

AS VANTAGENS DA PROTONTERAPIA QUANDO COMPARADAS À RADIOTERAPIA

Data de aceite: 01/11/2023

João Lucas Soares

FACULDADE ILAPEO - Instituto Latino
Americano de Pesquisa e Ensino
Odontológico

Leticia Bobato

CESCAGE - Centro de Ensino Superior
dos Campos Gerais

Fabício L. S. Cerutti

UTFPR - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná

Leandro Michelis

CESCAGE - Centro de Ensino Superior
dos Campos Gerais

Talita C. Santos

FACULDADE ILAPEO - Instituto Latino
Americano de Pesquisa e Ensino
Odontológico

Bianca P. Milchin

FACULDADE ILAPEO - Instituto Latino
Americano de Pesquisa e Ensino
Odontológico

Paola C. Rosa

FACULDADE ILAPEO - Instituto Latino
Americano de Pesquisa e Ensino
Odontológico

Sergei Anatolyevich Paschuk

UTFPR - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná

Valeriy Denyak

UTFPR - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná

Elisandre C. S. Cerutti

UniDomBosco - Centro Universitário
UniDomBosco.

Paulo R. Prevedello

FACULDADE ILAPEO - Instituto Latino
Americano de Pesquisa e Ensino
Odontológico

RESUMO: **Introdução:** A protonterapia apresenta técnicas avançadas para tratar diversos tipos de neoplasias, incluindo os que estão próximos aos tecidos e órgãos considerados radiosensíveis. A vantagem da protonterapia está relacionada com o comportamento físico da interação dos prótons que são acelerados com a matéria alvo. Atualmente, a dificuldade da técnica e o seu elevado custo tem sido cruciais na proliferação lenta da protonterapia pelo mundo. **Objetivo:** O presente estudo teve como objetivo aprofundar o conhecimento

científico sobre a física e a mecânica da protonterapia e compará-la com a radioterapia. Assim, classifica-se como sendo uma revisão bibliográfica do tipo qualitativa. **Materiais e Métodos:** Neste trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica com pesquisas embasadas nos assuntos referentes à protonterapia através de acervos digitais como *Google Scholar*, *Scielo* (Scientific Electronic Library Online), artigos científicos, dissertações e teses. **Resultado:** A radioterapia foi a primeira modalidade de tratamento de tumores nas regiões mais delicadas do corpo humano. O tratamento por feixe de fótons consiste em destruir células tumorais e cancerígenas por meio da radiação ionizante, ou ainda impedir que a neoplasia cresça e se reproduza. A protonterapia apresenta uma física capaz de fazer com que a dose de radiação atinja apenas o tumor, expondo o paciente aos menores riscos possíveis, para assegurar que o tratamento não atinja áreas além do necessário. **Conclusão:** A protonterapia é mais indicada, quando comparada com a radioterapia, em tratamentos que o tumor está próximo a estruturas anatômicas nobres como por exemplo: tumores de cabeça e pescoço. **PALAVRAS-CHAVE:** protonterapia; radioterapia; prótons; tratamento; tumores.

THE ADVANTAGES OF PROTON THERAPY WHEN COMPARED TO RADIOTHERAPY

ABSTRACT: Introduction: Proton therapy offers advanced techniques for treating various types of neoplasms, including those close to tissues and organs considered to be radiosensitive. The advantage of proton therapy is related to the physical behavior of the interaction of protons that are accelerated with the target material. Currently, the difficulty of the technique and its high cost have been crucial to the slow proliferation of proton therapy around the world. **Objective:** The aim of this study was to deepen scientific knowledge about the physics and mechanics of proton therapy and to compare it with radiotherapy. It is therefore classified as a qualitative literature review. **Materials and Methods:** In this study, a bibliographic review was carried out with research based on subjects related to proton therapy through digital collections such as Google Scholar, Scielo (Scientific Electronic Library Online), scientific articles, dissertations and theses. **Results:** Radiotherapy was the first method of treating tumors in the most delicate regions of the human body. Photon beam treatment consists of destroying tumor and cancer cells using ionizing radiation, or preventing the neoplasm from growing and reproducing. Proton therapy has the physics to ensure that the radiation dose reaches only the tumor, exposing the patient to the lowest possible risks, to ensure that the treatment does not reach areas beyond what is necessary. **Conclusion:** Proton therapy is more suitable than radiotherapy for treatments in which the tumor is close to noble anatomical structures, such as head and neck tumors. **KEYWORDS:** proton therapy; radiotherapy; protons; treatment; tumors.

INTRODUÇÃO

A protonterapia é um método de tratamento de grande importância, que apresenta técnicas avançadas para tratar diversos tipos de neoplasias, incluindo os que estão próximos aos tecidos e órgãos considerados radiosensíveis, como por exemplo, para o tratamento de tumores de cabeça, pescoço, próstata, e tumores pulmonares (PAGANETTI;

BORTFELD, 2005). A protonterapia é utilizada para o uso clínico principalmente por conseguir entregar uma dose de radiação mais alta no tumor e ao mesmo tempo expor menor dose de radiação nos tecidos e órgãos próximos à região a ser tratada, ou seja, reduzir os efeitos adversos nas células saudáveis (VIEIRA, 2014).

A protonterapia apresenta algumas vantagens em comparação à radioterapia convencional, como por exemplo, a menor exposição à radiação dos tecidos adjacentes ao tumor, menos efeitos colaterais, além de contribuir com a melhora da qualidade de vida do paciente, durante e após o tratamento, o que deixa o paciente mais seguro durante a realização desse (PAGANETTI; BORTFELD, 2005).

Segundo o *National Cancer Institute*, várias pessoas que estão com câncer avançado têm indicação para o tratamento por quimioterapia e radioterapia ou protonterapia simultaneamente. Desta forma foi analisado no Sistema de Saúde da Universidade da Pensilvânia entre 2011 e 2016 cerca de 1.500 casos, apenas em adultos e 11 tipos diferentes de câncer, para que assim conseguissem averiguar os efeitos colaterais e os resultados do câncer, incluindo a sobrevivência.

A vantagem da protonterapia está relacionada com o comportamento físico da interação dos prótons que são acelerados com a matéria do alvo. Os prótons ao colidirem com os átomos do alvo perdem energia em forma de deposição de dose, no entanto a deposição de dose é baixa na entrada do corpo e a máxima dose de energia é depositada ao final da sua trajetória. No tratamento é feito um planejamento para que a localização do tumor e a máxima dose do feixe de prótons sejam no mesmo ponto, buscando que a morte celular seja precisamente localizada para poupar os tecidos sadios (NEGRÃO, 2016).

A energia dos prótons e a densidade do material é o que determina a profundidade que a dose máxima de radiação irá ocorrer, assim é possível determinar onde o feixe vai provocar a máxima deposição de dose no corpo do paciente (HIRSCH, 2006).

A protonterapia teve seu início em 1946, com o cientista estadunidense Robert Wilson; contudo quem foi responsável por desenvolver o principal equipamento usado na terapia por prótons, “o cíclotron”, foi o seu compatriota Ernest Lawrence, no Laboratório Lawrence Berkeley da Universidade da Califórnia (LBL) em 1930. O primeiro uso da protonterapia foi para o tratamento da hipófise de humanos no Cíclotron de 184 polegadas (SMITH, 2006).

Atualmente, a dificuldade da técnica e o seu elevado custo têm sido cruciais na proliferação lenta da protonterapia pelo mundo. Segundo a Particle Therapy Co-Operative Group (PTCOG) até o final de 2013, quase 106.000 pacientes foram tratados pela terapia de prótons em até então 46 centros existentes pelo mundo (NEWHAUSER; ZHANG, 2015).

Na tabela 1, constam alguns dados sobre os países que possuem centros de tratamentos por feixe de prótons e que estão em operação clínica, atualizada em outubro de 2022 (PTCOG, 2022).

Nome dos Países	Início dos Tratamentos (ano)	Nº de Centros
Áustria	2016	2
Bélgica	2020	1
China	2004	6
República Checa	2012	1
Dinamarca	2019	1
França	1991	3
Alemanha	1998	7
Índia	2019	1
Itália	2002	4
Japão	1994	26
Polônia	2011	1
Rússia	1969	5
Coréia do Sul	2007	2
Espanha	2019	2
Suécia	2015	1
Suíça	1984	1
Tailândia	2022	1
Taiwan	2015	4
Países Baixos	2018	3
Reino Unido	1989	6
EUA	1990	43

Tabela 1: Centros de protonterapia que existem no mundo.

FONTES: Particle Therapy Co-Operative Group.

Apesar de seu elevado preço, alguns países estão construindo novos e/ou mais centros de protonterapia visto que existem países que ainda não possuem nenhum centro de tratamento por feixe de prótons. Segue na tabela 2, atualizada em outubro de 2022 onde constam alguns dados sobre a construção de centros de terapia por prótons (PTCOG, 2022). Tabela 2: Centros de protonterapia em construção.

Nome dos Países	Nº de Centros em construção
Argentina	1
Austrália	1
China	9
Emirado de Abu Dhabi	1
França	1
Índia	2
Japão	2
Noruega	2
Rússia	1
Arábia Saudita	1
Cingapura	2
República Eslovaca	1
Coréia do Sul	2
Taiwan	1
Reino Unido	1
EUA	6

FONTE: Particle Therapy Co-Operative Group.

A obra desenvolvida por Ernest Lawrence em 1930, o acelerador Cíclotron, cria um campo magnético graças aos ímãs dipolos, existentes em seu mecanismo. Os ímãs são colocados levemente separados, com os lados retos e paralelos um ao outro, através da lacuna criada um campo elétrico é produzido por uma tensão oscilante. As partículas são aceleradas após serem injetadas no campo magnético onde se movimentam em um caminho semicircular (PAGANETTI; BORTFELD, 2005).

O presente trabalho teve como objetivo realizar revisão bibliográfica sobre a evolução dos equipamentos de protonterapia, compará-los com a técnica de radioterapia e sobre conceitos físicos da interação dos prótons com a matéria.

METODOLOGIA

Neste trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica utilizando 25 trabalhos com pesquisas embasadas nos assuntos referentes à protonterapia através de acervos digitais como *Google Scholar*, *Scielo* (Scientific Electronic Library Online), artigos científicos, dissertações e teses. Foram selecionados os trabalhos cujas palavras chaves utilizadas foram: Protonterapia, Radiologia com Feixe de Prótons, Equipamentos de Protonterapia, Mecânica da Protonterapia, Física da Protonterapia. No inglês foram pesquisadas as palavras chaves: *Protontherapy*, *Proton Beam Radiology*, *Protontherapy Equipment*, *Mechanics of Protontherapy*, *Physics of Protontherapy*.

O presente estudo teve como objetivo aprofundar o conhecimento científico sobre a física e a mecânica da protonterapia e compará-las com a radioterapia. Assim, classifica-se como sendo uma revisão bibliográfica do tipo qualitativa.

RESULTADOS

A evolução dos equipamentos de protonterapia

Como já abordado anteriormente, a protonterapia é um método de exame que vem se modernizando constantemente, e assim ocorre com seus equipamentos. Quando Ernest Lawrence desenvolveu o primeiro equipamento usado na terapia de prótons, chamado cíclotron, físicos continuaram pesquisando por mais de 40 anos para melhor desenvolver o equipamento, para que assim ele se tornasse ainda mais seguro e eficiente para o paciente durante o tratamento (NEWHAUSER; ZHANG, 2015).

O cíclotron contém campo elétrico e campo magnético constante. As partículas ao serem aceleradas percorrem um caminho em forma de espiral o que faz as mesmas ganharem energia cinética, apesar de que o Cíclotron possui uma energia de extração fina, impossibilitando a mesma de alterar de maneira direta a energia das partículas (PAGANETTI; BORTFELD, 2005).

Com o passar do tempo foi desenvolvido o Síncrotron, objetivando um equipamento que conseguisse reparar e melhorar a aceleração de partículas do Cíclotron. O Síncrotron contém campo magnético e campo elétrico variável, percorre um caminho circular, o que aumenta a energia das partículas a cada volta que ela percorre e ao mesmo tempo extrai prótons, gerando assim após uma única volta, o feixe (PAGANETTI; BORTFELD, 2005).

Visto que para o tratamento é utilizado um acelerador de partículas, normalmente do tipo cíclotron ou síncrotron já falado acima, este deve ser escolhido para o centro de terapia de acordo com algumas características, como por exemplo, o custo como um todo do acelerador, o espaço que possui para ser instalado, o alcance das energias que serão empregadas, entre outras coisas (ICRU Report 59, 1998).

Entretanto o acelerador de partículas mais utilizado nos tratamentos de protonterapia ainda é o cíclotron, pois foi criado para operar em uma energia fixa e produzir feixes contínuos, além do fato de, como já relatado, quando um centro de protonterapia vai ser instalado deve-se ter certos cuidados, por exemplo: saber para quais tratamentos o centro vai ser direcionado, energia, custos (CHRISTÓVÃO, 2010).

Atuais equipamentos e as técnicas utilizados na protonterapia

Quando se trata de equipamentos para a Protonterapia o custo do investimento é extremamente alto, deve-se considerar que além do aparelho há as instalações e softwares especiais para o mesmo. Porém o tempo de vida dos aceleradores são relativamente longo,

podendo chegar a até 30 anos (CHRISTÓVÃO, 2010).

A protonterapia é um método de tratamento que é mais utilizado e por isso se faz eficaz em tratamentos de tumores localizados, devido aos prótons serem partículas carregadas pesadas e possuírem o aspecto próprio de depositar o pico de energia na profundidade escolhida para cada paciente e/ou tratamento (CARUSO; CARVALHO; SANTORO).

Esse pico de energia relatado acima se chama pico de Bragg: durante o percurso dos prótons a energia mesmo sendo pequena é constante até chegar próximo ao alcance final do feixe de prótons, onde será depositada em numa curta distância e então haverá uma máxima interação com elétrons orbitais após os prótons alcançarem o alvo (CHRISTÓVÃO, 2010).

A taxa da perda de energia depende da carga e não da massa da partícula, acarretando um aumento acentuado da dose no pico de Bragg e decrescendo para zero rapidamente. E como a profundidade do pico de Bragg depende da energia do feixe, quanto maior a energia do feixe for mais profunda a dose de radiação será no tecido (CASSETTA JUNIOR, 2013).

Sendo assim, a energia do feixe de prótons pode ser controlada de maneira precisa para que a dose de radiação atinja apenas o tumor ou o tecido alvo. Com isso, tecidos sadios circunvizinhos são preservados de receberem radiação e sofrerão menores danos em relação ao alvo (CHRISTÓVÃO, 2010).

Atualmente estão buscando substituir instalações para que o custo do aparelho diminua, mas a qualidade do tratamento continue a mesma, para que haja mais possibilidades de novos centros em todo o mundo (DEPUYDT, 2018).

O equipamento de protonterapia é bem grande e por isso precisa de uma infraestrutura sofisticada. Um centro que é exclusivamente dedicado ao tratamento de feixes de prótons, por exemplo, situado em Houston, EUA, chamado M.D. Anderson Proton Therapy Center que entrou em operação em 2006, custou cerca de US\$ 125 milhões (NAPT, 2006), com área total de 27.432 m², sendo projetado para tratar 3.000 pacientes/ano (MD ANDERSON, 2006).

Na figura 1, temos a ilustração de um aparelho de Protonterapia e como ele funciona, situado na Clinica da Universidade de Navarra, em Madri- Espanha.

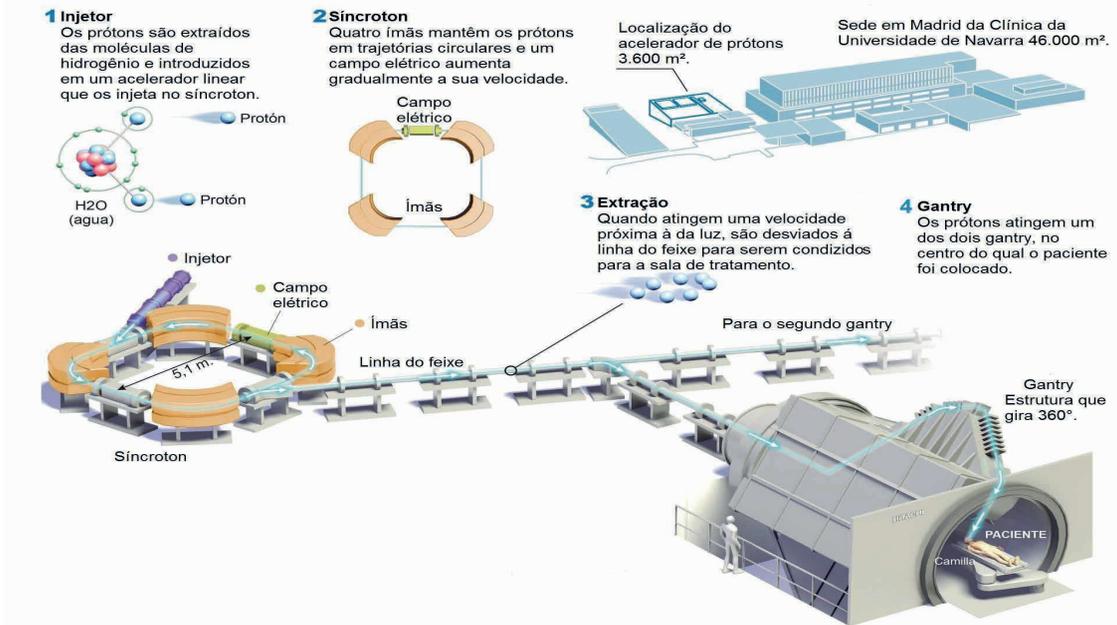


Figura 1. Ilustração da estrutura do equipamento de protonterapia.

FONTE: Elaborado com base na Clínica da Universidade de Navarra.

Na figura 2, temos a ilustração do Pico de Bragg, onde está representado como a dose de radiação começa a passar pelo paciente, chega ao tumor e também como ela continua depois de atingir o local tumoral, tanto pelo tratamento de Raios X convencional que é pelo feixe de fótons, e pelo tratamento de Protonterapia que é utilizado feixes de prótons.

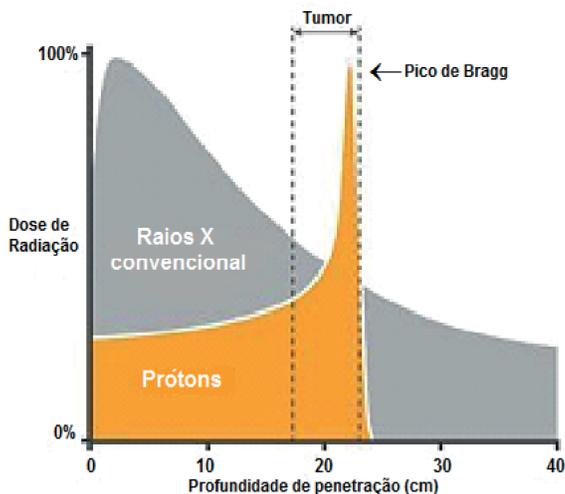


Figura 2. Ilustração do Pico de Bragg.

FONTE: Elaborado com base em CNA, Centro Nacional de Aceleradores (2018).

Paralelos entre a radioterapia e a protonterapia

A história da radioterapia iniciou com Wilhelm Konrad Roëntgen em 1895, quando o mesmo descobriu os raios X. Desde então pesquisadores continuaram a estudar mais para se aprofundarem no assunto, pois quando foi descoberto que a radiação conseguia destruir tecidos, houve um interesse grande por parte de físicos e pesquisadores visto que a mesma conseguiria ser utilizada com a finalidade de tratamentos radioterápicos (CAMARGO, 2015).

A radioterapia foi a primeira modalidade de tratamento de tumores nas regiões mais delicadas do corpo humano. O tratamento por feixe de fótons consiste em destruir células tumorais e cancerígenas por meio de radiação ionizante, ou ainda impedir que a neoplasia cresça e se reproduza. Com isso, a radioterapia se tornou um dos métodos mais utilizados no tratamento de tumores, principalmente como uma complementação pós-cirúrgica (TODESCATTO, 2019).

No início o equipamento de radioterapia era movido à fonte de rádio (Ra), porém foi percebido que seria um benefício substituí-la pelas fontes de Césio-137 e Cobalto-60. Com os avanços tecnológicos, surgiu a construção de aceleradores lineares que são máquinas que produzem radiação de maneira eletrônica e segundo Furnari (2009, p.80) “os aceleradores lineares representam a mais importante, prática e versátil fonte de radiação ionizante em radioterapia”.

Já a protonterapia é uma modalidade de tratamento mais recente se comparada com a radioterapia, visto que teve seu início em 1946 e consiste em destruir o tumor expondo o paciente aos menores riscos possíveis, para assegurar que o tratamento não atinja áreas além do necessário (SMITH, 2006).

A técnica da protonterapia, ainda que pouco conhecida, já está disponível em alguns países pelo mundo, seja para a modalidade de tratamento ou estudos, para que assim o tratamento por feixe de prótons se torne cada vez mais eficaz e preciso (CHRISTÓVÃO, 2010).

Os órgãos do corpo humano têm um limite de irradiação que podem receber ao longo da vida e caso o mesmo seja ultrapassado o paciente pode ter sérios riscos, sendo um deles a morte. E Existem áreas tumorais que para serem tratadas necessitam de uma dose alta de radiação, porém com a radioterapia, órgãos circunvizinhos acabam recebendo dose e às vezes para que esses órgãos sejam poupados não se consegue dar toda a dose no tumor (BRAZIER, 2019).

Nisto a protonterapia apresenta uma vantagem, a qual é entregar uma dose maior no tumor sem que células que estão ao redor sejam irradiadas, garantindo assim menores riscos e uma maior chance de cura (NEGRAO, 2016).

Já sobre os acessórios utilizados, assim como na radioterapia, também são utilizados colimadores (blocos) que são feitos exatamente na geometria do tumor do paciente para

que a dose não seja espalhada para outros tecidos e órgãos, e o compensador que também é feito sob medida para alcançar a profundidade prescrita; isso tudo para que o campo alvo seja precisamente atingido (CHRISTÓVÃO, 2010).

Uma das diferenças nos tratamentos de protonterapia e radioterapia é o seu custo, visto que um estudo sueco avaliou o valor de ambos. Ao final dos estudos concluiu que o tratamento de protonterapia custa em torno de US\$ 5.121 já um tratamento de radioterapia por fótons custa US\$ 40.967, e totalizando o tratamento com os custos do equipamento, a terapia de prótons custou US\$ 17.484 e a terapia de fótons custou US\$ 46.096 (YUAN, 2019).

Mas vale ressaltar que o tempo de vida dos equipamentos tem uma grande diferença também, pois um equipamento de radioterapia gira em torno de 15 anos considerando que os aceleradores de elétrons são trocados com frequência, já o de protonterapia seu tempo de vida é mais de 30 anos (CHRISTÓVÃO, 2010).

Processos físicos de interação da radiação com a matéria/com o paciente

Um acelerador de partículas tem o intuito de direcionar um feixe de partícula com uma energia específica contra um alvo e para isso o equipamento precisa de uma fonte de partículas carregadas, um campo elétrico para conseguir acelerar a partícula, elementos focalizadores, defletores para direcionar o feixe na direção desejada, um alvo com um material selecionado para então o feixe colidir e por fim uma câmara para abrigar todos os componentes em alto vácuo e prevenir assim que o feixe seja espalhado por moléculas do ar (MENEZES, 2008).

Para o acelerador linear acelerar os prótons, segundo Menezes (2008), são utilizadas ondas eletromagnéticas estacionárias, usadas apenas como injetoras de prótons de grandes energias, que possuem dispositivos para detectar e corrigir as distorções ocasionadas pelos efeitos relativísticos causados devido à massa dos prótons serem bem maior do que a dos elétrons e também por possuírem uma energia de quatro megavolts, o que gera em torno de dez por cento da velocidade da luz.

Através do material absorvedor e da partícula, as partículas carregadas são caracterizadas com um dado estado de carga, o qual conforme se aumenta a velocidade da partícula, diminuirá o poder de freamento e assim vice-versa. A perda de energia da partícula pode ser explicada com o pico de Bragg, pois grande parte do percurso a partícula é freada, e quando está chegando ao final do trajeto, a carga do íon é reduzida e a curva irá cair. Sendo assim o poder de freamento é máximo quando a partícula atinge o maior alcance de penetração (MENEZES, 2008).

Principais patologias tratadas com protonterapia.

A protonterapia apresenta uma física capaz de fazer com que a dose de radiação atinja apenas o tumor, sendo uma técnica mais precisa disponível nos centros pelo mundo.

Por esse motivo, essa técnica de terapia de prótons é mais utilizada em tratamentos

de tumor em locais próximos a estruturas de extrema importância, onde uma cirurgia poderá possuir riscos. Sendo assim a protonterapia é aplicada para o tratamento de tumores na cabeça, pescoço, próstata, e tumores pulmonares (PAGANETTI; BORTFELD, 2005).

DISCUSSÃO

Na pesquisa realizada pela *National Cancer Institute*, mostrou que quase 400 pacientes foram tratados com a terapia de prótons e o restante com a terapia de fótons. Após 90 dias de tratamento, as pesquisas mostraram que o grupo de 45 pessoas que foram submetidas ao tratamento com a terapia de prótons (12%) e 301 com a terapia de fótons (28%) tiveram efeitos colaterais graves. Mas pesquisas mostraram que os pacientes tratados com a protonterapia não ficaram impossibilitados de realizar atividades de suas rotinas, visto que a radioterapia afeta o dia a dia dos pacientes. Após três anos, dentre os pacientes que haviam sido tratados com a terapia de prótons, 46% estavam livres do câncer e 56% estavam vivos; já dentre os pacientes que foram tratados com a terapia de fótons 49% estavam livres e 58% estavam vivos (INSTITUTE, 2020)

Segundo HIRSCH a protonterapia apresenta vantagens sobre a radioterapia, pois oferece uma diminuição no tumor e menores riscos de irradiação em tecidos saudáveis, também PAGANETTI e BORTFELD concordam e ainda acrescentam o fato do paciente possuir menores efeitos colaterais e melhora na qualidade de vida.

O tratamento com feixe de fótons utiliza sessões de doses de radiação as quais são depositadas no paciente para que o tumor diminua até que essas sessões terminem, porém para que essa dose chegue até o local tumoral, terá que atravessar tecidos e células saudáveis, irradiando-os e podendo causar danos. Por esse motivo são utilizados alguns campos que são feixes em diferentes ângulos, para que a dose máxima se concentre no tumor, mas mesmo assim em algumas regiões do corpo o cuidado com a radiação deve ser muito maior, visto que possuímos órgãos como o coração e a medula, nos quais o recebimento de uma quantidade mínima de radiação poderá causar danos irreversíveis para o paciente (CARUSO; CARVALHO; SANTORO).

Por isso o método da protonterapia que utiliza feixes de prótons se torna mais eficiente, visto que possui uma física capaz de fazer com que as doses de radiação atinjam com mais precisão somente o tumor e nenhum tecido após, podendo e sendo indicado para tratamento de órgãos mais delicados, podendo algumas vezes o paciente ser curado por completo, sem que precise passar pela cirurgia como na maioria dos outros tratamentos (RODER, A. F.; HORMAZA, J. M.).

A figura 3 apresenta uma comparação dos dois métodos de tratamento relatados, sendo (A) tratamento por feixe de fótons, e (B) tratamento por feixe de prótons. As áreas que estão indicadas com as setas são onde os feixes de radiação estão entrando, e cada cor está representando a quantidade de dose de radiação que ela está depositando, descrito

ao lado esquerdo da imagem. Sendo o tumor reproduzido dentro da área pontilhada.

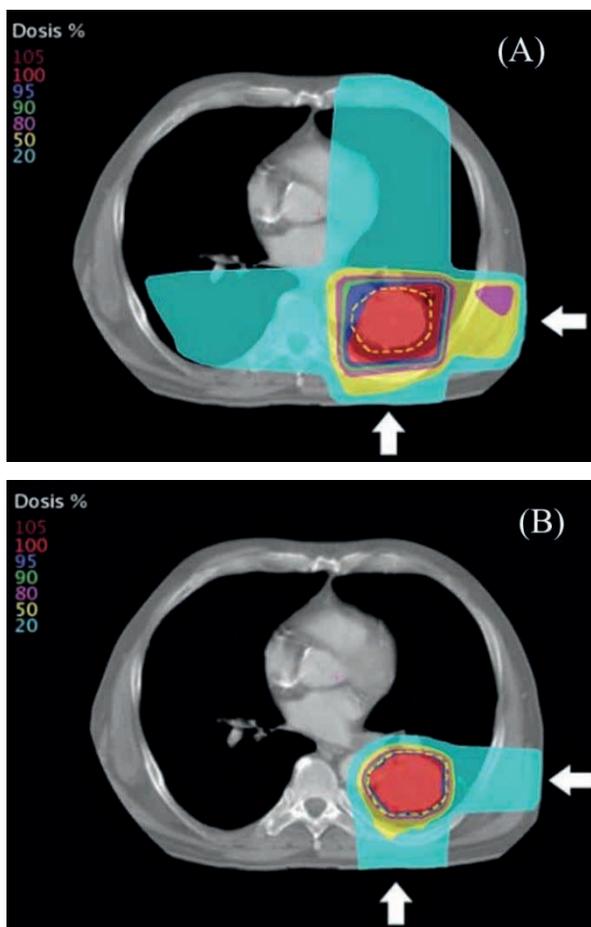


Figura 3: Comparação de tratamento para câncer. (A) tratamento por feixe de fótons; (B) tratamento por feixe de prótons.

FONTE: (RODER, A. F.; HORMAZA, J. M.).

Para os autores PAGANETTI e BORTFELD a terapia de prótons é mais utilizada no tratamento de tumores na cabeça, pescoço, próstata, e tumores pulmonares por estarem próximas a estruturas de risco. Os autores CARUSO, CARVALHO e SANTORO descrevem que este método deve ser mais utilizado e também será mais eficaz em tratamentos de tumores localizados como a cabeça, pescoço e região pélvica.

CONCLUSÃO

Podemos concluir que a protonterapia é mais indicada quando comparada com a radioterapia em tratamentos que estão próximos a estruturas delicadas e não podem receber altas doses de radiação por serem estruturas radiosensíveis e possuírem um

limite de dose, visto que o método de tratamento por feixe de prótons preserva danos celulares adjacentes e garante uma melhora na qualidade de vida do paciente. Então o método da protonterapia apresenta vantagens no tratamento de tumores de cabeça, pescoço, próstata, e tumores pulmonares que são tumores pelo fato do tratamento por feixe de prótons depositarem a dose de radiação precisamente no local tumoral graças ao efeito pico de Bragg e garantir assim menores riscos de efeitos secundários no paciente juntamente com uma maior chance de cura.

Mesmo sendo um tratamento pouco conhecido pela população em geral e apresentando um alto custo de investimento, o método de tratamento por feixe de prótons está sendo aperfeiçoado diariamente para se tornar acessível em mais países para que um maior número de pacientes seja curado.

REFERÊNCIAS

CAMARGO, Renato. **Radioterapia e Medicina Nuclear - Conceitos, Instrumentação, Protocolos, Tipos de Exames e Tratamentos**. São Paulo: Saraiva Editora, 2015. 103-123 p)

CASSETTA JUNIOR, Francisco Roberto. **Avaliação do Desvio Lateral do Feixe em Protonterapia**. Curitiba, Brasil: 2013. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/596>

BRAZIER, Yvette – **Proton Therapy as an Option for Trating Cancer**, N. Medical News Today. 2019. Disponível em: <<https://www.medicalnewstoday.com/articles/268629.php>>. Acesso em 20 de agosto de 2022.

CARUSO, F. et al. **A Física de Altas Energias e a Terapia de Câncer com Prótons: Motivações e Perspectivas**.

CHRISTÓVÃO, Marília Tavares. **PROPLAN - Sistema Computacional para o Planejamento da Protonterapia em Tumores Oculares**. Belo Horizonte- MG, Brasil: 2010. Disponível em: http://www.repositorio.cdn.br:8080/bitstream/123456789/968/1/Tese_Marilia_TChristovao.pdf

CNA, Centro Nacional de Aceleradores. **Experimentos em el CNA para la mejora de los tratamientos de protonterapia**. Sevilla, Espanha: 2018. Disponível em: <https://cna.us.es/index.php/es/noticias/notas-de-prensa/956-experimentos-en-el-cna-para-la-mejora-de-los-tratamientos-de-protonterapia>

DEPUYDT, T. **Proton therapy technology evolution in the clinic: impact on radiation protection**. Belgium: 2018. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0146645318756252>

FURNARI, Laura. **Controle de Qualidade em Radioterapia**. São Paulo, Brasil: 2009. Disponível em: <https://rbfm.org.br/rbfm/article/view/37>

HIRSCH L.R. Dinâmica nuclear para reações secundárias aplicadas a próton-terapia. Tese (Mestrado) – Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, 2006.

ICRU Report 59, **International Commission on Radiation Units and Measurements**. Clinical Proton Dosimetry - Part I: Beam Production, Beam Delivery and Measurement of Absorbed Dose. ICRU REPORT 59, 1998.

INSTITUTE, National Cancer. **Is Proton Therapy Safer Than Traditional Radiation?** Eua: 2020. Disponível em: <https://www.cancer.gov/news-events/cancer-currents-blog/2020/proton-therapy-safety-versus-traditional-radiation>

MENEZES, Kamila Kojoroschi. **Interação da radiação com a matéria- Aceleradores e Proteção Radiológica**. Porto Alegre- RS, Brasil: 2008. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/139411/000719712.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

NAVARRA, Clínica Universidad. **Terapia de Protons**. Madrid, Espanha. Disponível em: <https://www.cun.es/unidade-terapia-protoes>

NEGRÃO, R. R. **ESTUDO DA INTERAÇÃO DE PRÓTONS COM ALVOS HETEROGÊNEOS APLICADA A RADIOGRAFIA COM FEIXES DE PRÓTONS**. Botucatu: 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/202896>

NEUHAUSER, W. D.; ZHANG, R. **The physics of proton therapy**. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/274087651_The_physics_of_proton_therapy

PAGANETTI, Harald; BORTFELD, Thomas. **Proton Beam Radiotherapy- The State of the Art**. Massachusetts, USA: 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/253950498_Proton_Beam_Radiotherapy_-_The_State_of_the_Art1

PAGANETTI, Harald. **Proton Therapy Physics**. Boston: Taylor & Francis Group, 2012. p. 690. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.1201/b22053/proton-therapy-physics-harald-paganetti>

PTCOG SECRETARY, **Hadron Therapy Patient Statistics** (data received per March 2012; PTCOG50) Disponível em: <http://ptcog.web.psi.ch/ptcentres.html>. Acesso em 20/01/2013.

PTCOG, Particle Therapy Co-Operative Group. 2022. Disponível em: <https://www.ptcog.ch/index.php/facilities-under-construction>

RODER, A. F.; HORMAZA, J. M. **O que é protonterapia?** São Paulo: 2013. Disponível em: <http://www.jornacitec.fatecbt.edu.br/index.php/IIJTC/IIJTC/paper/viewFile/553/425>

SMITH, Alfred. **Proton therapy**. USA: 2006. Disponível em: [https://www.sprmn.pt/pdf/pmb6_13_r26_Proton_Therapy_\(ARSmith\).pdf](https://www.sprmn.pt/pdf/pmb6_13_r26_Proton_Therapy_(ARSmith).pdf)

SLATER J. M., ARCHAMBEAU, J. O., MILLER, D. W., NOTARUS, M. I., PRESTON, W., SLATER, J. D., **The proton treatment center at Loma Linda University Medical Center: rationale for and description of its development**, International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics, Vol. 22, No. 2, p.383, 1992.

TODESCATTO, T. **Princípios Físicos e Práticas de Radioterapia**. São Paulo: Clube de Autores Editora, 2019. 80-120 p.

VIEIRA, Bruno Alves Brenga. **Caracterização da deposição de energia de um feixe de próton, utilizando o código de Monte Carlo FLUKA**. Botucatu. São Paulo: 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/142911/000867022.pdf?sequence=1>

YUAN, et al. **New Frontiers in Proton Therapy: Applications in Cancers**. 2019. Disponível em: <https://cancercommun.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40880-019-0407-3>