

# INFLUÊNCIA DE AGREGADOS NA LOCALIZAÇÃO DE ARMADURAS EM CONCRETO ARMADO POR ESPALHAMENTO COMPTON

*Alexandre Osni Gral Iori<sup>1</sup>, Emerson Mario Boldo<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Acadêmico do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Campus de Cascavel, PR. Bolsista PIBIC/Fundação Araucária - UNIOESTE. alexandre\_osni@hotmail.com

<sup>2</sup>Orientador, Doutor, Docente do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CCET) – UNIOESTE. emerson.boldo@unioeste.br

## RESUMO

O espalhamento Compton é uma das formas de interação da radiação com a matéria e pode ser utilizado como técnica de caracterização de materiais. A densidade eletrônica dos materiais é um dos principais fatores que influenciam na quantidade de fótons espalhados. Neste trabalho avaliamos a influência da brita, um dos principais agregados utilizados no concreto armado, na localização de armaduras presentes na estrutura, por meio da técnica não destrutiva de retroespalhamento Compton. Utilizando a simulação de Monte Carlo foram empregadas duas energias para o feixe incidente dos isótopos Amerício 241 (59,51 keV) e Cobalto 60 (1170 keV), ambos incidindo à 90° em relação a superfície da amostra. A amostra é composta de um pilar de concreto com dimensões de 8,0 x 20,0 x 20,0 cm, com a inserção de uma armadura de  $\phi$  1,0 cm de diâmetro alinhada com uma brita de 2,0 x 1,0 cm. Ambas as energias empregadas foram capazes de identificar a armadura através da brita, sendo que o Cobalto 60 obteve melhor resolução espacial na localização da posição da armadura em função da menor atenuação do feixe mais energético dentro da amostra. A técnica de espalhamento Compton se mostrou adequada para o problema estudado podendo ser uma alternativa bastante promissora para análise não destrutiva de concretos contendo agregados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Brita; Contraste de densidade; Ensaios não destrutivos; Espalhamento incoerente.

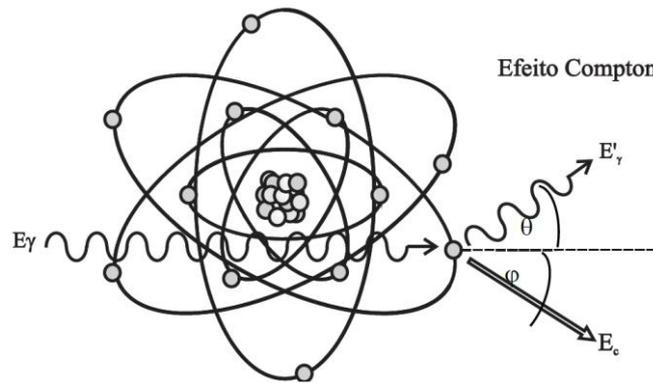
## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é formado por cimento, agregado graúdo, agregado miúdo, água, adições e aditivos (se necessário) e é caracterizado estruturalmente por possuir alta resistência à compressão, porém sua resistência à tração é baixa, e, devido a esse motivo, o aço é incorporado ao concreto para resistir aos esforços de tração, formando então o concreto armado (GENTIL, 1996).

O concreto quando corretamente executado protege a armadura sobre dois principais aspectos: o físico e o químico. A proteção física é devido à barreira proporcionada pela camada de cobertura sobre a armadura, cuja eficiência depende da qualidade do concreto e da dimensão da espessura do cobertura. Quanto a proteção química, é resultante do elevado pH existente na solução aquosa presente nos poros do concreto, permitindo assim, a formação de uma fina película protetora conhecida como camada passivadora (GENTIL, 1996).

Sendo um dos elementos construtivos da engenharia mais utilizados no Brasil, uma grande parte das estruturas de concreto armado estão sujeitas a uma série de fatores de degradação ambiental, que podem limitar sua vida útil. Uma eventual infiltração de água que ocasione a corrosão da armadura pode comprometer seriamente a durabilidade e resistência da estrutura como um todo. Uma corrosão severa altera o diâmetro da armadura, portanto há necessidade crescente de técnicas, de preferência não destrutivas, que avaliem a localização e a dimensão desses elementos dentro da estrutura.

Uma das técnicas que podem ser utilizadas nessa situação é o espalhamento Compton de raios gama. Este fenômeno é uma das formas de interação da radiação com a matéria. Ele ocorre quando um fóton incidente interage inelasticamente com um elétron pertencente a um átomo do material alvo, sendo espalhado com energia menor que a original (Figura 1).



**Figura 1:** Incidência de um fóton em um átomo resultando no espalhamento Compton  
**Fonte:** IAEA (2018)

A energia do fóton espalhado ( $E'_\gamma$ ) é relacionada exclusivamente com a energia do fóton incidente  $E_\gamma$  e o ângulo  $\theta$  de espalhamento por (OKUNO e YOSHIMURA, 2010):

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad (1)$$

onde:  $\alpha = \frac{E_\gamma}{m_0c^2}$  e  $m_0c^2$  é a energia de repouso do elétron com valor igual a 511 keV.

Portanto, a quantidade de elétrons disponíveis para interagir com os fótons incidentes é o parâmetro básico que influencia na probabilidade de espalhamento. O fenômeno do espalhamento Compton pode então ser transformado em técnica de caracterização das densidades eletrônicas de um material, já que alterações das densidades eletrônicas provocadas por mudanças de composição afetam a quantidade de fótons espalhados. Um típico experimento utilizando esta técnica consiste em incidir um feixe bem colimado de radiação gama sobre uma amostra e detectar a energia e a quantidade de fótons retroespalhados pelo material. A intensidade do sinal captado pelo detector é função da densidade eletrônica do volume de material interceptado pelo feixe, entre outros fatores, como mostra a equação abaixo (BALOGUN, 2003).

$$N_c = I_0 t \epsilon \exp\left(-\int_{x_1} \mu_1(E) dx\right) \exp\left(-\int_{x_2} \mu_2(E) dx\right) \rho_e \frac{d\sigma_c}{d\Omega} \Delta\Omega V \quad (2)$$

onde:  $I_0$  é a intensidade do feixe incidente com energia  $E$ ,  $t$  é o tempo em segundos do período de contagem,  $\epsilon$  é a eficiência do detector para a energia do fóton espalhado,  $x_1$  e  $x_2$  são os caminhos percorridos dentro do material pelos fótons incidentes e espalhados respectivamente,  $\mu_1$  e  $\mu_2$  são coeficientes de atenuação linear para os respectivos caminhos percorridos,  $\rho_e$  é a densidade eletrônica do material,  $d\sigma_c/d\Omega$  é a seção de choque diferencial por elétron do efeito Compton,  $\Delta\Omega$  é o ângulo sólido amostra-detector e  $V$  é o volume do voxel irradiado, definido pela sobreposição dos ângulos sólidos da colimação de feixe e detector.

Recentemente alguns trabalhos vem empregando o espalhamento Compton para a detecção de defeitos e inclusões em concreto (HUSSEIN; WHYNOT, 1989; PRIYADA *et al.*, 2013, 2014; BOLDO; APPOLONI, 2014; MARGRET *et al.*, 2015; SARI *et al.*, 2019; IORI; BOLDO, 2019, 2020). No entanto, as amostras estudadas nesses trabalhos eram

confeccionadas com argamassa (cimento, areia e água) sem adição de agregados graúdos. Os agregados graúdos, como a brita, são componentes fundamentais presentes na composição do concreto armado. Essas rochas, geralmente de origem basáltica, possuem metais pesados, como o ferro e o titânio na sua composição. Estes metais podem provocar elevada atenuação do feixe incidente e espalhado na amostra em função da energia do feixe incidente, o que pode prejudicar a localização e dimensionamento das armaduras. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da brita na detecção da armadura no concreto armado, utilizando a técnica de retroespalhamento Compton, para duas energias de feixe incidente. O estudo foi realizado por meio da simulação computacional de Monte Carlo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

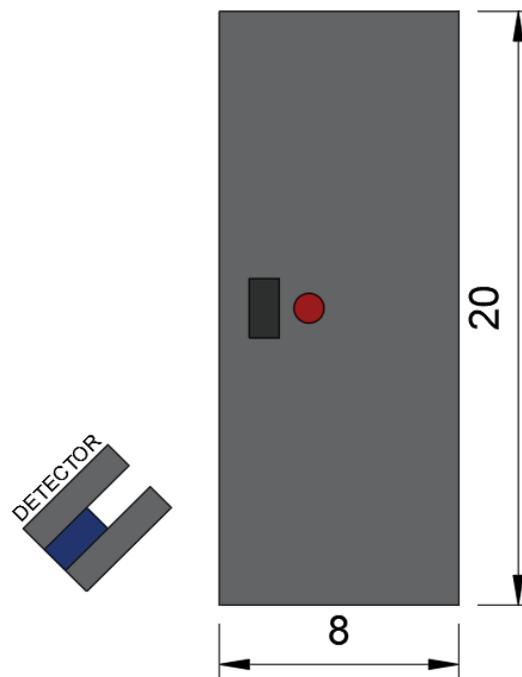
### 2.1 SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO

Para a realização da simulação do experimento proposto neste trabalho foi utilizado o código *Fluka*. O *Fluka* é um pacote totalmente integrado de simulação de Monte Carlo que usa uma programação sofisticada para simular com acurácia a interação e propagação de partículas e radiação através da matéria, sendo particularmente adequado para problemas de espalhamento (FASSO *et al.*, 2005).

Os resultados obtidos pelo *Fluka* já foram avaliados frente a dados experimentais e teóricos provenientes de outros códigos de simulação mostrando excelente concordância entre os mesmos (BESKROVNAIA *et al.*, 2008; JOOHEE *et al.*, 2011; MALANO *et al.*, 2019).

### 2.2 AMOSTRA

A amostra construída na simulação consiste de um pilar de concreto com dimensões de 8,0 x 20,0 x 20,0 cm, com a inserção de uma armadura de  $\phi$  1,0 cm de diâmetro centralizada com uma brita retangular de 2,0 x 1,0 cm como mostra a Figura 2. Com esse tamanho a brita entra na classificação do tipo 1 (malha da 24 mm), que é utilizada em diversas aplicações (colunas, vigas e lajes) na construção de edificações de grande porte (ABNT, 2009).



**Figura 2:** Vista superior do pilar. Concreto (cinza claro), armadura (vermelha) e brita (cinza escuro). Unidades em centímetros

**Fonte:** Autores

O concreto é confeccionado com cimento do tipo *portland* e possui densidade de  $2300 \text{ kg/m}^3$ . A armadura é feita de ferro com densidade de  $7870 \text{ kg/m}^3$  cujo centro encontra-se a 3,0 cm do limite esquerdo do pilar. Uma única pedra brita com centro geométrico a 1,5 cm do limite esquerdo do pilar foi posicionada à frente da armadura. Desta maneira o feixe incidente deve atravessar a pedra para atingir a armadura. Essa configuração tem o objetivo de avaliar se a técnica de caracterização empregada neste experimento ainda consegue determinar a posição da armadura mesmo estando “oculta” pela pedra. A brita escolhida é de origem basáltica, uma das mais utilizadas no Brasil, visto que no país a grande maioria dos agregados para concreto britado tem origem em rochas ígneas as quais são formadas pelo resfriamento e consequente solidificação do magma e constituídas principalmente por óxidos de silício, ferro, alumínio, cálcio, magnésio, sódio, titânio e potássio (SANTOS, 2012). A pedra brita tem densidade de  $2800 \text{ kg/m}^3$  e sua composição química é mostrada na Tabela 1.

**Tabela 1:** Fração percentual dos compostos químicos presentes na brita de basalto

Comp.	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	SrO	ZnO	ZrO <sub>2</sub>	CuO
%	50,5	15,5	14,2	10,0	4,1	2,5	1,3	1,0	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

**Fonte:** THOMAZ (2020)

Além disso, foi simulado um detector, posicionado em um ângulo de  $135^\circ$  em relação a direção do feixe incidente e formado por um cristal cilíndrico (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>O<sub>2</sub>) onde ocorre a contagem dos fótons retroespalhados provenientes do volume de inspeção. Cobrindo o cristal há um cilindro de chumbo com raio de  $\phi 1,5 \text{ cm}$  e abertura de  $\phi 0,5 \text{ cm}$  servindo de colimador. Ele evita que os fótons que sofreram múltiplos espalhamentos dentro da amostra cheguem ao detector diminuindo o ruído no sinal que esses fótons não provenientes do volume de interesse causam. Para efeitos da simulação o cristal de detecção tem eficiência de 100%, ou seja, todo fóton que penetra no cristal é contado.

## 2.3 FONTES E POSIÇÃO DE VARREDURA

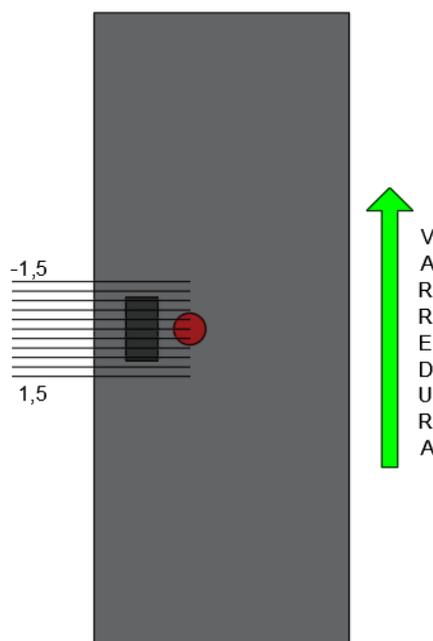
As fontes utilizadas na simulação com suas respectivas energias são mostradas na Tabela 2. A escolha destes isótopos se baseou em trabalhos anteriores que indicaram melhores resultados na utilização dessas fontes para os parâmetros avaliados nesta pesquisa (IORI, et al., 2019).

**Tabela 2:** Energias das fontes de raios gama utilizadas

Fonte	Massa atômica ( $\mu$ )	Energia (keV)
Americío (Am 241)	241	59,51
Cobalto (Co 60)	60	1170

**Fonte:** Dados de pesquisa

Os pontos de varredura escolhidos para a incidência do feixe cilíndrico com  $\phi$  1,0 mm estão representados na Figura 3. Em cada ponto foram emitidos  $1,0 \times 10^6$  fótons. Visualizando um plano cartesiano, sendo o centro da armadura a origem do mesmo, os pontos os quais o feixe incidiu vão de 1,5 até -1,5 cm, com uma distância 0,3 cm entre cada ponto. Desta maneira temos, no mínimo, 3 pontos em cada material que compõem a amostra.



**Figura 3:** Posições de incidência do feixe de fótons para cada ponto da varredura sobre a amostra.

**Fonte:** Autores

## 2.4 CONTRASTE

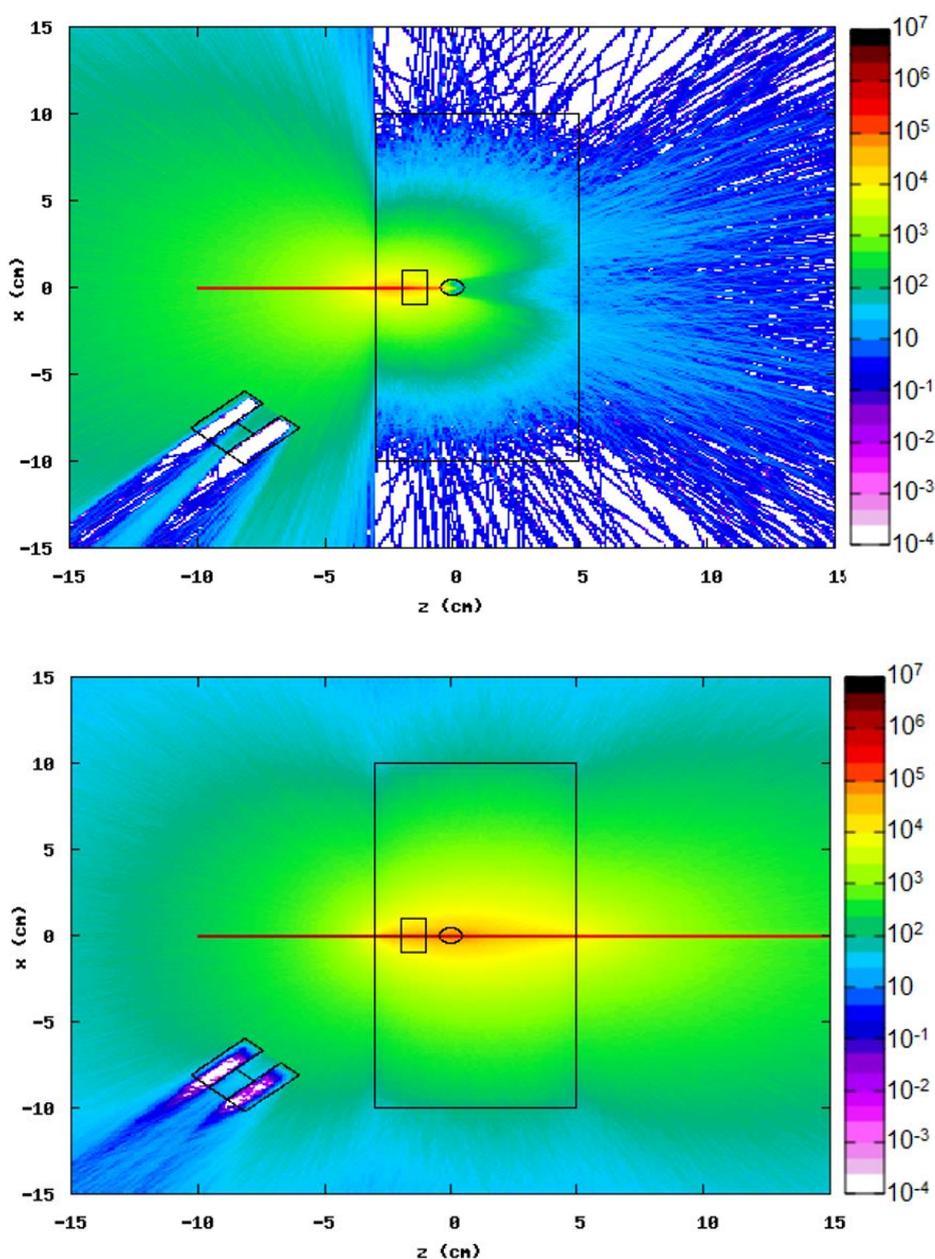
Para uma das análises dos dados obtidos na simulação, foi utilizado o conceito de contraste, que define a habilidade do experimento em distinguir materiais de diferentes densidades no interior da amostra. Neste trabalho ele é determinado matematicamente pela seguinte equação:

$$C_{AB} = \frac{(\bar{A} - \bar{B})}{\bar{A}} \times 100\% \quad (3)$$

onde:  $C_{AB}$  é o contraste entre o material A em relação ao material B;  $\bar{A}$  e  $\bar{B}$  são as médias integradas das contagens registradas pelo detector nos pontos em que o feixe incidente intercepta o material A e B respectivamente.

### 3 RESULTADOS

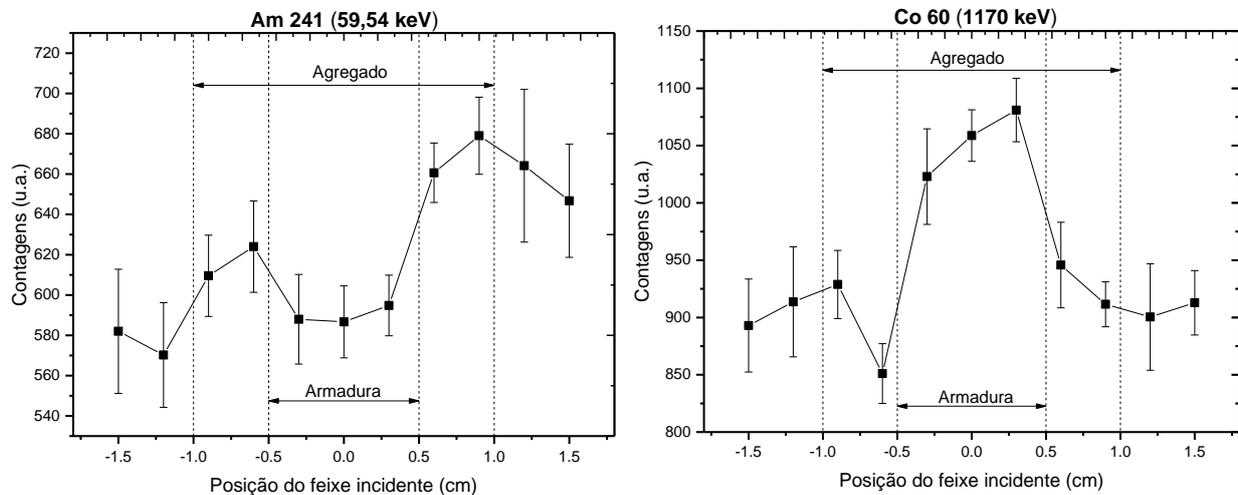
A Figura 4 apresenta exemplos da fluência de fótons espalhados na amostra quando realizada a simulação em um certo ponto de varredura. Estas imagens nos dão uma perspectiva espacial do que está ocorrendo durante o experimento em função da trajetória e número de fótons espalhados nas diferentes direções, além da atenuação que eles sofrem quando interagem com materiais de diferentes densidades dentro da amostra. É perfeitamente observável a menor atenuação do feixe de Co 60 que possui energia bem maior que o Am 241.



**Figura 4:** Exemplos de fluência de fótons espalhados na interação do feixe incidente (vermelho) com a amostra. Energia de 59,51 keV do  $^{241}\text{Am}$  (cima) e energia de 1170 keV do  $^{60}\text{Co}$  (baixo)

**Fonte:** Dados de pesquisa

As contagens dos fótons retroespalhados em cada posição da varredura utilizando as duas fontes de Am 241 e Co 60 são mostradas na Figura 5. As posições relativas da armadura e brita também estão indicadas nas figuras.



**Figura 5:** Contagens de fótons retroespalhados em função da posição de varredura do feixe incidente (Am 241 esquerda e Co 60 direita).  
**Fonte:** Dados de pesquisa

Analisando os quatro pontos de contagem entre as posições 0,5 e 1,5 cm para ambas as energias, percebemos que houve pouca variação no número de fótons espalhados entre o concreto e a brita. Isso se deve a baixa diferença entre as densidades dos dois materiais (2300 e 2800 kg/m<sup>3</sup>). A variação de contagem entre valores adjacentes dentro do mesmo material é atribuída somente à flutuação estatística presente neste tipo de experimento.

Para o Am 241, quando o feixe incide na região da armadura, verificamos uma queda de contagem devido ao efeito de atenuação do feixe incidente e espalhado dentro do material mais denso. Agora a técnica teve sensibilidade para perceber as diferenças de densidade. Os três pontos com contagens mais baixa, fornecem boa localização da posição e do tamanho da armadura, mesmo esta estando atrás de um agregado que possui alta porcentagem de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, um material de alta densidade (5240 kg/m<sup>3</sup>) na sua composição. A baixa contagem do restante dos pontos das posições mais negativas da varredura, pode ser explicada devido a atenuação do feixe que está voltando para o detector após sofrer espalhamento dentro do volume de inspeção.

No caso do Co 60 a diferenciação das densidades em função da quantidade de fótons espalhados também acontece, mas agora a armadura de maior densidade gera maior espalhamento, como pode ser visto nos três pontos entre as posições - 0,5 e 0,5 cm. Devido à grande energia do feixe emitido pelo Co 60, o fenômeno de espalhamento neste caso é preponderante em relação a atenuação do feixe devido ao maior peso da seção de choque diferencial por elétron do efeito Compton ( $d\sigma_c/d\Omega$ ) em relação a probabilidade de espalhamento na equação 2 (SCANNAVINO; CRUVINEL, 2012).

Na Tabela 3 são apresentados os dados de contraste calculados com a equação 3, para os diferentes materiais e para as duas energias utilizadas.

**Tabela 3:** Contrastes entre os materiais

Contraste (%)	
Am 241	Co 60

<b>Concreto / agregado</b>	2,21	2,48
<b>Concreto / armadura</b>	10,0	16,2

**Fonte:** Dados de pesquisa

Os valores de contraste corroboram já o percebido na observação direta dos gráficos de contagem espalhada em função da posição mostrados na Figura 5. Baixos valores de contraste entre concreto e agregado reforçam que a técnica não conseguiu diferenciar esses dois materiais devido à baixa diferença de densidade entre eles. No entanto, ambas as energias empregadas conseguiram localizar a armadura oculta pela brita dentro do concreto em função da diferença de contagens. O Co 60 obteve o maior valor de contraste visto que a elevada energia emitida por esta fonte sofre menor atenuação dos compostos presentes na composição da brita. Além disso, esta fonte pode ser utilizada para detecção de inclusões mais distantes da superfície, visto que fontes de alta energia emitem fótons que penetram mais profundamente na matéria.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho avaliamos a influência de agregados na detecção e posicionamento de armaduras dentro do concreto armado, por meio da técnica de espalhamento Compton. A investigação foi realizada utilizando a simulação computacional de Monte Carlo.

As duas energias analisadas foram capazes de detectar a armadura oculta pela brita com boa resolução espacial e valores de contraste, mesmo com o agregado possuindo quantidade considerável de óxido de ferro. O Co 60 foi a fonte que apresentou maiores valores de contraste e contagens, podendo ser uma alternativa para inspeção de defeitos mais distantes da superfície da amostra. A técnica de espalhamento Compton se mostrou adequada para o problema estudado podendo ser uma alternativa bastante promissora para análise não destrutiva de estrutura reais de concreto armado.

#### REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. p. 12.

BALOGUN, F. A. Angular variation of scattering volume and its implications for Compton scattering tomography. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 50, n. 2, p. 317-323, 1999.

BESKROVNAIA, L.; FLORKO, B.; PARAIPAN, M.; SOBOLEVSKY, N.; TIMOSHENKO, G. Verification of Monte Carlo transport codes FLUKA, GEANT4 and SHIELD for radiation protection purposes at relativistic heavy ion accelerators. **NIM in Physics Research B**, v. 266, n. 18, p. 4058-4060, 2008.

BOLDO, E. M.; APPOLONI, C. R. Inspection of reinforced concrete samples by Compton backscattering technique. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 95, p. 392-395, 2014.

FASSO, A.; FERRARI, A.; RANFT, J.; SALA, P. R. **FLUKA**: a multi-particle transport code. CERN-2005-10, INFN/TC\_05/11, SLAC-R-773, 2005. 406p.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

HUSSEIN, E. M. A.; WHYNOT, T. M. A Compton scattering method for inspecting concrete structures. **NIM in Physics Research A**, v. 283, n. 1, p. 100-106, 1989.

IAEA - International Atomic Energy Agency. **Interação da radiação com a matéria.** Disponível em: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/45/073/45073468.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073468.pdf). Acesso em: 29/07/2021.

IORI, A. O. G.; BOLDO, E. M. Avaliação de três geometrias de fontes de raios gama para a detecção de corrosão em concreto armado utilizando espalhamento Compton. *In: EPCC - ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA*, 12., Maringá. **Anais [...]**. Maringá, PR: UNICESUMAR, 2019.

IORI, A. O. G.; KASSAHARA, L. N.; BOLDO, E. M. Avaliação não destrutiva de concreto armado utilizando a técnica de retroespalhamento Compton. *In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC*, 71., 2019, Campo Grande. **Anais [...]**. Campo Grande, UFMS, 2019. p.1-4.

IORI, A. O. G. e BOLDO, E. M. Evaluation of three gamma sources configurations, for corrosion identification in a reinforced concrete rebar, by Compton backscattering. *In: REUNIÃO DE TRABALHO SOBRE FÍSICA NUCLEAR NO BRASIL*, 43., São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 2020.

JOOHEE, O.; HEE-SEOCK, L.; SUYEL, P.; MINHO, K.; SUKMO, H.; SEUNGKOOK K.; WOON-KAB, C. Comparison of the FLUKA, MCNPX, and PHITS Codes in yield calculation of secondary particles produced by intermediate energy proton beam. **Progress in Nuclear Science and Technology**, v. 1, p. 85-88, 2011.

MALANO, F.; MATTEA, F.; GESER, F. A.; PÉREZ, P.; BARRACO, D.; SANTIBÁÑEZ, M.; FIGUEROA, R.; VALENTE, M. Assessment of FLUKA, PENELOPE and MCNP6 Monte Carlo codes for estimating gold fluorescence applied to the detection of gold-infused tumoral volumes. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 151, p. 280-288, 2019.

MARGRET, M.; MANAKA, M.; VENKATRAMAN, B.; CHANDRASEKAN, S. Compton back scatter imaging for mild steel rebar detection and depth characterization embedded in concrete. **NIM in Physics Research B**, v. 343, p. 77-82, 2015.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. **Física das Radiações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 296 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.

PRIYADA, P.; RAMAR, R.; SHIVARAMU. Determining the water content in concrete by gamma scattering method. **Annals of Nuclear Energy**, v. 63, p. 565-570, 2014.

SANTOS, A. Para cada tipo de concreto, um tipo de brita. **Revista Massa Cinzenta, Portal Itambé**, v. 1, 2012. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/para-cada-tipo-de-concreto-um-tipo-de-brita/>. Acesso em: 29/07/2021.

SARI, M. B.; WIRAWAN, R.; WARIS, A.; KIM, H. J.; DJAMAL, M. Simulation of void detection system using gamma-ray Compton scattering technique. **Journal of Engineering and Technological Sciences**, v. 51, n. 3, p. 369-379, 2019.

SCANNAVINO, F. A. e CRUVINEL, P. E. A graphical tool for an analytical approach of scattering photons by the Compton effect. **NIM in Physics Research A**, v. 674, p. 28-38, 2012.

THOMAS, W. A. **Contribuição ao estudo do módulo de elasticidade estático e dinâmico de concretos contendo agregados basálticos**: análise experimental e proposta de modelo de correlação. 2020. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Foz do Iguaçu, 2020.