

Avaliação da penumbra de diferentes colimadores multi-lâminas Evaluation of the penumbra of different multileaf collimators

André Banhate¹, Geraldo G. Perez¹, Leonardo F. da Silva¹, André V. Camargo¹

¹Barretos Cancer Hospital, Barretos, Brasil

Resumo

A penumbra é definida como gradiente de dose existente nas bordas do campo de radiação, sendo importante para os planejamentos de tratamento de radioterapia para assegurar dose adequada no PTV, evitando um gradiente de dose na região de tratamento. Os objetivos do trabalho foram avaliar a penumbra nas direções X e Y em quatro colimadores multilâminas Varian, MLC Millennium HD 120 (TrueBeam STx), MLC Millennium 120 (Unique), MLC Millennium 120 (600CD) e MLC Millennium 52 (2100C), e sua variação para diferentes parâmetros, tais como: espessura das lâminas, energias de feixe, tamanhos de campo e posição dos colimadores em relação as lâminas; além de obter um valor ótimo de margem de ajuste dos campos de tratamento, considerando a penumbra para cada equipamento a ser usado na prática clínica durante os planejamentos radioterápicos 3D conformacional e, por fim, uma comparação estatística entre os métodos de interpolação Linear e FermiFit do Software Omni Pro I'mRT® (IBA), utilizados para determinação do perfil lateral do feixe. Foram encontrados valores de penumbra entre $(0,30 \pm 0,01)$ cm e $(0,40 \pm 0,01)$ cm para os diferentes MLC Millennium, tamanhos de campo e energias de feixe. Não houve diferença significativa da penumbra para as diferentes espessuras de lâminas. Um parâmetro influente nos valores de penumbra foi a energia do feixe utilizada, onde houve uma variação de cerca de 20% com o aumento da energia do feixe. Variando os tamanhos de campo, a penumbra apresentou um valor mínimo na região de 5×5 cm². As diferentes configurações de colimadores e lâminas mostraram que, na direção X, a posição rente as lâminas e, na direção Y, a configuração distanciando os colimadores a 0,5cm das lâminas, foram as configurações que apresentaram valores mínimos de penumbra. Por fim, para a prática clínica de planejamentos 3D, recomenda-se o valor de margem de penumbra de 0,40cm.

Palavras-chave: radioterapia; penumbra; dosimetria.

Abstract

Penumbra is defined as a dose gradient at the edges of the radiation field, and is important for radiotherapy treatment planning to ensure adequate dose in PTV, avoiding a dose gradient in the treatment region. The study aims to evaluate the penumbra widths in the X and Y directions in four multileaf collimators Varian, MLC Millennium HD 120 (TrueBeam STx), MLC Millennium 120 (Unique), MLC Millennium 120 (600CD) and MLC Millennium 52 (2100C), and its variation for different parameters, such as: thickness of the multileafs, beam energies, field sizes and position of the collimators in relation to the multileafs; in addition to obtain an optimum margin of fit of the treatment fields, considering the penumbra for each equipment to be used in clinical practice during 3D conformational radiotherapy plans and, finally, a statistical comparison between the Linear and FermiFit interpolation methods of the Omni Pro I'mRT Software® (IBA), used to determine the lateral beam profile. Penumbra values found were between (0.30 ± 0.01) cm and (0.40 ± 0.01) cm for the MLC Millennium, field sizes and beam energies. There was no significant variation of the penumbra for the different multileafs thickness. An influent parameter in the penumbra widths was the beam energy used, where there was a variation of about 20% with the increase of the beam energy. By varying the field sizes, the penumbra presented a minimum value in the region of 5×5 cm². The different configurations of collimators and multileafs showed that, in the X direction, the position close to the multileafs and, in the Y direction, the configuration distancing the collimators 0.5 cm from the multileafs, were the configurations that presented minimum values of penumbra. Finally, for the clinical practice of 3D planning, it is recommended the margin value of penumbra of 0.40 cm.

Keywords: radiotherapy; penumbra; dosimetry.

1. Introdução

Em radioterapia, o cálculo da distribuição de dose e do número de unidade monitor é realizado através de Sistemas de Planejamentos Computadorizados (Treatment Planning System - TPS). Para que o algoritmo do TPS modele corretamente o Acelerador linear (Al) e assim obtenha acuradamente a dose que o mesmo entregará para determinada configuração, é necessário que seja inserido no sistema dados mecânicos e dosimétricos do equipamento. Nesse sentido, um fator dosimétrico importante que deve ser

medido e informado para o TPS é a penumbra do colimador.

A penumbra corresponde ao gradiente de dose na região próxima das bordas dos campos de radiação. É definida como a distância lateral entre duas curvas de isodose (80% e 20% da dose no eixo central), sendo consequência da penumbra geométrica, devido às dimensões finitas da fonte (ponto focal); da penumbra de transmissão, causada pela transmissão do feixe através dos colimadores (Jaws) e lâminas e espalhamentos laterais de fótons e elétrons.

A AAPM (Associação Americana de Física Médica) em seu relatório *Task Group (TG) 106* descreve informações necessárias para comissionar adequadamente um acelerador linear, como dados de perfil do feixe e distribuição de dose [1]; já em seu relatório No. 72, referente ao *TG-50*, recomenda procedimentos adicionais de comissionamento para Aceleradores com colimadores multilâminas (*Multileaf Collimator - MLC*) para caracterização da penumbra e do perfil de dose com a utilização do *MLC* [2].

Para as diferentes modelos e tipos de AL, os valores de penumbra são variáveis, uma vez que a disposição, formato e movimentação das lâminas do *MLC* podem variar. A distância e posição dos *jaws* e *MLC* nos AL distinguem entre as fabricantes, um exemplo, é a disposição do *MLC* no *gantry* do acelerador, onde ele pode estar como sistema de colimação primário, secundário ou até terciário. Além disso, o formato das lâminas, os conhecidos *tongue and groove*, variam na intenção de diminuir a penumbra de transmissão inter lâminas. Tem-se também que algumas versões de AL podem apresentar lâminas se movimentam em um formato de circunferência, conhecido como *MLC* focalizado, onde ele acompanha a divergência do feixe para as diferentes aberturas de campo. Já as versões *Varian* e *Elekta* usam uma versão de lâminas que se movimenta em um eixo paralelo e plano, apresentando também bordas arredondadas para diminuir a dependência da penumbra com a abertura do tamanho de campo.

Portanto, temos que a penumbra é um fator variável com o AL, e vai ser um fator importante quando falamos de planejamentos 3D conformacionais devido às possíveis configurações de lâminas e colimadores utilizados para os campos de irradiação do tratamento utilizados para conformar o volume de tratamento planejado (*Planning Target Volume – PTV*), porque os documentos da Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (*International Commission on Radiation Units and Measurements – ICRU*) 50 e 62, que definem o *PTV*, dizem que este é um volume com uma margem que inclui o volume interno de tratamento (*Internal Tumor Volume – ITV*), incertezas do posicionamento, variações durante o tratamento, depende da precisão dos imobilizadores, porém exclui área de penumbra ou região de *build-up*. Logo, nos planejamentos de radioterapia uma margem suficiente deve ser dada entre o limite do *PTV* e a posição das lâminas para assegurar dose adequada no *PTV*, evitando um gradiente de dose na região de tratamento. [3]

Porém, convencionalmente, durante os planejamentos, adota-se uma margem padrão para o sistema de colimação devido a região de penumbra do feixe, mesmo em diferentes condições de tratamento (aceleradores lineares, tamanho de campo, energia do feixe e posicionamento dos colimadores e lâminas), e que depende tanto da instituição quanto do planejador, o que torna relevante a medida de penumbra. Outro motivo para avaliar a penumbra é que as informações adquiridas

e passadas para o *TPS*, normalmente coletadas no comissionamento, não são feitas e não requerem o uso dos *MLC*.

Diante disto, o presente estudo tem como objetivos avaliar o tamanho da penumbra e sua variação nas direções X e Y, direção paralela ao movimento das lâminas e direção perpendicular, respectivamente, para diferentes parâmetros (diferentes *MLC*'s, tamanhos de campos, energias de feixe e posicionamento dos *jaws* em relação às lâminas), permitindo assim obter um valor ótimo de margem de penumbra para cada equipamento a ser usado na prática clínica durante os planejamentos radioterápicos 3D conformacional; além disso, realizar uma comparação estatística entre os métodos de interpolação *Linear* e *FermiFit* do *Software Omni Pro I'mRT® (IBA)*, utilizados para determinação do perfil lateral do feixe.

2. Materiais e Métodos

Medidas de penumbra na direção X e Y foram realizadas em quatro colimadores multilâminas *Varian*, *MLC Millennium HD 120 (TrueBeam STx)*, *MLC Millennium 120 (Unique)*, *MLC Millennium 120 (600CD)* e *MLC Millennium 52 (2100C)*. Tem-se que o colimador multilâminas *Millennium HD 120* apresenta lâminas de 0,25 cm próximos do centro e 0,5 cm fora da região central; já o sistema *MLC Millennium 120* apresenta lâminas de 0,5 cm próximos do centro e 1,0 cm fora da região central; e o sistema de *MLC Millennium 52* apresenta lâminas de 1,0 cm.

As medidas foram realizadas com filmes radiocrômicos *EBT3* posicionados perpendicularmente ao eixo central do feixe dentro de um objeto simulador de água sólida (placas de água sólida). A dose utilizada foi de 500 UM e a taxa de dose de 600 UM/min, com distância fonte-eixo (*Source Axis Distance – SAD*) de 100 cm. Para energia de 6 MV e 10 MV o filme foi colocado nas profundidades de 1,5 cm e 2,5 cm respectivamente, para que este estivesse na profundidade de máxima dose; colocou-se 5,0 cm de água sólida abaixo do filme para garantir condições de retroespalhamento. A configuração de posicionamento utilizada para avaliação da penumbra de diferentes colimadores multilâminas é mostrado na Figura 1.

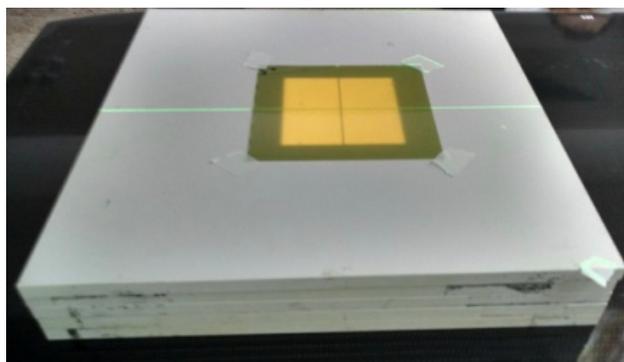


Figura 1. Configuração de posicionamento utilizada para avaliação da penumbra de diferentes colimadores multilâminas.

Estudos de medidas de penumbra para diferentes detectores mostraram que as características de resposta do detector têm impacto direto em seus valores [4]. Medidas de penumbra com câmera de ionização finita produzem valores imprecisos devido ao tamanho físico do detector; já filmes radiográficos oferecem uma alta resolução espacial para medidas, porém, dependendo do tipo de filme, pode ser afetado pela sua dependência inerente com a energia [5]. Por isso, neste estudo, optou-se por utilizar filme dosimétrico radiocrômico *Gafchromic EBT3* devido à sua alta resolução espacial e baixa dependência energética. Estas características o tornam uma ótima alternativa para medidas dosimétricas de penumbra para feixes de raios-X de alta energia [5,6]. Além disso, os filmes apresentam número atômico efetivo ($Z_{\text{eff}} = 6,98$) similar ao da água ($Z_{\text{eff}} = 7,3$) e sua dependência energética, na faixa dos 50 kVp a 10 MV, foi demonstrada ser menor que 10% [7].

Cada metodologia utilizada para o estudo de penumbra dos diferentes parâmetros será apresentada a seguir.

2.1. Avaliação da variação da penumbra entre colimadores multilâminas

Em todos os aceleradores lineares foram usados campo de $8 \times 8 \text{ cm}^2$, com os *jaws* na mesma posição das lâminas (rente a extremidade da lâmina). Os filmes foram irradiados na configuração descrita para a energia de 6MV ($D_{\text{máx}} = 1,5 \text{ cm}$), SAD = 100 cm.

2.2. Avaliação da variação da penumbra para diferentes energias do feixe

Essa avaliação foi realizada nos aceleradores TrueBeam e 2100C. Foram utilizados campos de radiação de $8 \times 8 \text{ cm}^2$ com os *jaws* na mesma posição das lâminas (rente a extremidade da lâmina). Irradiou-se dois filmes em cada equipamento, um para energia de fótons de 6 MV ($D_{\text{máx}} = 1,5 \text{ cm}$) e outro para 10 MV ($D_{\text{máx}} = 2,5 \text{ cm}$), SAD = 100 cm..

2.3. Avaliação da variação da penumbra para diferentes tamanhos de campo

Foram irradiados filmes com campos de radiação de 1×1 , 2×2 , 3×3 , 4×4 , 5×5 , 8×8 , 10×10 , 15×15 e $20 \times 18 \text{ cm}^2$ no acelerador 600CD, com a finalidade de avaliar a dependência do tamanho da penumbra com o tamanho de campo. Para todos os campos, os *jaws* foram colocados na posição das lâminas (rente a extremidade da lâmina) 6MV ($D_{\text{máx}} = 1.5 \text{ cm}$) e SAD = 100 cm.

2.4. Avaliação da variação da penumbra para diferentes configurações da posição dos jaws em relação às lâminas

Usando o acelerador 600CD, testou-se a dependência da penumbra para seis diferentes configurações de posição dos *jaws* com relação ao MLC.

Para isso, foram feitas irradiações de campos $10 \times 10 \text{ cm}^2$ formados pelas seguintes configurações: *jaws* colocados rente a extremidade das lâminas (A), *jaws* distanciados em cada lado do campo das

lâminas (X e Y) em 0,5 cm (B) e 1,0 cm (C), campo formado com os *jaws* (MLC totalmente aberto) (D), com as lâminas (*jaws* totalmente abertos) (E), e a configuração recomendada pelo fabricante que sugere um distanciamento dos *jaws* em relação ao MLC de 0,9 cm eixo X e 0,2 cm no eixo Y (F). As diferentes configurações de lâminas e *jaws* podem ser observadas na Figura 2.

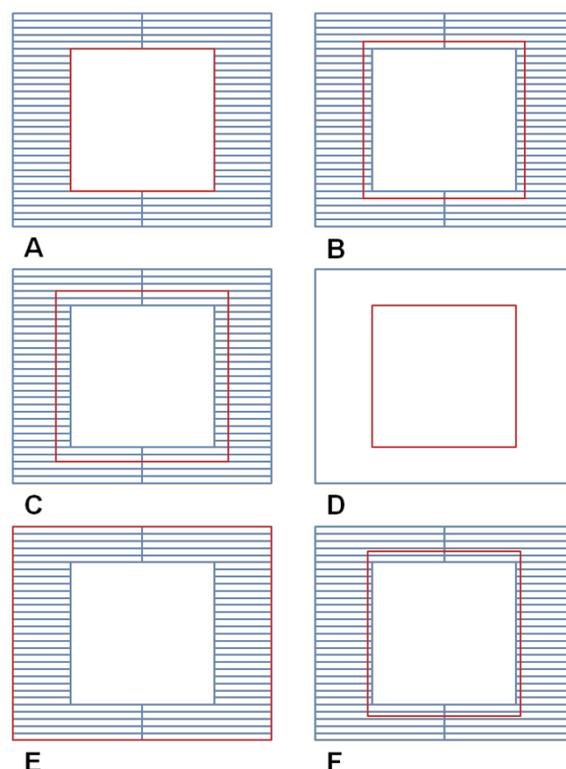


Figura 2. Ilustração das configurações usadas para avaliação da variação da penumbra para diferentes configurações da posição dos *jaws* em relação às lâminas.

2.5 Determinação da penumbra a partir do perfil de dose

Com os filmes dosimétricos irradiados, foi realizado o escaneamento utilizando scanner *EPSON Expression 100000 XL*, e em seguida uma análise dos perfis de dose do filme através do *Software OmniPro-I'mRT® (IBA)*.

Inicialmente, obteve-se a calibração do lote de filme radiocrômico, gerando a relação *ADC (Analogic Digital Converter)* para dose absorvida na água. Os filmes foram irradiados com doses de 10 UM a 2500 UM, escaneados e para cada dose foi associado um valor de *ADC*, obtendo assim a curva de calibração do filme. Além disso, um filme não irradiado foi utilizado para gerar uma imagem de fundo que serviu para correção de possíveis artefatos gerados no escaneamento do filme. Para determinação da penumbra as correções de artefatos e calibração foram aplicadas.

O método de obtenção da penumbra através do *Software OmniPro I'mRT® (IBA)* consistiu em traçar linhas paralelas aos eixos centrais nas direções X e Y, distando entre si 0,1 mm para que fossem gerados vários perfis de dose. A penumbra foi determinada para cada linha de perfil de dose como sendo a distância entre 80% e 20% da dose do ponto central

do campo de radiação, como ilustrado na Figura 3. A penumbra considerada em cada direção (X e Y), do campo foi a média das penumbras das múltiplas linhas de cada direção. Também foi determinada a penumbra total como sendo a média da penumbra nas direções X e Y.

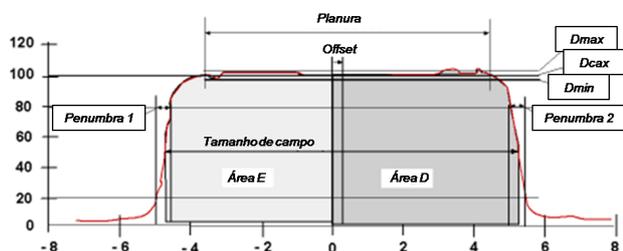


Figura 3. Método de determinação da penumbra através do perfil de dose, utilizando o Software OmniPro I'mRT®(IBA). [8]

Os resultados foram obtidos utilizando dois métodos de interpolação para o perfil de dose: Interpolação Linear e Interpolação FermiFit, onde buscou-se avaliar se há variação entre os dois métodos de interpolação disponível no Software Omni Pro I'mRT® (IBA). A interpolação FermiFit é uma ferramenta de ajuste otimizada para melhorar a determinação do ponto de 50% na penumbra de campos retangulares ou segmentos delimitados por MLC, cálculo de tamanho de campo e penumbra, onde os perfis são internamente e individualmente normalizados para 100% [8]. Dessa forma, os resultados de penumbra do presente trabalho serão sempre apresentados tanto para o método Linear e FermiFit.

O Software IBM SPSS Statistics (Statistical Package for Social Science for Windows), foi utilizado na análise estatística de comparação de médias realizando os testes T-student e ANOVA e avaliando o valor-p, onde foi utilizado nível de significância de 0,05 para avaliar a relação da penumbra para os diferentes colimadores multilâminas e entre os métodos de interpolação.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 1 mostra os valores de penumbra total para os diferentes colimadores dos Aceleradores Lineares Varian TrueBeam (MLC Millennium HD 120; 0,25 cm), Unique (MLC Millennium 120; 0,5 cm), 600CD (MLC Millennium 120; 0,5 cm) e 2100C (MLC Millennium 52; 1,0 cm).

Verificou-se pelo teste estatístico de análise de variância ANOVA um fator que os resultados de penumbra para as diferentes colimadores são estatisticamente diferentes ($p < 0,001$). Porém, para a prática clínica, as variações não são significantes, com variações máximas de 0,02 cm entre os colimadores. O mesmo resultado foi encontrado para os dois diferentes métodos de interpolação do perfil de feixe (Interpolação Linear e FermiFit).

Nota-se também que resultados não apresentaram relação da penumbra com a espessura das lâminas. Por exemplo, utilizando o método de interpolação Linear, no 2100C, que utiliza um sistema de lâminas MLC Millennium 52 (lâminas de espessura de 1,0

cm), apresentou menor penumbra ($0,31 \pm 0,01$) cm com relação equipamentos Unique e 600CD, ($0,32 \pm 0,01$), que apresentam sistema de lâminas Millennium 120 (lâminas centrais de espessura de 0,5 cm). Isso não é incoerente, uma vez que sistemas de MLC com lâminas menores não são feitos com o intuito de diminuição de penumbra, mas sim para uma melhor conformação.

Tabela 1. Penumbra total (cm) para diferentes aceleradores Varian, para feixe de 6 MV ($D_{max} = 1,5$ cm), com tamanho de campo 8×8 cm², SAD = 100 cm, para os métodos de interpolação Linear e FermiFit.

AL	Tamanho Penumbra (cm)	
	LINEAR	FERMIFIT
TrueBeam	$0,30 \pm 0,01$	$0,31 \pm 0,01$
Unique	$0,32 \pm 0,01$	$0,33 \pm 0,01$
600CD	$0,32 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,01$
2100C	$0,31 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,01$

A Tabela 2 mostra os resultados dos tamanhos da penumbra obtidos para as diferentes energias (6 e 10 MV), nas direções X e Y dos colimadores, para os Aceleradores TrueBeam e 2100C, utilizando os dois diferentes métodos de interpolação para o perfil de dose (Interpolação Linear e FermiFit). Verifica-se que para ambos os equipamentos, houve um aumento do tamanho da penumbra com o aumento da energia do feixe. No TrueBeam, utilizando o método de interpolação linear, para a energia de 6MV, na direção Y de colimação, obteve-se uma penumbra ($0,29 \pm 0,01$) cm e para a energia de 10MV, a penumbra foi de ($0,36 \pm 0,01$) cm, o que representa uma variação da ordem de 20% ao utilizar um feixe de maior energia. Já para o 2100C, utilizando o método de interpolação Linear, na direção X de colimação, a penumbra foi de ($0,32 \pm 0,01$) cm e ($0,40 \pm 0,01$) cm para as energias de 6 e 10 MV, respectivamente, com variação também da ordem de 20%. O aumento na penumbra para feixes de energia maiores pode ser explicado pela maior penetrabilidade do feixe, levando a uma maior contribuição da transmissão intralâminas na penumbra, que corresponde a dose devido a fração do feixe que atravessa as lâminas.

Tabela 2. Comparação do tamanho da Penumbra para diferentes energias, com tamanho de campo 8×8 cm², utilizando SAD = 100 cm, para os métodos de interpolação Linear e FermiFit.

AL	Energia	Tamanho Penumbra (cm)			
		LINEAR		FERMIFIT	
		\bar{X}	\bar{Y}	\bar{X}	\bar{Y}
TrueBeam	6 MV	$0,32 \pm 0,01$	$0,29 \pm 0,01$	$0,33 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,01$
	10 MV	$0,36 \pm 0,01$	$0,36 \pm 0,01$	$0,37 \pm 0,01$	$0,37 \pm 0,01$
2100C	6 MV	$0,32 \pm 0,01$	$0,31 \pm 0,01$	$0,33 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,01$
	10 MV	$0,40 \pm 0,01$	$0,36 \pm 0,01$	$0,40 \pm 0,01$	$0,37 \pm 0,01$

A Tabela 3 mostra os valores de penumbra para os vários tamanhos de campo medidos no Acelerador Linear 600CD, para os métodos de interpolação Linear e FermiFit. Para valores de campo superior a 5×5 cm², os resultados mostram uma tendência de aumento da penumbra com o aumento de tamanho de campo, no qual, para o campo 5×5 cm², utilizando o método de interpolação linear, obteve-se penumbra

de $(0,31 \pm 0,01)$ cm; já para o campo 20×18 cm², a penumbra foi de $(0,36 \pm 0,01)$ cm.

Tabela 3. Penumbra total (cm) para diferentes tamanhos de campo, para o Acelerador *Varian 600CD*, para feixe de 6 MV ($D_{\text{máx}} = 1,5$ cm), SAD = 100 cm, para os métodos de interpolação *Linear* e *FermiFit*.

Campo (cm ²)	Tamanho Penumbra (cm)	
	LINEAR	FERMIFIT
1X1	0,28 ± 0,01	-
2X2	0,31 ± 0,01	-
3X3	0,32 ± 0,01	-
4X4	0,32 ± 0,01	-
5X5	0,31 ± 0,01	0,31 ± 0,01
8X8	0,32 ± 0,01	0,32 ± 0,01
10X10	0,33 ± 0,01	0,34 ± 0,01
15X15	0,33 ± 0,01	0,33 ± 0,01
20X18	0,36 ± 0,01	0,36 ± 0,01

A figura 4 ilustra o perfil da variação penumbra total com o tamanho de campo, onde nota-se, que para valores de campo superior a 5×5 cm², os resultados mostram uma tendência de aumento da penumbra com o aumento de tamanho de campo, apresentando um mínimo próximo do campo 5×5 cm², e depois, para tamanho de campos menores, a penumbra volta a crescer, evidenciando a existência de um possível tamanho de campo quadrado onde a penumbra terá seu valor ótimo. Este tamanho de campo ótimo pode estar relacionado com ponto de divergência mínima do feixe, criado pelas bordas arredondadas das lâminas, onde a penumbra é minimizada. Além disso, para os campos pequenos (menores que 5×5 cm²), o aumento da penumbra está relacionado com ao efeito de superposição de penumbras e também pelo desequilíbrio lateral de partículas, que afetam a dose no eixo central.

Vale ressaltar que os perfis de dose para os campos menores se mostraram irregulares, com pouca simetria e planura, e por esse motivo, o método de interpolação *FermiFit* falhou na construção do *fitting* e nas medidas de penumbra.

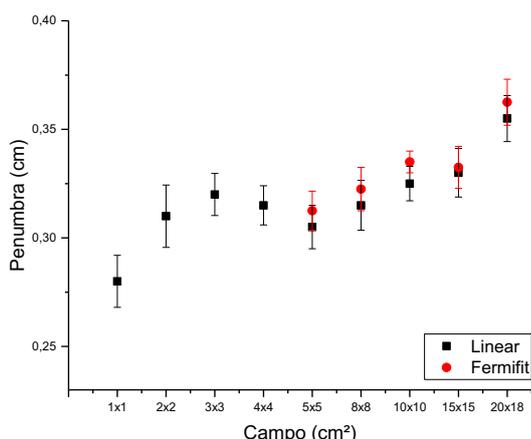


Figura 4. Perfil da variação da penumbra total (cm) do Acelerador *Varian 600CD* para diferentes tamanhos de campo.

A Tabela 4 mostra os resultados dos valores da penumbra nas direções X e Y, para o Acelerador *600CD*, obtidos para as diferentes configurações de *jaws* e lâminas para a formação do campo 10×10 cm², sendo elas: *jaws* colocados rente a extremidade das lâminas (A), *jaws* distanciados em cada lado do

campo das lâminas (X e Y) em 0,5 cm (B) e 1,0 cm (C), campo formado com os *jaws* (MLC totalmente aberto) (D), com as lâminas (*jaws* totalmente abertos) (E), e a configuração recomendada pelo fabricante que sugere um distanciamento dos *jaws* em relação ao MLC de 0,9 cm eixo X e 0,2 cm no eixo Y (F).

Tabela 4. Comparação do tamanho da penumbra para diferentes configurações de *Jaws+MLC* para o Acelerador *Varian 600CD*, para feixe de 6 MV ($D_{\text{máx}} = 1,5$ cm), com tamanho de campo 10×10 cm², utilizando SAD = 100 cm, para os métodos de interpolação *Linear* e *FermiFit*.

Configuração	Tamanho Penumbra (cm)			
	LINEAR		FERMIFIT	
	\bar{x}	\bar{y}	\bar{x}	\bar{y}
A (Rente)	0,34 ± 0,01	0,32 ± 0,01	0,34 ± 0,01	0,33 ± 0,01
B (0,5 cm)	0,37 ± 0,01	0,28 ± 0,01	0,37 ± 0,01	0,29 ± 0,01
C (1,0 cm)	0,37 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,38 ± 0,01	0,30 ± 0,01
D (JAWS)	0,37 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,37 ± 0,01	0,30 ± 0,01
E (MLC)	0,38 ± 0,01	0,31 ± 0,01	0,38 ± 0,01	0,31 ± 0,01
F (X=0,9; Y=0,2)	0,37 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,37 ± 0,01	0,30 ± 0,01

Observou-se que com os *jaws* rentes as bordas das lâminas, configuração A, as penumbras em X ($0,34 \pm 0,01$) cm e Y ($0,32 \pm 0,01$) cm são similares. Porém, com as aberturas dos *jaws*, os valores de penumbra em X ficaram maiores que o de penumbra em Y, por exemplo, na configuração E, a penumbra em X foi ($0,38 \pm 0,01$) cm e em Y foi ($0,29 \pm 0,01$) cm. Isso pode ser justificado pela transmissão da radiação entre lâminas, que contribuem para um aumento da penumbra de transmissão na direção X. *Galvin, Smith, and Lally 1993* e *Klein et al. 1995* analisaram as propriedades de transmissão de MLC para aceleradores *Varian* com diferentes energias, verificando uma transmissão adicional na direção X devido a transmissão interlâminas [9, 10].

Na direção X, a configuração que se mostrou mais relevante de posicionamento dos colimadores com relação às lâminas foi a A (penumbra (cm) de 0,34 cm), apresentando desempenho melhor até que a configuração recomendada pelo fabricante *Varian*. Já na direção Y, a configuração B apresentou o menor valor de penumbra (penumbra (cm) de 0,29 cm). Dessa forma, uma configuração ideal de posicionamento dos *jaws* em relação ao MLC seria com os *jaws* X rentes ao MLC e *jaws* Y recuados com 0,5 cm.

Um fato interessante é que na configuração D, que é a configuração de campos formados apenas pelos *jaws*, foi encontrado valores de penumbra de ($0,37 \pm 0,01$) cm na direção X, e ($0,29 \pm 0,01$) cm na direção Y, porém, esperava-se um valor menor para a penumbra em X do que em Y, uma vez que, nos equipamentos *Varian*, o sistema de colimação Y é posicionado mais próximo ao ponto focal do que os colimadores X. Logo, pode-se concluir que a penumbra geométrica não é tão influente quanto a contribuição das outras componentes de penumbra (espalhada e de transmissão).

Os resultados de penumbra obtidos para os métodos de interpolação *Linear* e *FermiFit* foram analisados estatisticamente através do Teste t-*Student*, onde ao avaliar o valor-p, verificou-se que os métodos apresentaram valores de penumbra

significativamente diferentes ($p < 0,01$). Vale ressaltar que a fabricante do *Software* recomenda o uso da interpolação *FermiFit* para análise do perfil de dose, porém ele não é recomendada para análise de campos de intensidade modulada, devido a criação de perfis de dose irregulares, o que dificulta a processo de interpolação deste método. Esta dificuldade na análise em perfil de feixes irregulares foi observada na análise dos campos menores que $5 \times 5 \text{ cm}^2$ no Acelerador *600CD*.

Por fim, os tamanhos de penumbra recomendada para cada Acelerador e energias são mostrados na Tabela 5. Foram recomendados tamanhos de penumbra para as direções X e Y, tomando-se o maior valor de penumbra medidos entre o método de interpolações *Linear* e *FermiFit*; e uma penumbra total, como sendo a média das direções X e Y, para ser adotada em sistemas de planejamento que não permitem a definição de margens individuais ou para a função de ajuste de estrutura de margens do *MLC* na forma circular. Vale ressaltar que não foi considerado a região de campos menores que $5 \times 5 \text{ cm}^2$ do Acelerador *600CD* para cálculo da penumbra média, por não haver esses valores de penumbra para o método de interpolação *FermiFit*.

Baseado nos resultados encontrados e pensando em um valor de margem de penumbra prático e geral, um valor ótimo que poderia ser adotada para margem de ajuste de campo na prática clínica de planejamentos 3D, seria 0,4 cm.

Tabela 5. Tamanhos de penumbra recomendada (cm) para cada Acelerador Linear e Energia de feixe.

AL	Energia	Penumbra Recomendada (cm)		
		X	Y	Total
600CD	6 MV	0,37	0,31	0,34
UNIQUE	6 MV	0,30	0,36	0,33
Truebeam	6 MV	0,33	0,30	0,31
	10 MV	0,37	0,37	0,37
2100 C	6 MV	0,33	0,32	0,32
	10 MV	0,40	0,37	0,38

5. Conclusões

Conclui-se que não há variação significativa da penumbra para diferentes equipamentos, mostrando não haver relação do tamanho da penumbra com a espessura dos *MLC*.

Um parâmetro influente nos valores de penumbra foi a energia do feixe utilizada, onde houve um aumento de cerca de 20% na penumbra do feixe de 10MV comparada ao do feixe de 6MV.

Variando os tamanhos de campo, a menor penumbra apresentou valor mínimo na região de $5 \times 5 \text{ cm}^2$. Para campos maiores, a penumbra tende a aumentar.

As diferentes configurações de *jaws* e lâminas mostraram que, na direção X, a configuração de *jaws* rente as lâminas apresentou valor mínimo, com valor menor do que a configuração recomendada pela fabricante *Varian*. A configuração distanciando os *jaws* a 0,5 cm das lâminas apresentou valor mínimo para a penumbra em Y. Desta forma, considerando os valores apresentados, uma combinação ideal de

uso seria a configuração com *jaws* na direção X rentes ao *MLC*, e os *jaws* na direção Y recuados de 0,5 cm.

Pela comparação dos algoritmos de interpolação *Linear* e *FermiFit*, por teste de hipóteses, verificou que ambos são estatisticamente diferentes, porém considerando os valores encontrados, ambos os métodos foram considerados similares.

Como conclusão, tem-se que foram encontrados valores de penumbra entre $(0,30 \pm 0,01 \text{ cm}$ e $0,40 \pm 0,01) \text{ cm}$ para os diferentes colimadores multilâminas *Millennium Varian*, tamanho de campo e energias de feixe. Para a prática clínica de planejamentos 3D, recomenda-se o valor de margem de ajuste de campos de tratamento de 0,4 cm.

Agradecimentos

Agrademos a toda equipe de físicos residentes e titulares, dosimetristas e técnicos do Hospital de Amor de Barretos por todo apoio a este trabalho.

Referências

1. Das I, Cheng JC, Watts A, et al. Accelerator beam data commissioning equipment and procedures: report of the TG-106 of the Therapy Physics Committee of the AAPM. *Med Phys* 2008;35:4186-4215.
2. American Association of Physicists in Medicine. Basic Applications of Multileaf Collimators: Report of the Task Group 50 of the Radiation Therapy Committee of the American Association Physicist in Medicine. AAPM Report No. 72. Madison, WI: Medical Physics Publishing; 2001.
3. Faiz M. Khan, The physics of radiation therapy. 5th ed; Philadelphia, PA: LWW.com; 2010.
4. Kron, T., Metcalfe P., Elliott, A., Wong, T., Hoban, P. Dosimetry of 6 MV xray beam Penubra. *Med. Phys.* 20, 1439 (1993); 10.1118/1.597107
5. T. Cheung, Butson, M. J. and P. K. Yu. 2006. Measurement of high energy x-ray beam penumbra with Gafchromic™ EBT radiochromic film. *Med. Phys.* 33, 2912 (2006); 10.1118/1.2218318.
6. Butson, M. J., P. K. Yu, and T. Cheung. 2003. Rounded end multileaf penumbral measurements with radiochromic Film. *Phys. Med. Biol.* 48 (17): N247–N252.
7. M. Butson, T. Cheung, and P. K. N. Yu, "Weak energy dependence of EBT Gafchromic™ film dose response in the 50 kVp–10 MVp x-ray range".
8. Manual do *software* OmniProl™RT.
9. Galvin, J. M., A. Smith, and B. Lally (1993). "Characterization of a multi-leaf collimator system." *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 25: 181–192.
10. Klein, E. E., W. B. Harms, D. A. Low, V. Willcut, and J. A. Purdy (1995). "Clinical implementation of a commercial multileaf collimator: Dosimetry, networking, simulation, and quality assurance." *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 33: 1195–1208.

Contato:

André Banhate
Rua Antenor Duarte Villela, n 1331,
Bairro Dr. Paulo Prata, CEP: 14.784-400
E-mail: andrebanhate@gmail.com

Geraldo Gabriel Perez
Rua Antenor Duarte Villela, n 1331,
Bairro Dr. Paulo Prata, CEP:
E-mail: gabriel.perez1506@gmail.com

Leonardo Ferreira da Silva
Rua Antenor Duarte Villela, n 1331,
Bairro Dr. Paulo Prata, CEP:
E-mail: leonardo.ferreira.silva@outlook.com.br