

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE MEDICINA VETERINÁRIA E ZOOTECNIA

**DETERMINAÇÃO DE BLINDAGENS RADIOLÓGICAS PARA
PROCEDIMENTOS DE RADIOTERAPIA VETERINÁRIA**

MARINA DE CARVALHO

Botucatu- SP
Setembro / 2019

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE MEDICINA VETERINÁRIA E ZOOTECNIA**

**DETERMINAÇÃO DE BLINDAGENS RADIOLÓGICAS PARA
PROCEDIMENTOS DE RADIOTERAPIA VETERINÁRIA**

MARINA DE CARVALHO

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Animais Selvagens da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Botucatu, como requisito para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof. Associado Marco Antônio Rodrigues Fernandes

Botucatu- SP

Set / 2019

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉC. AQUIS. TRATAMENTO DA
INFORM. DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CÂMPUS DE
BOTUCATU - UNESP

BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: ROSEMEIRE APARECIDA VICENTE-CRB 8/5651

Carvalho, Marina de.

Determinação de blindagem radiológica para
procedimentos de radioterapia veterinária / Marina de
Carvalho. - Botucatu, 2019

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Medicina
Veterinária e Zootecnia

Orientador: Marco Antônio Rodrigues Fernandes

Capes: 50501038

1. Radioterapia. 2. Animais selvagens. 3. Exposição a
radiação. 4. Braquiterapia. 5. Blindagem (Radiação). 6.
Radiação - Medidas de segurança. 7. Medicina veterinária.

Palavras-chave: Animais selvagens; Braquiterapia; Cálculo
de blindagem; Proteção radiológica; Radioterapia.

Nome do autor: **Marina de Carvalho**

TÍTULO: DETERMINAÇÃO DE BLINDAGEM RADIOLÓGICA PARA PROCEDIMENTO DE RADIOTERAPIA VETERINÁRIA

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Associado Dr. Marco Antônio Rodrigues Fernandes
Orientador

Departamento de Dermatologia e Radioterapia
FMB – UNESP – BOTUCATU

Prof^a. Dr^a. Sheila Cavanese Rahal

Departamento de Cirurgia e Anestesiologia Veterinária
FMVZ – UNESP – BOTUCATU

Prof. Dr. Rodrigo Sanchez Giarola

Departamento de Física e Biofísica
Instituto de Biociências – UNESP – BOTUCATU

Data da Defesa: 12 de Setembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Antônio Rodrigues Fernandes, com seu dom de ensinar, por ter me recebido e pelas oportunidades incríveis que vou levar como aprendizado para resto da vida. Obrigada por toda a ajuda, pela paciência, pela compreensão, pelo exemplo de esforço.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

A toda minha família pelo apoio e incentivo em todos esses anos de estudo, por acreditarem na minha capacidade.

Ao meu namorado, Dr. Rafael Bottaro Gelaleti, por me amparar nos momentos difíceis, me dar força para superar as dificuldades, mostrando os caminhos nas horas incertas.

E por último as minhas terapeutas, por me ajudarem a superar meus limites, por me ajudarem a chegar até aqui, quando acreditei não ser capaz.

“Não é tão simples viver a vida. Às vezes, ela contém capítulos imprevisíveis. Mas é possível escrever os principais textos de nossas vidas nos momentos mais difíceis de nossa existência”

Augusto Cury

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	i
LISTA DE SIGLASE ABREVIações.....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
1. INTRODUÇÃO.....	6
2. OBJETIVOS	
2.1 – Objetivo Geral.....	13
2.2 – Objetivos Específicos.....	13
2.3 – Justificativas do Trabalho.....	13
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	14
3.1 – O câncer e formas de tratamento.....	15
3.2 – Câncer e Radioterapia na medicina veterinária.....	16
3.3 – Interação da radiação eletromagnética com a matéria.....	22
3.4 – Proteção Radiológica.....	25
3.5 - Blindagem de salas para procedimentos de radioterapia.....	27
3.6 - Parâmetros de blindagem radiológica.....	28
3.6.1 - Carga de Trabalho – W.....	28
3.6.2 - Limite Máximo Permissível de Dose Equivalente – P (H).....	28
3.6.3 - Fator Uso – U.....	29
3.6.4 - Fator Ocupacional – T.....	29
3.7 - Cálculo das espessuras das barreiras de proteção radiológica.....	30
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	34
4.1 Equações para cálculos de blindagem em radioterapia de ortovoltagem...37	
4.2 Equações para cálculos de blindagem para salas de BATD.....	40
4.3 Equações para cálculos de blindagem para salas de BBTD.....	41
4.4 Dimensionamento das paredes do canil para BBTD.....	42
5 RESULTADOS.....	44
5.1 Dimensionamento das paredes - feixes de ortovoltagem.....	44
5.1.1 Espessuras para construção – ortovoltagem (NCRP49).....	47
5.2 Dimensionamento das espessuras das paredes para BATD.....	49
5.3 Dimensionamento das espessuras das paredes para BBTD.....	51
5.4 Dimensionamento das paredes do canil para BBTD – diferentes fontes....	51
6 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....	54
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Probabilidade de interação em função da energia dos fótons.....	23
Figura 2 Atenuação da radiação de barreira.....	24
Figura 3 Curva de atenuação relativa em função da espessura do absorvedor.	24
Figura 4 Croqui da sala de radioterapia veterinária	37
Figura 5 Vista da planta baixa da área de canis da FMVZ	43
Figura 6 Visão ampliada da área de um canil – identificação pontos de cálculo.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Valores de HVL (CSR) e TVL (CDR) de materiais atenuadores.....	25
Tabela 2 Características das fontes de radiação e energia de ortovoltagem.....	35
Tabela 3 Valores típicos da taxa de kerma no ar para fontes de braquiterapia	36
Tabela 4 Espessura das paredes para feixes espalhados – ortovoltagem – MCLD	46
Tabela 5 Espessura das paredes para radiação de fuga – ortovoltagem – MCLD	46
Tabela 6 Espessura das paredes para radiação primária – ortovoltagem – MCLD.....	47
Tabela 7 Espessura das paredes para construção – ortovoltagem– MCLD.....	47
Tabela 8 Espessura das paredes calculadas pelo NCRP-49– ortovoltagem	49
Tabela 9 Espessura das paredes para BATD– MCLD	50
Tabela 10 Valores calculados para fontes de Ir-192 de baixa taxa de dose	51
Tabela 11 Valores calculados da espessura da barreira: I-25 e Au-298 – BBTD	52
Tabela 12 Valores calculados da espessura da barreira: Co-60 e Cs-137 – BBTD	52
Tabela 13 Espessuras para as paredes do canil da FMVZ - fontes de Ir-192 – BBTD	53
Tabela 14 Espessuras para as paredes do canil da FMVZ - fontes de I-125 e Au-198- BBTD	53
Tabela 15 Espessuras para as paredes do canil da FMVZ - fontes de Co-60 e Cs-137- BBTD.....	53

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

3D-CRT	Radioterapia Conformacional Tridimensional
AL	Acelerador Linear
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CDR	Camada Decirredutora
CSR	Camada Semirredutora
CT	Tomografia Computadorizada
CTV	Volume de Tratamento Clínico
FMB	Faculdade de Medicina de Botucatu
FMVZ	Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia
GTV	Volume de Tratamento Grosseiro
Gy	Gray
HVL	half-value layer (CSR)
ICRP	Comissão Internacional de Proteção Radiológica
ICRU	Comissão Internacional de Unidades de Medidas
IGRT	Radioterapia Guiada por imagem
IMRT	Radioterapia de Intensidade Modulada
IOE	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto
kVp	Quilovolts Pico
MRI	Imagem por Ressonância Magnética
MV	Mega Voltagem
OAR	Órgão de Risco
PET	Tomografia por Emissão de Pósitron
PTV	Região Alvo do Planejamento
RT	Radioterapia
SAD	Distância Fonte Alvo
SRT	Radioterapia Estereotáxica
SSD	Distância Fonte Superfície
Sv	Sievert
TVL	Tenth-value layer
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

CARVALHO, M. Determinação de blindagem radiológica para procedimento de radioterapia veterinária. Botucatu, 2019. 58p. Dissertação (Mestrado em Animais Selvagens) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia (FMVZ), Campus de Botucatu, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP.

RESUMO

O uso de fontes de radiações ionizantes tem sido cada vez mais presente nas diversas atividades técnico-científicas. Os cuidados e os benefícios da prática já são bastante conhecidos e difundidos na área da medicina de humanos, tanto no campo do diagnóstico quanto da terapia. Na área da medicina veterinária, a radioterapia vem ganhando espaço, no entanto, o uso de feixes de radiações ionizantes exige o conhecimento de legislações específicas sobre proteção radiológica e a atuação de profissionais altamente especializados. O uso seguro das práticas de radioterapia requer o dimensionamento de blindagens para a correta proteção dos profissionais, dos pacientes e do meio ambiente. Neste trabalho foram realizados cálculos de blindagem para dimensionamento das espessuras das barreiras de proteção à radiação para uma sala de radioterapia adequada para o uso de um equipamento de teleterapia de ortovoltagem, destinado para procedimentos de radioterapia em medicina veterinária. Foram também realizados estudos para o dimensionamento das mesmas barreiras e condições de trabalho para o uso em braquiterapia de alta e de baixa taxa de dose (BATD e BBTD), para diferentes fontes radioativas. Foram ainda desenvolvidos os cálculos para dimensionamento das paredes de um espaço localizado no interior do canil situado no prédio da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Unesp de Botucatu (FMVZ), visando sua adequação para a realização de procedimentos de braquiterapia de baixa dose. Os resultados mostraram que as espessuras calculadas para as paredes da sala de radioterapia de ortovoltagem, são suficientes para a blindagem das radiações oriundas das fontes de BATD e BBTD.

Palavras Chave: animais selvagens, braquiterapia, cálculo de blindagem, medicina veterinária, ortovoltagem, proteção radiológica, radioterapia.

CARVALHO, M. SHIELDING CALCULATIONS FOR ORTHOVOLTAGEM ROOM APPLIED IN RADIOTHERAPY VETERINARY Botucatu, 2019. 58p.

Dissertação (Mestrado em Animais Selvagens) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia (FMVZ), Campus de Botucatu, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP.

ABSTRACT

The use of ionizing radiation surces has increased in various technical-scientific activities. The care and benefits of the practice are already well known and widespread in human medicine, both in the field of diagnosis and therapy. In the area of veterinary medicine, radiotherapy has been gaining space, however, the use of ionizing radiation beams requires the knowledge of specific legislation on radiolprotection and specialized professionals. The safe use of radiotherapy practices requires the design of shielding for the correct protection of professionals, patients and the environment. The present study calculated the dimension and thickness of the radiation protection barriers to a radiotherapy room suitable for the use of orthovoltage teletherapy equipment, destined for radiotherapy procedures in veterinary medicine. Studies were also carried out for the design of the same barriers and working conditions for use in high and low dose rate brachytherapy (HDR and LDR) for different radioactive sources. The calculations for dimensioning the walls of a dog kennel located in the school of Veterinary Medicine and Animal Science, Unesp Botucatu (FMVZ), were also developed, aiming at their adequacy for the accomplishment of dose rate brachytherapy procedures. The results showed that the thicknesses calculated for the walls of the orthovoltage radiotherapy room are sufficient for the shielding of the radiations from the sources of high and low dose rate brachytherapy.

Keywords: wild animals, brachytherapy, shielding calculation, veterinary medicine, orthovoltage, radiation protection, radiotherapy.

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A radioterapia é a modalidade médica que utiliza fontes de radiações ionizantes no tratamento de doenças (SCAFF, 2010). Estas fontes de radiação podem liberar feixes de raios-x ou de raios gama de alta energia e alto poder de penetração, com capacidade de atravessar o tecido humano ou mesmo as estruturas físicas as quais ele atinge (KHAN, 2003). Os procedimentos radioterápicos dividem-se em duas modalidades: a teleterapia e a braquiterapia (SALVAJOLI, 2013).

Na teleterapia, a fonte de radiação está posicionada á certa distância do volume alvo de irradiação, equivalente ao ponto geométrico do isocentro da máquina de tratamento, que em aparelhos do tipo acelerador linear é de 100,0 cm e nas Unidades de Telecobaltoterapia é de 80,0 cm. Na braquiterapia, a fonte de radiação fica em contato ou mesmo no interior do tumor (FERNANDES, 2000).

Na teleterapia utiliza-se um software de planejamento, a equipe multidisciplinar da radioterapia planeja o tamanho, a forma e a direção do feixe, para tratar de maneira eficaz o tumor, poupando o tecido normal adjacente. Este tratamento consiste em irradiar o órgão alvo com doses fracionadas, e é realizado cinco vezes na semana, durante um período de 4 a 6 semanas. No caso de tratamento em animais esse período tende a ser mínimo devido ao desafio da imobilização animal, necessitando, assim, de anestesia em todas as aplicações (MCNIEL, 2009).

Os equipamentos de teleterapia podem ser do tipo: a) acelerador linear (energia de megavoltagem), b) unidade de telecobaltoterapia (fonte de radioativa de megavoltagem), c) equipamentos de raios-X de baixa energia ou de ortovoltagem (kilovoltagem).

Nos aceleradores lineares, elétrons produzidos por um filamento aquecido são ejetados para dentro de uma estrutura aceleradora. Ao deixar a estrutura aceleradora colidem com um alvo, produzindo tanto um espectro eletromagnético com componente de radiação contínua (emissão *bremstrahlung*, ou radiação de freamento) e componente de radiação discreta (radiação característica do alvo). A estrutura aceleradora é composta por um guia de ondas e cavidades ressonantes que transportam a onda

eletromagnética produzida pela válvula Magnetron (até 10 MeV) ou Klystron e transferem, gradualmente, sua energia para o elétron, acelerando-o em direção ao alvo. Associada ao acelerador há uma mesa onde é posicionado o paciente e que apresenta 4 graus de liberdade: vertical, longitudinal, latitudinal e rotacional. O braço do acelerador pode girar em torno da mesa (SCAFF, 2010).

A braquiterapia é um procedimento que utiliza fonte de radiação interna (tratamento a curta distância). O material radioativo é inserido na região a ser tratada por meio de agulhas, cateteres ou aplicadores específicos. As fontes radioativas podem ficar implantadas permanentemente ou temporariamente. Dependendo do tipo de tratamento, o paciente pode precisar ser hospitalizado por um curto período de tempo (FERNANDES, 2000) (ROSTELATO, 1997).

Nos implantes permanentes podem ser utilizadas pequenas sementes radioativas, com dimensões de um grão de arroz, encapsuladas em material metálico, tais como titânio ou aço inoxidável, as quais são colocadas em contato com a lesão a ser tratada. A radiação emitida por estas sementes atinge em sua maior parte a região ao redor da área do implante, no entanto, alguma radiação pode ser emitida para outras partes do corpo do paciente. Por este motivo o paciente precisa tomar certas precauções para proteger as pessoas da exposição à radiação enquanto as sementes ainda estão ativas. Com o tempo, o implante perde sua radioatividade, mas as sementes permanecem no corpo do paciente, inativas (ABREU, 2019).

A braquiterapia pode ser realizada em procedimentos de baixa taxa de dose (BBTD), média taxa de dose (BMTD) e alta taxa de dose (BATD). Conforme classificação definida pela Comissão Internacional de Unidades de Radiação e Medidas (ICRU – *International Commission on Radiation Units and Measurements*) no *Report* nº. 38, a BBTD equivale à uma taxa de dose entre 0,4 a 2,0 Gy/hora; a BMTD equivale à 2,0 e 12,0 Gy/hora e a BATD refere-se a procedimentos com uma taxa de dose acima de 12,0 Gy/hora (ICRU-38, 1985).

A betaterapia é uma modalidade radioterápica que se utiliza de radiação beta, proveniente de placas para fins dermatológicas ou oftálmicas para tratamento de lesões a poucos milímetros de profundidade. Frequentemente, a betaterapia é empregada na prevenção de quelóides e pterígio (FERNANDES, 2009).

O Estrôncio-90 (Sr-90) é uma fonte de radiação beta de curta penetração, depositando altas doses à pequenas profundidades, reduzindo muito o risco de danos à tecidos sadios mais profundos (FERNANDES, 2010). A energia emitida da placa de estrôncio vai agir na camada da pele onde se encontram as células (fibroblastos) responsáveis pela produção em excesso de colágeno. Essa energia anula a proliferação anormal dos fibroblastos (COELHO, 2010).

A placa metálica de 1,0 cm de diâmetro é colocada em contato com a cicatriz. A placa fica encostada na pele durante um determinado tempo, calculado em conformidade com a atividade radioativa do radioisótopo usado e da dose de radiação preconizada pelo médico radioterapeuta (COELHO, 2011). A quantidade de frações também depende da dose de radiação e da finalidade do tratamento (COELHO, 2011.a).

O tratamento, usados por exemplo, em cicatrizes de cirurgia pós parto, mastectomia, é simples e indolor, o ideal é iniciar o procedimento o mais precocemente possível após a cirurgia (24 até 72 horas após término da cirurgia), o paciente pode exercer suas atividades normalmente, devendo apenas evitar a luz solar na área tratada, podendo ser aplicada em qualquer região do corpo (OLIVEIRA, 2019).

Em todas as modalidades de radioterapia, o uso de fontes de radiação de alta energia requer cuidados especiais do ponto de vista de proteção radiológica, que visam principalmente minimizar os efeitos radiobiológicos indesejáveis, aos quais estão sujeitos todos aqueles que se utilizam destes procedimentos médicos, tanto pacientes, quanto profissionais da área ou indivíduos do público (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2000).

Para garantir o sucesso da terapia e minimizar os efeitos indesejáveis do tratamento, é necessário um rigoroso controle de qualidade que envolve testes radiométricos nos feixes de radiação e seus equipamentos emissores utilizados (CAMARGO, 2007). Estes ensaios devem ser realizados periodicamente por especialistas da física da radioterapia de acordo com o que preconizam os protocolos de dosimetria e de controle de qualidade em radioterapia (IAEA, 2004).

Os cuidados com a proteção radiológica são exigidos antes mesmo da realização dos procedimentos radioterápicos, já quando da elaboração do projeto arquitetônico da clínica de radioterapia (PODGORSK, 2005) (FERNANDES, 2018).

É neste momento que são dimensionadas as espessuras das paredes, piso, teto, porta e demais estruturas físicas da sala de tratamento onde ficarão instalados e armazenados os equipamentos e fontes de radiação utilizados. Para tanto, são utilizados protocolos e métodos de cálculos específicos recomendados por organismos nacionais e internacionais responsáveis pela proteção radiológica (NCRP-49, 1976) (NCRP-51, 1979) (NCRP-151, 2005) (ICRP-33, 1985) (INCA, 2000). As demais dependências da clínica de radioterapia seguem as legislações das entidades envolvidas com a área da construção civil (ANVISA – RDC 50, 2002) (ANVISA, 2013).

O manuseio seguro das fontes de radiação requer o uso de blindagens eficientes que possam garantir o direcionamento do feixe de radiação focando a área a ser tratada e preservando os tecidos sadios circunvizinhos. Estas blindagens devem ser dimensionadas em conformidade com o tipo de radiação e sua energia, considerando a técnica radioterápica indicada para o tratamento (FERNANDES, 2018).

O sucesso da radioterapia depende de vários fatores, e está intimamente ligado com a reprodutibilidade dos campos de irradiação delimitados durante o planejamento do tratamento, o qual depende também da imobilização da área a ser tratada. Para pacientes humanos, a imobilização dos pacientes pode ser conseguida com o uso de acessórios específicos e com a simples comunicação ao paciente (VETTORATO, 2016). No entanto, no trato dos pacientes veterinários, a imobilização exige procedimentos clínicos anestésicos (STOSKOPF, 2012). Como o ciclo de tratamento requer várias aplicações, o frequente uso de anestésicos pode implicar em transtornos clínicos e orgânicos aos animais submetidos à radioterapia (MCNIEL, 2009).

Por causa da necessidade da imobilização sob anestésicos dos animais, os procedimentos de radioterapia são mais demorados quando comparados aos procedimentos em humanos (ANDRADE, 2014). Devido à necessidade de se abreviar o tratamento em poucas aplicações, o tempo de duração do procedimento de radioterapia é aumentado, o que exige o uso de blindagens apropriadas e dimensionadas de forma que garanta a liberação da dose de radiação de forma constante no volume alvo de tratamento (BURK, 1997).

A blindagem pode ser feita com diversos tipos de materiais, a escolha dos materiais vai depender de suas propriedades físicas, ou seja, quanto maior a densidade, maior sua capacidade de atenuar a radiação ionizante e conseqüentemente menor a espessura necessária de tal material. São exemplos destes materiais, o chumbo, o concreto, o concreto baritado, a água, o acrílico (radiação beta), etc (FERREIRA, 2019).

Neste trabalho foram realizados cálculos de blindagem para a orientação da construção de uma sala de radioterapia veterinária, para instalação de um equipamento de raios-X com energia de ortovoltagem (até 250 kVp). Visando o possível uso da sala para procedimentos de braquiterapia, foram desenvolvidas também planilhas de cálculos de blindagem considerando as características radiométricas de fontes radioativas usadas neste tipo de tratamento. Os cálculos foram ainda ajustados, buscando viabilizar a realização de procedimentos de braquiterapia em um canil típico. Os resultados dos dimensionamentos das blindagens, em função do espaço para tratamento e das fontes de radiação analisadas, mostraram que as espessuras calculadas para as paredes da sala de radioterapia de ortovoltagem, são suficientes para a blindagem das radiações oriundas das fontes de braquiterapia.

OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Cálculo de blindagem para dimensionamento as espessuras de materiais usados para blindagens radiológicas em conformidade com os tipos e características das radiações ionizantes aplicadas em procedimentos de radioterapia veterinária.

2.2 Objetivos específicos

Calcular as dimensões das espessuras das paredes de uma sala projetada para a realização de radioterapia com raios-X de ortovoltagem (teleterapia) a ser utilizada em medicina veterinária. Verificar a possibilidade de uso e adequações desta sala para a manipulação de fontes radioativas indicadas para a realização de procedimentos de braquiterapia de alta e de baixa taxa de dose. Estudar as propriedades físicas e radiométricas de fontes radioativas para uso em braquiterapia em animais de porte pequeno.

2. 3 Justificativa

A incidência de câncer tem se acentuado nas diversas espécies de animais (MORETO, 2013), sendo também perceptível nas espécies selvagens, o que tem preocupado pesquisadores, dentre os quais os docentes da FMVZ, principalmente os pesquisadores do CEMPAS (Centro de Medicina e Pesquisa em Animais Selvagens) e a radioterapia tem surgido na literatura como importante opção para contribuir com as terapêuticas até então oferecidas para esta doença (LARUE, 2014).

A realização de procedimentos radioterápicos na medicina veterinária no Brasil ainda é incipiente e são poucas e isoladas as pesquisas científicas realizadas em alguns centros acadêmicos sem, no entanto, constituírem em protocolos consolidados de rotina (ANDRADE, FERNANDES, 2014) (FERNANDES, et al, 2010). Assim sendo, o desenvolvimento deste trabalho contribuirá para uma melhor compreensão por parte dos médicos veterinários dos conceitos e técnicas da radioterapia.

REVISÃO DA LITERATURA

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 O câncer e formas de tratamento

O câncer é definido como um conjunto de manifestações patológicas, que têm como características fundamentais a perda no controle da proliferação celular e a capacidade de invadir tecidos adjacentes ou de espalhar-se (metástases) para tecidos distantes (SALVAJOLI, 2013). O câncer de mama, próstata, pulmão, fígado e tireoide, comumente desenvolvem metástase (INCA, 2017).

As causas do câncer podem estar relacionadas a fatores externos, como o meio ambiente e o estilo de vida do indivíduo, ou a fatores internos, como predisposições genéticas hereditárias ou alterações genéticas que aconteceram de forma aleatória (INCA, 2018).

O câncer é uma neoplasia que acomete tanto humanos como animais, sendo responsável por uma alta mortalidade (MORETTO, 2013)

As neoplasias são uma das principais causas de morte em pequenos animais. Um estudo sobre mortalidade em cães na Dinamarca apontou as neoplasias como a segunda maior causa de morte (14,5%), perdendo apenas para o óbito por idade avançada (20,8%) (YAZBEK, 2005). De 2.000 casos de necropsia em cães, foi demonstrado que 45% dos animais com 10 anos de idade ou mais, morreram devido a neoplasias (YAZBEK, 2005).

Os sinais clínicos de um animal com câncer variam com o tipo de tumor e estágio. O osteossarcoma (tumor ósseo), por exemplo, pode estar associado à fratura nos ossos, já que há destruição da estrutura óssea. No caso dos linfomas (tumor nos gânglios) pode haver o aumento de um ou mais gânglios. Mas em muitos casos o animal apresenta apenas perda de peso antes que os sinais mais graves apareçam. O diagnóstico precoce se torna a única maneira de se combater o câncer, com chances de prolongamento da vida do animal e, algumas vezes, a cura. (RAMOS JUNIOR, 2009).

A anamnese, muitas vezes pode esclarecer sobre a etiologia do

tumor, fato importante para o conhecimento do médico veterinário, que poderá em seguida alertar os proprietários sobre a prevenção do uso de certos agentes etiológicos (MORRISON, 1998). Além do histórico do paciente oncológico, o exame físico é aliado à citologia, radiografia, ultrassonografia, tomografia computadorizada, ressonância magnética, cintilografia e a histologia, os quais definem o diagnóstico e assim fundamentam a terapia a ser instituída (WITHROW *et al.*, 2013).

Os principais métodos para tratamento do câncer são a radioterapia, a quimioterapia e a cirurgia, tais técnicas, podem ser aplicadas isolada ou conjuntamente (MORRIS, 2007).

3.2 Câncer e Radioterapia na medicina veterinária

A radioterapia é uma modalidade eficaz de tratamento do câncer em animais e seres humanos, entretanto a sua utilização na medicina veterinária ainda é limitada pelo pequeno número de centros de tratamento radioterápico no país (CUNHA, 2013).

Aproximadamente metade dos pacientes com neoplasias malignas utilizarão a radioterapia em algum momento do seu tratamento. Visando sempre minimizar a dose em tecidos normais adjacentes ao volume a ser tratado, atualmente, o tratamento com radiações ionizantes pode ser realizado com uma variedade de tipos de feixes de radiação, tais como: feixes de fótons, feixes de elétrons e feixes de partículas pesadas como os prótons (protonterapia) (SALVAJOLI, 2013).

A radioterapia é indicada para o tratamento de diversos tipos de tumores, tais como, neoplasias orais (fibrossarcoma oral e carcinoma de células escamosas), nasais, cerebrais (macroadenoma hipoplásico e meningiomas), do corpo e extremidades (hemangiopericitomas, fibrosarcomas, neurofibromas), do mediastino (timoma e linfoma mediastínico); cardíacas (hemangiossarcoma), pulmonares (adenocarcinoma), da bexiga e uretra (carcinomas de células de transição, ou de origem mesenquimal), da região perianal (adenomas perianais, adenocarcinomas) do cólon e reto, de mama, de próstata entre outros órgãos (SALVAJOLI, 2013).

No entanto, a sua aplicação dentro da medicina veterinária para animais selvagens, tanto com intenções curativas quanto paliativas, ainda é muito pouco relatada na literatura (SILVA, 2018).

O manejo do câncer animal procura prolongar o tempo de vida com melhor qualidade clínica do paciente. Por isso todos os tratamentos são justificativa para alcançar tal objetivo e caso algum paciente em sofrimento, o tratamento pode ser encerrado ou o animal pode ser eutanasiado (MORRIS, 2007) (ARGYLE, 2008).

Quando administrada com finalidade curativa, a radioterapia é dada em pequenas frações ao longo de 2 a 5 semanas, dependendo do tamanho e localização da neoplasia, estado geral de saúde do animal, e do tipo de neoplasia que o animal apresenta. Já para finalidades paliativas, a radioterapia é dada em doses maiores, geralmente uma vez por semana durante três semanas (GILLETE, 1995).

Na medicina veterinária, o uso da radioterapia tem sido relativamente raro quando comparado com a cirurgia e quimioterapia. Porém, o uso limitado da radioterapia ocorre devido à falta de financiamentos e de profissionais experientes, e não a falta de eficácia (ANDRADE, FERNANDES, 2014).

O primeiro relato de radioterapia em medicina veterinária data de 1906, e os primeiros estudos sobre radiosensibilidade e dosimetria, foram realizados em cães e cavalos apontados na Faculdade de Veterinária de Viena em 1927 (BURK, KING, 1997). Já no final do ano de 2000, existiam 30 equipamentos de radioterapia veterinária em funcionamento na América do Norte e atualmente verifica-se uma tendência de crescimento e sofisticação tecnológica desses serviços (MORRIS, DOBSON, 2007).

No Brasil, a radioterapia em animais, até o ano de 2016, resumia-se em pesquisas isoladas em algumas universidades públicas. Nestas pesquisas, os procedimentos são realizados de forma ainda precária devido à dificuldade de aquisição de equipamentos de radiação e principalmente face à carência de profissionais especializados (ANDRADE, *et.al*, 2010), (ANDRADE; LUVIZOTTO, FERNANDES, 2008).

Atualmente existem dois serviços de radioterapia veterinária autorizados pela CNEN e em funcionamento no Brasil, ambos pertencentes à

clínicas veterinárias privadas. Um equipamento do tipo acelerador linear está em funcionamento na cidade de São Paulo e uma Unidade de Telecobaltoterapia em operação na cidade do Rio de Janeiro (FERNANDES, 2018).

Weisse e Berent indicaram a radioterapia veterinária especialmente para tumores orais, nasais, da tireóide, urogenitais, do sistema nervoso central, para osteosarcoma, para sarcomas de tecidos moles, para hemangiosarcoma intramusculares e subcutâneos. Os autores apontam também os efeitos agudos, tais como irritação na mucosa, descamação gastrointestinal após 3 a 4 semanas do tratamento e os efeitos tardios, após meses ou anos depois do tratamento, tais como fibrose, necrose, perda de função, até o surgimento de novos tumores por conta da radiação (WEISSE, BERENT, 2015).

As causas mais frequentes de mortalidade em cães são primeiramente o câncer, trauma locomotor (esquelético, musculatura e articulações), doenças cardíacas e doenças neurológicas (BONNETT *et al.*, 2005). O câncer em cães é uma preocupação crescente entre os proprietários de animais domésticos.

Animais selvagens em cativeiro tendem a viver muito mais tempo do que na própria natureza e como consequência disso, muitos zoológicos são considerados uma coleção de animais geriátricos. Como resultado, o câncer é um problema comum encontrado por veterinários de zoológicos. Em uma pesquisa informal em um grande zoológico, observou-se que quase metade de todos os mamíferos que foram submetidos à necropsia apresentou algum tipo de câncer. Desse modo, os veterinários oncologistas têm pesquisado e desenvolvido abordagens terapêuticas para muitos tipos de câncer ao longo dos anos em ambas as terapias curativas e paliativas, incluindo nelas a aplicação da radioterapia (STOSKOPF *et al.*, 2012).

Como a prevalência do câncer em animais está crescendo consideravelmente, é consenso na literatura médica veterinária a importância da avaliação completa do paciente para definição do diagnóstico, prognóstico e terapia dos animais portadores de neoplasias (DE NARDI, 2002).

A radioterapia geralmente é um tratamento localizado, tendo uma aplicação limitada em pacientes portadores de tumores disseminados (NORTH,

2009). O médico veterinário alemão Richard Eberlein, é considerado o pai da radiologia veterinária por, provavelmente, ter sido o primeiro a usar radiação no tratamento de animais. Publicou um artigo sobre radiodiagnóstico menos de um ano após Röntgen ter descoberto os raios X, e cerca de dez anos depois, em 1906, relatou resultados obtidos com a radioterapia veterinária. Esses resultados na época eram considerados desafiadores, pois não era possível produzir raios X em quantidade e qualidade suficiente para radiodiagnóstico, tão pouco para radioterapia (BURK e KING, 1997) (GILLETTE, 1995).

A primeira vez que a radiação foi utilizada para tratamento veterinário, em 1906, foi para o tratamento de tumores em equinos. A radiação também foi usada no tratamento de doenças benignas, tais como inflamação ortopédica e algumas doenças inflamatórias da pele (KNOTTENBELT *et al.*, 2015). A radioterapia avançou pouco até os anos 20. Quando os tubos de raios X tornaram-se amplamente disponíveis, foi possível a produção de raios X de aproximadamente 200 kVp (BURK e KING, 1997).

A radioterapia tornou-se uma especialidade médica reconhecida, com ênfase cada vez maior. Os avanços tecnológicos sofisticados ocorreram ao longo dos últimos 50 anos e as técnicas de radioterapia foram melhorando exponencialmente. Os equipamentos tornaram-se mais precisos e a utilização de técnicas avançadas de imagem para maximizar os efeitos terapêuticos, preserva as células normais adjacentes. Isto se tornou um dos tratamentos não cirúrgicos mais eficazes de tratar tumores superficiais e profundos, em particular, os tumores cutâneos, os quais são encontrados principalmente em equinos (KNOTTENBELT *et al.*, 2015).

Dentro de um serviço de radioterapia veterinária, existe uma equipe multiprofissional preparada para a aplicação adequada da radiação para cada paciente. Entre eles encontramos o médico veterinário radioterapeuta ou o oncologista da radiação, responsável pelo planejamento dos tratamentos. O físico das radiações, o qual calcula a dose de cada planejamento. O tecnólogo em radiologia, o qual opera os aparelhos do serviço e prepara o paciente para cada tratamento prescrito pelo veterinário e pelo físico (BOSTON e HENDERSON, 2014).

Existem vários princípios para a prescrição da irradiação nos pacientes veterinários, entre eles, a própria gestão e manejo dos pacientes, o

estadiamento do tumor, o comportamento biológico dos tipos de tumores específicos e a definição das metas da terapia. Todos esses passos são importantes para a avaliação de um paciente com câncer (SCHWARZ e SAUNDERS, 2011).

Na administração da radioterapia, durante o tratamento, o animal precisa ser anestesiado, sendo importante salientar que existe sempre um risco associado com anestesia geral, embora o animal seja monitorizado cuidadosamente enquanto está anestesiado, a anestesia deve sempre ter curta duração (VETORATTO, 2016).

Antes da radioterapia, cada animal é avaliado por meio de exames laboratoriais e exame físico, para ser submetido à anestesia. Durante a primeira sessão (fração), o animal é colocado sobre a mesa, na qual são utilizadas as radiografias, exames de ressonância magnética e tomografia computadorizada, nos quais se tem a localização exata do tumor (BURK e KING, 1997) (FOSTER, 2015). É de grande importância orientar os proprietários para cada etapa em que o animal é submetido (VETORATTO, 2016).

Após isso, utilizando fórmulas matemáticas e técnicas de mapeamento, o aparelho é programado e posicionado para focar o feixe de radiação sobre a localização exata do tumor. Vários pontos sobre a pele do animal podem ser marcados para fornecer as referências de direcionamento dos campos de tratamentos subsequentes. Esta configuração da máquina normalmente exige 30-60 minutos. O tempo de tratamento real durante as seguintes sessões é muito curto, e o animal é anestesiado normalmente para apenas 10 a 15 minutos (LARUE e GILLETTE, 2001) (FOSTER, 2015).

O tipo de protocolo e fracionamento deve variar com o tipo de serviço. Nos estágios iniciais do processamento, o veterinário tem que decidir qual método de imagem deve ser utilizado para acompanhamento do tratamento, optando-se pela tomografia computadorizada, ou pela imagem de ressonância magnética. Os oncologistas podem preferir a tomografia como imagem inicial, porque ela também é usada no planejamento do tratamento como também para o acompanhamento por meio do computador, e assim, possibilitando duas etapas em conjunto. A tomografia é uma ótima modalidade para ser usada no planejamento do tratamento, isso se deve às dimensões

precisas do paciente e informações sobre densidade dos tecidos, aos quais são informações essenciais para os programas de computador utilizados no serviço para determinar com precisão a distribuição da dose do tumor e dos tecidos vizinhos (SILVA, 2018).

Apesar da melhor resolução dos tecidos moles na ressonância magnética, essa modalidade é utilizada como adjuvante da tomografia, em vez de substituí-la no planejamento da radioterapia, isto porque na imagem de ressonância não é possível definir a densidade do tecido, como o osso, por exemplo, pelo qual é um dado importante para os cálculos de dosimetria aplicada (SCHWARZ e SAUNDERS, 2011).

Outra limitação da ressonância é a presença do campo magnético, o que pode ser uma restrição para uso de alguns acessórios de imobilização, especialmente os que contenham estruturas ferromagnéticas o que impede na hora do planejamento. Outra situação é a utilização das bobinas de radiofrequência, muitas vezes, alguns cães e gatos ficam posicionados em decúbito dorsal com as bobinas, o que não é a melhor posição para o tratamento. Isto faz com que seja difícil de reproduzir posicionamento diário do paciente durante o curso da terapia (SCHWARZ e SAUNDERS, 2011).

Segundo Withrow *et al.* (2013), o tratamento de pacientes com câncer é complexo e determinar a melhor modalidade de tratamento ou a combinação das modalidades podem ser um desafio. Na maioria dos casos, quando o controle local de um tumor sólido não pode ser obtido cirurgicamente, sem comprometer excessivamente a função, aparência, ou a qualidade de vida do animal, uma consulta com um oncologista da radiação deve ser considerada (WITHROW, 2013).

Novas modalidades, tais como a SBRT (radioterapia estereotáxica), IGRT (radioterapia com intensidade modulada) e a IMRT (radioterapia guiada por imagem) também estão mudando o paradigma do tratamento, proporcionando opções de radiação melhorada para tumores em uma variedade de localizações. O acompanhamento da avaliação clínica em curso destas modalidades é importante para uma ótima gestão do paciente. A 3D-RTC (radioterapia tridimensional conformacional) permite uma melhor conformidade entre o volume de alta dose irradiada e a forma geométrica do tumor. Esta técnica requer a utilização da tomografia computadorizada, da

ressonância magnética ou da tomografia por emissão de pósitrons (PET) para a análise no sistema de planejamento de tratamento (TPS). Uma grande vantagem da 3D-RTC é que o TPS fornece os histogramas de dose e volume (DVH) com informações da distribuição da dose de radiação no volume alvo (tumor) e nos tecidos sadios circunvizinhos (OAR – órgãos de risco). Isto fornece um método quantitativo de avaliação do plano de tratamento e aumenta a garantia de qualidade da radioterapia (WITHROW, 2013; LARUE e CUSTIS, 2014) (SILVA, 2018).

A IMRT e modalidades relacionadas, permite a liberação de maior dose de radiação no volume tratamento. Estas modalidades requerem estratégias para o posicionamento e imobilização do paciente. A IMRT utiliza um sistema de planejamento de tratamento específico denominado o planejamento inverso. O planejamento inverso exige que as várias estruturas de tumor (tais como, GTV, CTV e PTV), bem como estruturas críticas do tecido normal e seu devido contorno, sejam identificadas no sistema de planejamento. Em geral, estes planos aplicam de 5 a 12 campos de irradiação e são muito indicados para o tratamento de tumores do cérebro, intranasal, corpo vertebral, bexiga, próstata e tumores do períneo (SILVA, 2018).

3.3 Interação da radiação eletromagnética com a matéria

A interação da radiação X e gama com a matéria faz-se através de diversos processos físicos. Estes processos são a difusão elástica de Rayleigh, o efeito fotoelétrico, a difusão de Compton e a criação de pares elétron-pósitron, sendo que probabilidade de ocorrência de cada um destes processos depende essencialmente da energia fóton e do tipo de material atravessado (FERREIRA, 2019).

A Figura 1 ilustra os tipos de interação da radiação eletromagnética com a matéria em função da energia da radiação.

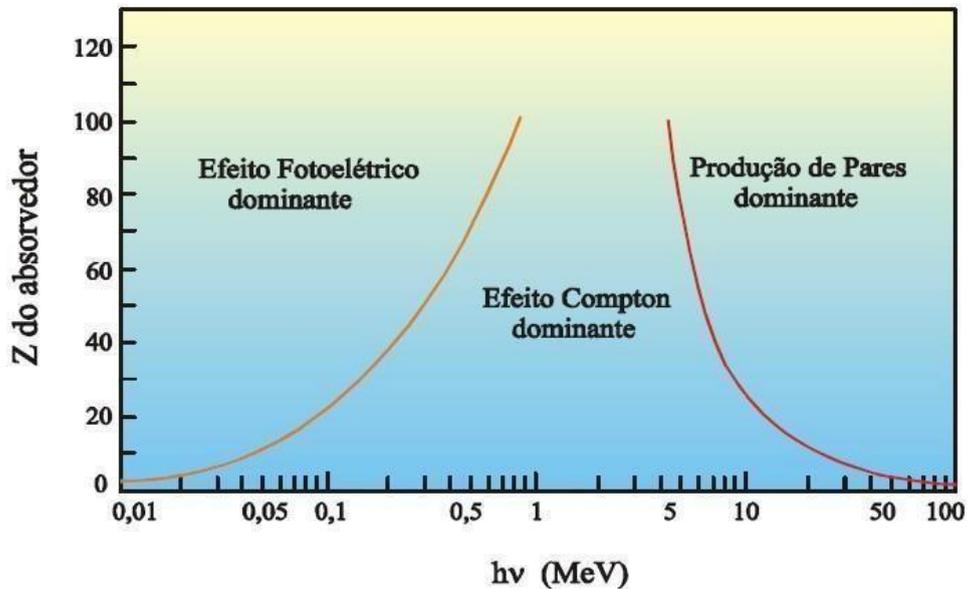


Figura 1 - Probabilidade de interação em função da energia dos fótons. Fonte: SCAFF, 2010

A relação entre a intensidade inicial de um feixe de fótons I_0 que atravessa um meio material segundo uma determinada direção e a intensidade I após ter atravessado uma espessura x é dada por (ATTIX, 2004):

$$I = I_0 e^{-\mu \cdot x}.$$

Onde: μ é o coeficiente de atenuação linear total.

Quanto maior a espessura de um material, maior a quantidade de radiação que ela absorve, ou seja, menor a intensidade do feixe que atravessa o material (Figura 2). Como a absorção obedece a uma lei exponencial, a intensidade diminui, porém nunca se anula completamente (Figura 3).

A capacidade de absorção varia de material para material. Isso se explica através de coeficiente de absorção " μ ", que é uma característica de cada material e representa a probabilidade, por unidade de comprimento, de que o fóton seja removido do feixe (por absorção ou espalhamento) (OKAWABATA, 2014).

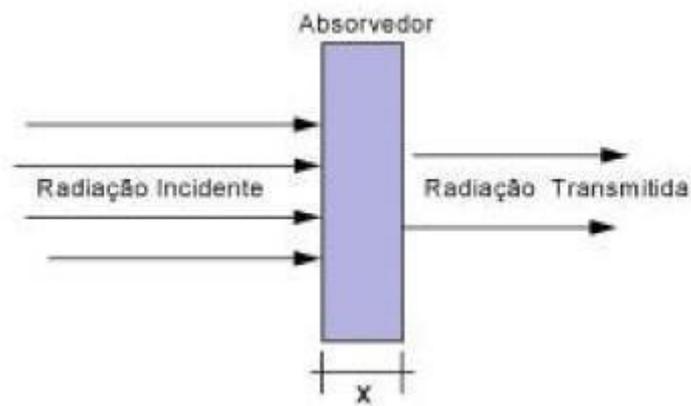
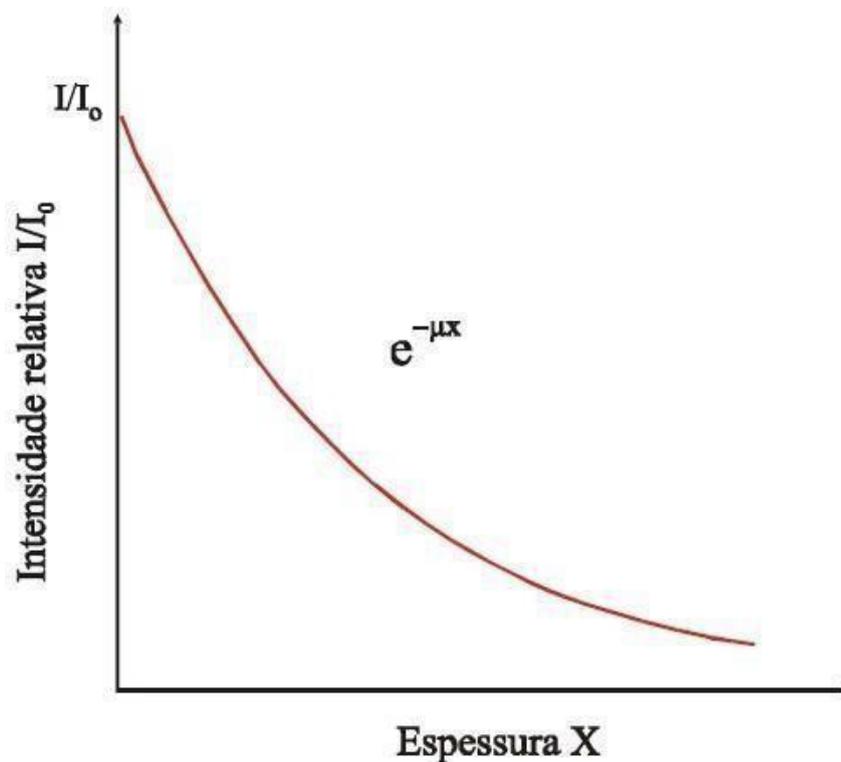


Figura 2 – Atenuação da radiação de barreira



Fonte: SCAFF, 2010

Figura 3 – Curva de atenuação relativa em função da espessura do absorvedor. Fonte: SCAFF, 2010

A Camada Semirredutora (CSR) de um feixe de radiação é a espessura de um material necessária para reduzir pela metade o valor original da intensidade do feixe de raios-X incidente, está relacionada com a qualidade do feixe da radiação (LUCAS, 2018).

A Camada Decirredutora (CDR) é definida como sendo a espessura de material que atenua de um fator de 10 a intensidade do feixe de fótons incidentes (LUCAS, 2018).

A camada semirredutora depende do valor da voltagem usada. Portanto, pode ser útil como uma técnica adicional para se determinar a energia efetiva associada ao feixe de raios X gerado pelo equipamento.

A partir da equação (1), quando $I = I_0/2$, temos que: $CSR = \ln 2 / \mu$

$$CSR \text{ ou } X_{1/2} = 0,693 / \mu$$

O valor da camada semi-redutora depende da energia do feixe de radiação e do coeficiente de atenuação linear μ do material atenuador.

Em teleterapia onde se utiliza feixes de radiação de alta energia, é mais preferencial o uso da camada deci-redutora (CDR) ou $X_{1/10} = 2,30/\mu$.

A Tabela 1 apresenta valores de CSR e CDR para alguns materiais absorvedores comumente usados em projetos de blindagem para salas de radiologia e radioterapia.

Tabela 1 – Valores de HVL (CSR) e TVL (CDR) de materiais atenuadores

FONTE DE RADIAÇÃO	Alumínio 2,3 g/cm ³ (cm)		Chumbo 12 g/cm ³ (cm)		Concreto 2,3 g/cm ³ (cm)		Aço 7,8 g/cm ³ (cm)	
	HVL	TVL	HVL	TVL	HVL	TVL	HVL	TVL
Raios X 100 kVp	10,24	34,00	0,026	0,087	1,65	5,42	-	-
Raios X 200 kVp	2,20	7,32	0,043	0,142	2,59	8,55	-	-
Raios X 250 kVp *	-	-	0,088	0,29	0,28	0,94	-	-
Raios X 300 kVp *	-	-	0,147	0,48	0,31	1,04	-	-
Raios X 400 kVp *	-	-	0,25	0,83	0,33	1,09	-	-
Iridio 192	3,66	12,16	0,55	1,90	4,30	14,00	1,30	4,30
Cobalto 60	5,36	17,80	1,10	4,00	6,30	20,30	2,00	6,70
Césio 137	4,17	13,85	0,65	2,20	4,90	16,30	1,60	5,40

Fonte: IAEA , Manual on Gamma Radiography , e NCRP

* valores aproximados obtidos para voltagem de pico de um tubo direcional para uso médico

3.4 Proteção Radiológica

O uso de radiação ionizante oferece grandes benefícios à sociedade. No entanto, existem alguns riscos associados à prática sem a devida proteção, que podem ser controlados, mas não eliminados, fazendo

com que a radiação possa ser prejudicial para a saúde humana. O principal objetivo da proteção radiológica é minimizar os riscos causados pela utilização da radiação, mantendo os benefícios que esta traz à sociedade (COLLACITE, 2008).

O uso da radiação ionizante é controlado através de normas e diretrizes elaboradas por organismos governamentais e não governamentais, tais como: 1) International Commission on Radiological Protection (ICRP), fundada em 1928, promove o desenvolvimento da proteção radiológica, faz recomendações voltadas para as grandezas limitantes; 2) International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), fundada em 1925, cuida especialmente das grandezas básicas e das operacionais; 3) Conselho Nacional de Proteção e Medidas de Radiação (NCRP), fundado em 1964 nos Estados Unidos da América, é uma organização não governamental de serviço público, responsável por fornecer e emitir recomendações sobre a proteção contra as radiações (TAUHATA *et al.*, 2013).

No Brasil, compete à CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) e à ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) a normatização e fiscalização do uso, posse e armazenamento de fontes emissoras de radiações ionizantes.

Através da análise dos riscos e dos benefícios causados pela utilização de radiações ionizantes, ao longo dos tempos têm sido estabelecidos valores de dose de radiação limites (LMP – limite máximo permitido), tanto para os trabalhadores como para o público em geral.

Para Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOE) o limite atual de dose de radiação é de 100 mSv em 5 anos, sendo que nenhum ano pode ultrapassar 50 milisievert (mSv) por ano. Para indivíduos do público (não manipulam fontes de radiações ionizantes) o LMP é 1,0 mSv/ano (TAUHATA *et al.*, 2013) (CNEN, 2014) (CNEN, 2017).

Os princípios de radioproteção fornecem diretrizes básicas para as atividades operacionais que utilizam radiação ionizante. São eles: Princípio da Justificativa, Princípio da Otimização baseados no princípio fundamental conhecido como ALARA acrônimo para *As Low As reasonable Achievable*, que significa: tão baixo quanto razoavelmente exequível e Princípio da Limitação da Dose, Em consonância com esses princípios, desenvolveram-se formas de

radioproteção baseadas no tempo de exposição, na distância da fonte de radiação e na blindagem (ANVISA, RDC 20/2006). Quando o tempo de exposição, o qual depende da rotina clínica e a distância da fonte de radiação não é suficiente para proteger contra a radiação, a blindagem deve ser dimensionada para reduzir ao máximo os efeitos deletérios da radiação (FERREIRA, 2019).

3.5 Blindagem de salas para procedimentos de radioterapia

O uso seguro das práticas de radioterapia requer o dimensionamento de blindagens para a correta proteção dos profissionais, dos pacientes e do meio ambiente (FERNANDES, 2018).

O uso e armazenamento de fontes de radiações ionizantes requer conhecimento dos preceitos de proteção radiológica. Os procedimentos devem ser realizados por profissional habilitado e em ambientes devidamente adequados sobre o ponto de vista de radioproteção (FERREIRA, 2019).

A construção de salas de radioterapia requer, primeiramente, a elaboração de planilha de cálculos de blindagem, onde são dimensionadas as espessuras necessárias de cada uma das barreiras de proteção, visando sempre à garantia à limitação da dose de radiação nas áreas internas e adjacentes à instalação (FERNANDES, 2018).

O Plano de Proteção Radiológica (PPR) é um documento exigido pela Portaria da Secretaria de Vigilância Sanitária MS nº 453 de 1º de junho de 1998. O PPR deve ser entregue a VISA (Vigilância Sanitária) quando da solicitação do Alvará de funcionamento inicial do serviço. Deverá conter a descrição do estabelecimento e de suas instalações, além do Programa de Garantia de Qualidade (PGQ), que descreve como deve ser o controle de qualidade dos equipamentos, e informações para o trabalho seguro com radiações ionizantes (CNEN, 2014) (FERREIRA, 2019).

A autorização de funcionamento de um serviço de radioterapia requer dentre vários requisitos, a aprovação pela CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) do Plano de Radioproteção (PPR) da clínica radioterápica (CNEN, 2014) (CNEN, 2011) (OKAWABATA, 2014).

O cálculo de blindagem da radiação para um serviço de radioterapia requer o conhecimento de alguns parâmetros, como, a carga de trabalho do equipamento de radioterapia, que representa a taxa de dose de radiação liberada no isocentro da máquina de tratamento (FERNANDES, 2018). Também devem ser conhecidas as propriedades físicas e radiométricas dos materiais atenuadores, além das condições de funcionamento da clínica, para serem estimados os fatores ocupacionais das áreas vizinhas à sala de radiação, e seus limites de dose de radiação permitidos para a exposição do pessoal envolvido. (CASTILHO, 2015), (NCRP, 2005), (INCA, 2000.a), (TAUHATA, *et al.*, 2013), (PRINZIO, 2014).

3.6 Parâmetros de blindagem radiológica

3.6.1 Carga de Trabalho – W

Carga de trabalho é a quantidade de radiação produzida por um equipamento de radioterapia em um determinado tempo e que pode ser dividida em carga de trabalho clínica (W_c), que é a radiação utilizada nos tratamentos, e carga de trabalho física (W_f), que é usada para os procedimentos de dosimetria, controle de qualidade e manutenção do acelerador. Somando as duas, obtém-se a carga de trabalho total W_t (INCA, 2000) (FERNANDES, 2018).

3.6.2 Limite Máximo Permissível de Dose Equivalente – $H_t(T)$:

O objetivo da blindagem é limitar as exposições de radiação às pessoas a um nível de dose aceitável. No setor de radioterapia, existem dois tipos de áreas, as controladas e as não controladas (áreas livres). As áreas não controladas são aquelas ocupadas por pacientes em espera de tratamento, visitantes, consultores e funcionários que não trabalham no manuseio das fontes de radiações ionizantes, denominados indivíduos do público. Já, as áreas controladas são aquelas ocupadas por trabalhadores do próprio setor, denominados indivíduos ocupacionalmente exposto (IOE) (CNEN, 2011) .

O limite máximo permissível são níveis de dose equivalente utilizados nos cálculos de blindagem que limita a radiação máxima que pode atingir um grupo de indivíduos sem causar dano algum à sua saúde. No Brasil os limites de dose legalmente permitidos são aqueles adotados pela CNEN e definindo para 50 semanas por ano (CNEN, 2014):

Para as áreas controladas:

P (H) para indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE) = 20,0 mSv/ano
 P (H) = 0,4 mSv/semana

Para as áreas não controladas:

P (H) para indivíduo do público (não IOE) = 1,0 mSv/ano
 P (H) = 0,02 mSv/semana

3.6.3 Fator Uso – U

Esse fator é uma grandeza adimensional que considera carga de trabalho de um feixe de radiação primário que é dirigida para uma dada barreira em determinada área vizinha.

Para radiação espalhada e radiação de fuga, considera-se $U=1,0$ (NCRP 151 – pág. 125) (FERNANDES, 2018).

3.6.4 Fator Ocupacional – T

Esse fator é uma grandeza adimensional que considera a fração média de tempo que o indivíduo, posicionado atrás da barreira, fica maximamente exposto enquanto o feixe de radiação está ligado (CASTILHO, 2015).

O fator ocupacional de uma área não é a fração de tempo ocupada por pessoas, e sim a fração do tempo ocupada por uma pessoa individual, que passa a maior parte do tempo na área. Assim, uma sala de espera, ocupada em todos os momentos durante o dia de trabalho, pode ter um fator ocupacional muito baixo, desde que nenhuma pessoa fique nela mais do que 50 horas por ano. O indivíduo maximamente exposto será normalmente

um funcionário da clínica de radioterapia (CASTILHO, 2015).

Em alguns casos, a clínica pode programar para operar o equipamento mais de 40 horas na semana. Neste caso, o fator ocupacional será determinado pela razão entre o tempo médio do indivíduo de máxima exposição pela média do tempo total que o equipamento será usado durante a semana. O período o qual a média será estimada é de 1 ano (TAUHATA, 2013).

3.7 Cálculo das espessuras das barreiras de proteção radiológica

As espessuras das barreiras de proteção são determinadas através de expressões matemáticas, consolidadas na literatura especializada, onde também se encontram as constantes físicas e as propriedades radiométricas dos feixes de radiação e dos materiais usados na edificação das paredes da sala de tratamento. (INCA, 2000.a), (NCRP-49, 1976) (NCRP-151, 2005), (TAUHATA, 2013), (SCAFF,2010), (PODGORSAK, 2005).

As definições e características do equipamento de teleterapia a ser instalado, as propriedades dos materiais a serem utilizados na edificação das barreiras e o *layout* da sala de teleterapia, devem ser identificados no projeto arquitetônico e no memorial descritivo da clínica de radioterapia (FERNANDES, 2018). A CNEN, para avaliação do Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS), exige que as planilhas de cálculos de blindagem em radioterapia sejam elaboradas por dois diferentes métodos de cálculos: 1) Método Baseado no Princípio do Limite de Dose; 2) Método Direto de Otimização da Barreira. (CNEN, 2011) (CNEN, 2014) (INCA, 2000).

A demonstração dos cálculos, para cada um dos dois métodos, deve estar apresentada e diferenciada para cada uma das barreiras analisadas, descrevendo aquelas nas quais ocorre a incidência do feixe de radiação primária, e as outras que recebem radiação secundária. Nas barreiras que não recebem o feixe primário, os cálculos devem considerar as componentes da radiação incidente originada do espalhamento pelo paciente e a componente de radiação de fuga do cabeçote emissor de radiação (CASTILHO, 2015).

As paredes primárias devem ser construídas com a maior

espessura determinada dentre aquelas obtidas com os dois métodos de cálculo. Para as paredes que recebem apenas radiações secundárias, quando a diferença entre as espessuras requeridas devido à radiação espalhada e de fuga do cabeçote, for menor que 1,0 CDR, deve ser adicionada uma CSR ao maior valor calculado dentre estes dois tipos de radiação secundária, considerando também a maior espessura determinada pelos dois métodos de cálculo (método do limite de dose e método de otimização). Nos casos onde a diferença entre os dois valores for maior que uma camada decirredutora, a maior espessura calculada deve ser utilizada para a construção da barreira (DI PRINZIO, 2014).

Após a escolha do material atenuador, são realizados os cálculos para determinar as espessuras que serão utilizadas e as geometrias para otimizar o nível de radiação. A espessura de blindagem necessária, para reduzir o nível de radiação incidente em um ponto de cálculo atrás da parede, até um nível abaixo do máximo permitido, é determinada em função das quantidades (n) de camadas decirredutoras: espessura (x) = (n) x (CDR).

O valor da CDR depende das características geométricas e da energia do feixe de radiação incidente, e do coeficiente de atenuação do material empregado na blindagem.

Em cálculos de blindagem, consideram-se três componentes do feixe de radiação: radiação primária (RP), radiação de fuga do cabeçote (RF), e radiação espalhada (RE).

Outro parâmetro empregado para estimar a espessura do material de blindagem é o Fator de Redução ou Atenuação (FR) definido por: $FR = I_0/I$

Cálculo do fator de redução (FR)

$$FR = I_0/I \rightarrow FR = 10^n = 2^m$$

Onde,

I_0 = intensidade inicial do feixe

I = intensidade atenuada do feixe

n = número de camadas decirredutoras (TVL) m = número de camadas semirredutoras (HVL)

Conhecendo-se um fator de redução FR, a espessura de blindagem pode ser obtida por:

$n = \log (FR) \rightarrow x = n \cdot TVL$ ou $m = \log (FR) / \log (2) \rightarrow x = m \cdot HVL$
 onde x é a espessura do material de blindagem.

O concreto comum tem a vantagem do baixo custo e da facilidade de construção. Embora as blindagens em concreto sejam bastante espessas, devido ao número atômico e densidade relativamente baixa, ele é o material de escolha quando espaço não é problema. A concretagem exige armação de ferragem para aumentar a resistência, e formas para contenção da massa fluída. Sempre que possível ela deve ser feita de forma contínua e vibratória para evitar fendas e espaços vazios. Como as espessuras são baseadas em concreto comum de $2,35\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, qualquer variação na densidade do concreto usado acarreta um ajuste na espessura calculada que, se não for muito grande, pode ser feito baseado na razão entre as densidades (DI PRINZIO, 2014) (CASTILHO, 2015) (FERNANDES, 2018).

O concreto de alta densidade pode ser usado quando o espaço é limitado. Entretanto, seu custo relativamente alto e a falta de curvas de atenuação apropriadas contra indicam sua utilização de rotina. O uso da relação de densidades na correção da espessura 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.

O aço de baixo teor de carbono apresenta características favoráveis de blindagem e, devido à resistência, pode também ser usado como componente estrutural. Placas de aço podem ser usadas complementarmente ao concreto quando o espaço for pequeno e também como marco e blindagem de portas e ainda como preenchimento de recessos nas paredes.

O chumbo só é aconselhado como blindagem nas portas. Embora esse material seja denso, lençóis ou lâminas de chumbo são difíceis de manusear, possuem baixa resistência e de alto custo para o serviço (INCA, 2000).

A terra compactada é um material de baixo custo e pode ser usado tanto em encostas, diminuindo a espessura de concreto (desde que se assegure que jamais ela será removida), quanto para preencher regiões entre dois arrimos. A atenuação oferecida pela terra depende da densidade e composição, que pode ser bastante variável de um local para outro

(COLLACITE, 2008).

Outro material indicado para aplicação em blindagens de ambiente que utilizam equipamentos emissores de raios-x é argamassa baritada. Ela é vendida em sacos de 25kg e basta misturá-la com água que ela formará uma mistura homogênea pronta para ser utilizada. Cada saco deve ser misturado com, em média, 6 litros de água. Pode ser aplicada nas paredes tetos e piso do ambiente. A aplicação pode acontecer em diversos tipos de construções como alvenaria, bloco de gesso e drywall. A espessura varia conforme a necessidade, que será determinada a partir de um cálculo de blindagem. Depois da aplicação, é importante certificar-se de que a camada está completamente seca e, depois disso, a parede ou chão podem ser revestidos por diversos materiais (pintura, azulejos, etc) (LUCAS,2018).

MATERIAIS E MÉTODOS

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram realizados os cálculos para dimensionamento das espessuras das barreiras (paredes, teto e porta) de uma sala projetada para a realização de procedimentos de radioterapia aplicada à medicina veterinária. Os cálculos de blindagem foram realizados usando o Método de Limite de Dose.

A partir do croqui sala (Figura 4), elaborado pelo arquiteto da clínica veterinária, foram realizados os estudos para a determinação das espessuras das barreiras que blindam a radiação proveniente de um equipamento de teleterapia de raios-X de ortovoltagem (energia entre 100 kVp e 250 kVp), e de um equipamento de braquiterapia de alta taxa de dose com fonte radioativa de irídio-192 (E= 370 KeV).

Inicialmente, foram caracterizadas as propriedades físicas e radiométricas dos materiais utilizados e já consolidados nas edificações de salas de radioterapia, com a finalidade de proteger os profissionais e os órgãos adjacentes ao volume alvo de irradiação contra os efeitos da radiação ionizante.

A Tabela 2 apresenta as características das fontes de radiação usadas em braquiterapia e de equipamentos de ortovoltagem.

Tabela 2 – Características das fontes de radiação e energia de ortovoltagem

Elemento	Símbolo	Tipo	Energia (MeV)	T _{1/2}	CSR Chumbo (cm)	CDR Concreto (cm)	CSR Concreto (cm)	CDR
Írídio-192	Ir-192	raios γ	0,37–0,61	74,0 d	0,55	1,90	4,30	14,00
Ouro-198	Au-198	raios γ	0,42-0,68	2,7 d	0,29	1,10	3,11	13,50
Iodo-125	I-125	raios γ e X	0,028	59,6 d	0,01	0,025	0,26	
Cobalto-60	Co-60	raios γ	1,17-1,33	5,26 a	1,20	4,50	6,30	20,30
Césio-137	Cs-137	raios γ	0,662	30,17 a	0,65	2,20	4,90	16,30
Paládio-103	Pd-103	raios-X	0,022	17,0 d	0,003	0,013		
Rutênio-106	Ru-106	partíc β	3,54	1,02 a				
Estrôncio-90	Sr-90	partíc β	0,54-2,27	28,6 a				
Rádio-226	Ra-226	raios γ	0,83-2,40	1626 a	1,60	4,50		23,30
Ortovoltagem	-----	raios-X	250 kVp	-----	0,088	0,29	2,80	9,40

Max = máxima

CSR = camada semi redutora

MeV = mega eletrônvolt

CDR = camada deci redutora

T_{1/2} = meia vida física

Fonte: NCRP-49 – Tabela 27; SCAFF, 2010. (ROSTELATO, 1997)

A Tabela 3 apresenta os valores de taxa de kerma no ar para algumas fontes radioativas usadas em braquiterapia.

Tabela 3 – Valores típicos da taxa de kerma no ar para fontes de braquiterapia

Elemento	Símbolo	Γ	K_{AR}	K_{AR}
		R/h.mCi	cGy/h.mCi a 1,0 cm	μ Gy/h.GBq a 1,0 m
Írídio-192	Ir-192	4,66	4,11	111,00
Ouro-198	Au-198	2,38	2,08	56,30
Iodo-125	I-125	1,45	1,27	34,30
Cobalto-60	Co-60	13,07	11,45	309,40
Césio-137	Cs-137	3,26	2,86	77,20
Rádio-226	Ra-226	8,25	7,23	195,30

Fonte: NCRP-49 – Tabela 27; SCAFF, 2010; (ROSTELATO, 1997)

O Microsoft Excel foi usado para a criação de uma planilha de cálculos de blindagem capaz de determinar a espessura final das paredes de uma sala de radioterapia. A planilha foi alimentada com os dados referentes aos parâmetros radiométricos dos feixes de radiação analisados, além de informações sobre a rotina de utilização do equipamento de radiação, tais como: quantidade de pacientes previsto por dia, números de dias por semana de funcionamento da clínica, dose de radiação média por tratamento e quantidade de horas de funcionamento. As expressões matemáticas recomendadas pela literatura específica de cálculos de blindagem em radioterapia (NCRP-151, 2005) (INCA, 2000), foram inseridas na planilha elaborada neste trabalho.

Os fatores para o cálculo de blindagem, tais como a Carga de Trabalho (W), o Limite Máximo Permissível de Dose Equivalente – P (H), o Fator Uso das Barreiras (U) e o Fator Ocupacional das áreas de cálculo (T) foram especificados em função do *layout* da sala de radioterapia.

A Figura 4 ilustra o croqui da sala de radioterapia elaborada para a clínica veterinária. Os cálculos das espessuras das paredes foram realizados considerando a realização de diferentes procedimentos de radioterapia: a) radioterapia de ortovoltagem; b) braquiterapia de alta taxa de dose (BATD) e c) braquiterapia de baixa taxa de dose (BBTD).

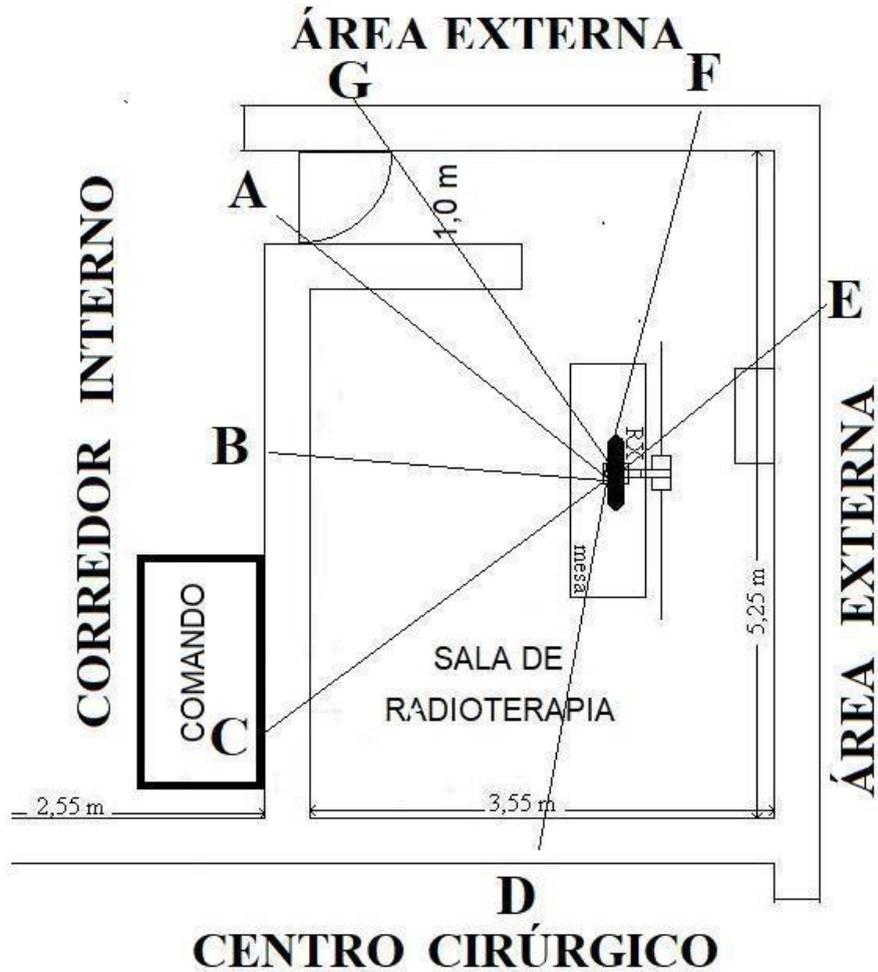


Figura 4 – Croqui da sala de radioterapia veterinária

As equações matemáticas usadas para os cálculos de dimensionamentos das espessuras das barreiras foram adequadas para cada tipo de equipamento de radiação considerado (ortovoltagem ou braquiterapia).

4.1 Equações para cálculos de blindagem em radioterapia de ortovoltagem

Para calcular as espessuras das barreiras para feixes de radiação em radioterapia de ortovoltagem, foi usada a expressão matemática:

$$\text{Espessura} = (n) \times (\text{CDR})$$

Onde:

n = quantidade de camadas decirredutoras do material atenuador

CDR = espessura da camada decirredutora do material atenuador

O valor de “n” pode ser calculado através:

$$n = -\log_{10}(B)$$

onde B é o fator de transmissão da radiação através da barreira dimensionada.

Na sala de radioterapia deve-se considerar três diferentes componentes da radiação: a) radiação primária (PRI), é aquela que a partir do alvo produtor de raios- X incide diretamente na barreira dimensionada; b) radiação espalhada (R_{esp}), é aquela oriunda do espalhamento do feixe de radiação primária pelo paciente, ou objeto espalhador, e incide na barreira de cálculo; c) radiação de fuga do cabeçote (R_{fuga}) é aquela que é devida ao espalhamento interno da radiação dentro do cabeçote do tubo de raios-X e escapa dele.

Assim, desta forma, o valor do fator de transmissão (B) deve ser determinado para cada uma destas três componentes dos feixes de radiação: B_{pri} , B_{esp} e B_{fuga} . As equações para determinação do fator de transmissão, usando o Método de Cálculo do Limite de Dose, estão demonstradas a seguir:

$$B_{pri} = [(P.(d_{pri})^2)] / [(W.U.T.)]$$

$$B_{esp} = [(P.(d_{esp})^2.(d_{sec})^2) / (a.W.U.T.)] / [(400 / F)]$$

$$B_{fuga} = [(P.(d_{fuga})^2) / (0,001.W.U.T.)] - \text{acima de 500 kVp}$$

$$B_{fuga} = [(P.(d_{fuga})^2) (60) (I)] / (W.U.T.)] - \text{abaixo de 500 kVp} - \text{NCRP-49}$$

Onde:

P = limite máximo permissível (LMP) de dose de radiação equivalente que o indivíduo, situado na área de cálculo da blindagem, pode receber. Os LMP preconizados pelos órgãos regulamentadores são: LMP = 1,0 mSv/ano (100 mR/ano = 0,1 R/ano) para indivíduos do público em geral e LMP = 20,0 mSv/ano (2,0 R/ano), para indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE);

d_{pri} = distância em metros entre a fonte de radiação ou do alvo do tubo de raios-X e o ponto de cálculo da blindagem;

d_{esp} = distância em metros entre a fonte de radiação ou do alvo do tubo de raios-X e o objeto espalhador. Se o objeto espalhador for o paciente, d_{esp} será a distância do cone aplicador do equipamento de ortovoltagem (varia de 30,0 a 50,0cm). Neste trabalho considerou-se $d_{esp} = 40,0\text{cm}$

d_{sec} = distância em metros entre o ponto de espalhamento (paciente) e o ponto de cálculo da blindagem;

d_{fuga} = distância em metros entre o centro do cabeçote do equipamento de raios-X e o ponto de cálculo da blindagem;

a = fração da dose absorvida do feixe primário que é espalhada pelo paciente em função do ângulo de espalhamento;

W = carga de trabalho na saída do cone aplicador da máquina de teleterapia (Sv/semana);

U = fator uso – fração do feixe de radiação primária que atinge a barreira;

- T = é uma grandeza adimensional que considera a fração média de tempo que o indivíduo, posicionado atrás da barreira, fica maximamente exposto enquanto o feixe de radiação está ligado;
- F = área máxima de campo de radiação no isocentro (considerada 400 cm²-equipamento de ortovoltagem).
- I = corrente máxima do tubo de raios-X de energia abaixo de 500 kVp (normalmente = 20 mA)
- 60 = conversão de horas em minutos devido à W estar em mA.min e a fuga equivaler à 0,01 mGy/h.

O valor 400 que aparece na equação para o B_{esp} é estimado para a área de um campo de radiação com dimensões de 20,0 cm X 20,0 cm. Essa dimensão de campo representa a média das áreas de todos os campos usados na prática dos procedimentos radioterápicos.

O valor de B deve ser sempre menor do que 1,0. O valor $B = 1,0$ representa máxima transmissão (100%), ou seja, inexistência de blindagem.

Em equipamentos de radioterapia, conforme normas internacionais, a fuga do cabeçote não pode exceder à 0,1% da dose de radiação liberada no isocentro da máquina. Todavia, conforme preconiza o NCRP-49, para equipamentos de teleterapia com raios-X de energia abaixo de 500 kVp, a fuga do cabeçote está limitada à 1,0 cGy/h (centigray por hora) à 1,0 metro do cabeçote. Enquanto que, para equipamentos de radiologia diagnóstica a fuga não deve exceder à 1,0 mGy/h (miligray por hora) à 1,0 metro do cabeçote.

Em equipamentos de radioterapia de ortovoltagem, a carga de trabalho (W) pode ser determinada em unidades de: mA.min (miliAmpere X minuto) que expressa a capacidade de irradiação do tubo de raios-X. A literatura apresenta valores comumente aplicados para W em função da energia máxima do equipamento de ortovoltagem. O NCRP-49 sugere um valor de $W = 20.000$ mA.min para um equipamento de ortovoltagem com energia máxima de 250 kVp. Neste documento também é possível obter a espessura da barreira de forma gráfica para cada valor de fator de transmissão (B) calculado. No modelo do NCRP-49 a unidade de dose deve ser expressa em Roentgen (R) e não em Sievert (Sv).

Todavia, a carga de trabalho (W) pode ser calculada considerando a demanda de pacientes e doses de radiação diárias aplicadas. Por se tratar de uma clínica de radioterapia destinada especificamente à animais, deve-se ater às especificidades da radioterapia veterinária, a qual exige procedimentos de anestesia

e sedação prévias à irradiação, o que implica em uma menor quantidade de sessões por paciente e uma maior dose de radiação por sessão.

Neste trabalho, considerou-se um quantitativo de 10 (dez) pacientes veterinários por dia e uma dose diária de 500 cGy por paciente. Os procedimentos radioterápicos são, normalmente, realizados 5 (cinco) dias por semana. Desta forma, tem-se $W = (10 \text{ pac/dia}) \times (500 \text{ cGy/pac}) \times (5 \text{ dias/sem})$, e a carga de trabalho clínica (para realização de tratamentos) será $W_c = 250 \text{ Gy/sem}$. Também foi prevista uma carga de trabalho física ($W_f = 100 \text{ Gy/sem}$), para realização de experimentos e procedimentos de dosimetria e controle de qualidade do equipamento de ortovoltagem. Desta forma, a carga de trabalho semanal total, considerada neste trabalho, é de $W_{\text{total}} = 350 \text{ Gy/sem}$.

4.2 Equações para cálculos de blindagem para salas de braquiterapia de alta taxa de dose (BATD)

Para os cálculos de blindagem de uma sala de braquiterapia de alta taxa de dose (BATD), desconsiderando a atenuação da radiação pelo paciente, todas as paredes, teto e piso, podem receber a radiação primária direta da fonte, o feixe espalhado e a radiação de fuga do cabeçote. Todavia, o feixe primário é bem mais significativo devido à sua penetração, o que requer maior espessura de blindagem, e portanto, ele é considerado nos cálculos de blindagem para estas salas de braquiterapia. Se a sala possuir labirinto, na porta só incide radiação espalhada, geralmente de primeira ordem.

A transmissão da radiação direta da fonte, que atende o limite autorizado pode ser determinada por:

$$B_{\text{BATD}} = [(P) (d^2)] / [(W) (U) (T)] .$$

Onde:

B_{BATD} = fator de transmissão pela barreira para radiação de BATD.

P = limite máximo permissível de dose para a área de cálculo.

W = carga de trabalho (dose de radiação semanal à 1,0 metro da fonte).

U = fator de uso da barreira (considerado $U = 1,0$ para fonte de braquiterapia).

T = fator ocupacional da área de cálculo.

A carga de trabalho (W) para BATD (W_{BATD}) pode ser determinada com base na experiência clínica dos serviços de radioterapia. A literatura (INCA, 2000) recomenda que se considere o tratamento diário de 6 pacientes por dia, durante 5 dias da semana, indicando 30 pacientes por semana. Os procedimentos de BATD utilizam, em média, 3 canais do irradiador (caso de tratamentos de tumores ginecológicos), o tempo médio de irradiação é de 2 minutos por canal, assim, ter-se-á 30 pacientes por semana. Logo, o tempo estimado de irradiação por semana será: $(30 \text{ pac/sem}) \times (3 \text{ canais/pac}) \times (2 \text{ min/canal}) = 180 \text{ minutos}$ (3,0 horas/semana).

O valor de " W_{BATD} " pode ser determinado pela expressão:

$$W_{\text{BATD}} = (K_{\text{AR}}) (t),$$

Onde:

W_{HDR} = carga de trabalho para braquiterapia de alta taxa de dose.

K_{AR} = taxa de kerma no ar.

t = tempo de exposição da fonte radioativa.

O elemento irídio-192, na forma de fontes radioativas de braquiterapia, possui uma taxa de kerma no ar (K_{AR}) igual a $= 111,0 \mu\text{Gy}/(\text{h.GBq})$ à 1,0 m. As fontes de BATD de irídio-192 são normalmente adquiridas com uma atividade nominal de $A_{\text{N}} = 370 \text{ GBq}$ (10 Ci), o que corresponde à uma K_{AR} da ordem de $4,11 \times 10^{-2} \text{ Gy/h}$ à 1,0 m $[(111,0 \times 10^{-6}) \times (370)]$.

Assim, a carga de trabalho estimada será de $W_{\text{BATD}} = (4,11 \times 10^{-2} \text{ Gy/h})(3 \text{ h}) = 0,123 \text{ Gy/h}$ à 1,0 metro da fonte. Nos cálculos realizados neste trabalho, e em conformidade com a literatura (INCA,2000) será usado um valor de $W = 0,15 \text{ Gy/sem}$ a 1 m.

Devido ao decaimento da fonte radioativa, o tempo de exposição aumenta a medida que a atividade decai, mas o produto entre o tempo médio e taxa de kerma real no ar ($K_{\text{AR}} \times t$) se mantém constante.

4.3 Equações para cálculos de blindagem para salas de braquiterapia de baixa taxa de dose (BBTD)

Para os cálculos de blindagem de uma sala de braquiterapia de baixa taxa de dose (BBTD), similarmente ao que foi discutido para BATD, desconsiderando a atenuação da radiação pelo paciente, todas as paredes, teto e piso, podem receber

a radiação primária direta da fonte, o feixe espalhado e a radiação de fuga do cabeçote. Se a sala possuir labirinto, na porta só incidirá radiação espalhada, geralmente de primeira ordem.

O cálculo do fator de transmissão pela barreira de proteção pode ser feito através da expressão matemática:

$$B_{\text{BBTD}} = [(P) (d^2)] / [(W) (U) (T)].$$

Os fatores da expressão já foram definidos anteriormente.

Neste caso, $W = (K_{\text{AR}})(A)(t)$

onde: K_{AR} = taxa de kerma no ar.

A = Atividade da fonte radioativa.

T = tempo de exposição.

4.4 Dimensionamento das paredes do canil para BBTD

Neste trabalho foi analisado também a planta arquitetônica baixa do canil da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia (FMVZ) da Unesp de Botucatu, visando dimensionar as paredes do espaço reservado para acomodação dos animais, para que se possa viabilizar a realização de procedimentos de braquiterapia de baixa taxa de dose em pacientes oncológicos.

A Figura 5 traz um croqui do espaço físico com todos os 16 (dezesesseis) canis projetados. A Figura 6 amplia um dos canis, localizado na periferia da área, identificando os pontos de cálculo de blindagem para dimensionamento das paredes.

A altura das paredes (pé direito do prédio) é de 3,0 metros, a área total é de $A = 586,76 \text{ m}^2$. As espessuras construídas das paredes é de 17,0 cm revestidas com reboco comum. As portas possuem 1,0 m de largura por 2,10 m, de altura. As janelas são de vidro com 0,60 m de largura por 1,0 m de altura.



Figura 5 – Vista da planta baixa da área de canis da FMVZ

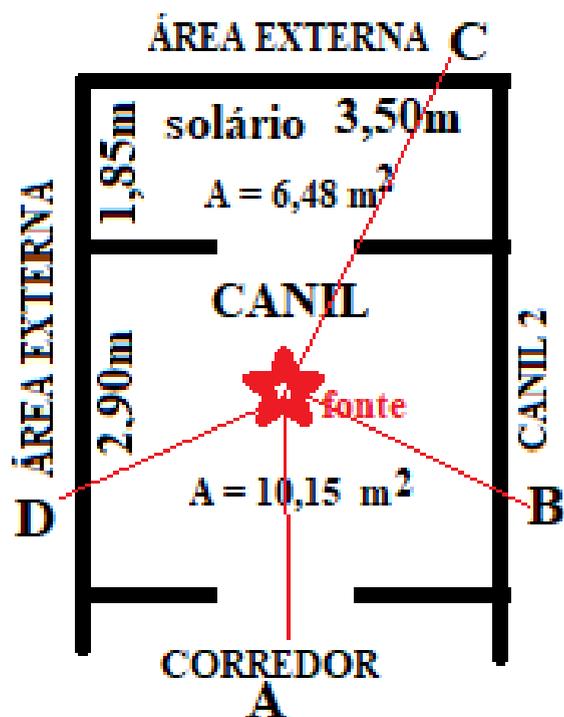


Figura 6 – Visão ampliada da área de um canil – identificação pontos de cálculo

RESULTADOS

5. RESULTADOS

As dimensões das barreiras foram determinadas usando as equações apresentadas anteriormente.

5.1 Dimensionamento das espessuras das paredes para feixes de ortovoltagem

A Tabela 4 apresenta as espessuras das paredes calculadas considerando o uso de equipamento de ortovoltagem. Para este tipo de aparelho, somente as paredes D e F podem receber feixe de radiação primária, todas as paredes recebem radiação espalhada e radiação de fuga do cabeçote. As espessuras apresentadas na Tabela 4 foram calculadas para feixes de radiação espalhada e com o método de cálculo por limite de dose (MCLD).

Para todos os pontos de cálculo utilizou-se o LMP para indivíduo do público ($P = 1,0 \text{ mSv/ano} = 0,02 \text{ mSv/semana} = 2 \times 10^{-5} \text{ Sv/semana}$). A carga de trabalho está expressa em Gy/semana (recomendação do NCRP-151). Os valores do fator ocupacional (T) foram adotados em função do tipo e condições de ocupação das áreas vizinhas à sala de tratamento e conforme recomendação da literatura (NCRP- 151; NCRP-51; NCRP-49; NCRP-33; INCA,2000).

Os valores de camada deci-redutora aplicados foram: CDR = 9,40cm (concreto) e CDR = 0,29cm (chumbo – Pb). Nos cálculos foi considerado uma fração de feixe espalhado: “a” = 0,0028, conforme recomenda o NCRP-49 (Tabela B2), o que proporciona a situação mais crítica para feixes de raios-X de 250 kVp.

A Tabela 5 apresenta as espessuras das paredes calculadas para equipamento de ortovoltagem considerando feixes de radiação de fuga do cabeçote. Para a definição da carga de trabalho de fuga (W_{fuga}) considerou-se que a fuga máxima do cabeçote equivale à 0,1% da carga de trabalho primária, conforme recomendação da literatura, o que fornece uma $W_{\text{fuga}} = 350 \times 0,001 = 0,35 \text{ Gy/semana}$. Se fosse considerada uma fuga do cabeçote equivalente á 1,0 mGy/h à 1,0m, para uma jornada de 10 horas diárias de trabalho da clínica,

ter-se-ia uma taxa de fuga semanal equivalente à 50 mGy/semana, ou 0,05 Gy/semana.

Tabela 4 – Espessura das paredes para feixes espalhados – ortovoltagem – MCLD

Ponto	dist (m)	W	P	U	T	B _{esp}	n	Esp (cm)
A	3,0	350	2,00E-05	1,0	1/8	2,35E-04	3,63	34,10
B	2,5	350	2,00E-05	1,0	1/2	4,08E-05	4,39	41,30
C	3,5	350	2,00E-05	1,0	1,0	4,00E-05	4,40	41,30
D	3,3	350	2,00E-05	1,0	1,0	3,56E-05	4,45	41,80
E	2,5	350	2,00E-05	1,0	1/2	4,08E-05	4,39	41,30
F	3,1	350	2,00E-05	1,0	1/2	6,28E-05	4,20	39,50
G	3,5	350	2,00E-05	1,0	1/2	8,00E-05	4,10	38,50
Porta	3,0	350	2,00E-05	1,0	1/8	2,35E-04	3,63	1,05 (Pb)
Teto	2,7	350	2,00E-05	1,0	1/16	3,81E-04	3,42	32,10

(Pb) = cálculo em centímetro de chumbo MCLD = Método de Cálculo por Limite de Dose

dist = distância em metros da fonte de radiação ao ponto de cálculo

W = carga de trabalho = 350 Gy/semana

Esp = espessura da barreira calculada

em centímetros P = limite de dose permitido, sem barreira, para indivíduo do público = $2,0 \times 10^{-5}$ Sv/sem

U = fator de uso da barreira

T = fator ocupacional da área calculada

B_{esp} = Fator de transmissão da radiação pela barreira

n = quantidade de camada deci-redutora

Tabela 5 – Espessura das paredes para radiação de fuga – ortovoltagem – MCLD

Ponto	dist (m)	W	P	U	T	B _{fuga}	n	Esp (cm)
A	3,0	0,35	2,00E-05	1,0	1/8	4,11E-03	2,39	22,40
B	2,5	0,35	2,00E-05	1,0	1/2	7,14E-04	3,15	29,60
C	3,5	0,35	2,00E-05	1,0	1,0	7,00E-04	3,15	29,70
D	3,3	0,35	2,00E-05	1,0	1,0	6,22E-04	3,21	30,10
E	2,5	0,35	2,00E-05	1,0	1/2	7,14E-04	3,15	29,60
F	3,1	0,35	2,00E-05	1,0	1/2	1,10E-03	2,96	27,80
G	3,5	0,35	2,00E-05	1,0	1/2	1,40E-03	2,85	26,80
Porta	3,0	0,35	2,00E-05	1,0	1/8	4,11E-03	2,39	0,70
Teto	2,7	0,35	2,00E-05	1,0	1/16	6,67E-03	2,18	20,50

B_{fuga} = Fator de transmissão da radiação de fuga pela barreira

A Tabela 6 apresenta as espessuras das paredes calculadas para equipamento de ortovoltagem considerando feixes de radiação primária.

Tabela 6 – Espessura das paredes para radiação primária – ortovoltagem – MCLD

Ponto	dist (m)	W	P	U	T	B _{pri}	n	Esp (cm)
D	3,30	350	2,00E-05	1/4	1,0	2,49E-06	5,60	52,70
F	3,10	350	2,00E-05	1/4	1/2	4,39E-06	5,36	50,40

B_{pri} = Fator de transmissão da radiação primária pela barreira

As paredes devem ser construídas com a maior espessura calculada. A Tabela 7 mostra as espessuras que cada parede deve ser construída, considerando feixes de radiação de ortovoltagem e a configuração da distribuição das paredes conforme o croqui da sala ilustrado.

Tabela 7 – Espessura das paredes para construção – ortovoltagem – MCLD

Ponto	Esp pri (cm)	Esp Espal (cm)	Esp fuga (cm)	Esp const (cm)
A		34,10	22,40	35,00
B		41,30	29,60	42,00
C		41,30	29,70	42,00
D	52,70	41,80	30,10	53,00
E		41,30	29,60	42,00
F	50,40	39,50	27,80	51,00
G		38,50	26,80	39,00
Porta		1,05 (Pb)	0,70 (Pb)	1,05 (Pb)
Teto		32,10	20,50	33,00

Esp pri = Espessura da barreira calculada para radiação primária

Esp espal = Espessura da barreira calculada para radiação espalhada Esp fuga = Espessura da barreira calculada para radiação de fuga Esp const = Espessura da barreira definitiva para construção

5.1.1 Espessuras das paredes para construção – ortovoltagem – Uso dos gráficos de atenuação do NCRP-49.

As espessuras das paredes foram também calculadas usando os gráficos de atenuação recomendados pela literatura (NCRP-49). Neste caso a

carga de trabalho considerada foi de $W = 20.000 \text{ mA.min}$, e adotou-se o LMP igual a $0,1 \text{ Roentgen/ano}$ (equivalente a $0,00002 \text{ Sv/semana}$ - limite para áreas livres – indivíduos do público).

Conforme preconizado pelo NCRP-49 (página 55), para equipamentos de teleterapia com energia abaixo de 500 kVp , a fuga do cabeçote é limitada em $1,0 \text{ cGy/h}$ à $1,0 \text{ metro}$ do cabeçote, com o tubo de raios-X estiver operando na corrente máxima (I). A carga de trabalho (W)(T) é dada em mA.min . As expressões matemáticas para o cálculo do fator de transmissão tornam-se:

$$\text{Radiação Primária: } B_{\text{pri}} = [(P \cdot (d_{\text{pri}})^2)] / [(W \cdot U \cdot T)]$$

$$\text{Radiação Espalhada: } B_{\text{esp}} = [(P \cdot (d_{\text{esp}})^2 \cdot (d_{\text{sec}})^2)] (400 / F) / [(a \cdot W \cdot U \cdot T)]$$

$$\text{Radiação de Fuga: } B_{\text{fuga}} = [(P) (d_{\text{fuga}})^2 (60)(I)] / [(W \cdot U \cdot T)]$$

A Tabela 8 apresenta os valores das espessuras das paredes determinadas com a metodologia de cálculo proposta pelo NCRP-49. Os valores das espessuras foram obtidos considerando: $P = 0,1 \text{ R/ano}$; $W = 20.000 \text{ mA.min}$, $U = \frac{1}{4}$ para radiação primária e $U = 1,0$ para radiação de fuga e espalhada. Os valores de T e das distâncias são os mesmos apontados na Tabela 5.

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 7 e 8, verifica-se que as espessuras das barreiras finalizadas para construção, determinadas usando o método de cálculo proposto pelo NCRP-151, cuja carga de trabalho (W) é determinada em Gy/semana conforme recomendação para projetos de blindagem de feixes de megavolttagem, são maiores do que as calculadas pela metodologia proposta pelo NCRP-49, que recomenda “ W ” em mA.min/semana e utiliza fatores de atenuação para radiações de raios-x de média e baixas energias.

Pode-se observar também que, as espessuras das barreiras calculadas para a radiação de fuga são maiores quando se considera a metodologia do NCRP-49 frente à do NCRP-151, isto se dá em parte porque para raios-X de ortovolttagem, ambos os métodos são divergentes quanto às

definições da radiação de fuga do cabeçote emissor de radiação ionizante.

Tabela 8 – Espessura das paredes calculadas pelo NCRP-49 – ortovoltagem

Ponto	Esp pri (cm)	Esp Espal (cm)	Esp fuga (cm)	Esp const (cm)
A		18,00	9,40	18,00
B		26,00	35,72	36,00
C		26,00	36,19	36,00
D	42,50	25,00	38,54	43,00
E		26,00	35,72	36,00
F	41,00	24,00	35,25	41,00
G		20,00	28,20	29,00
Porta		1,10 (Pb)	0,29 (Pb)	1,10 (Pb)
Teto		24,00	4,70	24,00

Esp pri = Espessura da barreira calculada para radiação primária

Esp espal = Espessura da barreira calculada para radiação espalhada Esp fuga = Espessura da barreira calculada para radiação de fuga Esp const = Espessura da barreira definitiva para construção

5.2 Dimensionamento das espessuras das paredes para BATD

Para o cálculo da transmissão da radiação direta da fonte de braquiterapia de alta taxa de dose, foi usada a expressão matemática:

$$B_{\text{BATD}} = [(P) (d^2)] / [(W) (U) (T)].$$

Onde:

B_{BATD} = fator de transmissão pela barreira para radiação de BATD. P = limite máximo permissível de dose para a área de cálculo

W = carga de trabalho (dose de radiação semanal à 1,0 metro da fonte)

U = fator de uso da barreira (considerado U = 1,0 para fonte de braquiterapia)

T = fator ocupacional da área de cálculo

A carga de trabalho (W) para BATD (W_{BATD}) foi determinada conforme ilustrado na sessão 4.2 deste trabalho, usando a expressão:

Onde:

$$W_{\text{BATD}} = (AKR) (t),$$

W_{HDR} = carga de trabalho para braquiterapia de alta taxa de dose
 AKR = taxa de kerma no ar

t = tempo de exposição da fonte radioativa

Considerando o valor de $A_{KR} = 4,11 \times 10^{-2}$ Gy/h à 1,0 m [(111,0x10⁶)x(370)], a carga de trabalho estimada será de $W_{BATD} = (4,11 \times 10^{-2}$ Gy/h)(3h) = 0,123 Gy/h à 1,0 metro da fonte. Nos cálculos realizados neste trabalho, foi aplicado um valor de $W = 0,15$ Gy/sem a 1 m.

A Tabela 9 apresenta as espessuras das paredes, calculadas pelo método de cálculo por limite de dose (MCLD), considerando o uso de equipamento de braquiterapia de alta taxa de dose (BATD), com fonte de irídio-192.

Tabela 9 – Espessura das paredes para BATD – MCLD

Ponto	dist (m)	W	P	U	T	B _{BATD}	n	Esp (cm)
A	3,0	0,15	2,00E-05	1,0	1/8	9,60E-03	2,02	28,20
B	2,5	0,15	2,00E-05	1,0	1/2	1,67E-03	2,78	38,90
C	3,5	0,15	2,00E-05	1,0	1,0	1,63E-03	2,79	39,00
D	3,3	0,15	2,00E-05	1,0	1,0	1,45E-03	2,84	39,70
E	2,5	0,15	2,00E-05	1,0	1/2	1,67E-03	2,78	38,90
F	3,1	0,15	2,00E-05	1,0	1/2	2,56E-03	2,59	36,30
G	3,5	0,15	2,00E-05	1,0	1/2	3,27E-03	2,49	34,80
Porta	3,0	0,15	2,00E-05	1,0	1/8	9,60E-03	2,02	0,04 (Pb)
Teto	2,7	0,15	2,00E-05	1,0	1/16	1,56E-02	1,81	25,30

B_{BATD} = Fator de transmissão da radiação pela barreira calculado para BATD com Ir-192

Os resultados apresentados nas Tabelas 7 e 9 mostram que o dimensionamento das barreiras calculadas para feixes de radiação de ortovoltagem, usando o método proposto pelo NCRP-151, exigem espessuras de paredes maiores do que os determinados para BATD. Desta forma, do ponto de vista de proteção radiológica, uma sala de radioterapia de ortovoltagem garante a blindagem necessária para a realização de procedimentos de BATD.

5.3 Dimensionamento das espessuras das paredes para BBTD

As espessuras das barreiras da sala de radioterapia (Figura 4) também foram dimensionadas para a possibilidade de seu uso para procedimentos de braquiterapia de baixa taxa de dose (BBTD).

Neste caso, os cálculos foram realizados para fontes de baixa atividade radioativa de irídio-192, iodo-125, ouro-192, cobalto-60 e césio-137. Os cálculos consideraram o armazenamento e manuseio máximo de 100 mCi (3,70 GBq) de atividades e um tempo de funcionamento da clínica de 40 horas/semanais.

A Tabela 10 apresenta os valores dos parâmetros: distância, U, T e P, comuns para todos os isótopos estudados. Os valores de W, B_{BBTD}, “n” e espessura foram determinados para uma barreira para fontes de irídio-192 de baixa taxa de dose, a serem manipuladas na sala de radioterapia (Figura 4).

Tabela 10 – Valores calculados para fontes de Ir-192 de baixa taxa de dose

Ponto	dist (cm)	U	T	P	Irídio-192 – $K_{AR} = 0,000111 \text{ Sv/h.GBq} - 1,0\text{m}$			
					$W=K_{AR}(A)(t)$	B _{BBTD}	n	Esp (cm)
A	3,00	1	0,1250	2,00E-05	1,64E-02	8,77E-02	1,06	14,80
B	2,50	1	0,5000	2,00E-05	1,64E-02	1,52E-02	1,82	25,45
C	3,50	1	1,0000	2,00E-05	1,64E-02	1,49E-02	1,83	25,57
D	3,30	1	1,0000	2,00E-05	1,64E-02	1,33E-02	1,88	26,29
E	2,50	1	0,5000	2,00E-05	1,64E-02	1,52E-02	1,82	25,45
F	3,10	1	0,5000	2,00E-05	1,64E-02	2,34E-02	1,63	22,83
G	3,50	1	0,5000	2,00E-05	1,64E-02	2,98E-02	1,53	21,36
Porta	3,00	1	0,1250	2,00E-05	1,64E-02	8,77E-02	1,06	0,02
Teto	2,70	1	0,0625	2,00E-05	1,64E-02	1,42E-01	0,85	11,87

5.4 Dimensionamento das paredes do canil para BBTD – diferentes fontes

As Tabelas 11 a 12 apresentam os valores de W, B_{BBTD}, “n” e espessura da barreira determinados para fontes de iodo-125, ouro-198, cobalto-60 e césio-137 de baixa taxa de dose, a serem manipuladas na sala de radioterapia (Figura 4).

Tabela 11 – Valores calculados da espessura da barreira: I-25 e Au-298 - BBTD

Iodo-125– $K_{AR} = 0,0000343$ Sv/h.GBq – 1,0m					Ouro-198– $K_{AR} = 0,0000772$ Sv/h.GBq– 1,0m			
Ponto	$W=K_{AR}(A)(t)$	B_{BBTD}	n	Esp (cm)	$W=K_{AR}(A)(t)$	B_{BBTD}	n	Esp (cm)
A	5,08E-03	2,84E-01	0,55	0,14	8,33E-03	1,73E-01	0,76	10,29
B	5,08E-03	4,92E-02	1,31	0,34	8,33E-03	3,00E-02	1,52	20,56
C	5,08E-03	4,83E-02	1,32	0,34	8,33E-03	2,94E-02	1,53	20,68
D	5,08E-03	4,29E-02	1,37	0,36	8,33E-03	2,61E-02	1,58	21,37
E	5,08E-03	4,92E-02	1,31	0,34	8,33E-03	3,00E-02	1,52	20,56
F	5,08E-03	7,57E-02	1,12	0,29	8,33E-03	4,61E-02	1,34	18,04
G	5,08E-03	9,65E-02	1,02	0,26	8,33E-03	5,88E-02	1,23	16,61
Porta	5,08E-03	2,84E-01	0,55	0,01	8,33E-03	1,73E-01	0,76	0,84
Teto	5,08E-03	4,60E-01	0,34	0,09	8,33E-03	2,80E-01	0,55	7,46

Tabela 12 – Valores calculados da espessura da barreira: Co-60 e Cs-137 - BBTD

Co-60– $K_{AR} = 0,0000343$ Sv/h.GBq – 1,0m					Cs-137– $K_{AR} = 0,0000772$ Sv/h.GBq– 1,0m			
Ponto	$W=K_{AR}(A)(t)$	B_{BBTD}	n	Esp (cm)	$W=K_{AR}(A)(t)$	B_{BBTD}	n	Esp (cm)
A	4,58E-02	3,14E-02	1,50	30,50	1,14E-02	1,26E-01	0,90	14,66
B	4,58E-02	5,46E-03	2,26	45,94	1,14E-02	2,19E-02	1,66	27,06
C	4,58E-02	5,35E-03	2,27	46,11	1,14E-02	2,14E-02	1,67	27,20
D	4,58E-02	4,76E-03	2,32	47,15	1,14E-02	1,91E-02	1,72	28,03
E	4,58E-02	5,46E-03	2,26	45,94	1,14E-02	2,19E-02	1,66	27,06
F	4,58E-02	8,39E-03	2,08	42,14	1,14E-02	3,36E-02	1,47	24,01
G	4,58E-02	1,07E-02	1,97	40,00	1,14E-02	4,29E-02	1,37	22,29
Porta	4,58E-02	3,14E-02	1,50	6,76	1,14E-02	1,26E-01	0,90	1,98
Teto	4,50E-02	5,09E-02	1,29	26,25	1,14E-02	2,04E-01	0,69	11,25

A Tabela 13 apresenta os valores determinados para as espessuras necessárias das paredes do canil da FMVZ (Figuras 5 e 6) para que se possa utilizá-lo na realização de procedimentos de braquiterapia de baixa taxa de dose com fontes de Ir-192. Para os cálculos foi considerado uma atividade máxima de 100 mCi (3,7 GBq) das fontes radioativas, e a presença de um funcionário do canil por 20 horas por semana nas vizinhanças (pontos de cálculo).

Conforme a literatura (ROSTELATO, 1997), a braquiterapia de baixa taxa de dose (BBTD) com fios de irídio-192 corresponde à uma atividade radioativa linear na faixa de: 1,0 mCi/cm (37 MBq/cm) a 4,0 mCi/cm (148 MBq/cm).

Tabela 13 – Espessuras para as paredes do canil da FMVZ - fontes de Ir-192 - BBTB

Ponto	dist (cm)	U	T	P	Iridio-192 – $K_{AR} = 0,000111 \text{ Sv/h.GBq} - 1,0\text{m}$			
					$W=K_{AR}(A)(t)$	B_{BBTD}	n	Esp (cm)
A	2,00	1	0,2500	2,00E-05	8,21E-03	3,90E-02	1,41	19,73
B	2,25	1	0,2500	2,00E-05	8,21E-03	4,93E-02	1,31	18,30
C	3,65	1	0,2500	2,00E-05	8,21E-03	1,30E-01	0,89	12,42
D	2,25	1	0,2500	2,00E-05	8,21E-03	4,93E-02	1,31	18,30
Porta	2,00	1	0,1250	2,00E-05	8,21E-03	7,79E-02	1,11	2,11
Teto	3,30	1	0,0625	2,00E-05	8,21E-03	4,24E-01	0,37	5,21

As Tabelas 14 e 15 apresentam os valores de W, B_{BBTD} , “n” e espessura da barreira determinados para fontes de iodo-125, ouro-198, cobalto-60 e césio-137 de baixa taxa de dose, a serem manipuladas no canil para a realização de procedimentos de braquiterapia de baixa taxa de dose (Figuras 5 e 6).

Tabela 14 – Espessuras para as paredes do canil da FMVZ - fontes de I-125 e Au-198- BBTB

Ponto	Iodo-125– $K_{AR}= 0,0000343 \text{ Sv/h.GBq} - 1,0\text{m}$				Ouro-198– $K_{AR} = 0,0000772\text{Sv/h.GBq} - 1,0\text{m}$			
	$W=K_{AR}(A)(t)$	B_{BBTD}	n	Esp (cm)	$W=K_{AR}(A)(t)$	B_{BBTD}	n	Esp (cm)
A	2,54E-03	1,26E-01	0,90	0,23	4,17E-03	7,68E-02	1,11	15,05
B	2,54E-03	1,60E-01	0,80	0,21	4,17E-03	9,72E-02	1,01	13,67
C	2,54E-03	4,20E-01	0,38	0,10	4,17E-03	2,56E-01	0,59	7,99
D	2,54E-03	1,60E-01	0,80	0,21	4,17E-03	9,72E-02	1,01	13,67
Porta	2,54E-03	2,52E-01	0,60	0,01	4,17E-03	1,54E-01	0,81	0,89
Teto	2,54E-03	1,37E+00	-0,14	0,04	4,17E-03	8,36E-01	0,08	1,05

Tabela 15 – Espessuras para as paredes do canil da FMVZ - fontes de Co-60 e Cs-137- BBTB

Ponto	Co-60– $K_{AR}= 0,0000343 \text{ Sv/h.GBq} - 1,0\text{m}$				Ouro-198– $K_{AR} = 0,0000772\text{Sv/h.GBq} - 1,0\text{m}$			
	$W=K_{AR}(A)(t)$	B_{BBTD}	n	Esp (cm)	$W=K_{AR}(A)(t)$	B_{BBTD}	n	Esp (cm)
A	4,58E-02	3,14E-02	1,59	30,50	1,14E-02	1,26E-01	0,90	14,66
B	4,58E-02	5,46E-03	2,26	45,94	1,14E-02	2,19E-02	1,66	27,06
C	4,58E-02	5,35E-03	2,27	46,11	1,14E-02	2,14E-02	1,67	27,20
D	4,58E-02	4,76E-03	2,32	47,15	1,14E-02	1,91E-02	1,72	28,03
Porta	4,58E-02	3,14E-02	1,50	6,76	1,14E-02	1,26E-01	0,90	1,98
Teto	4,58E-02	5,09E-02	1,29	26,25	1,14E-02	2,04E-01	0,69	11,25

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

6. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

As pesquisas bibliográficas indicam que, a realização da radioterapia em medicina veterinária tem proporcionado benefícios significativos aos animais oncológicos, tanto quanto à melhoria da qualidade de vida dos doentes, quanto à conduta mais segura dos profissionais da área veterinária.

Os resultados apontados neste trabalho mostraram que, as espessuras calculadas para as paredes da sala de radioterapia de ortovoltagem (teleterapia), são suficientes para a blindagem das radiações oriundas das fontes radioativas de braquiterapia de alta taxa de dose e de braquiterapia de baixa taxa de dose. Assim, a mesma sala pode ser utilizada para a teleterapia com feixes de raios-x de ortovoltagem e para procedimentos de braquiterapia.

Para viabilizar o uso, no canil da FMVZ, das fontes radioativas de braquiterapia de baixa taxa de dose estudadas, se faz necessário o reforço das espessuras das paredes atualmente construídas, ou a confecção de biombos de chumbo a serem dispostos em pontos específicos no interior do canil.

Para se garantir os critérios de proteção radiológica e satisfazer a legislação mais atualizada, as paredes da sala de radioterapia de ortovoltagem analisadas neste estudo, devem ser construídas com as espessuras determinadas pelo método de cálculo proposto pelo NCRP-151, e ilustradas na Tabela 7.

A metodologia de cálculo de blindagem para barreiras de proteção da sala de radioterapia veterinária, ilustrada neste trabalho, se mostrou facilmente exequível e pode servir como uma importante orientação aos profissionais médicos veterinários que pretendam incrementar suas terapêuticas oncológicas com o uso de fontes de radiações ionizantes

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, R.T. Caracterização dosimétrica da semente de irídio-192 para aplicação em câncer oftálmico. 2019. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN) - Universidade de São Paulo. USP. São Paulo - SP.

ANDRADE A.L.; FERNANDES M.A.R. Braquiterapia em Medicina Veterinária. In Jericó MM, Neto AJP, Kogika MM. Tratado de Medicina Interna de Cães e Gatos.v. 2. São Paulo: Roca, 2014; p. 560-583.

ANDRADE, A.L.; FERNANDES, M.A.R.; SAKAMOTO, S.S.; LUVIZOTTO, M.C.R. Beta therapy with 90strontium as single modality therapy for canine squamous cell carcinoma in third eyelid. *Ciência Rural*, 45(6):1066-1072. 2015.

ANDRADE, A. L.; LUVIZOTTO, M.C.R.; SAKAMOTO, S.S.; SOUZA, T.F.B.; FERNANDES, M.A.R. Eficácia do Extrato Aquoso do *Triiticum Vulgare* no Tratamento de Radiodermatites Geradas pelo uso da Radioterapia em Gatos. *Archives of Veterinary Science*, v. 15, p. 135-142, 2010.

ANDRADE, A.L.; LUVIZOTTO, M.C.R.; FERNANDES, M.A.R. Impacto da radioterapia como modalidade exclusiva ou combinada à cirurgia, no tratamento de neoplasias. *Anais do V ONCOVET*; 2008. Resumos. São Paulo-BR. *ABROVET*; (1):60-61.2008.

ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Dispõe sobre o Regulamento Técnico para planejamento, programação, elaboração e avaliação de projetos físicos de estabelecimentos assistenciais de saúde. Resolução RDC nº. 50 de 21 de fevereiro de 2002. Brasília – DF. 2002.

ANVISA - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILANCIA SANITÁRIA. Regulamento Técnico para o funcionamento de serviços de radioterapia, visando a defesa da saúde dos pacientes, dos profissionais envolvidos e do público em geral. (Resolução ANVISA/MS RDC 20 de 02/12/2006) Brasília – DF. Disponível em: www.anvisa.gov.br. Acessado em 13 de abril de 2018.

ANVISA - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Curso de Capacitação. “Avaliação de projetos básicos e executivos de engenharia e arquitetura no contexto do plano de expansão na radioterapia no SUS”. 2013. Brasília – DF.

ARGYLE, D. J.; BREARLEY, M. J.; TUREK, M. M. Decision Making in Small Animal Oncology. Wiley Blackwell, 2008. 403p.

ATTIX FH. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. Wiley-VCH. Madison, Wisconsin. 2004.

BONNETT, B.N.; EGENVALL, A.; HEDHAMMAR, A.; OLSON, P. Mortality in over 350,000 insured Swedish dogs from 1995–2000: II. Breed-Specific Age and Survival Patterns and Relative Risk for Causes of Death. Acta Vet Scand. 2005; 46(3):121-136.

BOSTON, S.; HENDERSON, R. A. Role of Surgery in Multimodal Cancer Therapy for Small Animals. Veterinary Clinical Small Animal, vol. 44, p. 855–870, 2014. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0195561614000862/1-s2.0-S0195561614000862-main.pdf?_tid=2172f090-6e90-11e5-9915-0000aacb35e&acdnat=1444400282_3b32c3a4705596f1a2fab859a99362c1> Acessado em: 13 de abril de 2018.

BURK R.L.; KING G.K. The Veterinay Clinics of North America – Small Animal Praticce – Radiation Oncology. Philadelphia-USA: W.B. Saunders Company, 1997; 171.

CAMARGO, P.R.T.L.; RODRIGUES, L.N.; FURNARI, L.; RUBO, R.A. Implementation of a quality assurance program for computerized treatment planning systems. *Medical Physics* 34 (7), July 2007.

CASTILHO, T. G. Otimização de Cálculos de Blindagem de Salas de Teleterapia de Megavotagem. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Bacharel em Física Médica). Instituto de Biociências de Botucatu (IBB). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Botucatu - SP. 2015.

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Requisitos de Segurança e Radioproteção para Serviços de Radioterapia, Rio de Janeiro: CNEN, 2017.18 p. (CNEN NN 6.10). Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm610.pdf>>. Acessado em 13 de abril de 2018.

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Rio de Janeiro: CNEN, 2014. 22p. (CNEN NN 3.01). Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>> Acessado em 13 de abril de 2018.

COELHO, T.S.; FERNANDES, M.A.R.; YORIYAZ, H.; ANTONIO, P.L. A complete dosimetric characterization of two ^{90}Sr - ^{90}Y dermatologic applicators. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A – Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*. 632(A):147-151. 2011.

COELHO, T. S. Desenvolvimento de um sistema de dosimetria para aplicadores de betaterapia de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$. 2010. Dissertação (Tecnologia do Combustível Nuclear e Reatores Nucleares de Potência) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN/SP.

COELHO, T.S.; FERNANDES, M.A.R; YORIYAZ, H.; LOUZADA, M.J.Q..
Análise Dosimétrica de perfis de distribuições radiais de doses relativas de um aplicador de betaterapia de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ utilizando o código MCNP-4C e filmes radiocrômicos. Revista Brasileira de Física Médica (RBFM). 2011; 4(3):7-10.

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. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Bacharel em Física Médica). Instituto de Biociências de Botucatu (IBB). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Botucatu - SP. 2008.

CUNHA, S.C.S. Radioterapia: as radiações do bem. Revista Pulo do Gato [Internet]. 2013. Disponível em:
<http://www.revistapulodogato.com.br/materias/ler-materia/70/radioterapiaas-radiacoes-do-bem>. Acessado em 13 de abril de 2018.

DE NARDI, A.B.; RODASKI, S.; SOUZA, R. S.; COSTA, T. A.; MACEDO, T. R.; RODIGHIERI, S. N.; RIOS, A.; PIEKARZ, C. H. Prevalência de neoplasias e modalidades de tratamentos em cães atendidos no hospital veterinário da Universidade Federal do Paraná. Archives of Veterinary Science, v. 7, n. 2, p. 15-26, 2002.

DI PRINZIO, R. D.; FACURE, A. Determinação de blindagem em radioterapia. Disponível em:
<https://iniscollection/NCLCollectionStore/Public/45/073/45073477.pdf>
Acesso em: 01 de maio de 2018.

FERNANDES, M.A.R. Metodologia para Determinação da Carga de Trabalho Efetiva em Equipamentos de Teleterapia. Proposta para Otimização das Blindagens da Sala de Radioterapia Veterinária. Tese (Livre Docência). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Faculdade de Medicina de Botucatu. Botucatu. 2018.

FERNANDES, M.A.R. Utilização de Moldes Radioativos Especiais de Folhas de Ouro¹⁹⁸ no Tratamentos de Tumores de Pele. 2000. Tese (Doutorado em Tecnologia do combustível Nuclear e Reatores Nucleares de Potência). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN-SP.

FERNANDES, M.A.R.; OLIVEIRA JR.; B.; COELHO, T. S.; YORIYAZ, H.; LOUZADA, M.J.Q.; FERNANDES, M.F.S. Avaliação Densitométrica e Aspectos Clínicos da Betaterapia em Quelóides e Pterígio. Universitas (Revista do Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium de Araçatuba). v.1, p.133 - 144, 2009.

FERNANDES, M.A.R.; COELHO, T. S.; YORIAZ, H. Estudo Comparativo da Atenuação da Radiação de Aplicadores de Betaterapia: Efeito da Concavidade do Aplicador. Revista Brasileira de Cancerologia. , v.56, p.52 - 52, 2010.

FERNANDES, M. A. R.; ANDRADE, A. L.; LUVIZOTO, M. C. R.; PIERÔ, J. R.; CIARLINI, L. D. R. P. Radioterapia em Medicina Veterinária Princípios e Perspectivas. Revista Brasileira de Física Médica, Natal, v. 4, n. 2, p. 11-14, 2010. Disponível em:<http://www.abfm.org.br/rbfm/publicado/RBFM_v4n2_p11-4.pdf> Acesso em: 10 de out. 2016.

FERNANDES; M. A. R.; ANDRADE, A. L.; BIAZZONO, L.; LUVIZOTTO, M. C. R.; SANTOS, A.; CORREA, C. Gold (¹⁹⁸Au) fiuks brachytherapy use on canine skin tumor. Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science, v. 40, n. 5, p. 321- 327, 2003. Disponível em<http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S141395962003000500002&script=sci_arttext> Acesso em: 10 de Out. 2016.

FERREIRA, G.C. Análise Radiométrica de Feixes de Fótons de Alta Energia – Elaboração do Plano de Radioproteção Aplicado à Radioterapia Veterinária. 2019. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia (FMVZ). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Botucatu – SP.

FOSTER; SMITH Radiation Therapy in Dogs, Cats and Other Small Animals. Veterinary & Aquatic Services Department, 2015. Disponível em <http://www.peteducation.com/article.cfm?c=2+2087&aid=2607>. Acessado em 14 março 2018.

GILLETTE, E. L.; LARUE, S. M.; GILLETTE, S. M. Normal tissue tolerance and management of radiation injury. In: Seminars in veterinary medicine and surgery (small animal). 1995. p. 209-213.

IAEA, International Atomic Energy Agency. Technical Report Series n. 430: Commissioning and quality assurance of computerized planning system for radiation treatment of cancer. Vienna, Austria, 2004.

ICRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Protection against ionizing radiation from external sources used in medicine. Pergamon Press, Inc. NY. USA: ICRU, 1985. (Report 33).

ICRU – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Dose and volume specification for reporting intracavitary therapy in gynecology. ICRU – Report 38. Bethesda, MD, 1985.

INCA – INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. Ministério da Saúde (MS). Blindagem em Radioterapia: técnica e normas. Rio de Janeiro – RJ. 2000.

INCA - INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. Ministério da Saúde (MS). Programa de Qualidade em Radioterapia. TEC DOC 1151. Aspectos Físicos da Garantia da Qualidade em Radioterapia – Protocolo de Controle de Qualidade. INCa. Rio de Janeiro - RJ. 2000. Também disponível em: www.inca.gov.br.

INCA – INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. Ministério da Saúde (MS). ABC do câncer: Abordagens Básicas para o Controle do Câncer. 3ªed. Rio de Janeiro, 2017.

INCA - INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. Ministério da Saúde (MS). Câncer – Prevenção e Fatores de Risco. Rio de Janeiro - RJ. 2018. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/causas-e-prevencao/prevencao-e-fatores-de-risco>. Acessado em 23 de setembro de 2018.

KHAN, F., “The Physics of Radiation Therapy”, 4^a Ed. Lippincott, Williams and Wilkins. Baltimore, MD. 2003.

KNOTTENBELT, D. C. KELLY, D. F. The diagnosis and treatment of periorbital sacoid in the horse 445 cases from 1974 to 1999. Veterinary Ophthalmology, v. 3, n. 2-3, p. 169-191, 2000. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1463-224.2000.3230169.x/abstract>> Acesso em: 14 de março de 2018.

LARUE, S.M.; CUSTIS, J.T. Advances in Veterinary Radiation Therapy – Targeting Tumors and Improving Patient Comfort. Vet Clin Small Anim. 44, p. 909-923, 2014.

LARUE, S. M.; GILLETTE, E. L. Radiation therapy. In: WITHROW, S. J.; MACEWEN, E. G. Small Animal Clinical Oncology. W.B. Saunders Co. Philadelphia, PA. 2001.

LUCAS, M.H.M. Cálculo de Blindagem para Sala de Radioterapia de Ortovoltagem – Aplicação em Medicina Veterinária. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Bacharel em Física Médica). Instituto de Biociências de Botucatu (IBB). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Botucatu - SP. 2018.

MCNIEL E. Introduction to Radiation Therapy. Michigan State University, East Lansing, Michigan. Department of Small Animal Clinical Sciences 2009: p.126-129. Disponível em:<http://landofpuregold.com/cancer/thePDFs/intro-radiationtherapy.pdf>>

MORETTO A.J.G, CORRÊA F.G. Radioterapia para carcinomas em animais domésticos. Garça. Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária. 2013;20.Disponível em: http://faef.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/mcMIQhIjR6ueiY8_2013-6-21-15-37-39.pdf. Acessado em 14 de março de 2018.

MORRIS, J.; DOBSON, J. Oncologia em pequenos animais. São Paulo: Roca Ltda; 2007.

MORRISON, W.B. *Cancer in Dogs and Cats: Medical and Surgical Management*. Baltimore :Williams & Wilkins, p. 591-598, 1998.

NCRP - NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. “Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities” NCRP N° 151. Bethesda, Maryland, 2006.

NCRP - NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. “Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X Rays and Gamma Rays of Energies up to 10 MeV” NCRP Report N° 49. Bethesda, Maryland, 1976.

NORTH, S.; BANKS, T. *Small Animal Oncology: An Introduction*. Philadelphia: Elsevier, 2009. 298p.

OKAWABATA, F.S. Avaliação e Atualização do Plano de Radioproteção em Serviço de Telecobaltoterapia 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Bacharel em Física Médica). Instituto de Biociências de Botucatu (IBB). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Botucatu - SP. 2014.

OLIVEIRA, A.L.P. Radioterapia pós-cirúrgica em queloides. Uma meta-análise e revisão da literatura. 2019. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Medicina de Botucatu (FMB). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” –

UNESP. Botucatu – SP.

PODGORSAK, E.B. Technical Editor. “Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students”. Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA). Vienna. 2005.

RAMOS JUNIOR, W.C. Sistema de Cálculo para Determinação do Tempo de Exposição em Radioterapia Veterinária. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Bacharel em Física Médica). Instituto de Biociências de Botucatu (IBB). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Botucatu - SP. 2009.

ROSTELATO, M.E.C.M. Preparação de fontes de Irídio-192 para Uso em Braquiterapia. 1997. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN) - Universidade de São Paulo. USP. São Paulo-SP.

SALVAJOLI, J. V.; SOUAHAMI, L.; FARIA, S. L. “Radioterapia em Oncologia”. Editora Atheneu. Rio de Janeiro-RJ. 2013.

SCAFF, L. A. M., Física na Radioterapia A Base Analógica de uma Era Digital. Editora Projeto Saber. São Paulo. 2010.

SILVA, D.A. Planejamento Computacional Tri-Dimensional para Radioterapia em Região Pélvica de Animais Selvagens. 2018. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia. Botucatu-SP.

STOSKOPF MK, BROWN J, DEVOE R. Imaging in Zoological Medicine Practice. Journal of radiology nursing, v. 31, n. 3, p. 81-90, 2012.

SCHWARZ, T.; SAUNDERS, J. Veterinary computed tomography. John Wiley & Sons, 2011. 575p.

TAUHATA, L.; SALATI, I.P.A.; DI PRINZIO, R.; DI PRINZIO, M. A. R. R.
Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos - 9ª revisão - novembro/2013 - Rio de Janeiro - IRD/CNEN.

VETTORATO, M.C. Desenvolvimento de Metodologia para Aplicação de Técnicas de Radioterapia em Medicina Veterinária. 2016. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia. Botucatu-SP.

VETTORATO, M.C, Fernandes MAR, Vulcano LC. Acessórios de imobilização e proteção utilizados na radioterapia de pequenos animais. *Vet. e Zootec.* 2017 Set.; 24(3): 444-452.

VETTORATO, M. C.; FERNANDES, M. A. R.; VULCANO, L. C. Utilização da radioterapia na medicina de animais selvagens – um estudo fundamentado em casos obtidos na literatura. *Veterinária e Zootecnia*, v. 24, n. 2, p. 256-265, 2017.

WEISSE, C.; BERENT, A. Radiation Therapy – Oncology for the Interventionalist; In: *Veterinary Image-Guided Interventions*. (capther three) 1ªed. 2015. WILEY Blackwell (John Wiley & Sons, INc). New York, NY,

WITHROW, S.J.; MacEWEN, E.G.. *Small Animal Clinical Oncology*. 5ª Ed. Philadelphia, Pennsylvania-USA: Elsevier’s Health Sciences; 2013.

YAZBEK, K.V.B.; FANTONI, D.T. Manutenção da qualidade de vida em cães com câncer: tratamento da dor e cuidados paliativos. 2005. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em <https://bdpi.usp.br/item/001484256>. Acessado em 14 de outubro de 2018.

