		473,00		
	Lajes		91,70		
<b>03-02-00</b>	<b>ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO - ARMADURA</b>				
03-02-04	ARMADURA EM AÇO CA-50	KG	40.438,80	7,12	<b>287.924,26</b>
	Vigas		17.907,50		
	Pilares		16.830,80		
	Lajes		5.700,50		
03-02-07	ARMADURA EM AÇO CA-60	KG	716,60	7,60	<b>5.446,16</b>
	Vigas		22,80		
	Pilares		53,00		
	Lajes		640,80		
<b>03-03-00</b>	<b>ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO - CONCRETO</b>				
03-03-16	CONCRETO FCK = 20,0MPA - USINADO E BOMBEÁVEL	M3	303,06	298,24	<b>90.384,26</b>
	Concreto massa proteção radiológica na cobertura		303,06		
03-03-18	CONCRETO FCK = 25,0MPA - USINADO E BOMBEÁVEL	M3	850,60	307,20	<b>261.304,32</b>
	Vigas				
	Pilares				
	Lajes				
03-03-30	BOMBEAMENTO DE CONCRETO	M3	1.179,06	30,47	<b>35.925,92</b>
	Vigas				
	Pilares				
	Lajes				
	Concreto massa proteção radiológica na cobertura				
		TOTAL	R\$ 954.682,02		
		BDI	25%	R\$ 238.670,51	
		TOTAL COM BDI	R\$ 1.193.352,53		

BDI - Benefícios e Despesas Indiretas

TABELA DE PREÇO COM BASE EM JANEIRO DE 2018

VALORES COM BASE NA TPCO - Tabela de Composições e Precos para Orcamento/ EDITORA PIN



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino**

**Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000**

**Fone/Fax(0XX11) 3133-8908**

**SÃO PAULO – São Paulo – Brasil**

**<http://www.ipen.br>**

**O IPEN é uma Autquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada  
à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela  
Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do  
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.**