



ESTUDO DE COLIMADORES CÔNICOS PARA UM EXPERIMENTO DE RETROESPALHAMENTO COMPTON ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

Eduardo Heis Olivo¹, Emerson Mario Boldo²

RESUMO: O desenvolvimento de um sistema portátil para avaliação não destrutiva de estruturas de concreto armado envolve muitas dificuldades. A técnica do retroespalhamento Compton vem sendo estudada para este uso e necessita de refinamentos. O colimador é peça fundamental para que o sistema gere resultados confiáveis e precisa de aprimoramentos tanto relacionados à sua posição em relação à fonte, quanto ao seu modelo. Neste artigo, objetiva-se otimizar este sistema verificando-se o desempenho de colimadores cônicos através de simulação computacional. As análises foram feitas utilizando-se o código FLUKA para simulação de Monte Carlo. Os testes foram feitos com dois colimadores cilíndricos e dois colimadores cônicos com tamanhos diferentes, visando comparar o desempenho tanto relacionado aos diferentes modelos, quanto relacionados às diferentes dimensões. As simulações mostraram que a utilização de colimadores cônicos gera bons resultados, interferindo nos parâmetros de contraste e resolução espacial.

PALAVRAS-CHAVE: Colimador cônico; sistema detector-fonte; teste não destrutivo.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas em concreto armado, devido às suas qualidades, são os elementos mais utilizados pela engenharia civil. Apesar de ser um material heterogêneo criado da combinação de concreto simples e barras de aço, o resultado é um material capaz de resistir a diversos tipos de esforços e que, devido à suas características semelhantes (módulo de elasticidade, coeficiente de dilatação térmica, entre outros), se comporta como um material único.

Além da função estrutural, o concreto tem como objetivo proporcionar uma camada de proteção para o aço, impedindo que a armadura tenha contato direto com o ar, prevenindo assim a ocorrência da corrosão. Contudo, devido à permeabilidade e porosidade do concreto; ou a falhas como fissuras, trincas e rachaduras, estas barras poderão entrar em contato com o ambiente, iniciando o processo da corrosão eletroquímica.

Este processo ocorre quando o aço entra em contato com oxigênio, água, cloretos, CO₂ e outros gases poluentes, como SO₂ e SO₃, gerando uma reação química (TEXSA, 2010). Esta reação tem como resultado óxidos e hidróxidos de ferro que ocupam espaços de 3 a 10 vezes o seu tamanho inicial que pode gerar tensões internas na estrutura de mais de 15 MPa, culminando no deslocamento da camada de concreto, aumentando assim o contato do aço com o ambiente e agravando a corrosão (CASCUDO, 1997).

O aço corroído perde suas características de resistência, ductilidade e se torna quebradiço, ou seja, perde sua função estrutural. Neste estado o aço se deforma e rompe facilmente, fato que conseqüentemente pode levar uma estrutura ao colapso.

A verificação *in loco* e não destrutiva da qualidade de elementos de concreto armado é desejável, visto que estes métodos de inspeção não causam danos à estrutura e suas funções, comparados à coleta de corpos de prova, e permitem refazer testes nos mesmos locais examinados anteriormente com o objetivo de avaliar mudanças de propriedades ao longo do tempo de vida da estrutura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Há algum tempo o uso do retroespalhamento de radiação gama para a realização de ensaios não destrutivos vem sendo estudado para verificação de estruturas de concreto armado (PRIYADA, *et al.*, 2013). O principal meio de análise é através do espalhamento Compton, já que ocorre no intervalo de energia dos radioisótopos mais comuns disponíveis comercialmente, tornando o procedimento mais acessível.

No efeito Compton, quando um fóton colide com um elétron livre, este perde energia e tem sua trajetória original alterada em um ângulo θ . A energia do fóton espalhado é função da energia do fóton incidente e do ângulo θ de espalhamento, como dado na equação abaixo (COOPER, 2004):

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Cascavel – PR. Bolsista PIBIC/Fundação Araucária. eduardoheisolivo@gmail.com

² Docente do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Cascavel – PR. eboldo@gmail.com



$$E_c = \frac{E_0}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}$$

onde, E_c é a energia do fóton espalhado; θ é o ângulo de espalhamento do fóton; E_0 é a energia do fóton incidente. α também é função de E_0 e de m_0c^2 que corresponde à energia de repouso do elétron com valor igual a 511 keV.

$$\alpha = \frac{E_0}{m_0c^2}$$

Para se realizar a análise, o conjunto fonte-detector é montado em um dos lados da amostra. A fonte emite um feixe de fótons incidentes a 90° em relação à amostra e o detector conta a quantidade de fótons retroespalhados pelo material alvo. A quantidade de fótons contados pode ser estimada pelo volume de inspeção, dado pela região de intersecção do campo de visão da fonte e do detector. É feita então uma varredura no material alvo com o conjunto fonte-detector de modo que o volume de inspeção percorra a região que se quer analisar dentro do material (Figura 1). Variações de densidade interceptadas pelo volume de inspeção alteram a contagem de fótons espalhada.

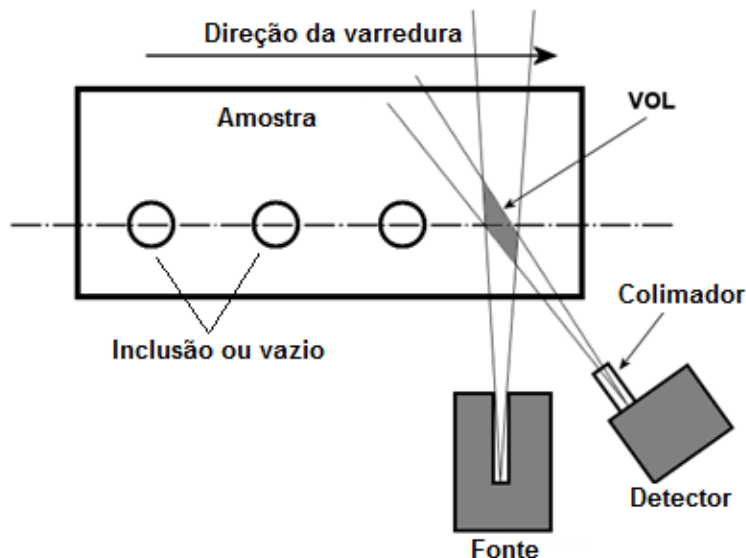


Figura 1 – Diagrama de um experimento de retroespalhamento Compton típico, mostrando a intersecção dos ângulos sólidos da fonte e detector que define o volume de inspeção (VOL).

Fonte: Autor.

Um dos fatores fundamentais para uma boa inspeção é uma adequada colimação entre o conjunto, visando ter-se uma boa resolução espacial sem que haja necessidade de longos períodos de coleta de dados. Além disso, a colimação visa evitar que fótons provenientes de espalhamentos múltiplos ou de fora da região do volume de inspeção sejam contados pelo detector (BOLDO, *et al.*, 2011).

Neste trabalho temos como objetivo otimizar um sistema de colimação entre fonte e detector, verificando o desempenho de colimadores cônicos, utilizando para isso a simulação computacional de Monte Carlo.

Os fatores que devem ser otimizados, servindo de parâmetro para verificação do desempenho das simulações são:

2.1 Contagem Líquida

É a área integrada total abaixo do pico Compton, subtraída da contagem de fundo da mesma região. Contagens líquidas elevadas possibilitam tempos de inspeção menores.

É influenciada por diversos fatores, como a geometria da simulação, que influencia no tamanho do volume de inspeção, por exemplo; e o equipamento que está sendo utilizado.



2.2 Contraste

É a capacidade do equipamento distinguir materiais de diferentes densidades dentro da amostra. Pode ser matematicamente definido como:

$$\text{Contraste} = C = \left(\frac{C_{bulk} - C_{inclusão}}{C_{bulk}} \right) \cdot 100\%$$

onde, C_{bulk} é a média integrada das contagens registradas pelo detector nos pontos onde o feixe incidente está somente sobre o material da amostra e $C_{inclusão}$ é a média das contagens quando o feixe incidente está interceptando uma inclusão no interior da amostra.

Exige-se um valor mínimo de contraste para que se possam distinguir regiões de diferentes densidades. Adotando uma confiabilidade de 95%, C_{bulk} e $C_{inclusão}$ devem distinguir entre si de um valor equivalente a dois desvios padrões, assumindo uma distribuição normal para o erro. Segundo a distribuição de Poisson, o desvio padrão é equivalente à raiz quadrada da contagem. Quando se tem uma população grande e uma probabilidade baixa de ocorrer um evento, como é o caso da contagem de fótons espalhados, a distribuição de Poisson se equivale ao limite da distribuição Gaussiana (KNOLL, 2000).

Assim, com 95% de confiabilidade, o valor mínimo do contraste é definido pela menor estimativa para a média das contagens somente no material e a maior estimativa da média das contagens quando o feixe intercepta uma inclusão. Com isso, o valor mínimo (C_{min}) é dado por:

$$C_{min} = \frac{(C_{bulk} - 2\sqrt{C_{bulk}}) - (C_{inclusão} + 2\sqrt{C_{inclusão}})}{(C_{bulk} - 2\sqrt{C_{bulk}})}$$

O valor mínimo considera que o erro na média das contagens de C_{bulk} e $C_{inclusão}$ está ajustado na direção que traz os dois valores mais próximos um do outro.

Para satisfazer a condição de 95% de confiabilidade, o contraste obtido nas simulações deve ser maior que o contraste mínimo C_{min} .

2.3 Resolução Espacial

Para avaliar a resolução espacial será comparada a proximidade entre o valor do tamanho da inclusão obtido na simulação e o tamanho real da inclusão. As curvas de contagem líquida *versus* posição da amostra possui a forma de vale quando o feixe atinge a inclusão e o tamanho da inclusão será dado pelo valor do FWHM (*Full Width at Half Maximum* ou largura a meia altura) obtido do ajuste Gaussiano destas curvas. Optou-se pelo ajuste Gaussiano pois foi o que apresentou melhor resultado.

3 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

Para as simulações deste trabalho optou-se por utilizar o método computacional de Monte Carlo. Este método possibilita a verificação de diversos parâmetros atuantes na situação a ser experimentada, tanto de forma generalizada, melhorando a acurácia das simulações; quanto de forma individualizada, estudando a influência de cada um dos parâmetros no resultado final.

O método de Monte Carlo é considerado um método estatístico, já que nele, em muitos casos, não é necessária a implementação de fórmulas ou equações matemáticas para se descrever os fenômenos físicos, sendo necessário somente que o comportamento possa ser descrito por funções de densidade de probabilidade. Dessa forma, as simulações são realizadas através de amostragem aleatória das funções inseridas e o resultado é dado por uma estimativa do valor médio das grandezas observadas em um determinado número de simulações (BOLDO, *et al.*, 2011).

As simulações do método de Monte Carlo foram realizadas com o código FLUKA. Este é um código de simulação de Monte Carlo desenvolvido em colaboração entre os laboratórios do CERN (European Organization for Nuclear Research, Genebra, Suíça) e INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Roma, Itália) (FLUKA, 2011).

Ele faz uso de uma programação sofisticada para lidar com transporte de partículas através da matéria, com certo destaque para problemas de espalhamento (FASSO, *et al.*, 2005). Os resultados apresentados pelo programa já foram longamente avaliados, mostrando excelente concordância com resultados experimentais; além de se mostrar mais rápido que outros códigos semelhantes (BOLDO, *et al.*, 2011).



O FLUKA é capaz de simular com alta precisão a interação e propagação de fótons na matéria com energias a partir de 1 keV; além de levar em conta as ligações atômicas no cálculo da probabilidade de espalhamento, importante para o efeito Compton. Ele consegue lidar com geometrias complexas e possui ferramentas para identificação de defeitos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos testes, foi criado no FLUKA um bloco de concreto de 15 x 7,5 x 10 cm, com uma barra de aço de 10 mm de diâmetro a 1,5 cm da superfície. Dentre as várias composições possíveis para o concreto foi escolhido o concreto estrutural comum com 10% de umidade e com densidade de 2,34 g/cm³.

As simulações foram executadas utilizando-se colimadores cilíndricos de Ø5 mm x 15 mm e Ø7 mm x 30 mm, para serem os parâmetros de referência e dois colimadores cônicos, um com aberturas de Ø3 mm / Ø9 mm e outro com aberturas de Ø5 mm / Ø9 mm, podendo-se, assim, comparar também a relação das diferenças de aberturas dos colimadores cônicos. A Figura 2 apresenta a geometria da simulação:

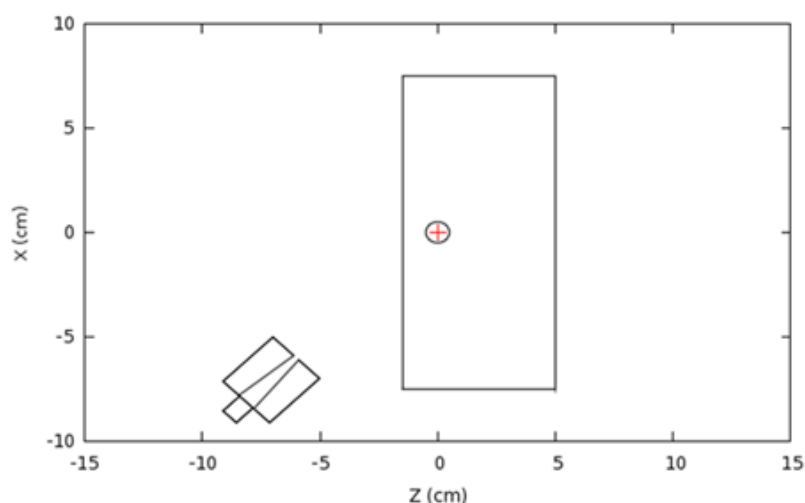


Figura 2 - Vista superior da geometria utilizada na simulação.

Fonte: Dados da pesquisa.

Na tabela 01 são apresentados os parâmetros do feixe de raios gama incidente na amostra além de algumas características geométricas do experimento simulado:

Tabela 01 – Características do feixe incidente de raios gama usado na simulação.

Energia	59,54 keV
Distância fonte - amostra	10,0 cm
Distância amostra - detector	10,0 cm
Forma do feixe	Cilíndrica
Diâmetro	2,0 mm
Número de partículas primárias	1,2 x 10 ⁶ fótons
Peso de cada partícula	1,0
Divergência	Plana

Fonte: Autor.



5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 3 representa a fluência de fótons espalhados quando o feixe incidente se intercepta com a barra de aço dentro da amostra de concreto. Podemos observar a deformação na configuração de espalhamento devido à forte atenuação provocada no feixe incidente e espalhado pela barra de aço.

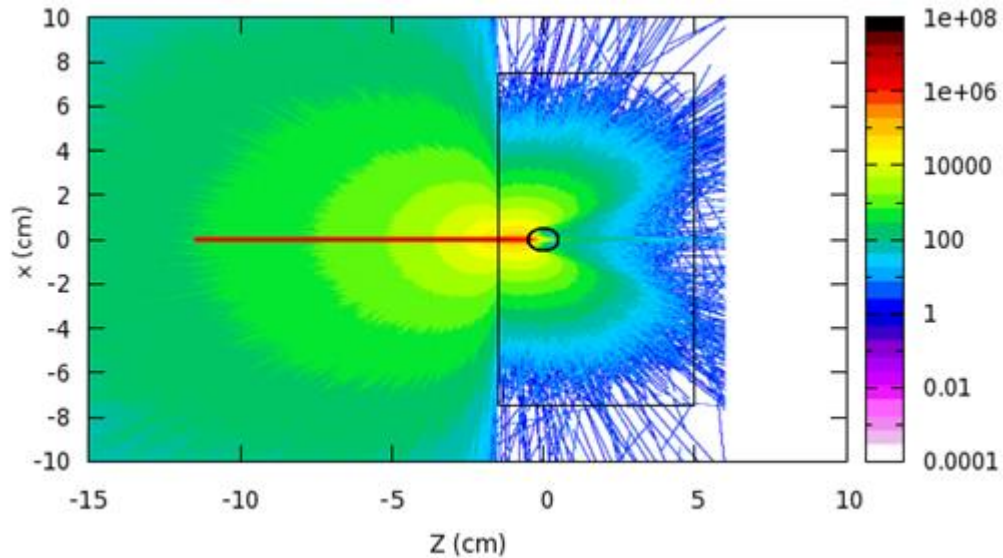
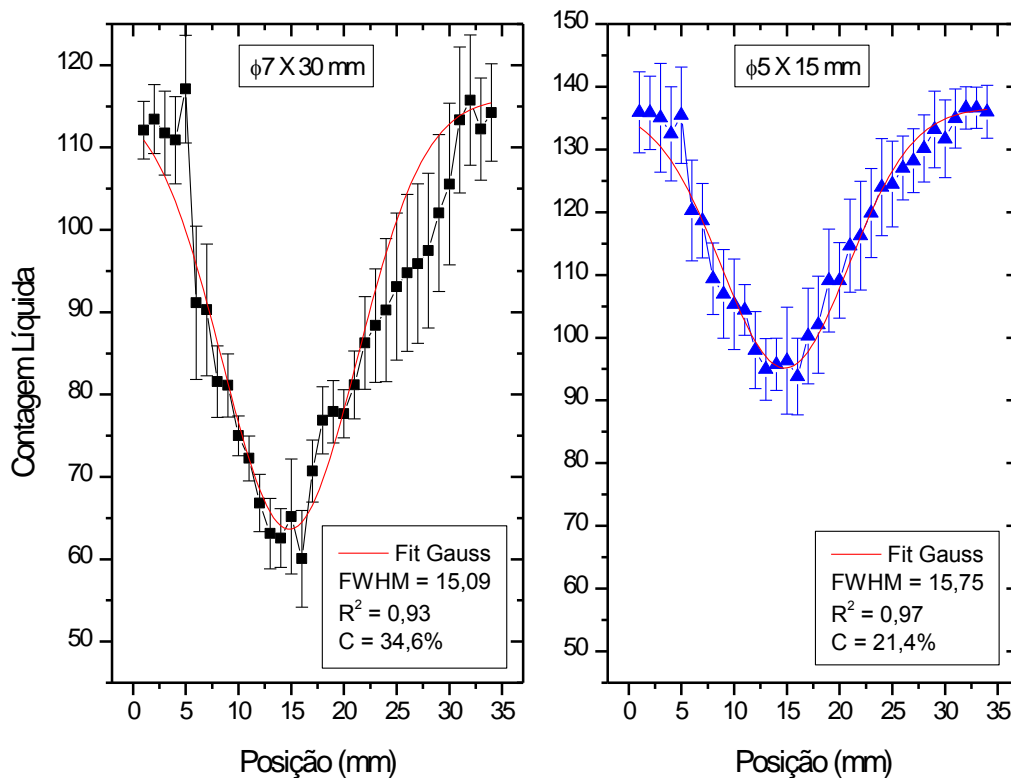


Figura 3 – Fluência de fótons espalhados quando o feixe incidente se choca com a barra de aço localizada no interior do bloco de concreto. Energia: 59,54 keV.

Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 4 mostra o resultado da contagem líquida em função da posição do bloco de concreto, apresentando também a análise de contraste (C) e resolução espacial ($FWHM$) para os colimadores cônicos e cilíndricos citados anteriormente:



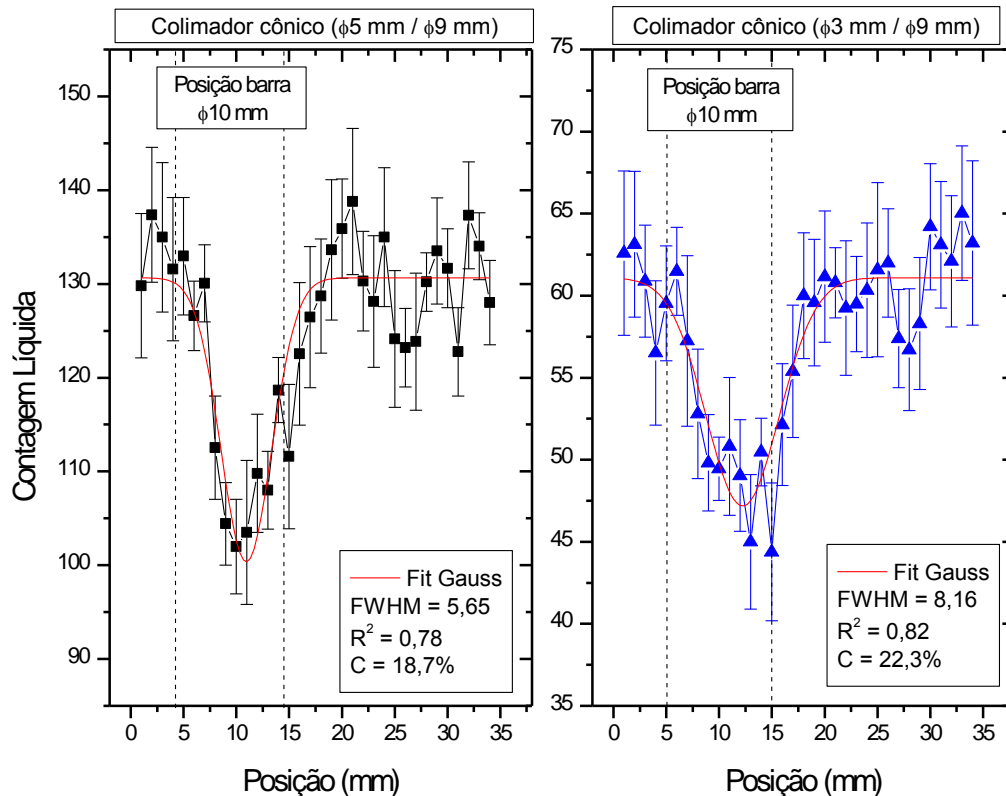


Figura 4 – Ajuste Gaussiano da curva de contagem líquida versus posição para os quatro tipos de colimadores.

Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se que o contraste obtido pelo colimador cônico de abertura menor de $\varnothing 3 \text{ mm} / \varnothing 9 \text{ mm}$ ($C_{\varnothing 3 \text{ mm}} = 22,3\%$) foi um pouco melhor que o obtido para o colimador cônico de abertura maior de $\varnothing 5 \text{ mm} / \varnothing 9 \text{ mm}$ ($C_{\varnothing 5 \text{ mm}} = 18,7\%$), o que sugere uma pequena melhora no foco do volume de inspeção sobre a amostra, justificado também pelo melhor resultado do valor de FWHM comparando-se com o valor real da dimensão do aço. Além disso, comparando-se os valores de resolução espacial e contraste obtidos para o colimador cônico de abertura menor de $\varnothing 3 \text{ mm} / \varnothing 9 \text{ mm}$ com o colimador cilíndrico de $\varnothing 5 \times 15 \text{ mm}$ nota-se uma pequena melhora dos parâmetros.

Porém, o colimador cônico de abertura menor obteve contagens muito baixas, gerando maiores erros, tendo contraste mínimo de $C_{\min(\varnothing 3 \text{ mm})} = 25,1\%$. Como o contraste mínimo foi maior que o contraste obtido pelos dados de simulação, é necessário utilizar um tempo de contagem maior para este colimador, objetivando aumentar a confiabilidade da medida, visto que essa não atingiu o patamar de 95%.

Na Figura 5, compara-se o desempenho do colimador cônico de $\varnothing 5 \text{ mm} / \varnothing 9 \text{ mm}$ com os colimadores cilíndricos de $\varnothing 5 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ e $\varnothing 7 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ para simulação de contagem líquida versus posição. Nota-se que as contagens do colimador cônico retornam mais rapidamente aos patamares iniciais e numa posição anterior, indicando uma melhora na resolução espacial. Porém, o uso de colimador cônico não apresentou melhora significativa em relação ao contraste.

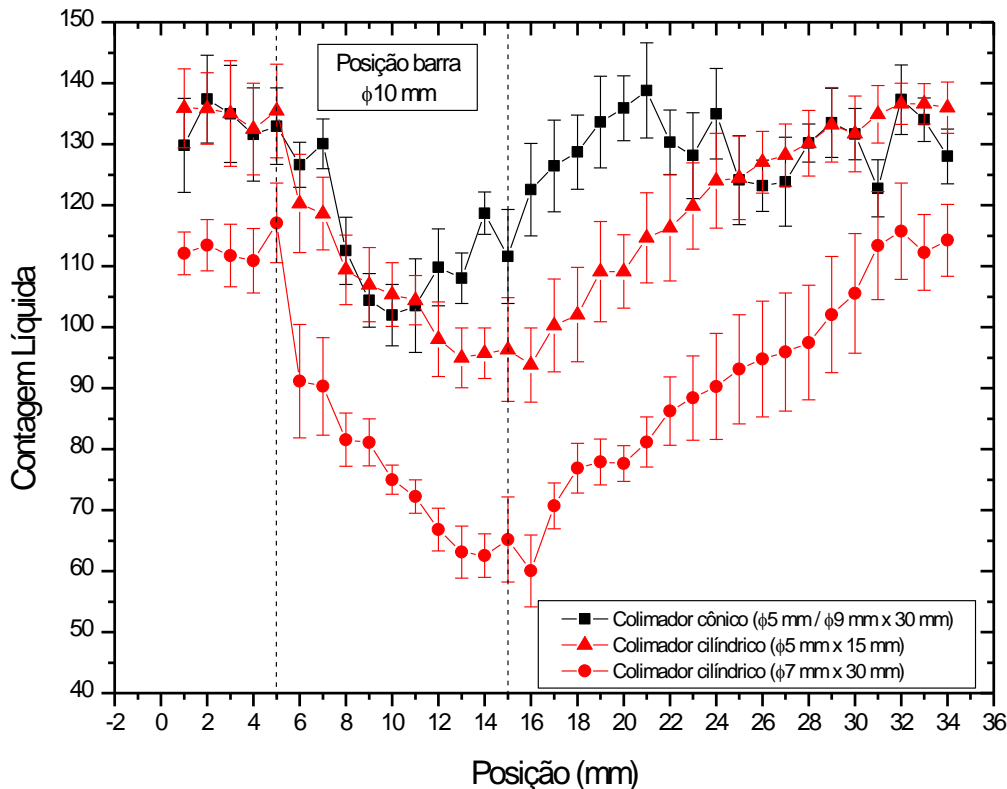


Figura 5 – Comparação dos valores de contagem líquida para os colimadores cilíndricos e para o colimador cônico de abertura maior.

Fonte: Dados da pesquisa.

6 CONCLUSÃO

Os resultados da simulação de Monte Carlo sugerem que o uso de colimadores cônicos pode apresentar resultados positivos para o sistema experimental proposto. Houve uma melhora nos parâmetros de resolução espacial e contraste utilizando colimadores com esta geometria. Porém, faz-se necessário um estudo mais detalhado do caso, investigando condições ideais relacionadas ao tempo de contagem para se minimizar os erros probabilísticos incorporando mais confiabilidade estatística aos resultados.

O código FLUKA mostrou-se adequado para este tipo de análise, o que abre um leque amplo de investigação futura, incluindo outras geometrias entre fonte/detector e de diferentes modelos de colimadores.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à Pró Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UNIOESTE e à Fundação Araucária pelo apoio financeiro para realização dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

BOLDO, E. M.; PRESTES, A. A. e APPOLONI, C. R. A geometry and collimation study of a Compton backscatter device for inclusions detection in materials. **Proceedings of Science**, v. 01, p. 1-7, 2011.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini, 1997. 237 p.

COOPER, M. J. **X-Ray Compton Scattering**. New York, Oxford University Press 2004, 392p.

FASSO, A.; FERRARI, A.; RANFT, J. e SALA, P. R. **FLUKA: a multi-particle transport code**. CERN-2005-10, INFN/TC_05/11, SLAC-R-773, 2005. 406 p.

FLUKA – **The official FLUKA site**. Disponível em <<http://www.fluka.org>>. Acesso em: 19 agosto 2015.



KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement**. 3^a Ed., Hoboken: John Wiley & Sons, 2000. 816 p.

PRIYADA, P.; RAMAR, R. e SHIVARAMU. Application of gamma ray scattering technique for non-destructive evaluation of voids in concrete. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 74, p. 13-22, 2013.

TEXSA. **Corrosão do concreto e das armaduras**. Disponível em: <<http://www.texsa.com.br/Livro%2007.htm>>. Acesso em: 19 agosto 2015.