



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

THIAGO ELIAS MILANI

**AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE DO COEFICIENTE DE  
ATENUAÇÃO LINEAR AO LONGO DE AMOSTRAS DE  
CONCRETO**

---

Londrina  
2014

THIAGO ELIAS MILANI

**AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE DO COEFICIENTE DE  
ATENUAÇÃO LINEAR AO LONGO DE AMOSTRAS DE  
CONCRETO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Curso de Pós-Graduação em Física, da  
Universidade Estadual de Londrina, como  
requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Avacir Casanova Andrello

Londrina  
2014

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da  
Universidade Estadual de Londrina.**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

M637a Milani, Thiago Elias.  
Avaliação da variabilidade do coeficiente de atenuação linear ao longo de amostras de concreto / Thiago Elias Milani. – Londrina, 2014.  
100 f. : il.

Orientador: Avacir Casanova Andrello.  
Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Física, 2014.  
Inclui bibliografia.

1. Física nuclear – Teses. 2. Capilaridade – Teses. 3. Concreto – Análise – Teses. 4. Blindagem (Radiação) – Teses. 5. Raios gama – Aplicações industriais – Teses. 6. Radiação ionizante – Medidas de segurança – Teses. I. Andrello, Avacir Casanova. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Física. III. Título.

CDU 539.14

THIAGO ELIAS MILANI

**AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE DO COEFICIENTE DE  
ATENUAÇÃO LINEAR AO LONGO DE AMOSTRAS DE CONCRETO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Curso de Pós-Graduação em Física, da  
Universidade Estadual de Londrina, como  
requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Avacir Casanova Andrello  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Profa. Dra. Berenice Martins Toralles Carbonari  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Prof. Dr. Paulo José dos Reis  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 15 de Agosto de 2014.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me concedido todas as melhores oportunidades em minha vida.

Aos meus pais Alfredo Elias Milani e Helena R. T. Milani, pelo apoio e por estarem a meu lado em todos os momentos.

À minha esposa Cintia Milani por ser meu maior apoio, por sua compreensão e amor durante todo tempo ao meu lado.

Ao meu filho Filipe E. Milani por ter me renovado e dado um sentido inexplicável a minha vida.

Ao meu irmão Lucas E. Milani pelo companheirismo, ser meu melhor amigo e me dar forças para sempre seguir em frente.

À minha irmã Isadora Milani, por me ajudar e estar ao meu lado sempre que necessário.

À minha tia Patrícia Milani, pela grande ajuda e carinho desde os tempos de graduação.

Ao Prof. Dr. Avacir Casanova Andrello pela orientação, carinho e amizade que levarei para sempre.

Ao Prof. Dr. Paulo José dos Reis pelos conselhos durante todo o trabalho e ter aceito fazer parte de minha banca de defesa.

À Profa. Dra. Berenice M. T. Carbonari, por ter aceito de imediato fazer parte de minha banca de defesa.

Aos meus companheiros de laboratório e amigos, Diego de Dio, Edher, Fábio Lopes, Daniele Maia pela amizade e ajudas em momentos difíceis nestes anos.

Aos meus amigos Luís Henrique, Madson A. Bruno e Marcus por todo apoio, companheirismo e amizade.

Aos meus amigos Eduardo Inocente e João Ricardo por todos estes anos de muita amizade, e que com certeza durará para sempre.

Aos meus grandes irmãos Lucas Endo e Luana de Oliveira por tantos gritos de socorro atendidos nas horas mais incertas, e pela mais bela amizade que nos faz sermos verdadeiros irmãos.

A todos os meus companheiros de trabalho, Eduardo Javier, Adriano júnior, Eduardo Sanada e Thiago que em tão pouco tempo fizeram com que me sentisse em casa.

Ao grupo do Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da UEL pela amizade e companheirismo.

À CAPES pelo apoio financeiro e ao Departamento de Física (estudantes, professores e funcionários).

Milani, Thiago Elias. **Avaliação da variabilidade do coeficiente de atenuação linear ao longo de amostras de concreto**. 2014. 100 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

## RESUMO

O presente trabalho desenvolvido no LFNA (Laboratório de Física Nuclear Aplicada), da Universidade Estadual de Londrina, trata da aplicação da técnica de transmissão de raios gama em diferentes amostras de concreto, e objetiva caracterizá-las quanto ao coeficiente de atenuação linear e frente de molhamento, para aplicação como blindagem radiológica. Para as medidas foi utilizada uma fonte de Césio – 137, um detector de NaI(Tl) (cintilador inorgânico, o qual pertence ao grupo dos cristais alcali-halogêneos) e um tubo fotomultiplicador da ORTEC – modelo 276 acoplado de forma direta ao cristal de cintilação NaI(Tl) na janela final adjacente ao fotocátodo. Foi aplicada uma tensão de 1150 V no tubo. As amostras de concreto com agregados baríticos apresentaram o maior valor para o coeficiente de atenuação médio. Em relação à frente de molhamento, as amostras de concreto convencional apresentaram o melhor desempenho e parecem ser mais viáveis como uma possível blindagem para proteção radiológica, tendo em vista o baixo poder de transportar substâncias nocivas através da capilaridade para a estrutura de concreto armado.

**Palavras-chave:** Transmissão de raios gama. Concreto. Coeficiente de atenuação. Frente de molhamento. Capilaridade.

Milani, Thiago Elias. **Evaluation of variability of the linear attenuation coefficient along the concrete samples.** 2014. 100 p. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

### **ABSTRACT**

This study developed in LFNA (Laboratory of Applied Nuclear Physics), located at State University of Londrina, refers to the technique of gamma ray transmission in different concrete samples in order to characterize these samples for the linear attenuation coefficient and wetting front, in applying these as radiation shielding. For the measurements was used a Cesium source, a detector NaI(Tl) (inorganic scintillator, which belongs to the group of alkalicrystal halogen) and a photomultiplier tube ORTEC - model 276 directly coupled to the scintillation crystal NaI (TI) at the end adjacent to the photocathode window shape. A voltage of 1150 V was applied to the tube. Samples of concrete with baríticos residues showed the highest value for the coefficient of attenuation. In relation the wetting front, conventional concrete samples showed the best performance and appear to be viable as a possible shielding for radiation protection, in view of the low power to transport noxious substances through the capillary to the armed structure.

**Key words:** Gamma ray transmission. Concrete. Attenuation coefficient. Wetting front. Capillarity.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>13</b>
<b>4.1</b>	<b>RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA .....</b>	<b>13</b>
4.1.1	Raios-X, Raios Alfa, Beta e Gama.....	14
<b>4.2</b>	<b>INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA.....</b>	<b>16</b>
<b>4.3</b>	<b>COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>4.4</b>	<b>POROSIDADE.....</b>	<b>24</b>
<b>4.5</b>	<b>PESO ESPECÍFICO .....</b>	<b>25</b>
<b>4.6</b>	<b>CAPILARIDADE.....</b>	<b>25</b>
<b>4.7</b>	<b>ABSORÇÃO CAPILAR DO CONCRETO .....</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
<b>5.1</b>	<b>AMOSTRAS DE CONCRETO.....</b>	<b>28</b>
<b>5.2</b>	<b>ELETRÔNICA NUCLEAR DE MEDIDAS.....</b>	<b>30</b>
<b>5.3</b>	<b>DETECTOR NAI(TI) .....</b>	<b>32</b>
<b>5.4</b>	<b>TUBO FOTOMULTIPLICADOR .....</b>	<b>32</b>
<b>5.5</b>	<b>FONTE DE <sup>137</sup>Cs .....</b>	<b>33</b>
<b>5.6</b>	<b>SOFTWARES .....</b>	<b>33</b>
<b>5.7</b>	<b>METODOLOGIA DE ANÁLISE .....</b>	<b>33</b>
5.7.1	Coeficiente de Atenuação Médio .....	33
5.7.2	Meia Espessura .....	35
5.7.3	Frente de Molhamento.....	36
<b>6</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>39</b>
<b>6.1</b>	<b>RESULTADOS PARA O COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO MÉDIO E MEIA ESPESSURA.....</b>	<b>39</b>
<b>6.2</b>	<b>COMPORTAMENTO DA FRENTE DE MOLHAMENTO.....</b>	<b>43</b>

<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>97</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>99</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A radiação ionizante danifica o tecido humano, sendo que diversos efeitos maléficos foram reportados logo após a descoberta do raio X. Durante décadas foi acumulado um grande número de informações sobre os efeitos maléficos da radiação ionizante e, conseqüentemente, sobre a necessidade de regulamentar a exposição de indivíduos a essa radiação bem como de aprimorar as técnicas empregadas pelo uso de colimadores, filtros, blindagens para atenuação, etc.

Conforme Xavier, Moro e Hailbron (2006), a irradiação de material biológico pode resultar em transformações de moléculas específicas (água, proteína, açúcar, DNA, entre outros). No caso de exposição de seres humanos a altas doses de radiação, uma grande parte das células do corpo é afetada, impossibilitando a sustentação da vida. Neste contexto, a proteção radiológica é fundamental no planejamento de atividades de trabalhadores que convivem com esse fator de risco diariamente.

Quando os níveis de radiação permanecem altos, mesmo que, dentro do viável, seja mínimo o tempo de permanência em locais que possuam fontes emissoras de radiação e máxima a distância mantida dessa fonte, é necessária a introdução do fator blindagem, com o objetivo de limitar a dose (XAVIER, MORO e HEILBRON, 2006).

Segundo os mesmo autores, colimadores, biombos, aventais e óculos de proteção são exemplos de materiais empregados para minimizar a exposição à radiação. A determinação da espessura e material adequado para confecção de uma blindagem eficiente depende do tipo de radiação, além é claro, do valor de dose aceitável, após a atenuação pela blindagem. Neste contexto, este trabalho possui como um dos objetivos a caracterização de diferentes amostras de concreto, com diferentes agregados, em níveis de proteção radiológica para uma fonte de radiação gama.

Além de poder ser utilizado para fins de proteção radiológica, o concreto é um material de extrema importância no âmbito da construção civil (MOSTARDEIRO NETO, 2011). O concreto é o material mais utilizado pela civilização moderna, só perdendo em volume para a água. É neste contexto, que um estudo sobre as características de absorção capilar do concreto ganha uma grande importância, tendo em vista que está ligado diretamente com a

durabilidade e qualidade das estruturas de concreto armado. Por fim, a verificação do comportamento da frente de molhamento nas amostras de concreto por meio da técnica de transmissão de raios gama também é um dos objetivos principais deste trabalho.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Carneiro Júnior (2006) desenvolveu um sistema de inspeção baseado em transmissão da radiação gama para aplicação em dutos flexíveis e colunas industriais. Foi utilizada uma fonte de radiação gama de Césio-137 e um detector cintilador NaI (TI) para mostrar um sistema eficiente na detecção de obstruções no duto e na verificação de níveis de volume no seu interior.

Moreira (2006) caracterizou microestrutura de materiais porosos por microtomografia de raios x e transmissão de raios gama. Foram determinadas propriedades como porosidade total média e distribuição de tamanho de poros por meio da análise de pastilhas cerâmicas de Alumina e Carbetto de Boro.

Oliveira, Reichardt e Vaz (1994) utilizaram a atenuação da radiação gama no estudo da distribuição de partículas em solo sob floresta e cana-de-açúcar. Os resultados indicaram uma diferença significativa dos teores de argila nas camadas superficiais do solo em função do cultivo da cana-de-açúcar.

Bacchi *et al* (1998) utilizaram a atenuação de feixes de raios gama como técnica auxiliar na determinação de curvas de retenção de água no solo. Este procedimento apresentou várias vantagens em relação ao processo tradicional, tais como: evitar a necessidade de constante manipulação das amostras; minimizar o problema da histerese; permitir uma determinação mais precisa da umidade por considerar possíveis alterações na densidade do solo devido à expansão e/ou contração durante a adição ou retirada de água.

Appoloni *et al* (1997) fizeram um estudo de cerâmicas arqueológicas do Paraná por transmissão de raios gama com o objetivo de inspecionar sua estrutura interna e homogeneidade. Obtiveram como resultado diferenças em termos de homogeneidade, possibilitando a caracterização de algumas técnicas de manufatura da pasta.

### **3 OBJETIVOS**

Este trabalho possui como objetivo a caracterização de amostras de concreto de diferentes composições quanto ao coeficiente de atenuação médio e meia espessura por meio da técnica de transmissão de raios gama, a fim de estabelecer o melhor grupo de amostras para proteção radiológica.

Além de caracterizar essas amostras quanto ao comportamento de suas frentes de molhamento, utilizando a mesma técnica.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Qualquer corpo que possua temperatura acima do zero absoluto (0 Kelvin) emite energia eletromagnética. Essa energia não precisa de um meio material para se propagar, e é definida como uma energia que se move em forma de onda (com componentes elétricos e magnéticos). A figura 1 demonstra como uma onda eletromagnética se propaga no espaço.

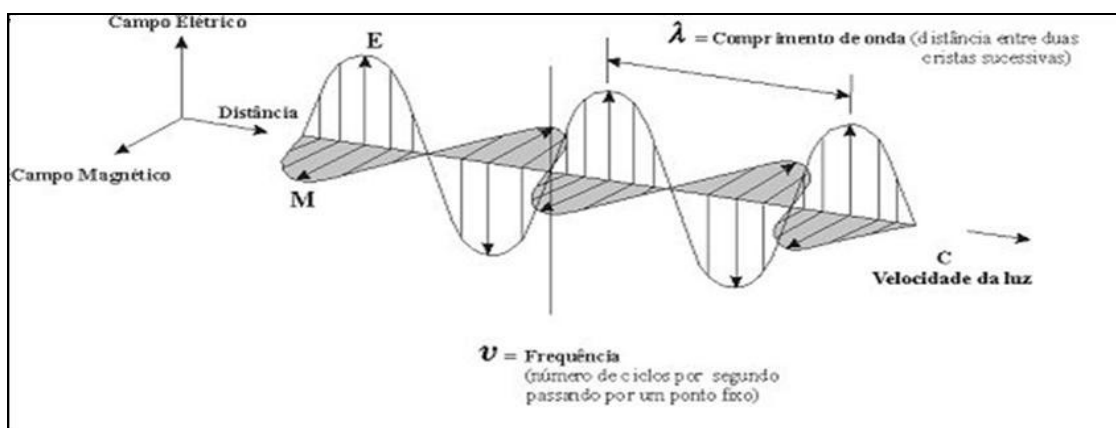


Figura 1 – Exemplo de propagação de uma onda eletromagnética no espaço (HEU, 2013, *apud* ENDO, 2013).

A energia da radiação é definida pelo postulado de Planck, na equação:

$$E = h\nu. \quad (1)$$

em que  $h$  representa a constante de Planck e  $\nu$  a frequência de oscilação.

Podemos ordenar de maneira contínua a energia eletromagnética em função de seu comprimento de onda ou de sua frequência. Esta disposição é denominada espectro eletromagnético.

Quanto menor o comprimento de onda maior será sua energia associada. A figura 2 mostra o espectro eletromagnético e suas aplicações conforme a energia.

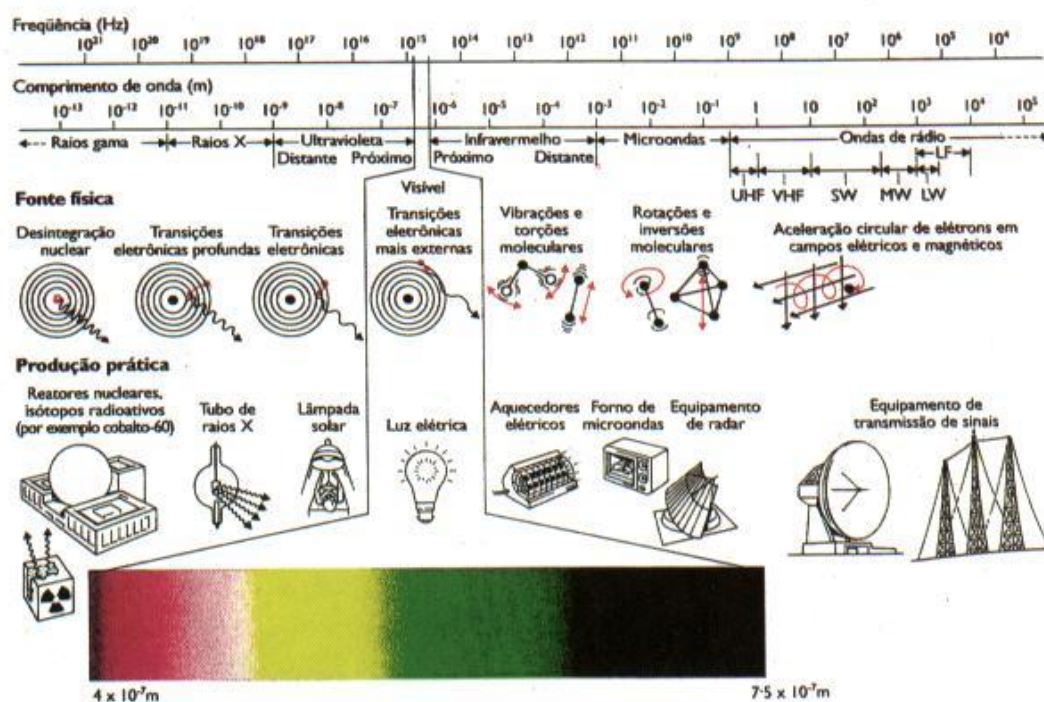
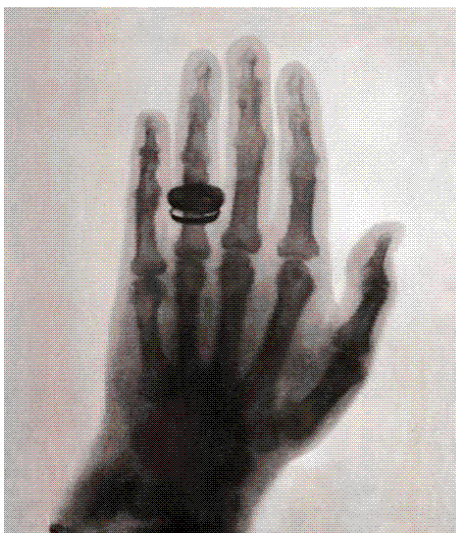


Figura 2 – Espectro detalhado da onda eletromagnética e suas aplicações (Sociedade Criacionista Brasileira, 2013).

#### 4.1.1 Raios-X, raios Alfa ( $\alpha$ ), Beta ( $\beta$ ) e Gama ( $\gamma$ )

Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), físico alemão, foi o responsável por descobrir acidentalmente os raios x. Essa descoberta se deu por experimentos de raios catódicos em meados de 1895 e rendeu ao físico o prêmio Nobel da física em 1901.

Esses raios possuem capacidade de penetração em tecidos moles e atenuação em sólidos, contribuindo assim para uma importante aplicabilidade na área médica. A primeira radiografia foi realizada um ano após a descoberta desses raios, e a figura 3 mostra uma estrutura óssea nessa radiografia.



**Figura 3 – Primeira radiografia, feita por Röntgen em novembro de 1985 (NOGUEIRA, 2010 *apud* ENDO, 2013).**

A radiografia mostra a mão da esposa de Röntgen, sendo perceptível até mesmo seu anel de noivado.

A radiação alfa ( $\alpha$ ) é constituída por partículas subatômicas formadas por dois nêutrons e dois prótons, apresentando carga positiva +2 e número de massa igual a quatro. Os raios alfa são, portanto, núcleos de hélio e são emitidas por núcleos instáveis de massa atômica elevada.

Essas partículas não possuem um alto poder de penetração, sendo inofensivas para exposições externas, não atravessando, por exemplo, tecidos epiteliais.

O raio beta ( $\beta$ ) consiste na emissão de um elétron ou um pósitron por um núcleo instável quando um nêutron se transforma em próton ou um próton se transforma em nêutron, respectivamente, acompanhada de uma partícula de massa desprezível, denominada de neutrino (EISBERG e RESNICK, 1979).

Apesar de ser mais penetrante que as partículas alfa, atravessando, por exemplo, folhas de papel ou alguns milímetros do tecido humano, seu poder de penetração também é considerado pequeno e depende de sua energia.

Por fim, o raio gama é uma radiação emitida por núcleo atômico em estado excitado após a transição de um próton ou nêutron para um menor nível de energia. Como possui um pequeno comprimento de onda, os raios gama possuem uma energia muito alta, tendo em vista que quanto menor o comprimento de onda, maior a energia da radiação, sendo capaz de atravessar grandes espessuras.

## 4.2 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Radiação é todo processo físico de emissão e propagação de energia. Mais especificamente, radiação ionizante é a radiação cuja energia é superior à energia de ligação dos elétrons de um átomo com seu núcleo, ou seja, em que a energia é suficiente para arrancar elétrons de seus orbitais.

A área que estuda a interação de radiações ionizantes com a matéria é conhecida como Física das Radiações, a qual possui grande interesse nos resultados da transferência de energia da radiação para o meio. Radiação eletromagnética com energia de fóton acima de 12 eV (raios X, raios X característicos e partículas carregadas desaceleradas), partículas eletricamente carregadas que possuem energia cinética superior a energias de ligação dos elétrons atômicos e nêutrons livres são algumas das radiações ionizantes usualmente estudadas.

Radiações na faixa de energia dos raios X e gama podem interagir com átomos, elétrons e núcleos atômicos, mas existe a probabilidade também de não interação, por exemplo, um fóton de raio gama pode atravessar distâncias consideráveis em um material sem que ocorra alguma interação entre eles. A probabilidade ou não de interação depende das características da radiação e do meio.

As principais interações da radiação ionizante com a matéria, levando-se em conta fótons de poucos keV até dezenas de MeV são: espalhamento coerente (efeito Rayleigh), efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares elétron-pósitron.

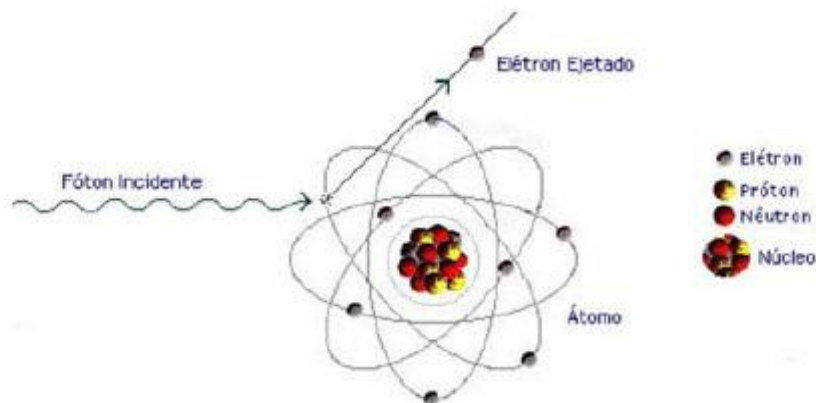
O espalhamento coerente ocorre quando um átomo absorve e emite a radiação em uma direção diferente da incidente. Diferentemente dos outros efeitos, no qual a radiação é tratada como constituída por fótons, no efeito Rayleigh ou espalhamento coerente a radiação é tratada como onda.

O efeito fotoelétrico consiste em um processo no qual um fóton é absorvido pelo átomo, liberando um elétron atômico para se mover no material. A energia cinética com que o elétron atômico é ejetado é estabelecida pela diferença entre a energia do fóton incidente e a energia de ligação do elétron ao átomo.

A energia do fotoelétron é apresentada pela equação 2:

$$E_K = h\nu - W \quad (2)$$

sendo  $E_K$  a energia cinética do fotoelétron e  $h\nu$  a energia do fóton incidente; e  $W$  representa a energia de ligação do elétron ao átomo. A figura 4 representa esquematicamente o efeito fotoelétrico.



**Figura 4 – Esquema de efeito fotoelétrico (MOREIRA, 2006).**

A probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico, ou seja, a seção de choque, considerando energias suficientes para ionização de elétrons da camada K, é dada pela equação.

$$\sigma_F = \frac{8\pi}{3} \left( \frac{e^2}{m_0 c^2} \right)^2 Z^5 \alpha^4 4\sqrt{2} \left( \frac{m_0 c^2}{h\nu} \right)^{\frac{7}{2}}, \quad (3)$$

em que  $\alpha=1/137$  é a constante de estrutura fina e  $m_0 c$  a energia de repouso do elétron. Existe uma maior probabilidade deste efeito nesta camada devido à conservação de momento do elétron, pois seu momento de recuo é absorvido pelo núcleo atômico. Após este efeito, existe a possibilidade de ser emitido um raio x característico do material, ou então, a emissão de um elétron conhecido como elétron Auger. A representação esquemática deste efeito é mostrada na figura 5.

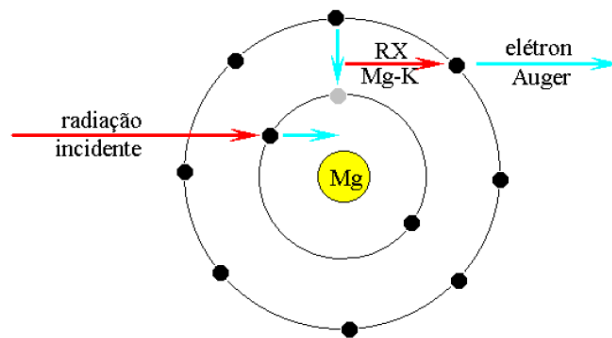


Figura 5: Efeito Auger em um átomo de Mg (NASCIMENTO FILHO, 1999).

O efeito Compton, conhecido também como espalhamento inelástico consiste no espalhamento de fótons por elétrons livres. Neste processo parte da energia do fóton é transferida para o elétron e um fóton com a energia restante é espalhado em outra direção. A energia do fóton espalhado depende do ângulo de espalhamento  $\theta$ .

A figura 6 mostra esquematicamente o espalhamento Compton para um fóton de energia  $h\nu$  e comprimento de onda  $\lambda$  que ao colidir com um elétron pouco ligado em repouso é espalhado em um ângulo  $\phi$  e com comprimento de onda  $\lambda'$ . De acordo com o esquema o elétron é espalhado de um ângulo  $\theta$

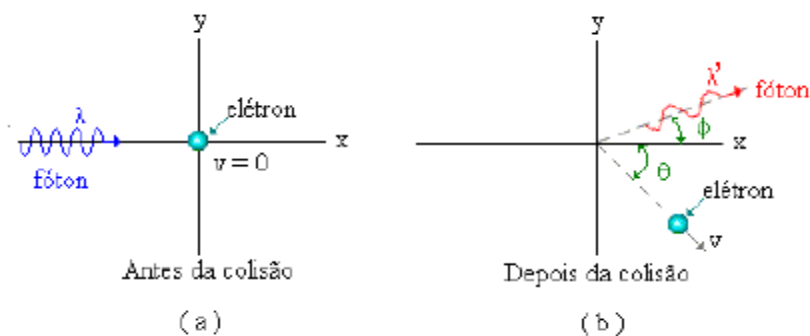


Figura 6 – Esquema de espalhamento Compton.

Utilizando a conservação de energia e momento é possível estabelecer uma relação entre a transferência de energia e o ângulo de espalhamento para qualquer interação. A energia com que o fóton é espalhado é dada pela equação 4.

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos \phi)} \quad , \quad (4)$$

em que  $\alpha = \frac{h\nu}{mc^2}$  .

A energia cinética do elétron ejetado é dada por:

$$T = h\nu \frac{\alpha(1 - \cos \phi)}{1 + \alpha(1 - \cos \phi)} \quad . \quad (5)$$

Estabelecendo essa energia pelo ângulo de espalhamento do elétron, temos:

$$T = h\nu \left[ \frac{2\alpha}{1 + 2\alpha(1 + \alpha)^2 \operatorname{tg}^2 \theta} \right] \quad . \quad (6)$$

Em que a relação entre os ângulos de espalhamento do fóton e do elétron são dadas por (KNOLL, 2000):

$$\cos \phi = 1 - \frac{2}{(1 + \alpha)^2 \operatorname{tg}^2 \theta + 1} \quad (7)$$

$$\cot g \theta = (1 + \alpha) \operatorname{tg} \left( \frac{\phi}{2} \right) \quad . \quad (8)$$

A probabilidade de ocorrer o espalhamento Compton aumenta conforme a energia de ligação dos elétrons (camadas mais externas) se torna desprezível quando comparada com a energia do fóton incidente. Desse modo a interação da radiação assume um comportamento como se houvesse elétrons livres.

A secção de choque do elétron para os fótons espalhados com um ângulo sólido  $d\Omega$  em uma direção  $\phi$  foi calculada por Klein e Nishima e é mostrada na equação 9:

$$\frac{d_e\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left( \frac{h\nu'}{h\nu} \right) \left( \frac{h\nu}{h\nu'} + \frac{h\nu'}{h\nu} - \text{sen}^2\phi \right) . \quad (9)$$

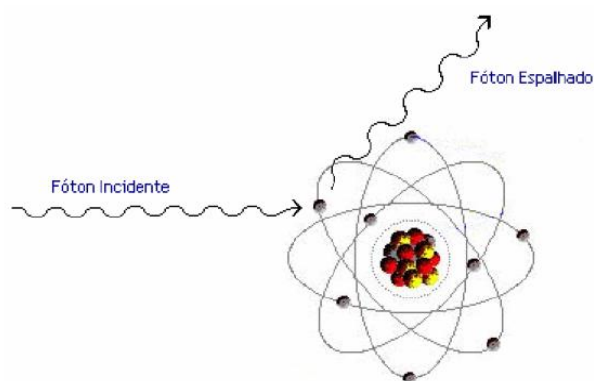
Substituindo a equação  $\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_0^2$  na equação anterior obtemos:

$$\frac{d_e\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left\{ \left\{ \frac{1}{[1 + \alpha(1 - \cos\phi)]^2} \left[ 1 + \cos^2\phi + \frac{\alpha^2(1 - \cos\phi)^2}{[1 + \alpha(1 - \cos\phi)]} \right] \right\} \right\} . \quad (10)$$

No limite para baixas energias, ou seja,  $\alpha < 1$ , a equação anterior passa a descrever a sessão de choque para o espalhamento Thomson. Integrando tal equação é obtida a sessão de choque total para o espalhamento Compton (KNOLL, 2000):

$$\sigma = 2\pi r_0 \left\{ \frac{1 + \alpha}{\alpha^2} \left[ \frac{2(1 + \alpha)}{1 + 2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1 + 2\alpha) \right] + \frac{1}{2\alpha} \ln(1 + 2\alpha) - \frac{1 + 3\alpha}{(1 + 2\alpha)^2} \right\} . \quad (11)$$

O espalhamento Rayleigh ocorre quando um feixe de fótons colide elasticamente com os elétrons pertencentes à eletrosfera atômica do material alvo. Como nesse caso temos um espalhamento elástico, os fótons sofrem mudança em sua trajetória sem perder energia. O espalhamento é mostrado esquematicamente na figura 7.



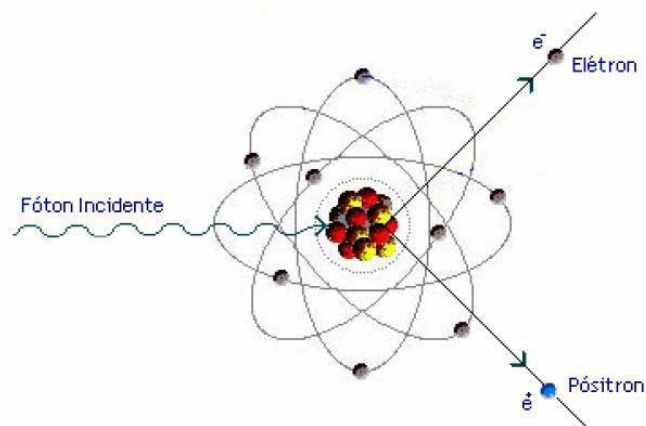
**Figura 7 – Esquema de espalhamento Rayleigh (MOREIRA, 2006).**

A sessão de choque para o espalhamento Rayleigh, para energias não relativísticas ( $h\nu \ll m_0c^2$ ) é expressa segundo a equação:

$$d\sigma_r(E) = r_0 |f_\theta|^2 \left( \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right) d\Omega \quad . \quad (12)$$

Sendo  $r_0 = \frac{e^2}{mc^2}$  corresponde ao raio clássico do elétron,  $f_\theta$  o fator de espalhamento atômico que leva em consideração a distribuição de carga da nuvem eletrônica e  $d\Omega$  é o ângulo sólido para o ângulo de difusão  $\theta$  (TAUHATA, 2003).

A produção de pares é o processo pelo qual um fóton é absorvido e toda sua energia é convertida em massa de repouso e energia cinética de um par elétron – pósitron. Em seguida, o pósitron sofre aniquilação com algum elétron disponível no material, produzindo um par de raios  $\gamma$  com energias de 511 keV. A figura 8 representa esquematicamente a produção de pares.



**Figura 8 – Processo de produção de pares (MOREIRA, 2006).**

Não existe possibilidade de ocorrência deste efeito para fótons de energia menor que 1,02 MeV, no entanto a seção de choque vai aumentando para fótons de maiores energias e é proporcional a  $Z^2$ . A equação diferencial da seção de choque para a formação de pares, tendo a emissão de um pósitron com energia cinética dada por  $T_+$  é descrita como (BURCHAM, 1974):

$$d\sigma_p = \frac{\sigma_0 Z^2 p}{h\nu - 2m_0 c^2} dT_+ . \quad (13)$$

Temos que  $\sigma_0 = \frac{1}{137} \left( \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m_0} \right)^2 = 5,8 \cdot 10^{-32} m^2$  e  $P = p(h\nu, Z)$  a distribuição de energia entre os elétrons e pósitrons.

Tratando-se de radiação gama, utilizada neste trabalho, existe uma probabilidade de ocorrência destes três processos. Essa probabilidade depende da energia do raio  $\gamma$  e do número atômico  $Z$  do material absorvedor. Para raios  $\gamma$  de baixa energia e alto número atômico temos o efeito fotoelétrico como predominante.

O efeito Compton predomina para energias intermediárias e baixo número atômico; já a produção de pares é predominante na região de altas energias e alto número atômico. A fig. 9 ilustra a probabilidade relativa de ocorrência destes três processos.

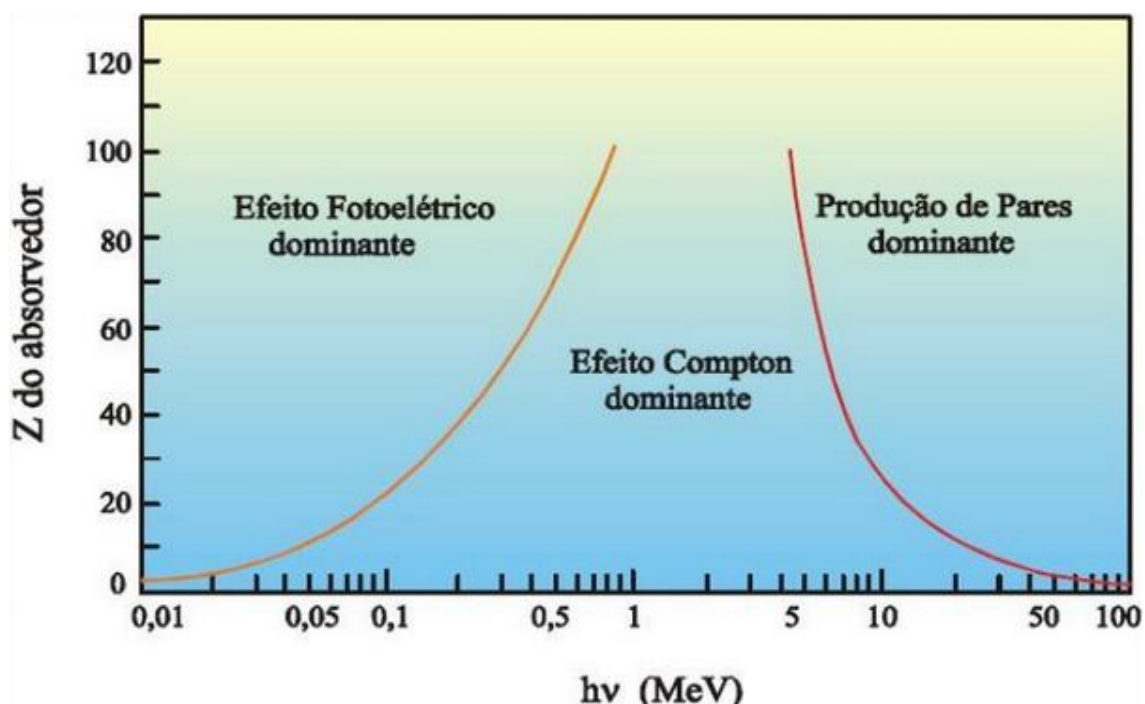


Figura 9 – Probabilidade Relativa de ocorrência dos processos citados.

### 4.3 COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO

A radiação gama é uma radiação eletromagnética ionizante, não possui massa nem carga e pode penetrar em um material e percorrer grandes espessuras antes de sofrer uma interação. Ao atravessar o material, um feixe de radiação gama pode interagir com a matéria de acordo com os três processos citados anteriormente.

Após uma interação o raio gama pode ser completamente absorvido pelo material absorvedor ou desviado de sua direção de incidência. Ou seja, quando um feixe incide sobre um material, parte dessa radiação será absorvida, parte espalhada e uma fração da radiação atravessará o material sem que ocorra alguma

interação. Desse modo, quanto maior à distância percorrida por um feixe em um material absorvedor, maior será a intensidade de radiação absorvida e menor a intensidade do feixe transmitida através do material.

A intensidade do feixe transmitido decresce exponencialmente em função da distância atravessada segundo a lei de Beer-Lambert (LEO, 2013):

$$I(X) = I_0 e^{-\mu x} \quad , \quad (14)$$

em que  $I_0$  é a intensidade do feixe inicial,  $I(x)$  representa a intensidade do feixe transmitido,  $x$  é a espessura do material absorvedor e  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear da amostra (relativo aos três processos de interação já mencionados).

O coeficiente de atenuação representa a probabilidade de o feixe interagir com a matéria por unidade de comprimento de caminho, caracterizando a penetração e difusão de uma radiação gama num meio material. Este depende do material absorvedor e da energia do raio  $\gamma$  incidente.

#### 4.4 POROSIDADE

A porosidade e a distribuição do tamanho do poro caracterizam a parte do volume do material que não é ocupada por material sólido. Como no caso deste trabalho, a porosidade nos concretos trabalhados é a propriedade desses concretos em conter espaços vazios (relação entre o volume dos vazios e o volume total da rocha), ou seja, é um valor que quantifica os espaços disponíveis para o fluido no interior do material.

Os vazios podem estar conectados ou semifechados condicionando assim a passagem do fluido. Ou seja, um material poroso pode ser muito permeável se os seus poros forem grandes e interconectados, ou quase impermeáveis se apesar de ter muitos poros, estes forem pequenos e semifechados.

Existem duas denominações simplificadas para a porosidade do solo, a macroporosidade e a microporosidade. A macroporosidade representa a porosidade total da amostra, desconsiderando a porosidade não observável na escala microscópica enquanto que a microporosidade é a porosidade caracterizada por suas pequenas dimensões.

Este trabalho não possui como foco e objetivo o cálculo da porosidade do material, por isso não trataremos em detalhes.

#### 4.5 PESO ESPECÍFICO

O peso específico ou densidade de um material depende de seus elementos constituintes e de sua porosidade. Além de ser uma propriedade de extrema importância, tendo em vista que a resistência ao desgaste do material cresce com a densidade.

Podemos enumerar alguns fatores que influenciam diretamente nessa propriedade, sendo eles: um material poroso com vazios isolados diminui a densidade real da amostra, enquanto que, se interligados, a densidade real será maior; material muito poroso possui densidade baixa; a resistência a compressão de um material cresce com a densidade;

Por esses motivos, o peso específico e a porosidade são de extrema importância para analisar a qualidade e resistência do material.

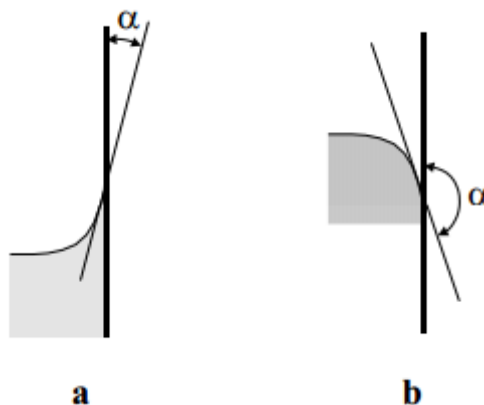
#### 4.6 CAPILARIDADE

A capilaridade trata-se da tendência que um líquido possui de subir (mesmo contrário a força gravitacional) ou descer paredes de tubos finos, os chamados tubos capilares, ou de se mover por vazios existentes em materiais porosos. As moléculas de um líquido são atraídas pelas moléculas vizinhas por uma força chamada coesão, que diminui rapidamente com a distância. Tal distância, chamada de raio de coesão possui aproximadamente o mesmo valor para todos os líquidos, e gira em torno de  $0,5 \mu\text{m}$ .

Contrária a esta força, a adesão consiste na força de atração entre as moléculas do líquido com as moléculas do tubo sólido. A água em um copo de vidro, por exemplo, possui força de adesão maior que a força de atração intermolecular (coesão). Consequentemente as moléculas aderem ao copo, curvando-se para cima na proximidade da parede, resultando na formação de um menisco côncavo.

É possível quantificar a tendência de um líquido aderir ou não a uma parede sólida pelo ângulo de contato ( $\alpha$ ), medido entre a parede e a tangente da superfície líquida no ponto de contato com a parede, mostrado na figura 10. No caso do exemplo citado anteriormente, este ângulo de contato varia entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Caso contrário, ou seja, quando a força de coesão for superior a de adesão, o líquido terá

a tendência de se afastar da parede sólida, resultando na formação de um menisco convexo. Neste caso, o ângulo de contato irá variar entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$ . Concluímos assim, que quanto maior a força de adesão em relação à coesão menor será o ângulo de contato.



**Figura 10 – Ângulo de contato para um menisco côncavo (a) e convexo (b).**

Assim, quando um líquido está dentro de um tubo capilar, as moléculas conseguem se aderir às paredes internas do tubo por adesão, arrastando as demais moléculas por coesão, tal fenômeno é conhecido como capilaridade. A partir do momento em que a força de coesão é superior a força de adesão, as moléculas param seu movimento de subida.

#### **4.7 ABSORÇÃO CAPILAR DO CONCRETO**

A absorção capilar do concreto é de extrema importância, tendo em vista que está ligado diretamente com a durabilidade das estruturas de concreto armado, pois pelo fenômeno da capilaridade, discutido anteriormente, o líquido pode transportar substâncias nocivas podendo causar a corrosão da estrutura. Os cloretos, por exemplo, penetram no concreto através dos poros, sendo que tais elementos podem estar presentes na superfície do concreto, e conduzidos ao interior do material após serem dissolvidos por água ocasionada por precipitação.

Existem alguns fatores que influenciam diretamente na absorção capilar do concreto, tais como, viscosidade, saturação do concreto, tensão superficial, densidade do líquido e fatores determinantes como porosidade, interconexão e estrutura dos poros do material.

Quanto menor o tamanho dos poros, maior será a pressão e altura da ascensão capilar, pois como tratado anteriormente, as moléculas irão aderir às paredes internas do tubo por adesão, arrastando as demais moléculas por coesão até que a força de coesão seja superior a força de adesão. No entanto, isso só ocorre se os poros estiverem conectados entre si.

A absorção capilar, apesar de difícil controle, por depender de vários fatores pode ser controlada com o uso de aditivos incorporadores de ar, que possuem a função de interromper a comunicação entre os poros pela incorporação de bolhas em seu interior, resultando em uma diminuição da capilaridade do material (MOSTARDEIRO NETO, 2011).

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 AMOSTRAS DE CONCRETO

Foram analisadas 24 amostras de concreto a fim de verificar a variabilidade do coeficiente de atenuação médio e meia espessura de radiação, ou seja, espessura para que a radiação transmitida diminua pela metade, sendo divididas em grupos como amostras de referência ou concreto convencional, amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e areia silícia, amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e areia calcária, amostras de concreto com resíduos e silício velho, amostras de concreto com resíduos e silício novo, amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e calcário velho, amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e calcário novo e amostras de concreto com agregados baríticos. Para cada grupo foram analisadas quatro amostras de concreto, sendo que cada uma delas foram feitas em duplicatas.

As amostras foram codificadas de forma a explicitar o tipo de concreto e numeradas de 1 a 8. As amostras com numeração ímpar representam as amostras originais, sendo que as amostras de numeração par representam sua respectiva réplica, ou seja, as amostras com número 1 ao final do código que representa a que grupo a mesma pertence possui como réplica amostra de número 2 e assim por diante.

Todas as amostras possuem dimensões aproximadas de 10x10 cm e espessuras que variam de 4,4cm a 5,4 cm. As amostras foram confeccionadas e disponibilizadas pelo Departamento de Engenharia de Construção da Universidade Politécnica da Catalunya – Barcelona – Espanha. A tabela 1 e 2 apresentam a codificação referente aos grupos de amostras analisadas.

**Tabela 1: Codificação referente às amostras de referência ou concreto convencional, amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e areia sílica, amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e areia calcária.**

<b>Descrição</b>	<b>Código</b>
Referência	REF <sub>1</sub>
	REF <sub>2</sub>
	REF <sub>3</sub>
	REF <sub>4</sub>
	REF <sub>5</sub>
	REF <sub>6</sub>
	REF <sub>7</sub>
	REF <sub>8</sub>
Siderúrgico e areia Silícia	SAS <sub>1</sub>
	SAS <sub>2</sub>
	SAS <sub>3</sub>
	SAS <sub>4</sub>
	SAS <sub>5</sub>
	SAS <sub>6</sub>
	SAS <sub>7</sub>
	SAS <sub>8</sub>
Siderúrgico e areia Calcária	SAC <sub>1</sub>
	SAC <sub>2</sub>
	SAC <sub>3</sub>
	SAC <sub>4</sub>
	SAC <sub>5</sub>
	SAC <sub>6</sub>
	SAC <sub>7</sub>
	SAC <sub>8</sub>

Tabela 2: Codificação referente aos outros grupos de amostras de concreto analisadas

Descrição	Código
Siderúrgico Silício Velho	SSV <sub>1</sub>
	SSV <sub>2</sub>
	SSV <sub>3</sub>
	SSV <sub>4</sub>
Siderúrgico Silício Novo	SSN <sub>5</sub>
	SSN <sub>6</sub>
	SSN <sub>7</sub>
	SSN <sub>8</sub>
Siderúrgico Calcário Velho	SCV <sub>1</sub>
	SCV <sub>2</sub>
	SCV <sub>3</sub>
	SCV <sub>4</sub>
Siderúrgico Calcário Novo	SCN <sub>5</sub>
	SCN <sub>6</sub>
	SCN <sub>7</sub>
	SCN <sub>8</sub>
Barítico	BA <sub>1</sub>
	BA <sub>2</sub>
	BA <sub>3</sub>
	BA <sub>4</sub>
	BA <sub>5</sub>
	BA <sub>6</sub>
	BA <sub>7</sub>
	BA <sub>8</sub>

A fim de verificar o comportamento da frente de molhamento nos diferentes grupos foram escolhidas quatro amostras de referência, quatro amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e areia calcária, quatro amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e silício, quatro amostras de concreto com resíduo siderúrgico e calcário. Além de duas amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e areia silícia e três amostras de concreto com agregados baríticos.

## 5.2 ELETRÔNICA NUCLEAR DE MEDIDAS

A eletrônica nuclear é constituída de um contador da ORTEC- 871-Timer e Counter, um amplificador MICRONAL – modelo 4012, uma fonte de

alta tensão MICRONAL – modelo 1023 A que alimenta o detector com 1150 V e um multicanal ORTEC – modelo 7100. As figuras 11 e 12 mostram o diagrama da eletrônica e geometria utilizada para a aquisição dos dados para cálculo do coeficiente de atenuação médio e meia espessura deste trabalho.

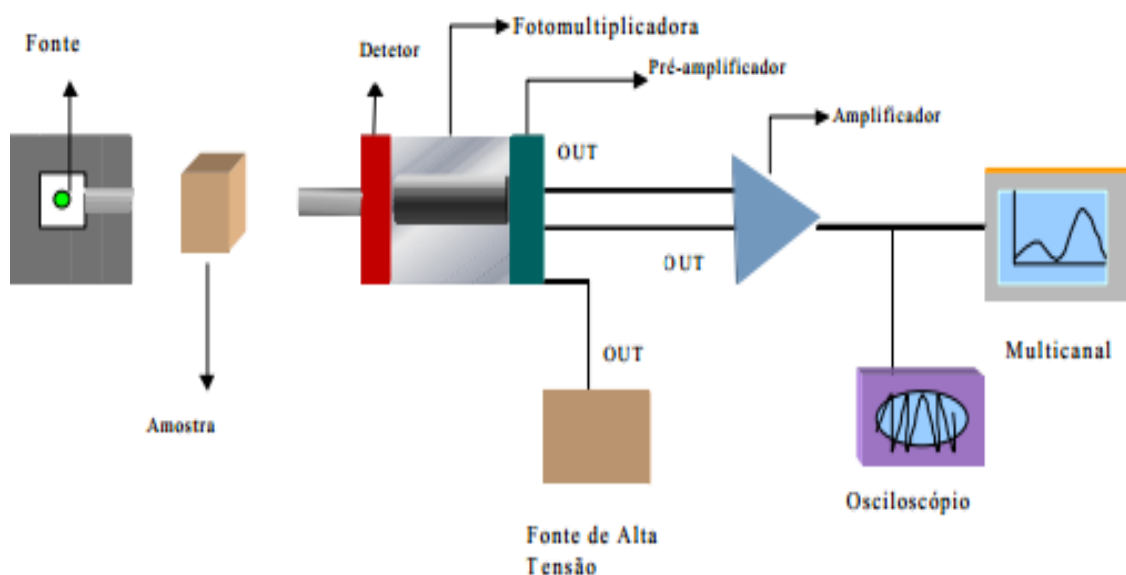


Figura 11: Arranjo experimental aplicado (POTTKER & APPOLONI, 2001).



Figura 12: Foto do arranjo experimental aplicado.

A geometria utilizada para caracterizar o comportamento da frente de molhamento nas diferentes amostras foi exatamente a mesma, com a adição de um suporte, o qual continha água. As amostras eram parcialmente imersas em água, aproximadamente dois centímetros de altura da base da amostra.

### 5.3 DETECTOR NaI(Tl)

O detector de NaI(Tl) utilizado neste trabalho é um cintilador inorgânico, o qual pertence ao grupo dos cristais alcali-halogêneos. O detector possui como função medir a radiação ionizante produzindo luz na interação da mesma com o material do cintilador. As propriedades do material cintilador ideal são: a conversão da energia cinética das partículas carregadas em luz detectável com alta eficiência de cintilação, o material deve ser de boa qualidade ótica e a produção de luz deve ser proporcional a energia depositada. Os cintiladores inorgânicos possuem a melhor produção de luz e linearidade, e a figura 13 mostra o espectro de emissão de luz produzida por quatro cintiladores inorgânicos.

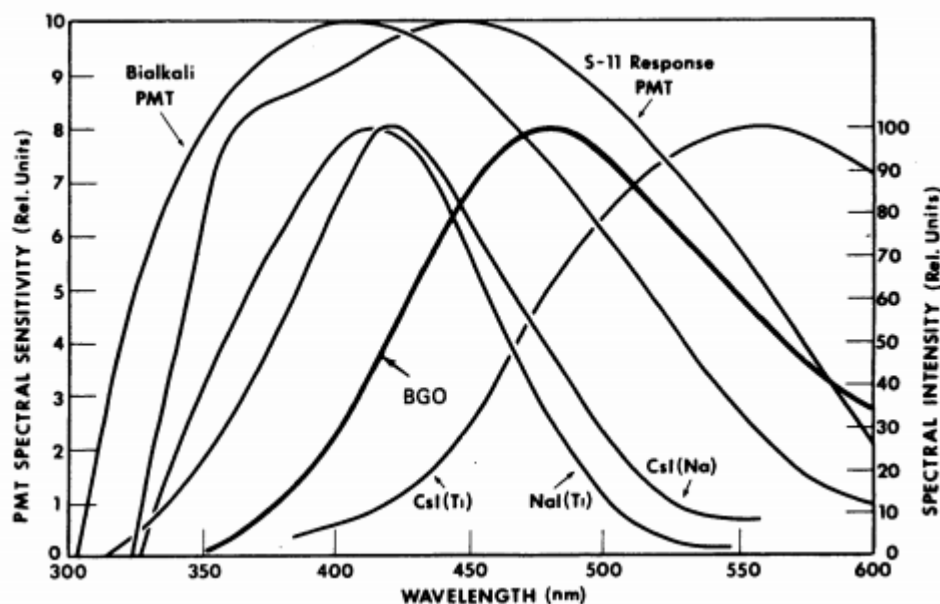


Figura 6: Espectro de emissão dos cintiladores mais utilizados e as curvas de resposta de dois fotocátodos de larga aplicação (KNOLL, 2000).

O detector de NaI(Tl) possui como melhor característica a excelente produção de luz e eficiência de aproximadamente 90%.

O detector de NaI(Tl) utilizado neste trabalho foi o modelo TELEDYNE ISOTOPES NaI(Tl) – Modelo 905-3, de 2x2” acoplado a uma fotomultiplicadora ORTEC – Modelo 276.

### 5.4 TUBO FOTOMULTIPLICADOR

O tubo possui um fotocátodo semitransparente, uma seção multiplicadora de elétrons multifase, um ânodo para a coleta da carga ampliada e uma região de coleta de fotoelétrons entre o primeiro dinodo e o fotocátodo.

O número de fotoelétrons produzidos por unidade de energia depositada no cintilador é proporcional à eficiência quântica média do espectro de emissão do cintilador. No caso do detector utilizado neste trabalho, ou seja, NaI (TI) como um cristal de cintilação, o número de fotoelétrons produzidos em um determinado fotocátodo, é determinado em função da energia perdida pelos elétrons ligados ao cristal NaI(TI).

O tubo PM utilizado neste trabalho foi da ORTEC – modelo 276 acoplado de forma direta ao cristal de cintilação NaI(TI) na janela final adjacente ao fotocátodo. Foi aplicada uma tensão de 1150 V no tubo.

## **5.5 FONTE DE $^{137}\text{Cs}$**

A fonte de radiação utilizada neste trabalho foi uma fonte de Césio – 137 com atividade de 0,57 Ci.

## **5.6 SOFTWARES**

Neste trabalho foi utilizado um microcomputador com o software SAMARA V\_200 da EMBRAPA. O software foi utilizado para o manuseamento automático da mesa micrométrica nos eixos x e y, ou seja, para que fosse feita a varredura da amostra nos pontos escolhidos para as medidas. Além disso, o software fornecia os valores da intensidade de radiação detectados pelo detector de NaI(TI). Outra função deste software é a de selecionarmos o tempo em que a amostra será irradiada pela fonte.

Para a construção das tabelas e gráficos foi utilizado o software Microcal Origin 6.0.

## **5.7 METODOLOGIA DE ANÁLISE**

### **5.7.1 Coeficiente de atenuação médio**

Para o cálculo do coeficiente de atenuação médio de cada amostra foram escolhidos 24 pontos de cada amostra para irradiação. O cálculo do coeficiente de

atenuação de cada ponto irradiado foi obtido através da equação 12. Assim tem-se que:

$$I(X) = I_0 e^{-\mu x} , \quad (14)$$

$$\frac{I(x)}{I_0} = e^{-\mu x} . \quad (15)$$

Reescrevendo a equação acima, temos que:

$$\ln \frac{I(x)}{I_0} = -\mu x . \quad (16)$$

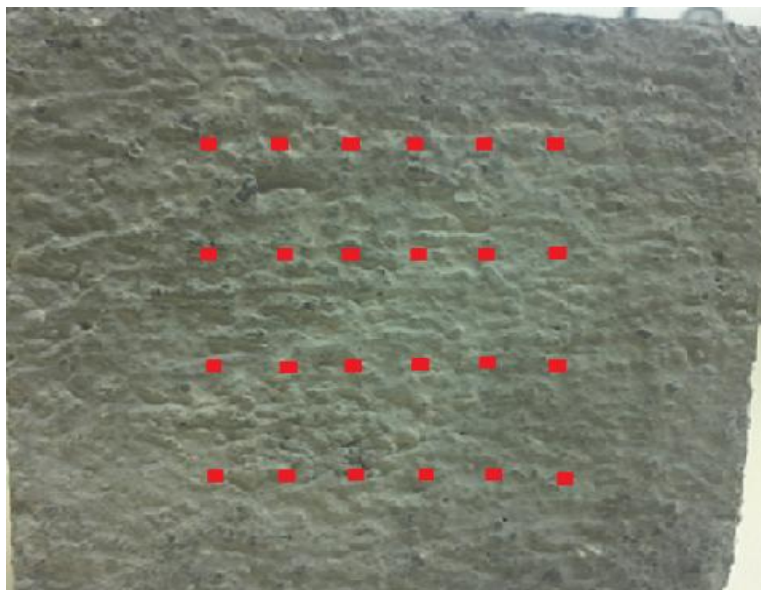
Assim, coeficiente de atenuação para cada ponto da amostra irradiada pode ser calculado por:

$$\mu = -\frac{1}{x} \ln \frac{I(x)}{I_0} . \quad (17)$$

Em seguida, calculou-se a média dos 24 coeficientes de atenuação obtidos para cada amostra analisada. A intensidade inicial de radiação,  $I_0$ , foi obtida através da irradiação direta fonte detector, ou seja, sem que houvesse nenhuma amostra entre o feixe de radiação e o detector de NaI(TI). A espessura das amostras foi obtida com a utilização de um paquímetro.

Foi calculado o desvio propagado referente a cada ponto irradiado, bem como o desvio propagado da média. Nesta parte do trabalho, foram medidas e analisadas todas as 24 amostras de concreto, bem como a réplica de cada uma delas. Cada ponto da amostra foi irradiado por 600 s. As duas colunas dos extremos verticais estavam localizadas a dois centímetros das bordas da amostra. Os pontos horizontais eram separados por um centímetro, enquanto que os pontos verticais eram separados por uma distância de dois centímetros.

A figura 14 mostra os pontos analisados para o cálculo do coeficiente de atenuação médio para cada amostra.



**Figura14: Pontos analisados para o cálculo do coeficiente de atenuação médio para cada amostra.**

### 5.7.2 Meia espessura

Após o cálculo do coeficiente de atenuação, foi utilizada novamente a equação 14 para calcular a meia espessura de cada amostra de concreto, ou seja, a espessura de amostra necessária para que o feixe de radiação transmitido tenha uma diminuição de 50% em relação ao feixe de radiação inicial. Assim, temos que:

$$I(X) = I_0 e^{-\mu x} , \quad (14)$$

Onde,  $I(x) = \frac{I_0}{2}$

Assim, podemos reescrever a equação acima da forma:

$$\frac{I_0}{2I_0} = e^{-\mu x} , \quad (18)$$

$$0,5 = e^{-\mu x} , \quad (19)$$

Reescrevendo a equação acima, temos:

$$x = -\frac{1}{\mu} \ln(0,5) . \quad (20)$$

Pela equação 20, pôde ser calculada a meia espessura de cada amostra.

### 5.7.3 Frente de molhamento

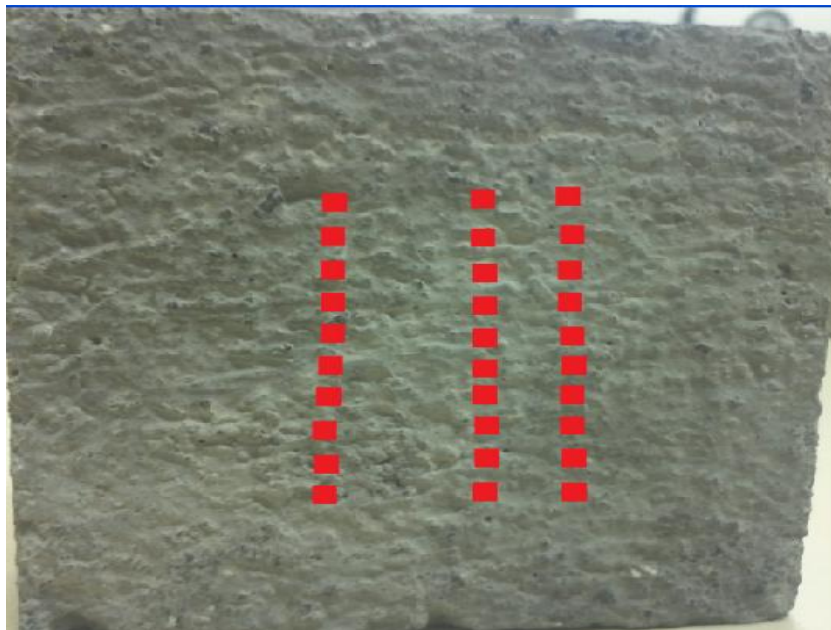
Para a análise do comportamento da frente de molhamento foram escolhidas quatro amostras de referência, quatro amostras com resíduo siderúrgico e areia calcária, quatro amostras com resíduo siderúrgico e calcário, quatro amostras com resíduos siderúrgicos e silício, três amostras de agregados baríticos e duas amostras com resíduos siderúrgicos e areia silícia. A geometria utilizada continuou a mesma que para o cálculo do coeficiente de atenuação médio, salvo que as amostras estavam parcialmente submersas, ou seja, cerca de um centímetro da amostra estava imersa em água, como mostra a figura 15.



**Figura15: Foto do arranjo experimental aplicado para a análise da frente de molhamento.**

Foi medida a radiação transmitida de 30 pontos em cada amostra, formando três colunas verticais. Para cada coluna vertical foi gerado um gráfico a fim de analisar o comportamento da frente de molhamento na respectiva coluna, ou seja, para cada amostra foi possível obter três gráficos. Os gráficos foram construídos com a utilização do software Microcal Origin 6.0 de modo a mostrar a variação do coeficiente de atenuação linear pela altura de cada coluna vertical no decorrer do tempo para cada ponto escolhido.

A figura 16 mostra os pontos analisados nas amostras selecionadas.



**Figura16: Pontos analisados para a verificação do comportamento da frente de molhamento.**

A coluna do extremo direito estava localizada a uma distância de aproximadamente dois centímetros da borda direita da amostra, enquanto que a coluna do extremo esquerdo estava localizada a uma distância de aproximadamente três centímetros da borda esquerda. A coluna central estava localizada a uma distância de um centímetro da coluna direita e dois centímetros da coluna esquerda. Os pontos verticais possuíam separação de 0,5 cm entre eles. Cada ponto foi medido por 60 segundos.

Para cada ponto medido, foi calculado o seu respectivo coeficiente de atenuação utilizando o mesmo método anterior, lembrando que a intensidade inicial de radiação,  $I_0$ , foi obtida irradiando diretamente o detector. Foi realizada de quatro a cinco medidas por amostra a fim de observar o comportamento da frente de molhamento em um curto período de exposição. A primeira medida ocorreu com a amostra ainda seca. Após duas horas foi feita a segunda medição, e as medições seguintes ocorreram sempre com intervalo de uma hora.

Em todos os gráficos obtidos, o momento em que foram realizadas as medições foi representado por códigos. Sendo assim,  $t_0$  representa os resultados obtidos com a amostra ainda seca,  $t_2$  representa os resultados obtidos duas horas após as amostras terem sido inseridas no suporte com água e assim por diante. As amostras foram medidas inicialmente de quatro a cinco horas.

O comportamento da frente de molhamento pode ser observado a partir do momento que exista variação na radiação transmitida em cada ponto. Sendo assim,

uma diminuição da radiação transmitida resulta em um aumento do coeficiente de atenuação calculado, o que indica molhamento do ponto em questão.

Foi selecionada uma amostra de cada grupo para a análise da frente de molhamento por um período de 48 horas a título de comparação com as medidas mais rápidas. A mesma metodologia foi empregada, salvo que o coeficiente de atenuação linear foi calculado a cada 12 horas, a partir do momento em que as amostras eram parcialmente imersas no suporte com água.

Por fim, será estabelecida uma curva de saturação do coeficiente de atenuação no decorrer do tempo, de alguns pontos selecionados.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 RESULTADOS PARA O COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO MÉDIO E MEIA ESPESSURA

Foi utilizado o software Samara V\_200 da EMBRAPA para a visualização da intensidade de radiação transmitida através do concreto. Após isso foi calculado o coeficiente de atenuação médio para cada amostra analisada e a meia espessura de radiação. A tabela 3 mostra as amostras de referência, ou de concreto convencional, analisadas com seus respectivos coeficiente de atenuação médio e meia espessura calculada após ser obtida a radiação transmitida pela amostra, lembrando que a espessura da amostra foi obtida com a utilização de um paquímetro e a intensidade inicial de radiação foi obtida através da irradiação direta fonte-detector.

**Tabela 3: Coeficiente de atenuação médio e meia espessura para amostras de Referência.**

Amostras	Coeficiente Médio ( $\text{mm}^{-1}$ )	Erro $\Delta\mu$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	Espessura para diminuição do feixe em 50% (mm)
Ref <sub>1</sub>	0,01868	0.00002	37,11± 0,05
Ref <sub>2</sub>	0,01926	0.00002	35,99± 0,05
Ref <sub>3</sub>	0,01864	0.00002	37,19± 0,05
Ref <sub>4</sub>	0,01917	0.00002	36,16± 0,05
Ref <sub>5</sub>	0,02166	0.00002	32,00± 0,05
Ref <sub>6</sub>	0,02178	0.00002	31,82± 0,05
Ref <sub>7</sub>	0,01839	0.00002	37,69± 0,05
Ref <sub>8</sub>	0,01918	0.00002	36,14± 0,05

Podemos observar que as amostras de concreto convencionais possuem coeficientes de atenuação médio parecidos, com exceção das amostras Ref 5 e 6. Essa variação faz com que este grupo de amostras apresentem um desvio padrão alto, de 0,001. Essa diferença pode ter sido causada pelo fato de que as amostras convencionais não eram exatamente iguais, ou seja, pode ter havido variação na

razão água-cimento das amostras e isto pode ter contribuído para essa diferença no coeficiente de atenuação médio calculado.

Do mesmo modo, a tabela 4 apresenta os resultados obtidos para amostras de concreto com agregados siderúrgicos e areia sílica.

**Tabela 4: Coeficiente de atenuação médio e meia espessura para amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e areia sílica.**

Amostras	Coeficiente Médio ( $\text{mm}^{-1}$ )	Erro $\Delta\mu$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	Espessura para diminuição do feixe em 50% (mm)
SAS <sub>1</sub>	0,02119	0.00002	32,71 ± 0,05
SAS <sub>2</sub>	0,02092	0.00002	33,13± 0,05
SAS <sub>3</sub>	0,02106	0.00002	32,91± 0,05
SAS <sub>4</sub>	0,02111	0.00002	32,84± 0,05
SAS <sub>5</sub>	0,02082	0.00002	33,29± 0,05
SAS <sub>6</sub>	0,02023	0.00002	34,26± 0,05
SAS <sub>7</sub>	0,02067	0.00002	33,53± 0,05
SAS <sub>8</sub>	0,02149	0.00002	32,25± 0,05

Apesar do fato de que as amostras siderúrgicas e areia sílica também apresentarem pequenas variações em sua composição, tal como a relação água cimento, o que pôde ser notado é que todas as amostras apresentaram coeficientes de atenuação médio parecidos, com desvio padrão de 0,0004, e maiores que os mesmos encontrados para as amostras de concreto convencionais.

Os dados do coeficiente médio calculado e meia espessura de radiação para as amostras com resíduo siderúrgico e areia calcária são apresentados na tabela 5.

**Tabela 5: Coeficiente de atenuação médio e meia espessura para amostras de concreto e areia calcária.**

Amostras	Coeficiente Médio ( $\text{mm}^{-1}$ )	Erro $\Delta\mu$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	Espessura para diminuição do feixe em 50% (mm)
SAC <sub>1</sub>	0,02091	0.00002	33,15 ± 0,05
SAC <sub>2</sub>	0,02109	0.00002	32,87 ± 0,05
SAC <sub>3</sub>	0,02126	0.00002	32,60 ± 0,05

SAC <sub>4</sub>	0,02146	0.00002	32,30 ± 0,05
SAC <sub>5</sub>	0,02081	0.00002	33,31 ± 0,05
SAC <sub>6</sub>	0,02046	0.00002	33,88 ± 0,05
SAC <sub>7</sub>	0,02072	0.00002	33,45 ± 0,05
SAC <sub>8</sub>	0,02042	0.00002	32,94 ± 0,05

Todas as amostras apresentaram coeficientes de atenuação médio parecidos, com baixa discrepância, desvio padrão de 0,0004, e maiores que os mesmos encontrados para as amostras de concreto convencionais.

A tabela 6 apresenta os dados calculados para as amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e silício velho e novo.

**Tabela 6: Coeficiente de atenuação médio e meia espessura para amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e silício velho e novo**

Amostras	Coeficiente Médio (mm <sup>-1</sup> )	Erro $\Delta\mu$ (mm <sup>-1</sup> )	Espessura para diminuição do feixe em 50% (mm)
SSV <sub>1</sub>	0,02068	0.00002	33,52± 0,05
SSV <sub>2</sub>	0,02097	0.00002	33,05± 0,05
SSV <sub>3</sub>	0,02086	0.00002	33,23± 0,05
SSV <sub>4</sub>	0,02075	0.00002	33,40± 0,05
SSN <sub>5</sub>	0,02126	0.00002	32,60± 0,05
SSN <sub>6</sub>	0,02228	0.00002	31,11± 0,05
SSN <sub>7</sub>	0,02086	0.00002	33,23± 0,05
SSN <sub>8</sub>	0,02040	0.00002	33,98± 0,05

As amostras e resíduos siderúrgicos e silício velho não apresentou diferença significativa para as amostras com resíduos siderúrgicos e silício novo, quanto ao coeficiente de atenuação médio calculado para estas amostras. É possível notar que todas as amostras apresentaram coeficiente de atenuação médio parecidos, ou seja, com desvio padrão de 0,0006, sem que houvesse grande discrepância.

Os dados do coeficiente médio calculado e meia espessura de radiação para as amostras com resíduo siderúrgico e calcário velho e novo são apresentados na tabela 7.

**Tabela 7: Coeficiente de atenuação médio e meia espessura para amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e calcário velho e novo**

Amostras	Coeficiente Médio ( $\text{mm}^{-1}$ )	Erro $\Delta\mu$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	Espessura para diminuição do feixe em 50% (mm)
SCV <sub>1</sub>	0,02135	0.00002	32,47± 0,05
SCV <sub>2</sub>	0,02052	0.00002	33,78± 0,05
SCV <sub>3</sub>	0,02126	0.00002	32,60± 0,05
SCV <sub>4</sub>	0,02193	0.00002	31,61± 0,05
SCN <sub>5</sub>	0,02090	0.00002	33,16± 0,05
SCN <sub>6</sub>	0,02118	0.00002	32,73± 0,05
SCN <sub>7</sub>	0,02127	0.00002	32,59± 0,05
SCN <sub>8</sub>	0,02113	0.00002	32,80± 0,05

Todas as amostras da tabela acima apresentaram o mesmo comportamento quanto ao coeficiente de atenuação. Não houve diferença significativa entre as amostras de concreto e resíduo siderúrgico e calcário velho e amostras com resíduo siderúrgico e calcário novo. O desvio padrão calculado para este grupo de amostras foi de 0,0004. Tais amostras apresentaram coeficientes de atenuação ligeiramente maior que as amostras com resíduo siderúrgico e silício.

Por fim, a tabela 8 apresenta os resultados obtidos referentes às amostras e agregados baríticos.

**Tabela 8: Coeficiente de atenuação médio e meia espessura para amostras de concreto e agregados baríticos**

Amostras	Coeficiente Médio ( $\text{mm}^{-1}$ )	Erro $\Delta\mu$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	Espessura para diminuição do feixe em 50% (mm)
BA <sub>1</sub>	0,03306	0.00002	20,97± 0,05

BA <sub>2</sub>	0,02148	0.00002	32,27± 0,05
BA <sub>3</sub>	0,02448	0.00002	28,31± 0,05
BA <sub>4</sub>	0,02861	0.00002	24,23± 0,05
BA <sub>5</sub>	0,03008	0.00002	23,04± 0,05
BA <sub>6</sub>	0,03020	0.00002	22,95± 0,05
BA <sub>7</sub>	0,02578	0.00002	26,89± 0,05
BA <sub>8</sub>	0,02663	0.00002	26,03± 0,05

Pode ser verificado que a amostra de código BA<sub>2</sub>, réplica da amostra BA<sub>1</sub> apresentaram grande diferença no coeficiente de atenuação médio calculado, representando um resultado não esperado, tendo em vista que teoricamente, uma amostra réplica deveria obter o mesmo comportamento de uma amostra original. As amostras BA 1, 5 e 6 apresentaram um coeficiente de atenuação médio maior que as demais, destacando-se quanto à meia espessura. Apesar de uma maior discrepância nos coeficientes calculados para este grupo de amostra, tendo em vista que essas amostras apresentaram o maior desvio padrão, 0,004, pôde ser verificado que tais amostras são as que possuem o maior coeficiente médio de atenuação, e conseqüentemente a menor meia espessura. Isso se deve ao fato de que a amostra é composta por Bário, o qual possui um número atômico elevado, o que deixa esse grupo de amostras com uma maior densidade, e conseqüentemente uma maior atenuação quando comparada aos outros grupos de amostras analisadas. Outro fato que é possível destacar quanto a variabilidade no coeficiente de atenuação deste grupo de amostras, é que estas não são homogêneas.

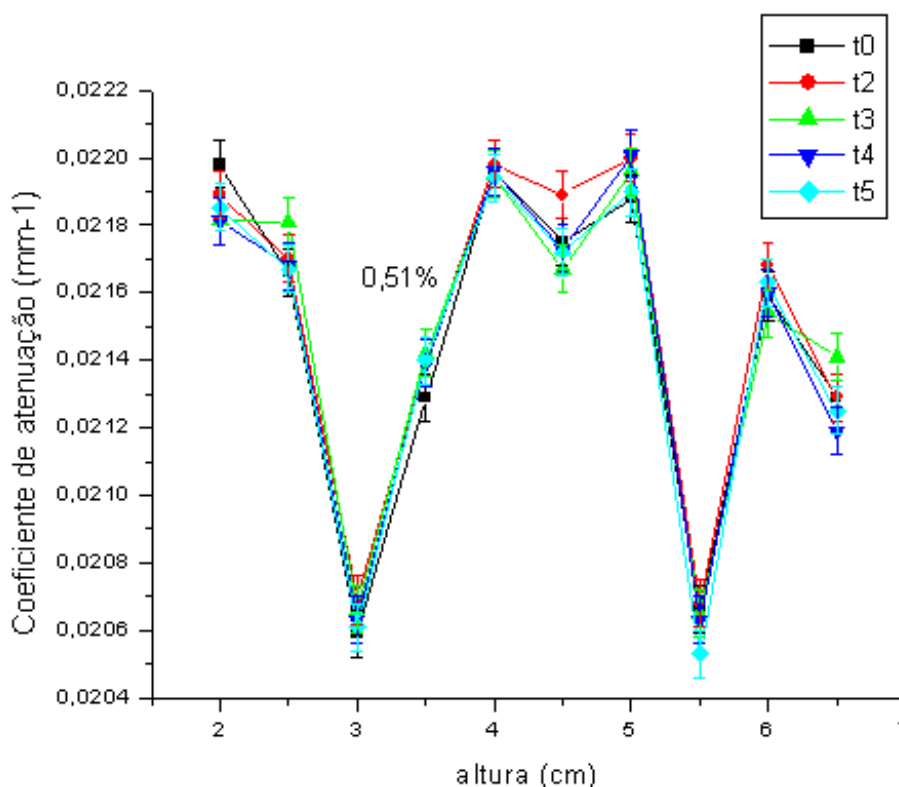
Para a atenuação total de um feixe de radiação, seriam necessárias dez meias espessuras, assim, quando levamos em conta uma parede com dimensões de 8 m<sup>2</sup>, o volume de concreto contendo agregados baríticos a ser utilizado seria de aproximadamente 0,8m<sup>3</sup> metro cúbico menor que a mesma parede confeccionada por concreto convencional, e 0,6m<sup>3</sup> menor que a mesma parede confeccionada por todos os outros grupo de amostras de concreto analisadas.

## 6.2 COMPORTAMENTO DA FRENTE DE MOLHAMENTO

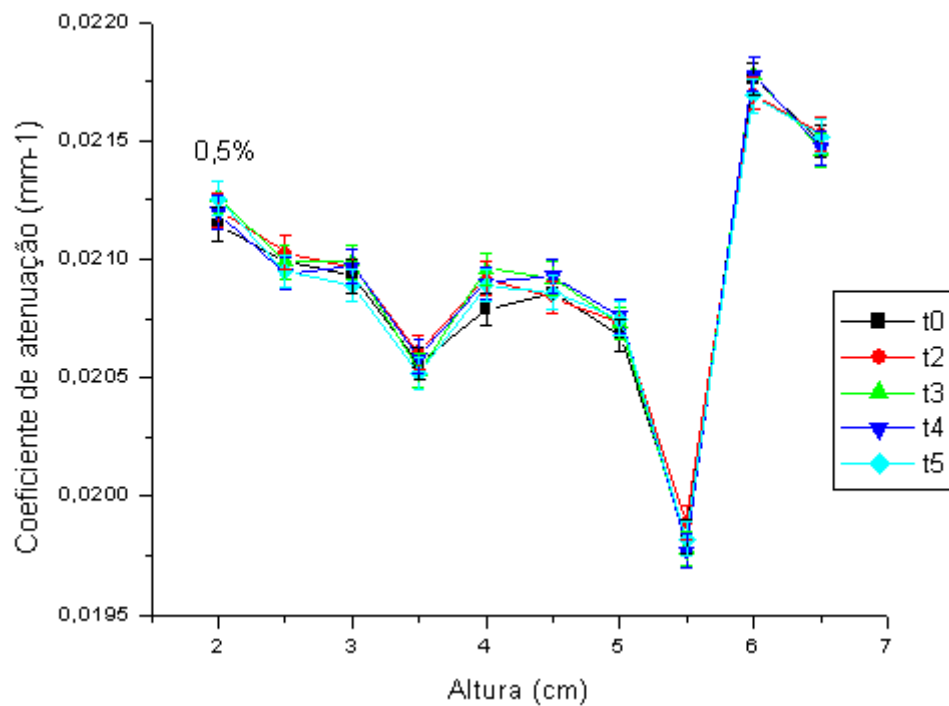
O software Samara V\_200 continuou sendo utilizado aqui para a visualização da radiação transmitida pela amostra. Além disso, foi utilizado o software Microcal Origin 6.0 para a construção dos gráficos, a fim de que pudéssemos caracterizar o comportamento da frente de molhamento das amostras analisadas.

A porcentagem indicada acima de alguns pontos representa a máxima variação atingida pelo coeficiente de atenuação em porcentagem, tendo como referência o coeficiente de atenuação calculado com amostra ainda seca. Os pontos em que não aparece o valor percentual de variação significam que não houve variação significativa do coeficiente de atenuação no decorrer do tempo para o ponto medido, ou seja, a variação ocorrida está dentro do desvio para cada coeficiente de atenuação calculado.

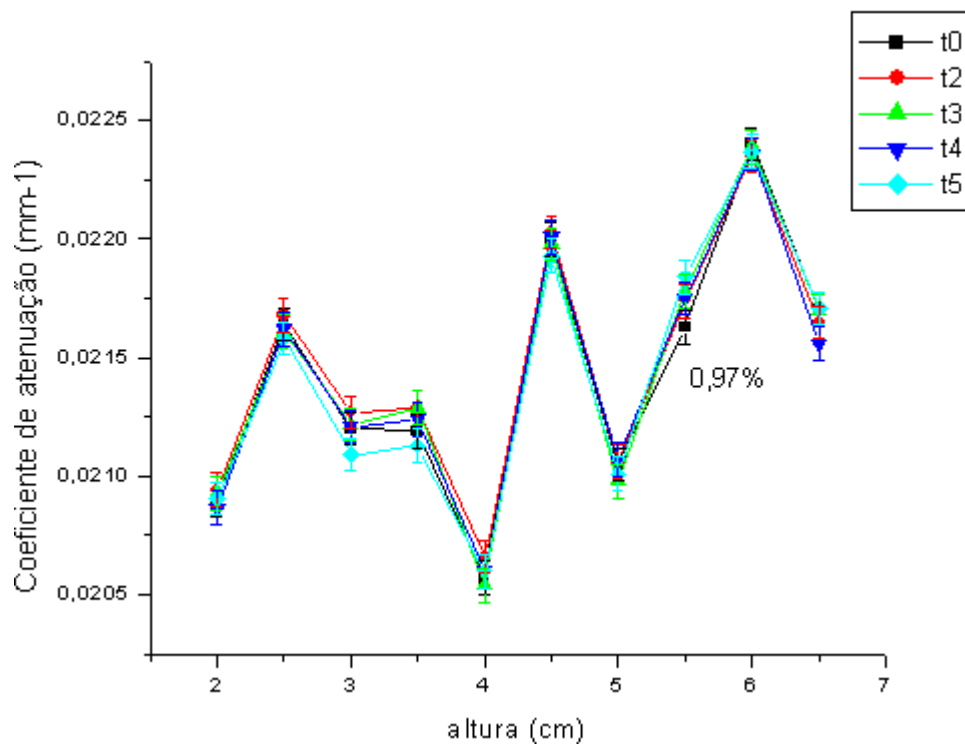
As amostras de concreto de referência ou convencionais escolhidas foram as amostras de códigos: Ref<sub>1</sub>, Ref<sub>2</sub>, Ref<sub>5</sub> e Ref<sub>6</sub>. Sendo que as amostras de número impar representam amostras originais e as de número par representam réplicas. No caso das amostras de referência foram escolhidas duas amostras originais e suas respectivas réplicas. Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical da amostra de referência de código Ref<sub>1</sub> analisada no decorrer do tempo.



**Gráfico 1: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra de referência código Ref<sub>1</sub>.**



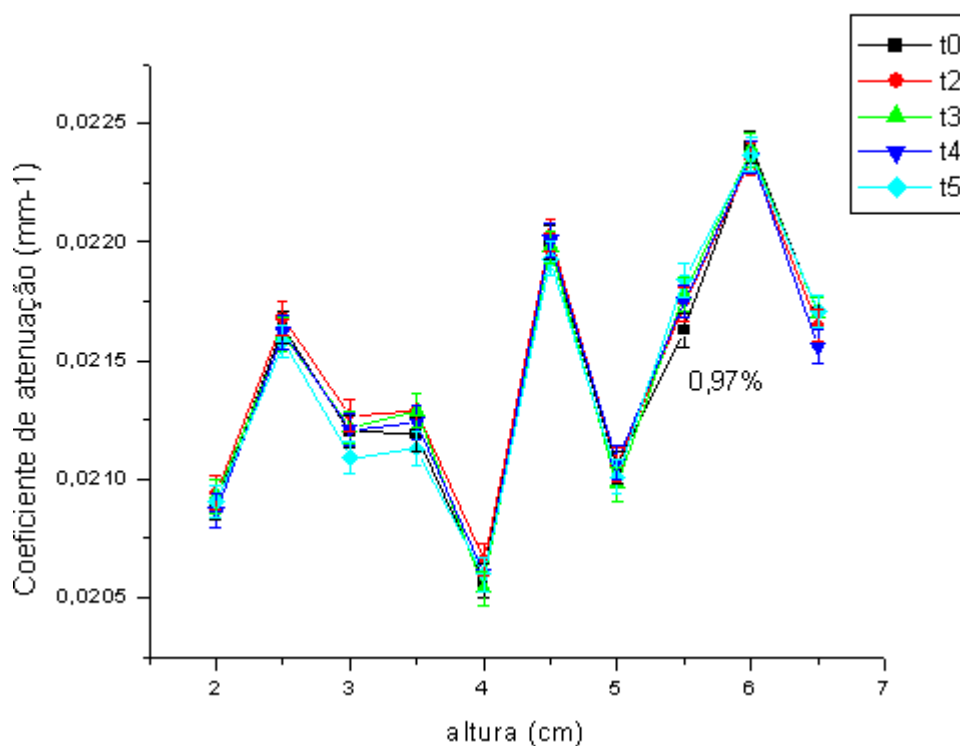
**Gráfico 2: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra de referência código Ref<sub>1</sub>.**



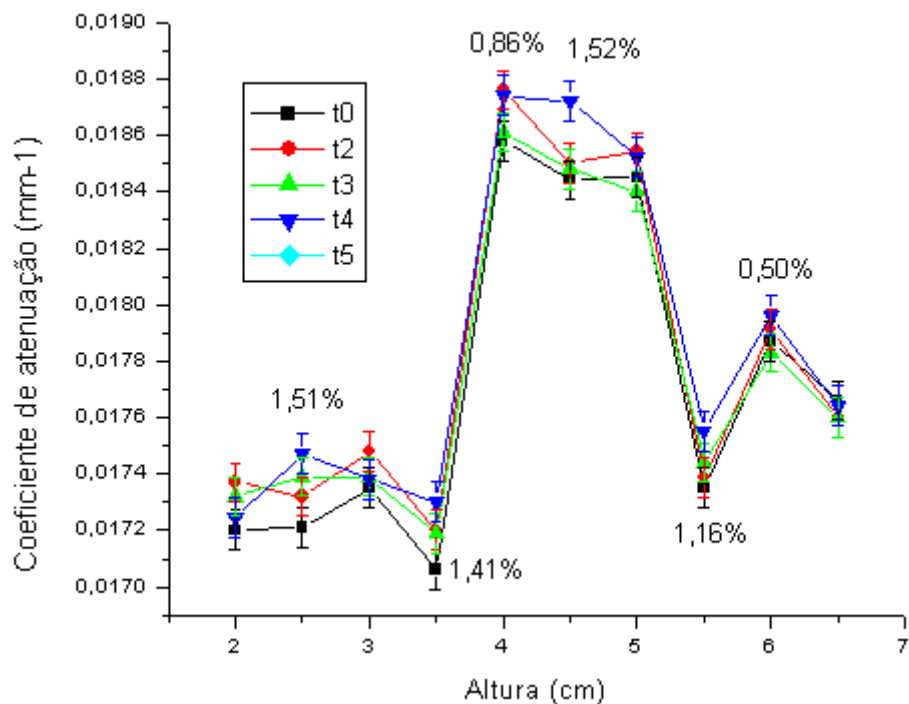
**Gráfico 3: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra de referência código Ref<sub>1</sub>.**

A amostra de referência de código Ref<sub>1</sub> não apresentou variação significativa do coeficiente de atenuação no período de cinco horas, período este em que a amostra estava inserida no suporte com água. Embora as colunas escolhidas apresentem pequenas variações em seus coeficientes de atenuação calculadas para cada ponto, em se tratando de caracterizá-las quanto ao comportamento da frente de molhamento no curto período de medidas, foi observado que as colunas apresentaram o mesmo comportamento.

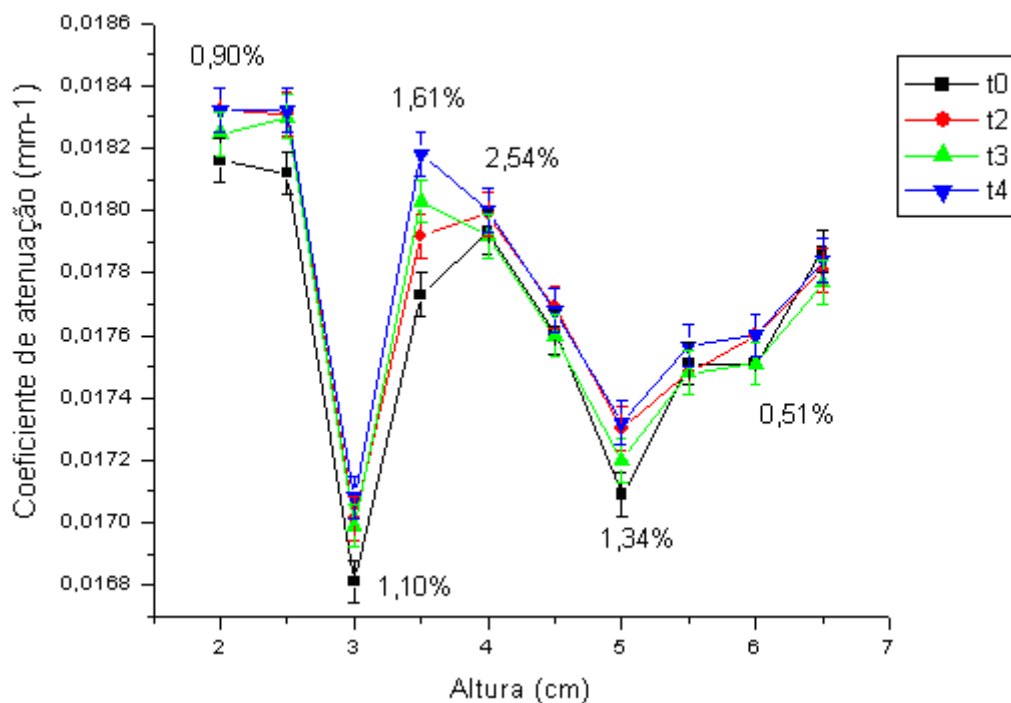
Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical da amostra de referência de código Ref<sub>2</sub> analisada no decorrer do tempo.



**Gráfico 4: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra de referência código Ref<sub>2</sub>.**



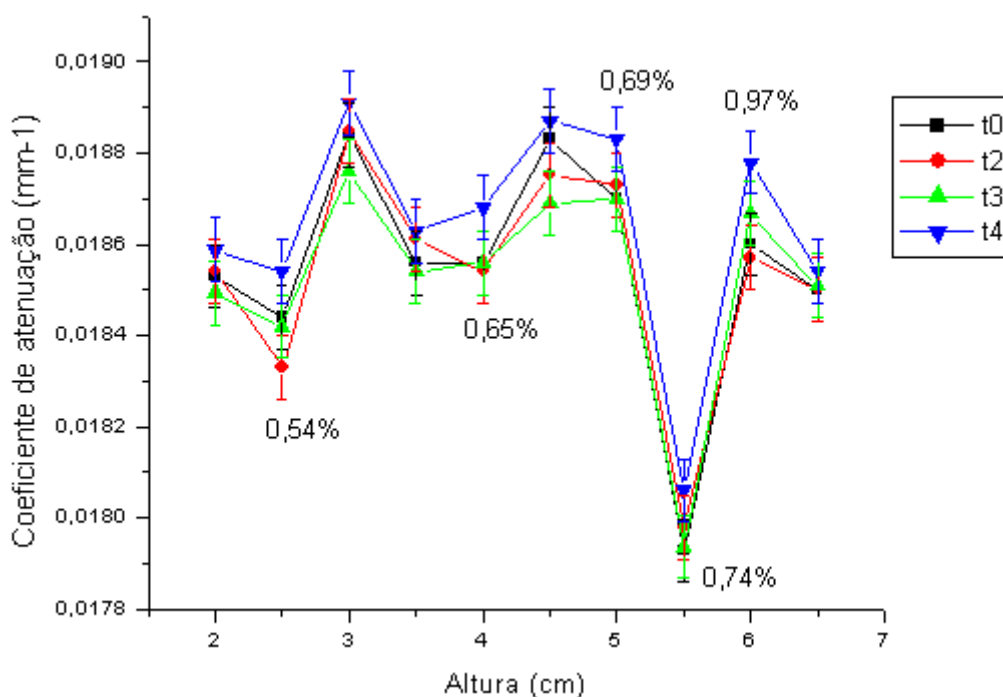
**Gráfico 5: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra de referência código Ref<sub>2</sub>.**



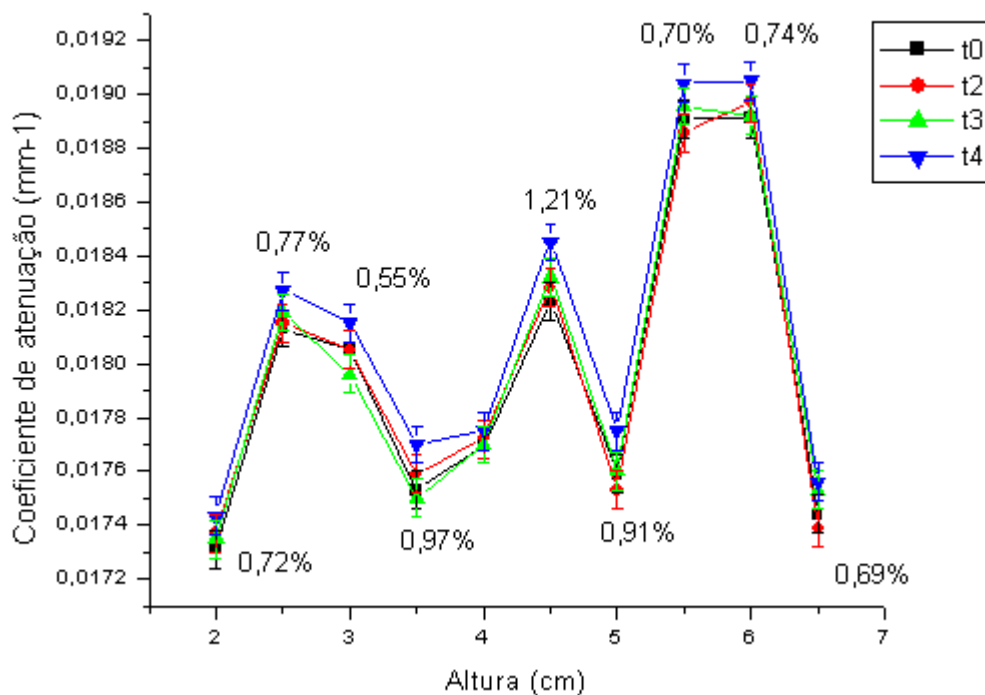
**Gráfico 6: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra de referência código Ref<sub>2</sub>.**

Mesmo não apresentando grandes variações do coeficiente de atenuação em todos os pontos calculados, a amostra de referência de código

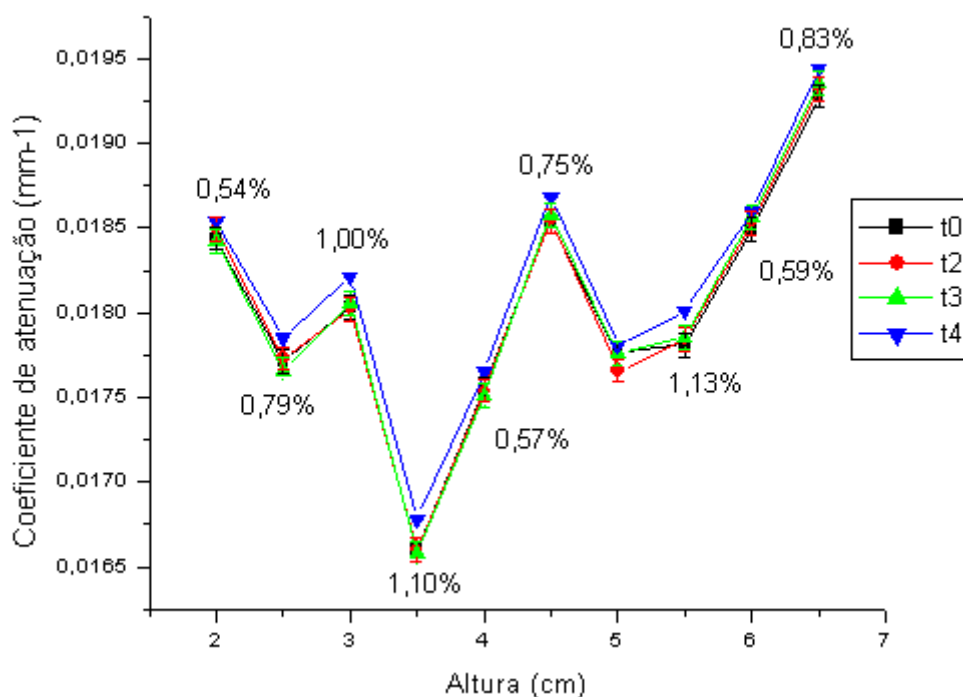
Ref<sub>2</sub> apresentou uma variação maior quando levamos em conta a amostra Ref<sub>1</sub>. As três colunas verticais estão em sintonia, apresentando praticamente o mesmo comportamento, salvo um ponto da coluna do extremo esquerdo obtendo destaque quanto à variação do coeficiente, com um máximo de 2,54%, em relação ao coeficiente de atenuação calculado com a amostra ainda seca. Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical da amostra de referência de código Ref<sub>5</sub> analisada no decorrer do tempo.



**Gráfico 7: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra de referência código Ref<sub>5</sub>.**



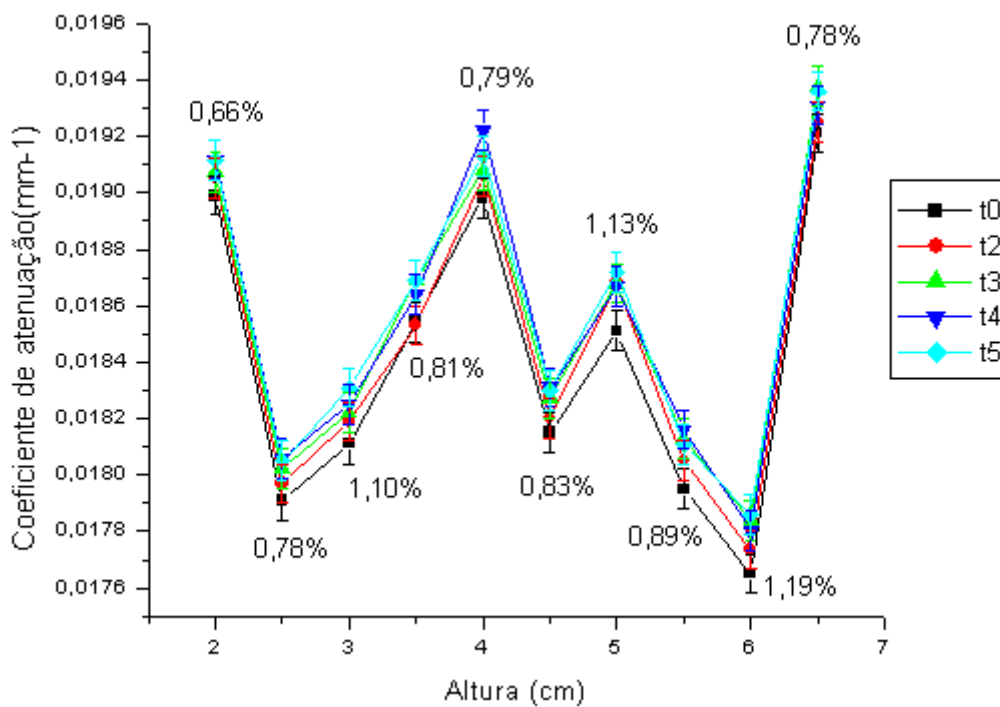
**Gráfico 8: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra de referência código Ref<sub>5</sub>.**



**Gráfico 9: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra de referência código Ref<sub>5</sub>.**

Apesar de ter uma variação do coeficiente de atenuação por praticamente toda a amostra, a amostra de referência Ref<sub>5</sub> obteve variação máxima de 1,21%, em relação ao coeficiente de atenuação calculado com

amostra ainda seca, em um ponto da coluna central. Por fim, as três colunas apresentaram praticamente o mesmo comportamento. Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical da amostra de referência de código Ref<sub>6</sub> analisada no decorrer do tempo.



**Gráfico 10: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra de referência código Ref<sub>6</sub>.**

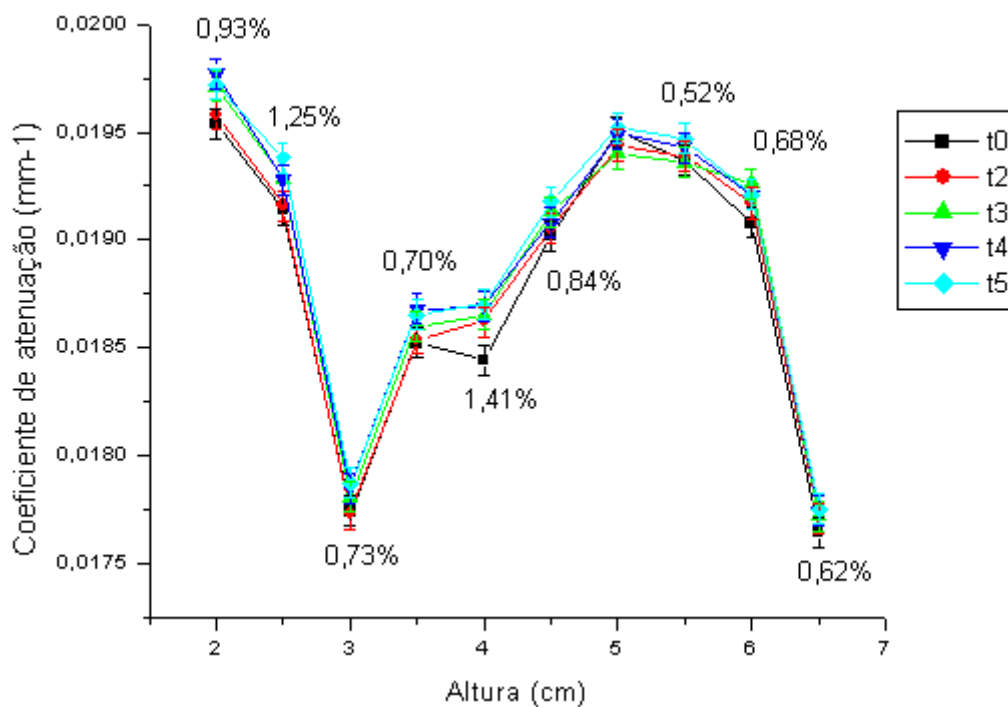


Gráfico 11: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra de referência código Ref<sub>6</sub>.

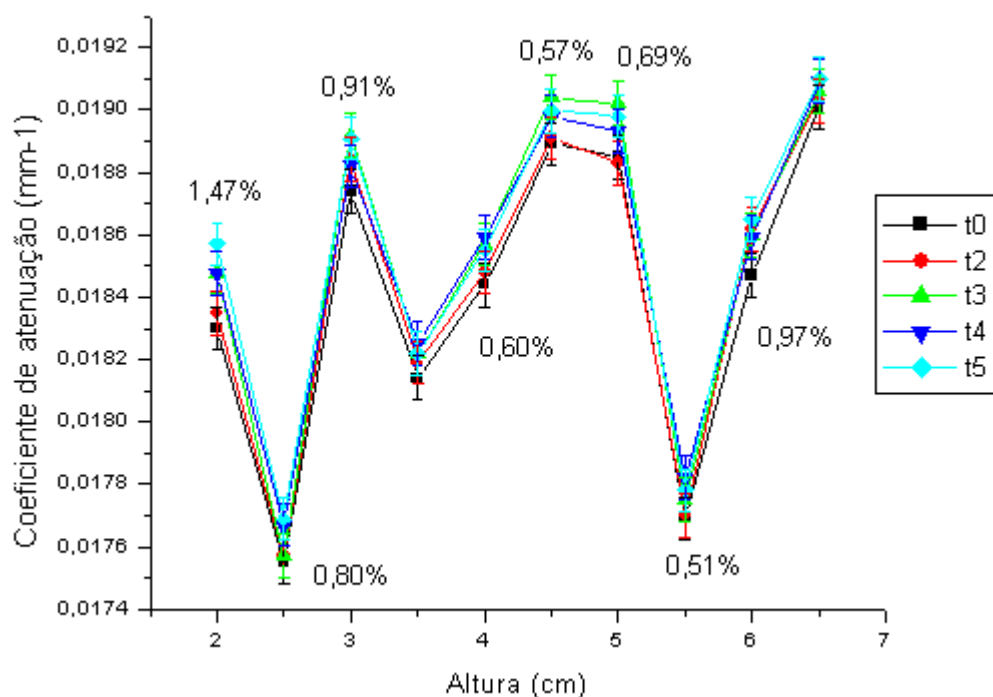
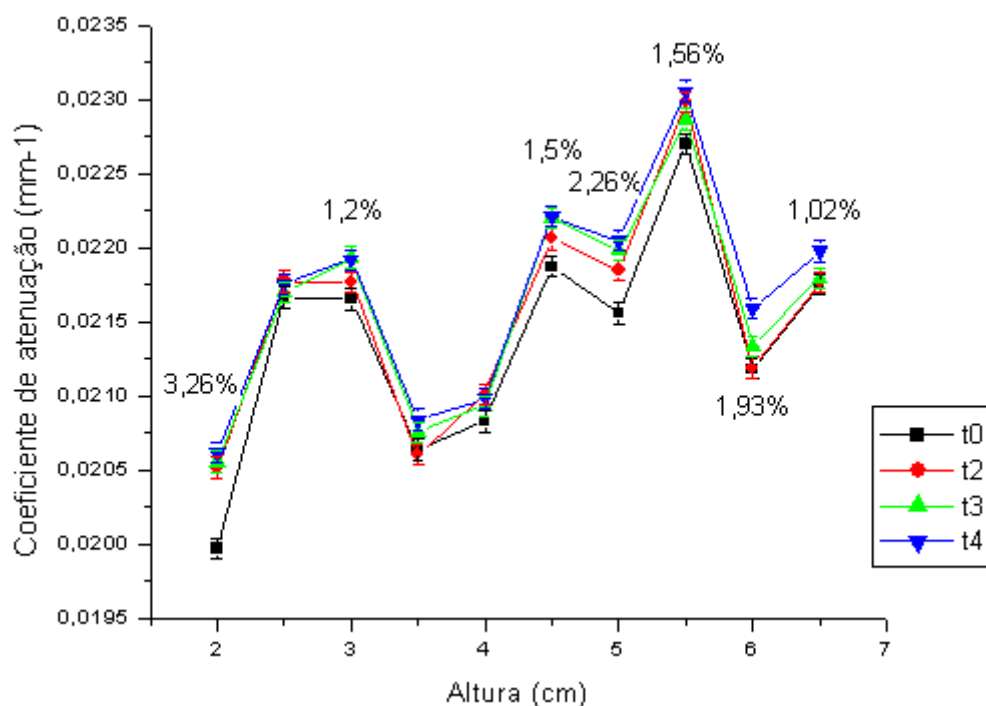


Gráfico 12: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra de referência código Ref<sub>6</sub>.

A amostra Ref<sub>6</sub> apresentou praticamente o mesmo comportamento da amostra Ref<sub>5</sub>. Em geral, as amostras de referência se comportaram da mesma

forma, não obtendo variações muito maiores que 1% em relação ao coeficiente de atenuação calculado com as amostras ainda secas.

As amostras de concreto e resíduos siderúrgicos e areia sílica analisadas foram as amostras de código SAS<sub>1</sub> e SAS<sub>5</sub>. Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical das amostras de concreto e resíduos siderúrgicos e areia sílica analisadas no decorrer do tempo.



**Gráfico 13: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra siderúrgica e areia sílica código SAS<sub>1</sub>.**

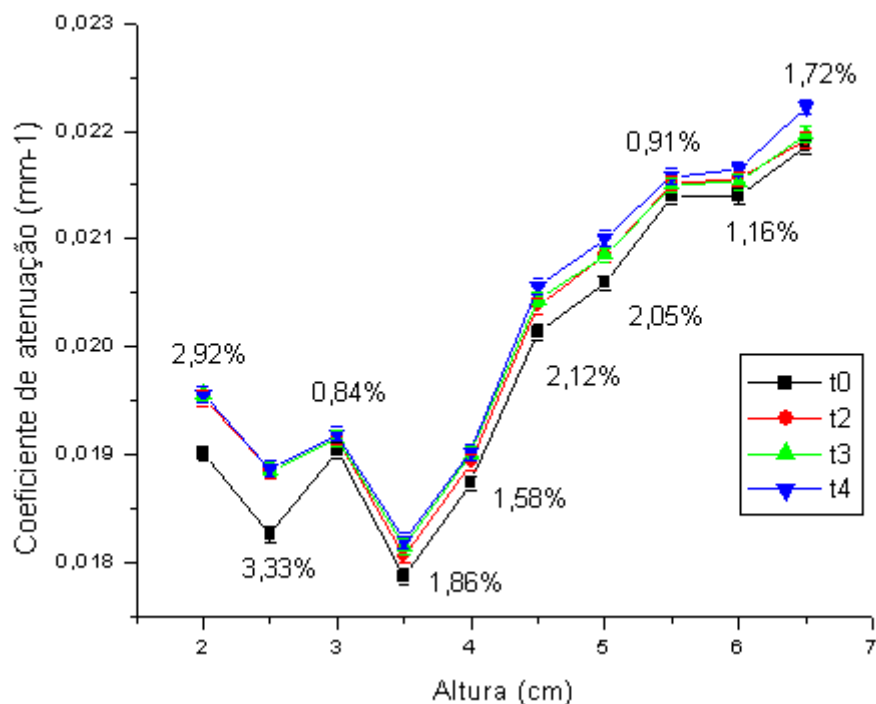


Gráfico 14: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra Siderúrgica e areia sílica código SAS<sub>1</sub>.

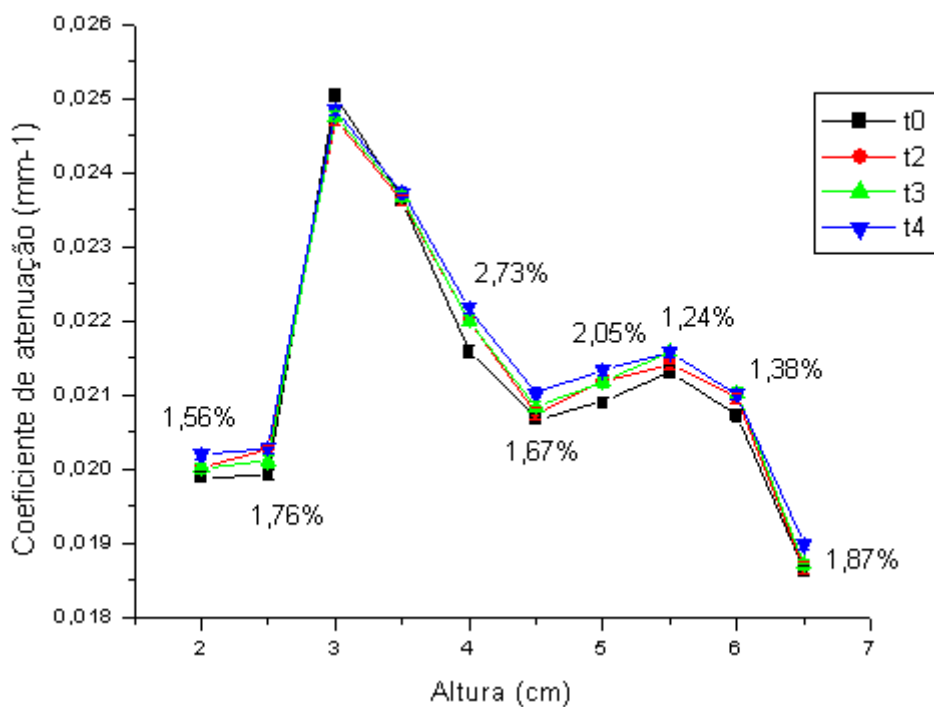


Gráfico 15: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra siderúrgica e areia Sílica código SAS<sub>1</sub>.

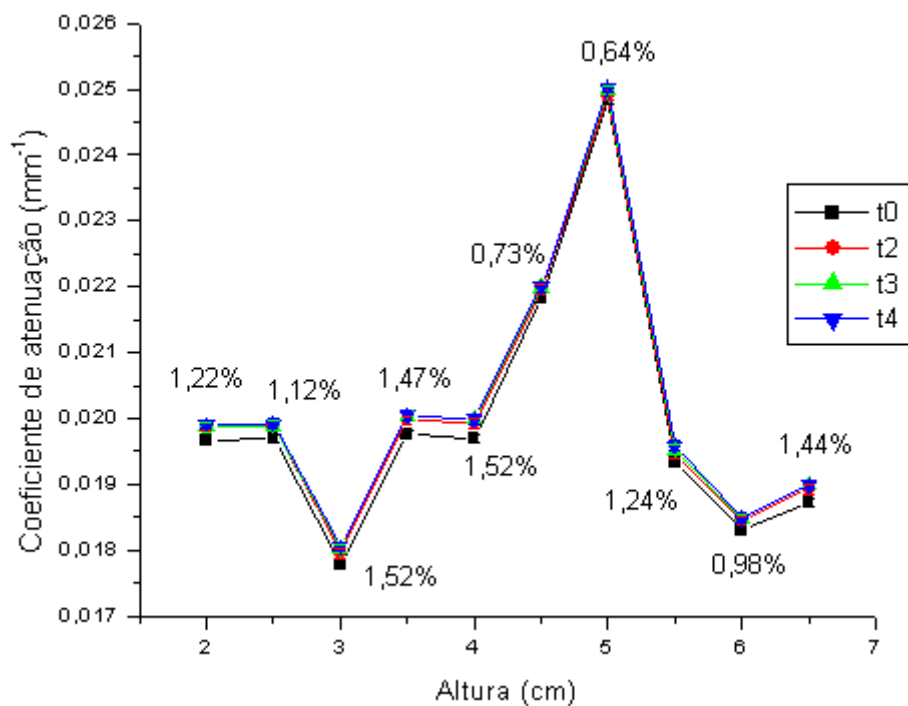


Gráfico 16: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra siderúrgica e areia Silícia código SAS<sub>5</sub>.

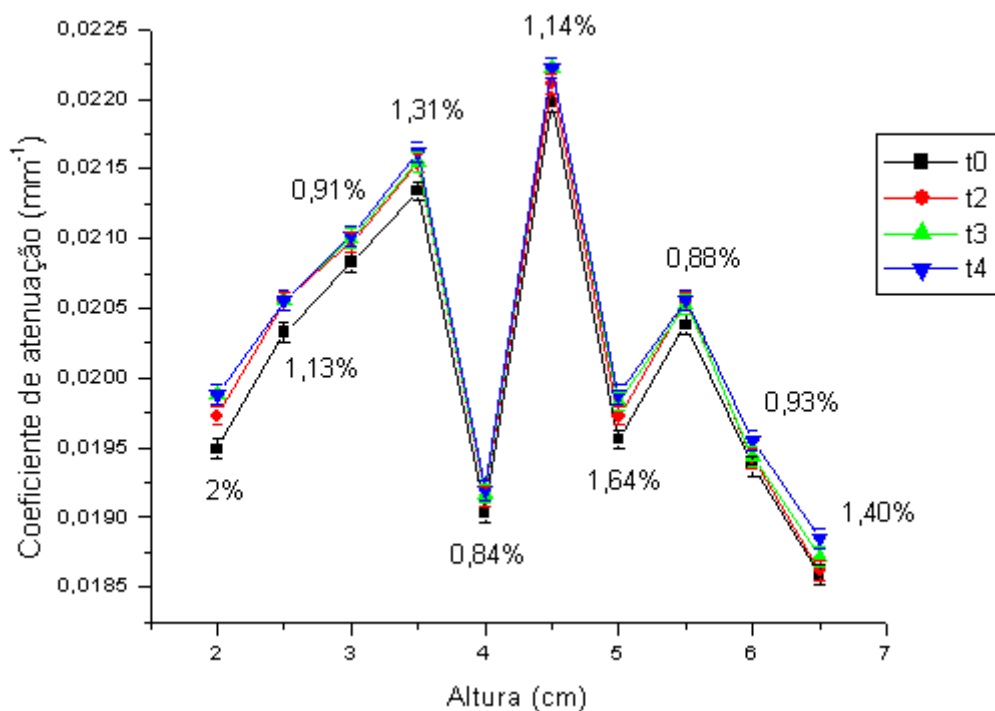
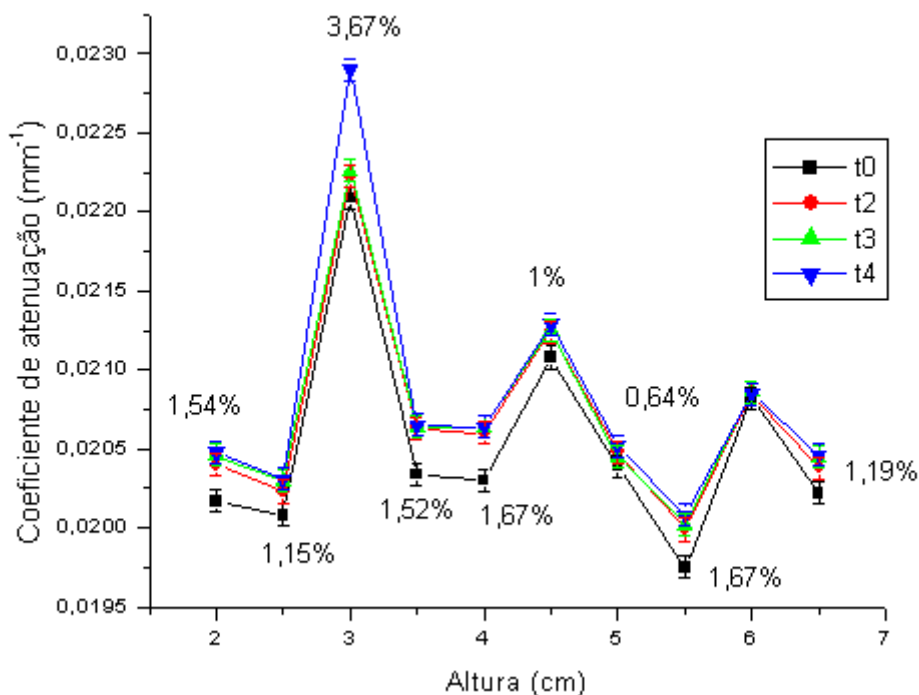


Gráfico 17: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra siderúrgica e areia Silícia código SAS<sub>5</sub>.



**Gráfico 18: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra siderúrgica e areia sílica código SAS<sub>5</sub>.**

Analisando de forma geral, a amostra siderúrgica e areia sílica apresentou uma variação máxima do coeficiente de atenuação, em relação ao coeficiente de atenuação calculado com a amostra ainda seca, muito maior que a mesma variação para as amostras de referência. Alguns pontos chegaram a ter essa variação aproximada em 3,67%, o que significa o triplo do valor em termos de variação quando se compara as amostras dos dois grupos, o que indica uma maior capilaridade neste grupo de amostras.

A coluna do extremo esquerdo da amostra de código SAS<sub>1</sub> obteve uma menor variação dentre as colunas analisadas para esta amostra. O que pode indicar caminhos preferenciais nos capilares das outras colunas, tendo em vista que, tubos capilares mais finos significam maior força de adesão entre as moléculas de água e paredes do tubo, e um caminho preferencial para a água.

As amostras de concreto de resíduos siderúrgico e areia calcária escolhidas foram as amostras de códigos: SAC<sub>2</sub>, SAC<sub>3</sub>, SAC<sub>4</sub> e SAC<sub>7</sub>. Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical da amostra de código SAC<sub>2</sub> analisada no decorrer do tempo.

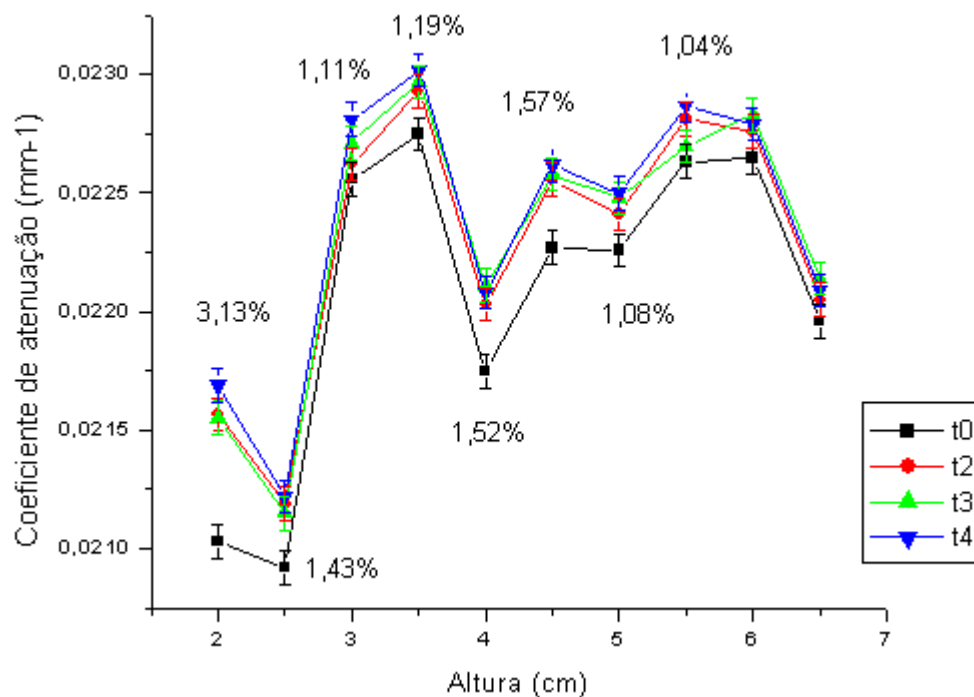


Gráfico 19: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra siderúrgica e areia calcária código SAC<sub>2</sub>.

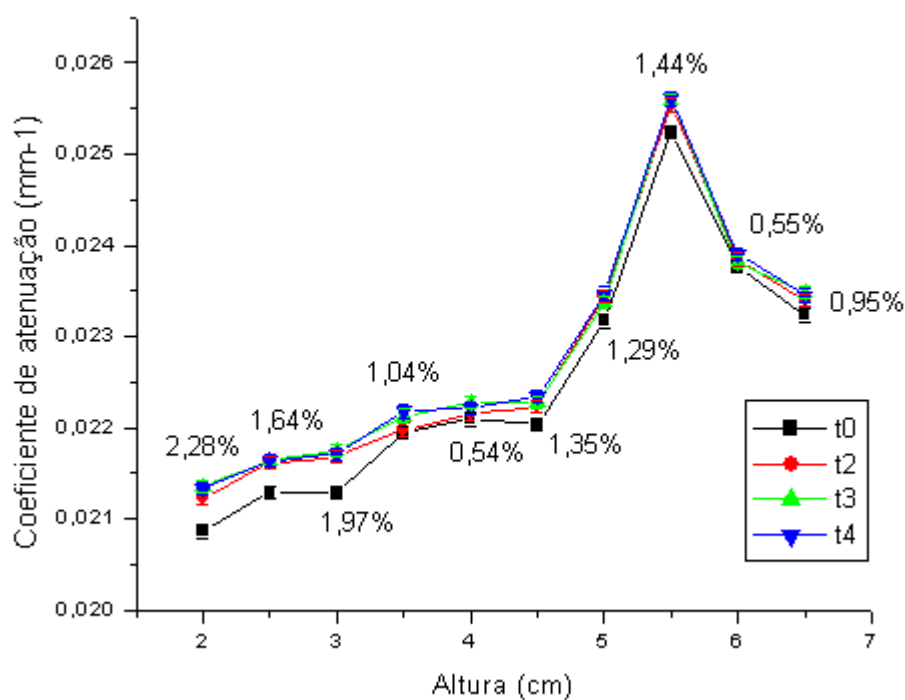
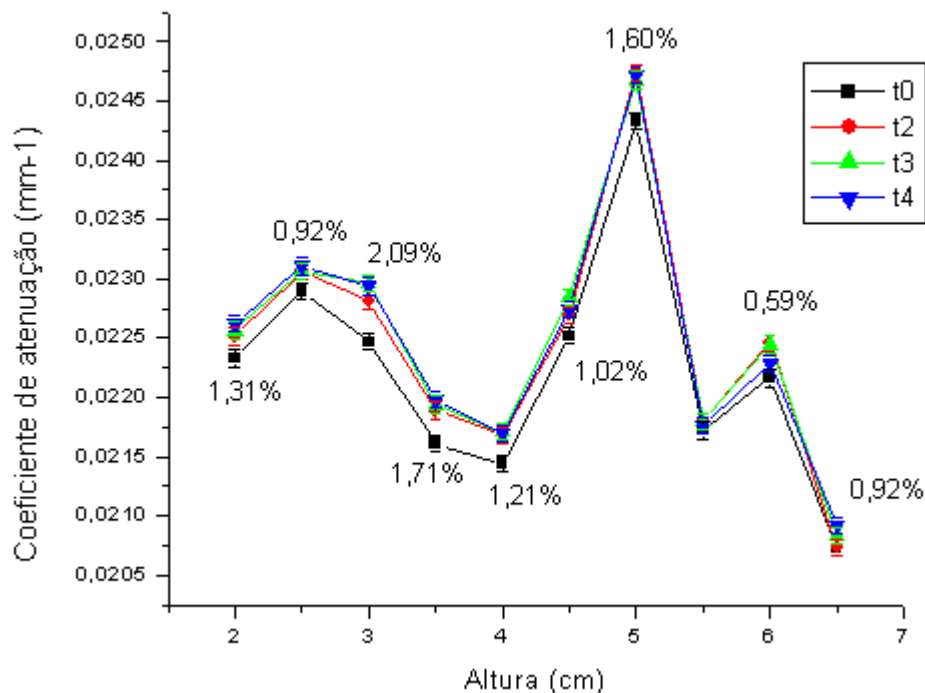


Gráfico 20: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra siderúrgica e areia calcária código SAC<sub>2</sub>.



**Gráfico 21: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra siderúrgica e areia calcária código SAC<sub>2</sub>.**

É possível observar um aumento do coeficiente de atenuação, em relação ao coeficiente de atenuação calculado com a amostra ainda seca, como uma variação mais significativa nos pontos mais baixos da amostra. O que pode significar que com um tempo maior de exposição teríamos variações parecidas nos pontos mais altos da amostra. Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical da amostra de código SAC<sub>3</sub> analisada no decorrer do tempo.

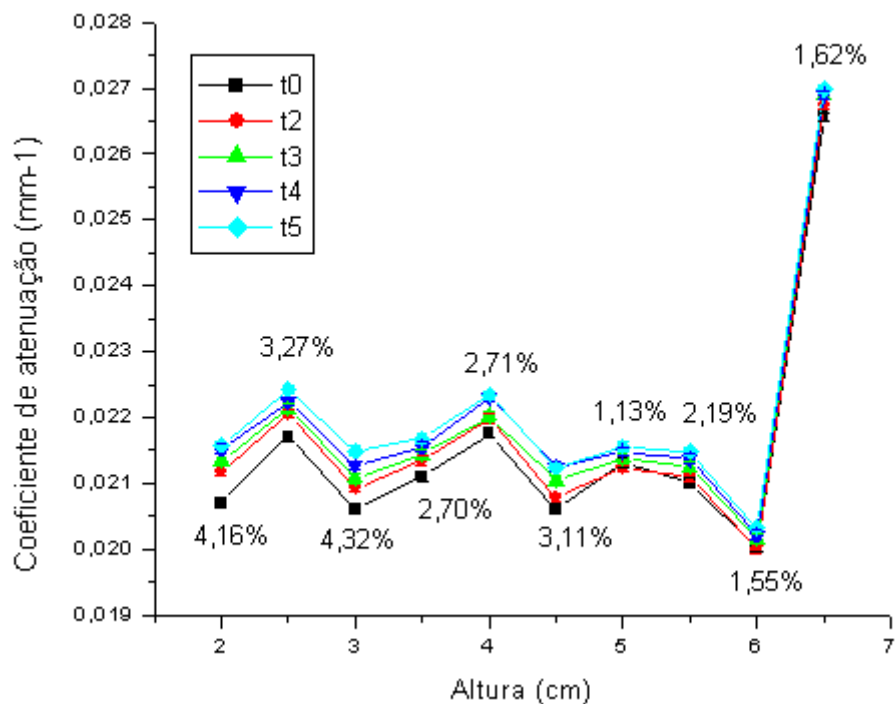


Gráfico 22: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra siderúrgica e areia calcária código SAC<sub>3</sub>.

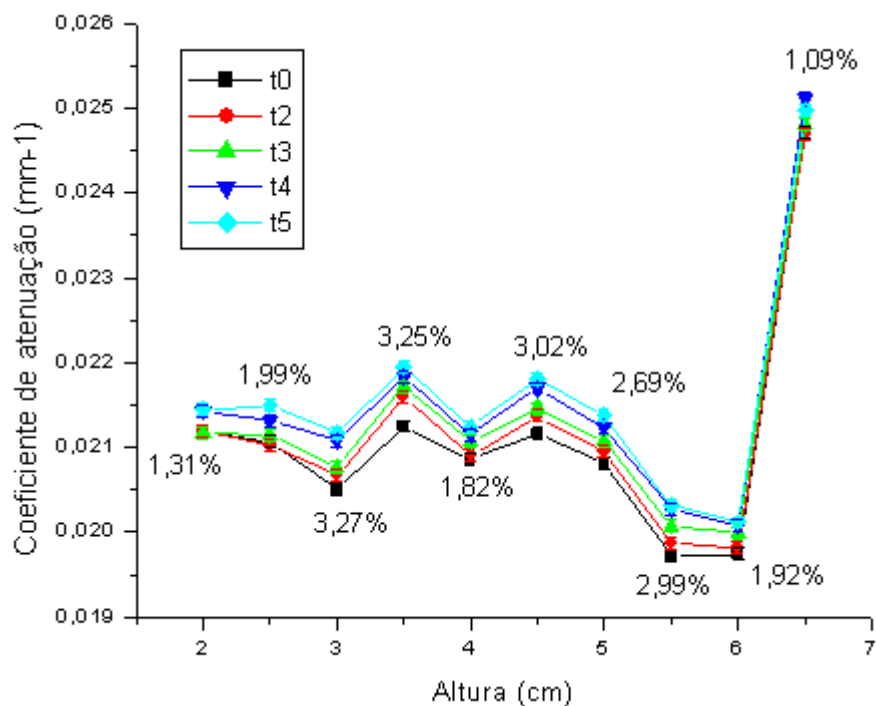
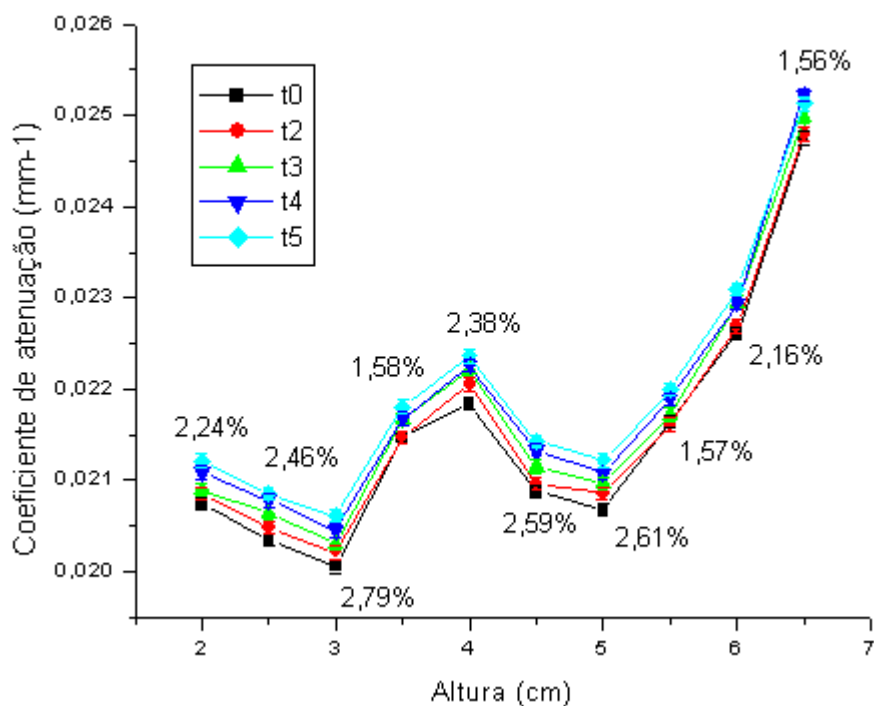
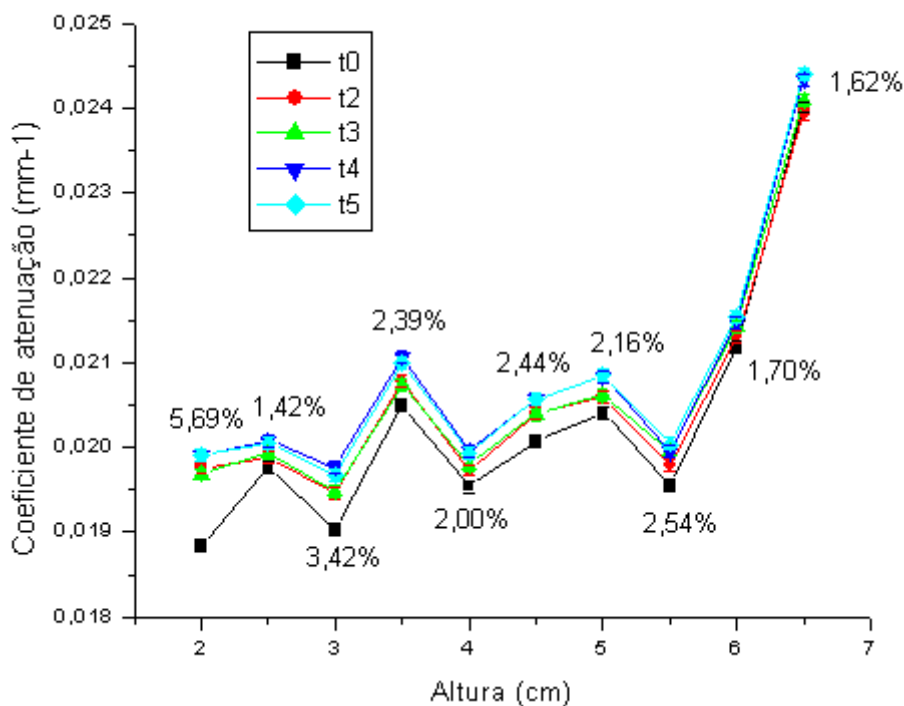


Gráfico 23: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra siderúrgica e areia calcária código SAC<sub>3</sub>.



**Gráfico 24: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra siderúrgica e areia calcária código SAC<sub>3</sub>.**

Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical da amostra de código SAC<sub>4</sub> analisada no decorrer do tempo. Tal amostra é réplica da amostra original SAC<sub>3</sub>.



**Gráfico 25: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra siderúrgica e areia calcária código SAC<sub>4</sub>.**

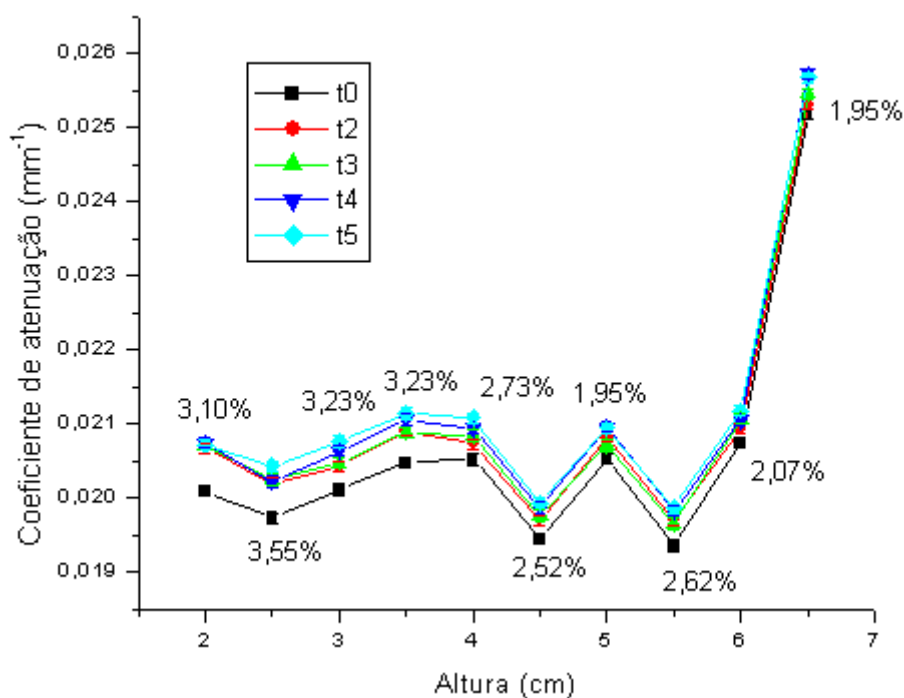


Gráfico 26: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra siderúrgica e areia calcária código SAC<sub>4</sub>.

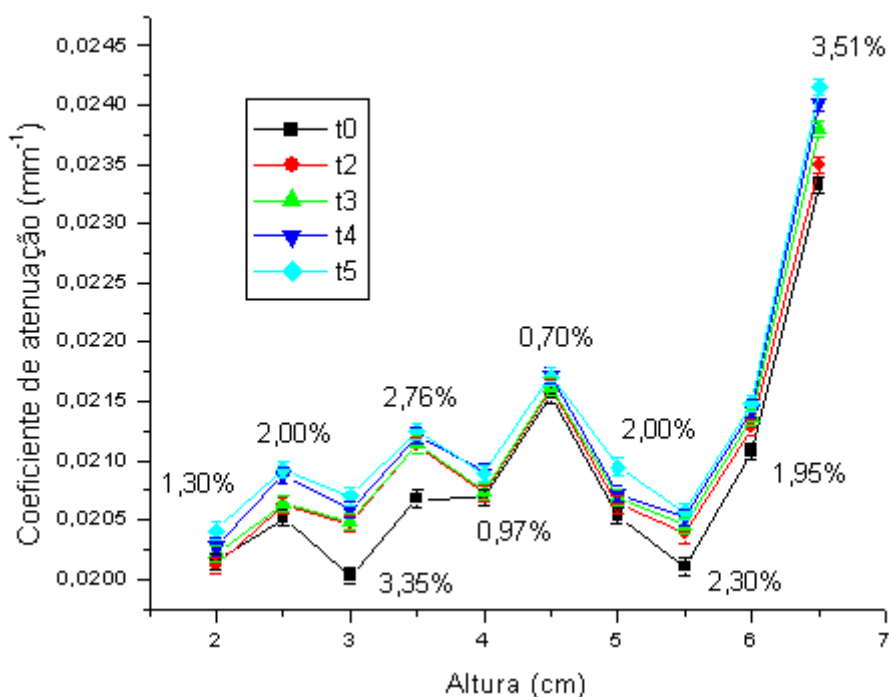


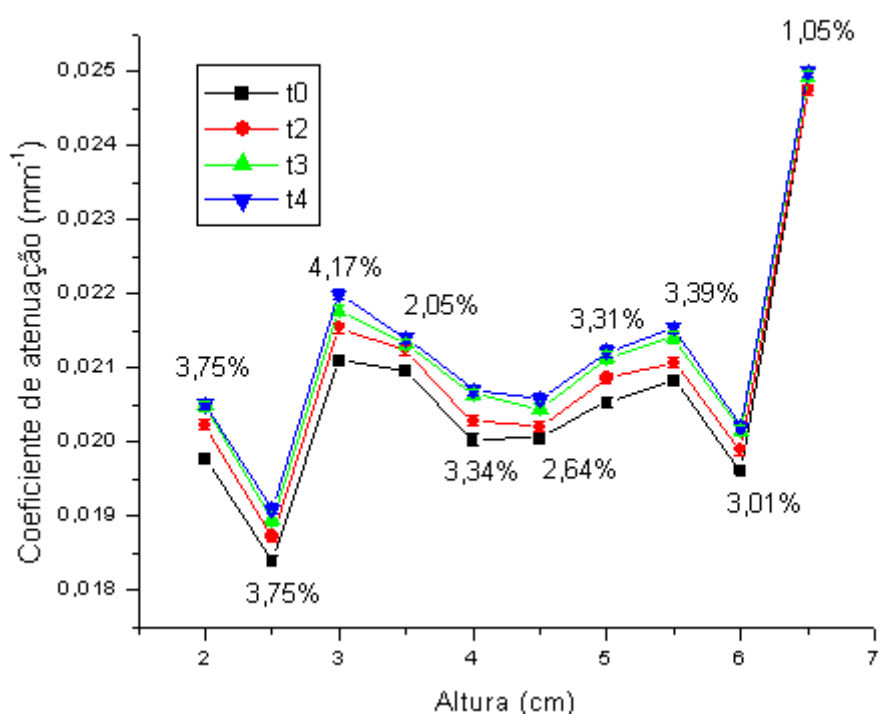
Gráfico 27: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra siderúrgica e areia calcária código SAC<sub>4</sub>.

A amostra de código SAC<sub>4</sub> teve comportamento semelhante à amostra SAC<sub>3</sub>, ou seja, amostra original e réplica apresentaram o mesmo

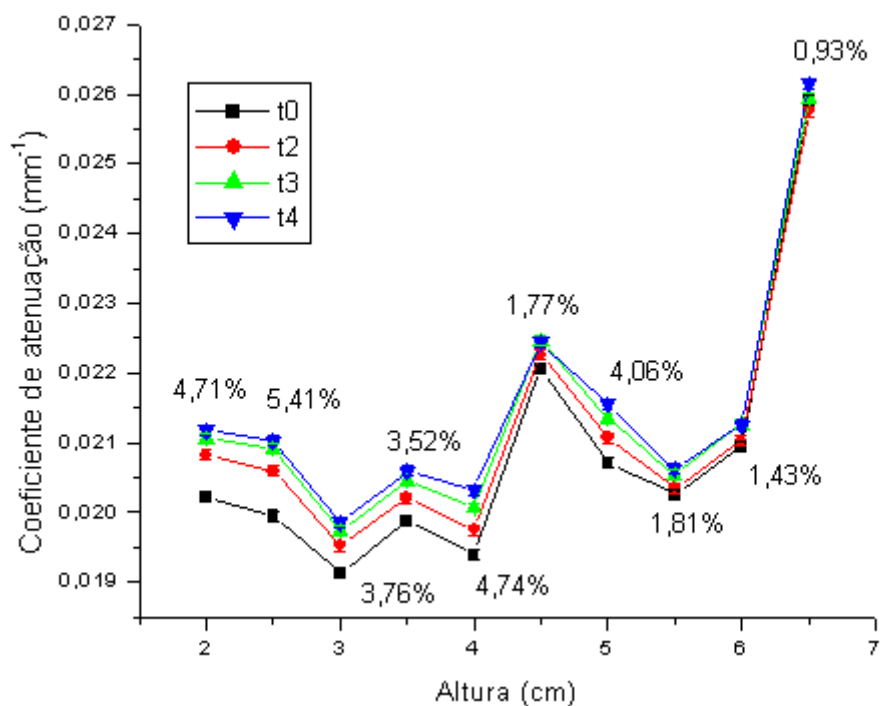
comportamento no que diz respeito a coeficiente de atenuação e sua variação quanto à frente de molhamento.

A coluna do extremo esquerdo da amostra SAC<sub>4</sub> obteve uma menor variação dentre as colunas analisadas. O que, mais uma vez, pode nos indicar caminhos preferenciais nos capilares das outras colunas, tendo em vista que, essa afirmação poderá ser comprovada com um tempo de aquisição de dados maior.

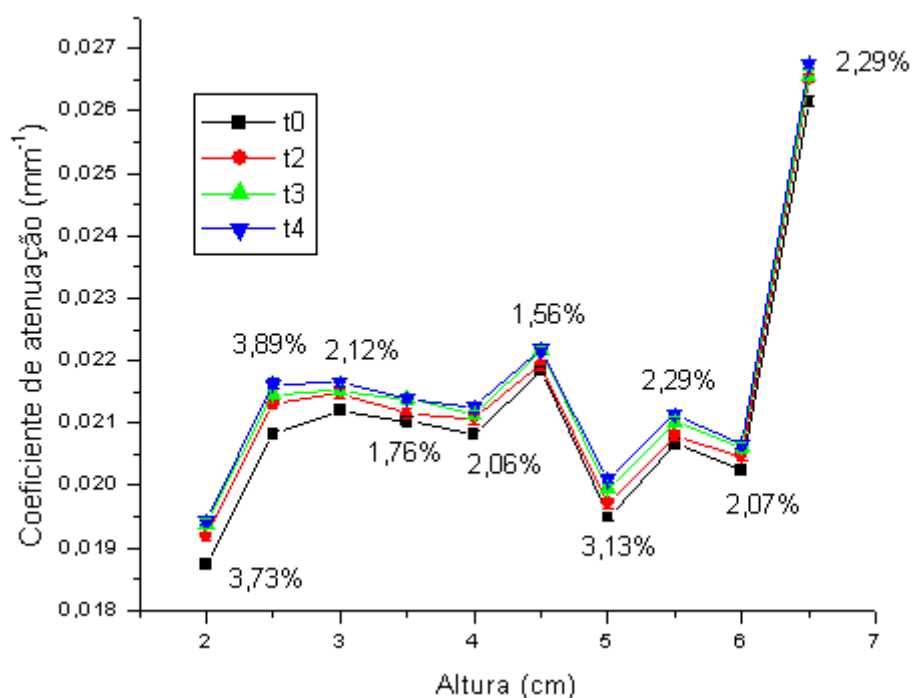
Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical da amostra de código SAC<sub>7</sub> analisada no decorrer do tempo.



**Gráfico 28: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra siderúrgica e areia calcária código SAC<sub>7</sub>.**



**Gráfico 29: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra siderúrgica e areia calcária código SAC<sub>7</sub>.**



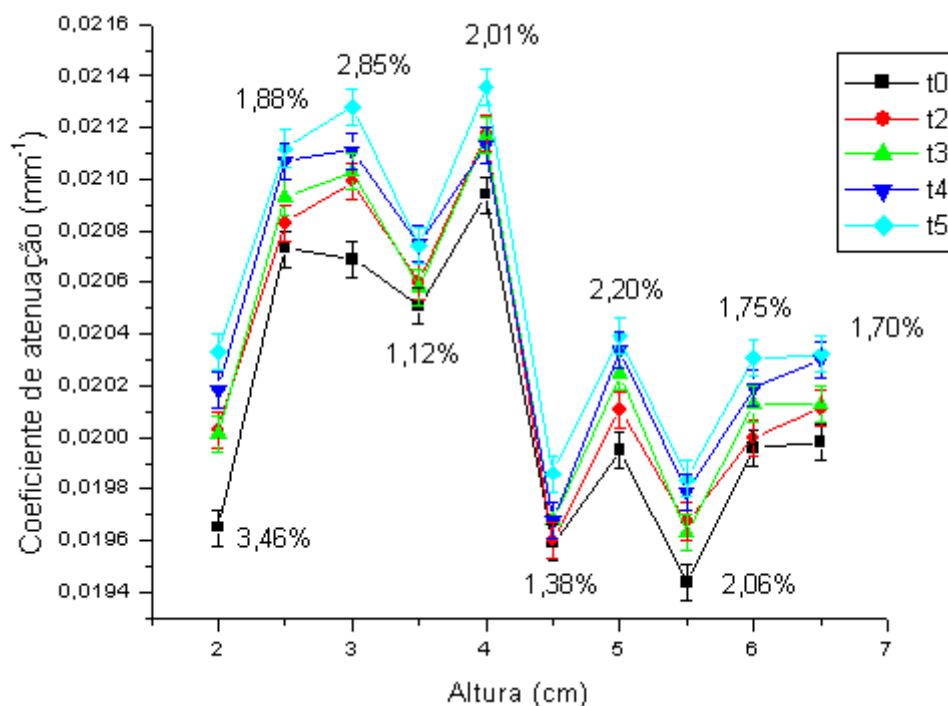
**Gráfico 30: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra siderúrgica e areia calcária código SAC<sub>7</sub>.**

Analisando de forma geral, amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e areia calcária apresentaram comportamentos semelhantes quanto à frente de molhamento, com a exceção da amostra SAC<sub>2</sub>, que teve

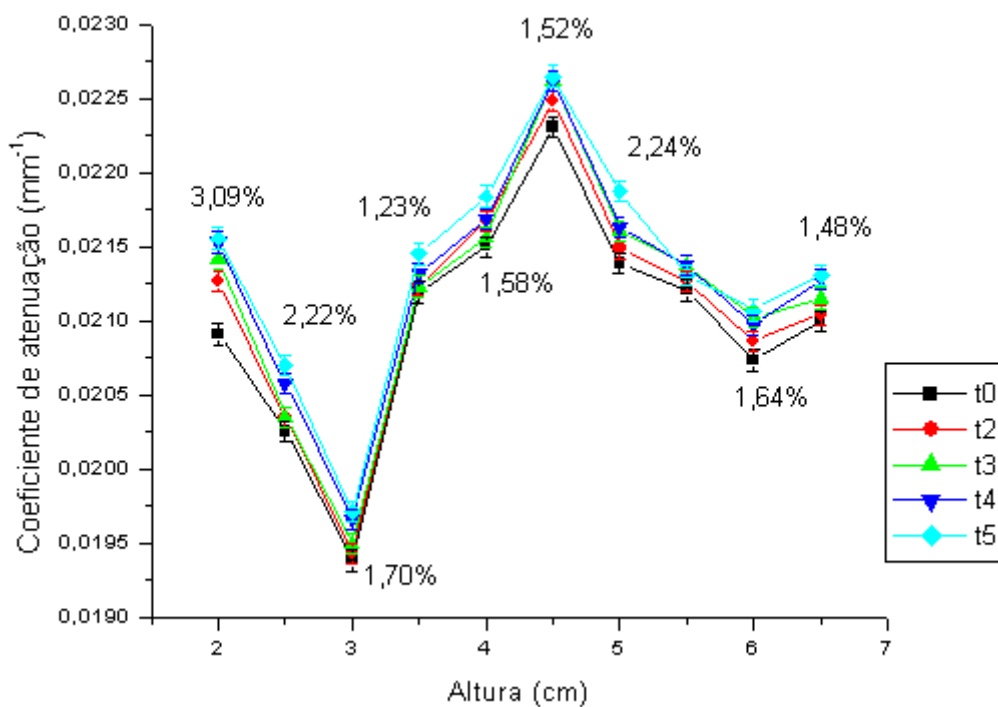
uma variação menor em relação às outras amostras do mesmo grupo analisadas aqui. As amostras deste grupo apresentaram uma maior variação do coeficiente de atenuação, comparado ao coeficiente de atenuação dos pontos analisados com a amostra ainda seca, quando levamos em conta as amostras de concreto convencionais e as amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e areia silícia.

As amostras de concreto com resíduos siderúrgico com silício velho e novo escolhidas foram as amostras de códigos: SSV<sub>1</sub> e SSV<sub>2</sub>, amostras compostas por silício velho, além das amostras SSN<sub>5</sub> e SSN<sub>6</sub>, amostras estas com silício novo.

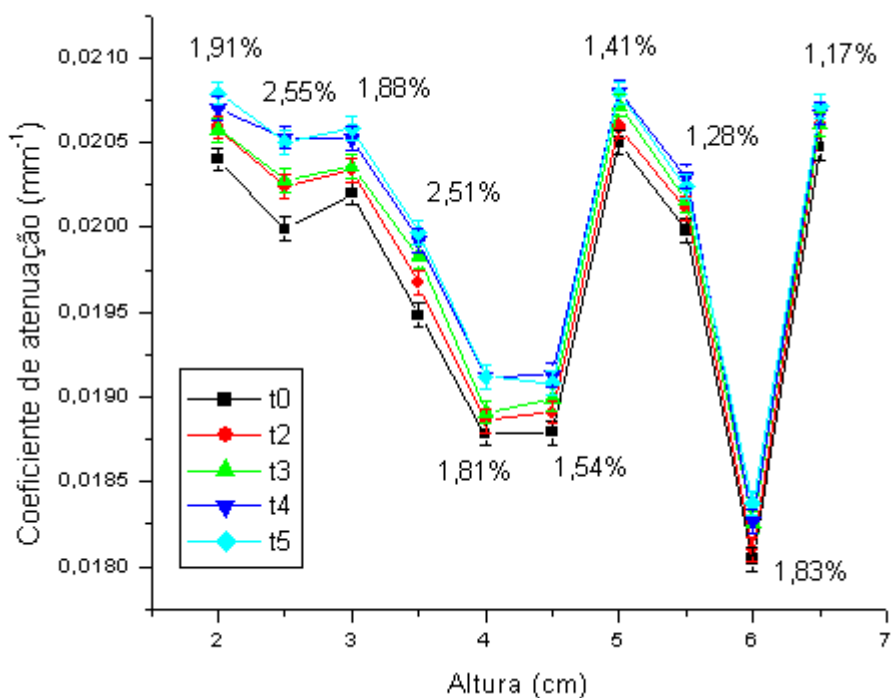
Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical da amostra de código SSV<sub>1</sub> analisada no decorrer do tempo.



**Gráfico 31: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra siderúrgica e silício velho código SSV<sub>1</sub>.**



**Gráfico 32: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra siderúrgica e silício velho código SSV<sub>1</sub>.**



**Gráfico 33: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra siderúrgica e silício velho código SSV<sub>1</sub>.**

A amostra de concreto SSV<sub>1</sub> apresentou comportamento parecido nas colunas analisadas. Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos

para cada coluna vertical da amostra de código SSV<sub>2</sub> analisada no decorrer do tempo, tal amostra é réplica da amostra original analisada anteriormente.

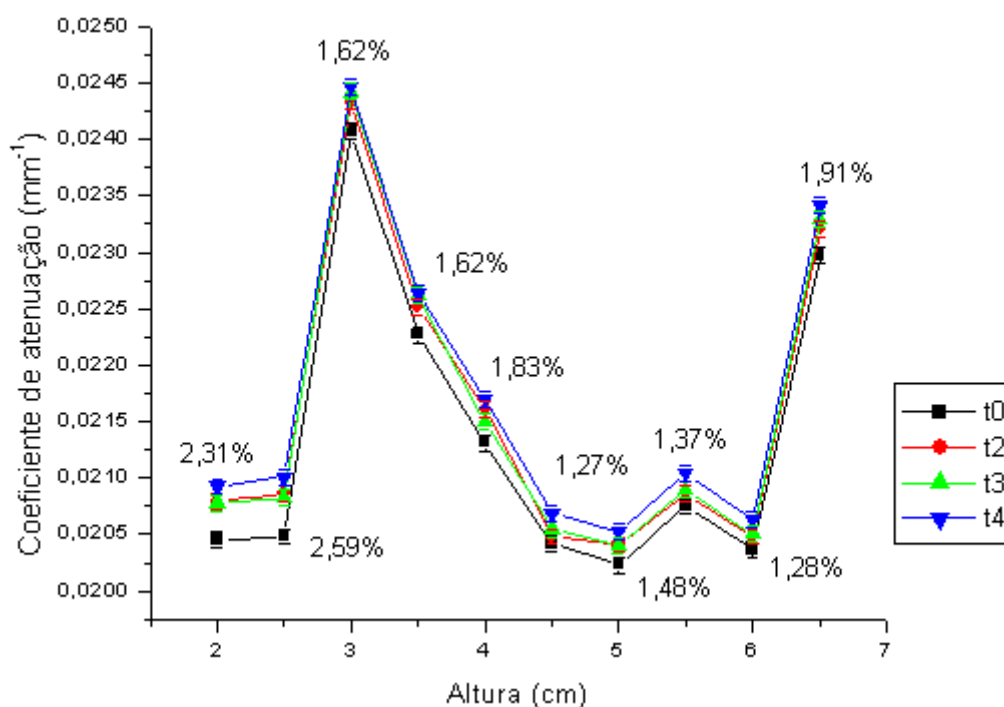


Gráfico 34: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra siderúrgica e silício velho código SSV<sub>2</sub>.

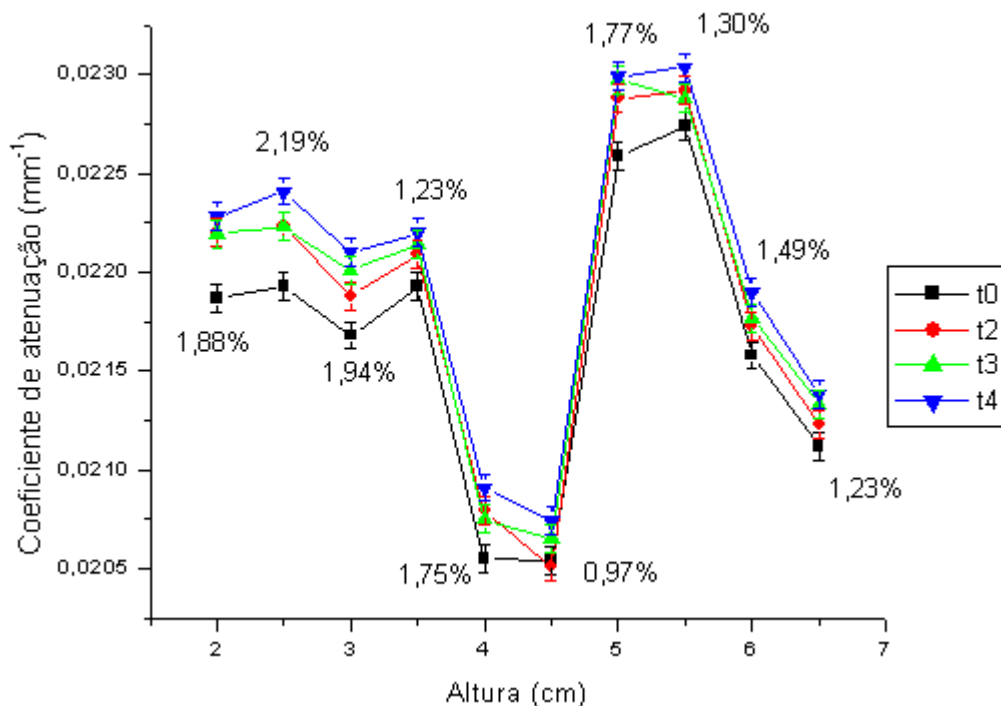
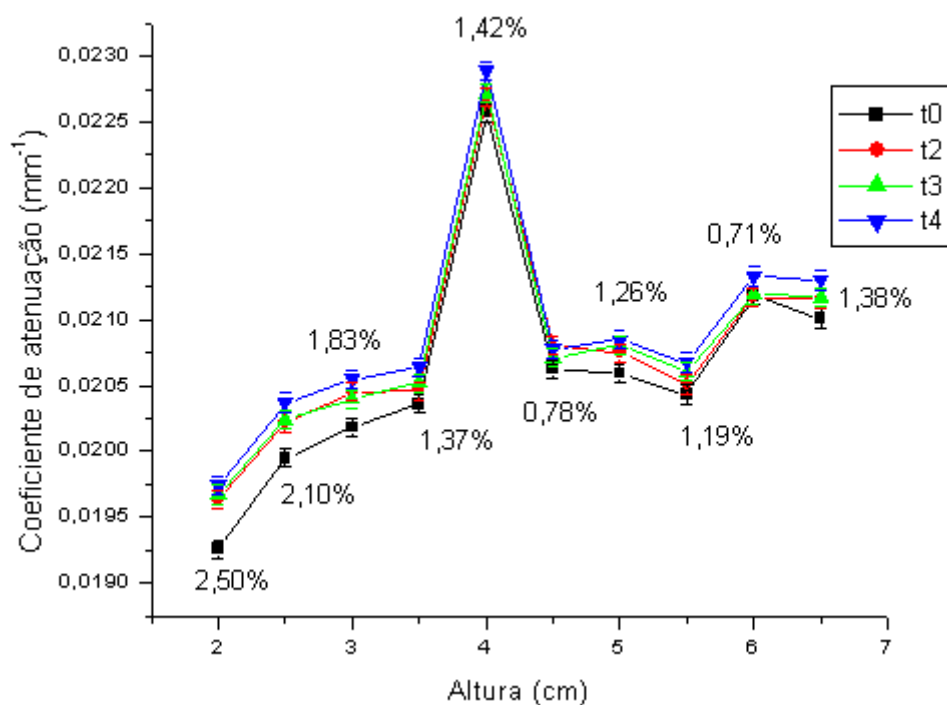


Gráfico 35: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra siderúrgica e silício velho código SSV<sub>2</sub>.



**Gráfico 36: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra siderúrgica e silício velho código SSV<sub>2</sub>.**

É possível observar que a amostra SSV<sub>2</sub> possui o mesmo comportamento que a amostra original SSV<sub>1</sub>, ou seja, as três colunas analisadas se comportaram de maneira semelhante. Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical da amostra de código SSN<sub>5</sub> analisada no decorrer do tempo, e em seguida os gráficos referentes a amostra SSN<sub>6</sub>, lembrando que estas duas amostras são amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e silício novo, sendo uma amostra original e sua respectiva réplica.

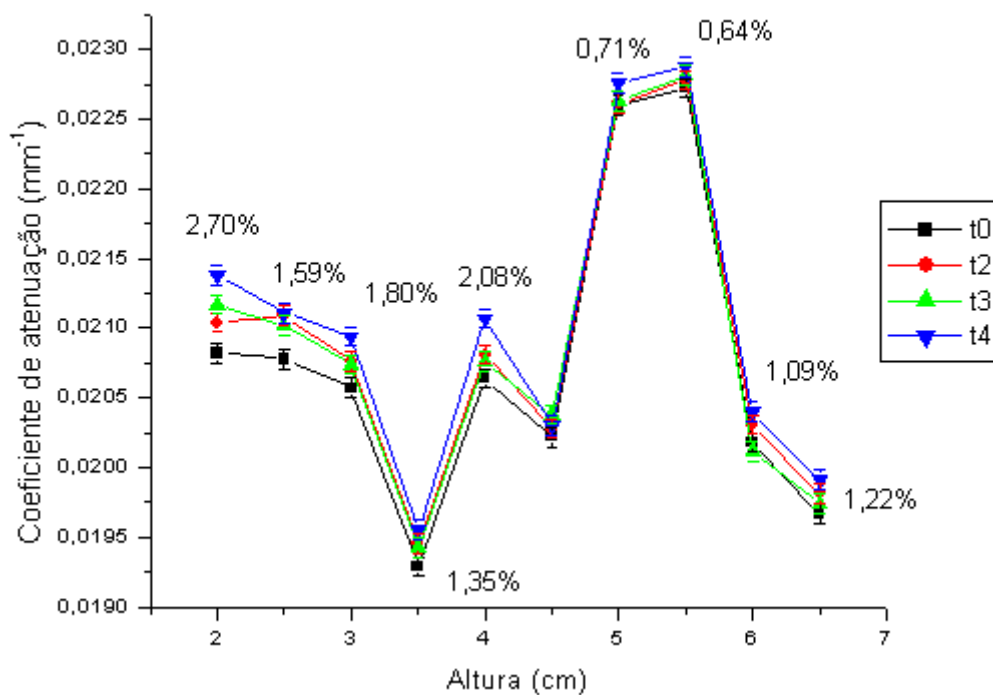


Gráfico 37: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra siderúrgica e silício velho código SSN<sub>5</sub>.

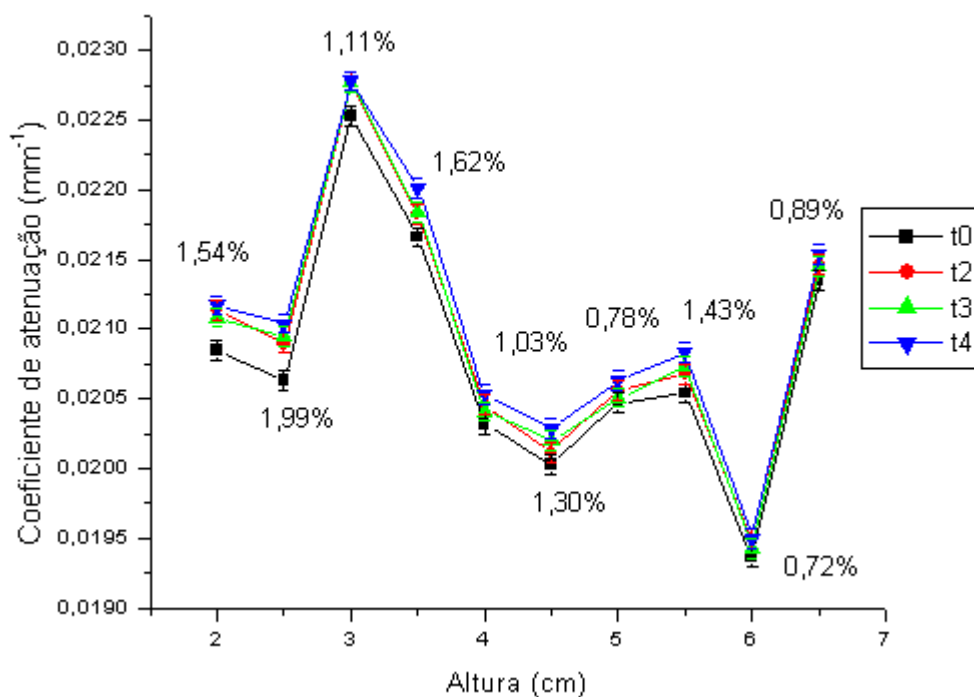
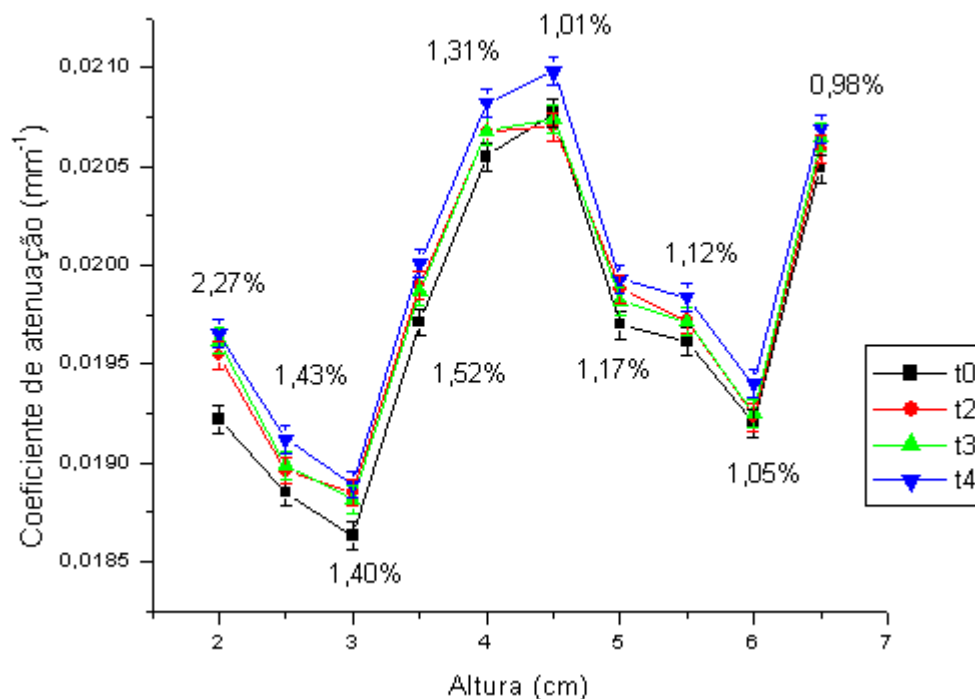
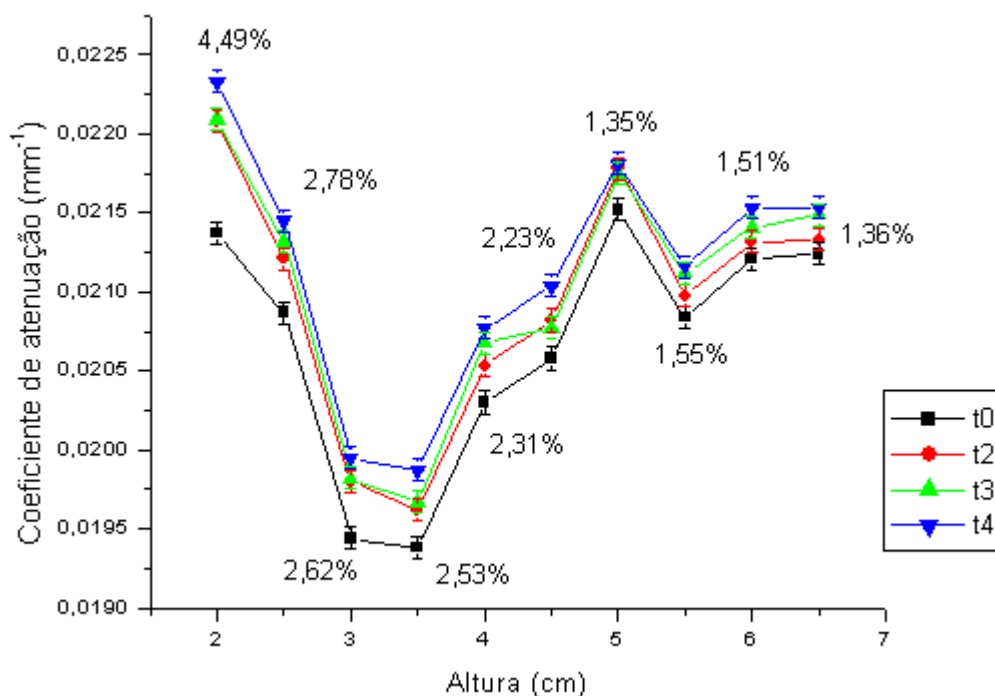


Gráfico 38: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra siderúrgica e silício velho código SSN<sub>5</sub>.



**Gráfico 39: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra siderúrgica e silício velho código SSN<sub>5</sub>.**



**Gráfico 40: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra siderúrgica e silício velho código SSN<sub>6</sub>.**

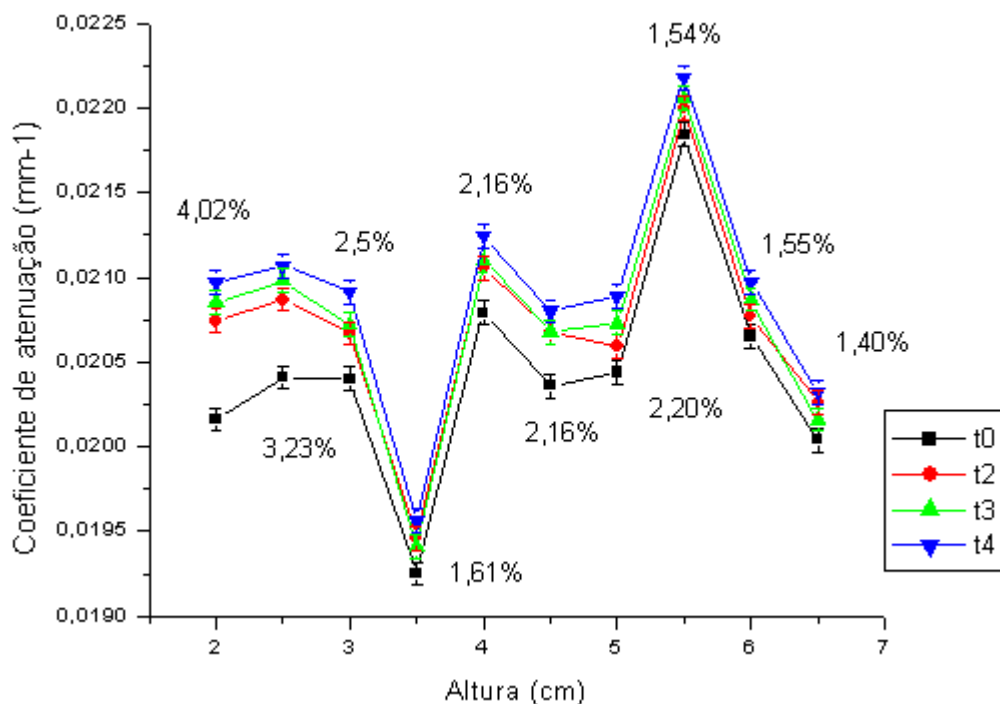


Gráfico 41: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra siderúrgica e silício velho código SSN<sub>6</sub>.

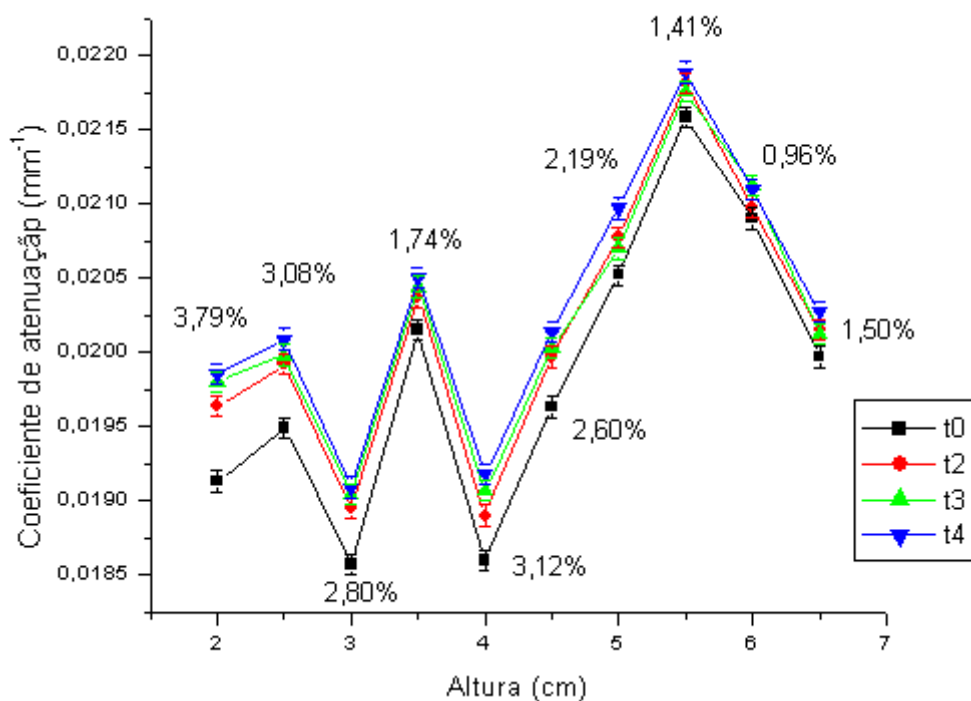


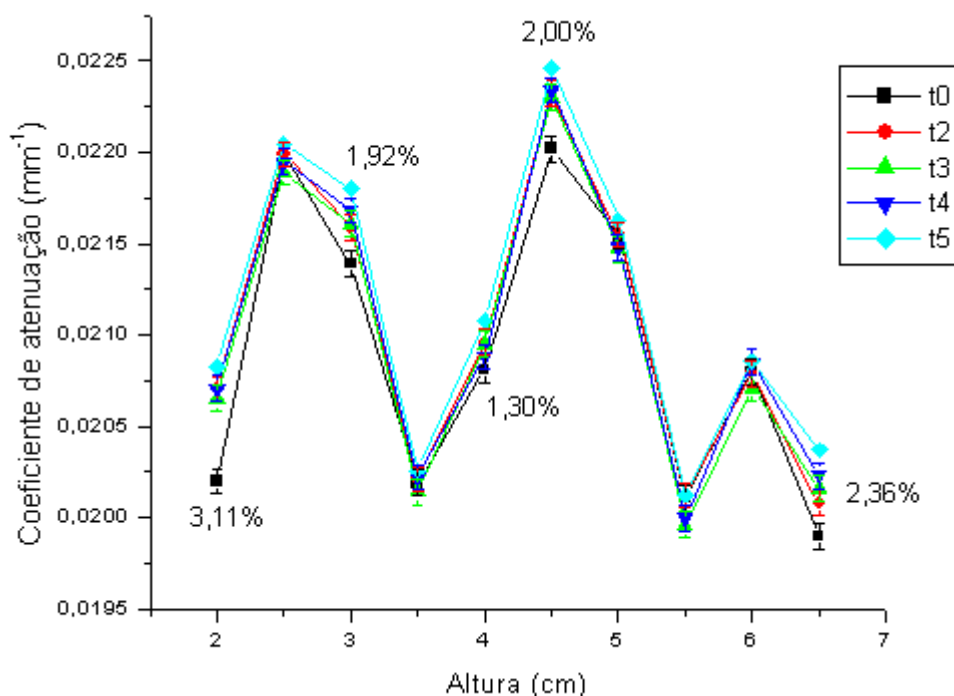
Gráfico 42: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra siderúrgica e silício velho código SSN<sub>6</sub>.

As amostras SSN<sub>5</sub> e SSN<sub>6</sub>, apesar de iguais, apresentaram um comportamento completamente diferente. O resíduo de silício novo presente na amostra original apresentou comportamento parecido, quando comparado às

amostras possuindo resíduos de silício velho. Já a amostra SSN<sub>6</sub>, réplica da amostra SSN<sub>5</sub>, obteve uma variação do coeficiente de atenuação muito maior quando comparada as amostras pertencentes a este grupo. A variação mais significativa ocorre principalmente nos quatro primeiros centímetros de altura das colunas da amostra analisada. Nos pontos mais altos da amostra, essa variação não foi tão discrepante das amostras do grupo siderúrgica com silício. Essa diferença entre a amostra réplica e original, indica, apesar de serem iguais, uma falta de homogeneidade entre estas amostras.

As amostras de concreto com resíduos siderúrgico e calcário velho e novo escolhidas foram as amostras de códigos: SCV<sub>3</sub> e SCV<sub>4</sub>, amostras compostas por silício velho, além das amostras SCN<sub>5</sub> e SCN<sub>6</sub>, amostras estas com silício novo.

Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical das amostras de códigos SCV<sub>3</sub> e SCV<sub>4</sub> analisada no decorrer do tempo. Essas amostras configuram, respectivamente, amostra original e réplica.



**Gráfico 43: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra siderúrgica e calcário velho código SCV<sub>3</sub>.**

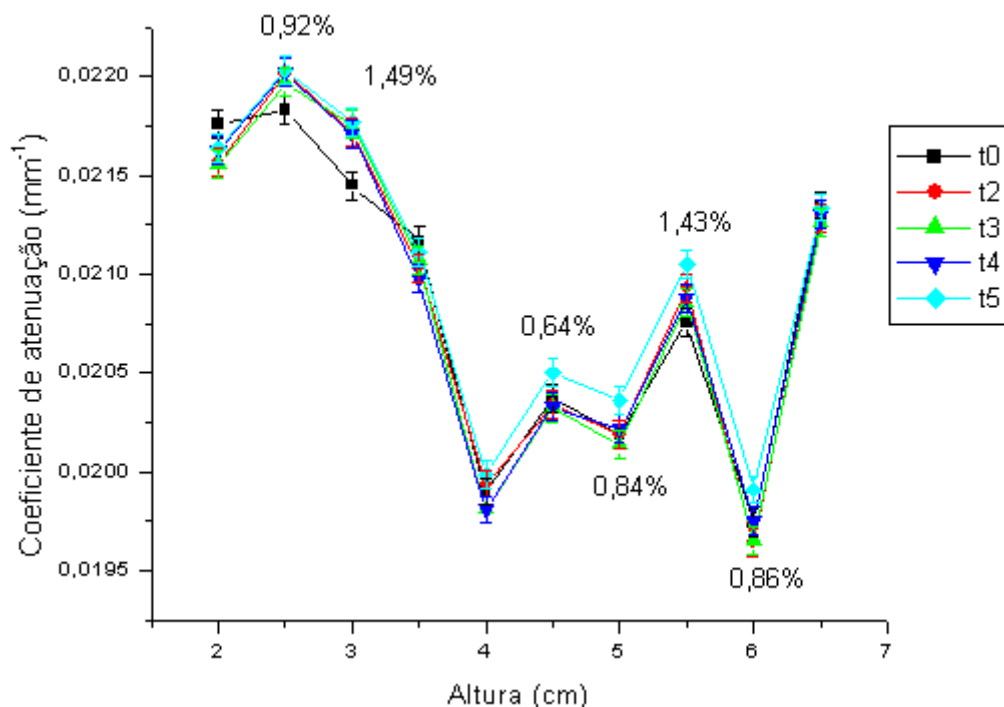


Gráfico 44: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra siderúrgica e calcário velho código SCV<sub>3</sub>.

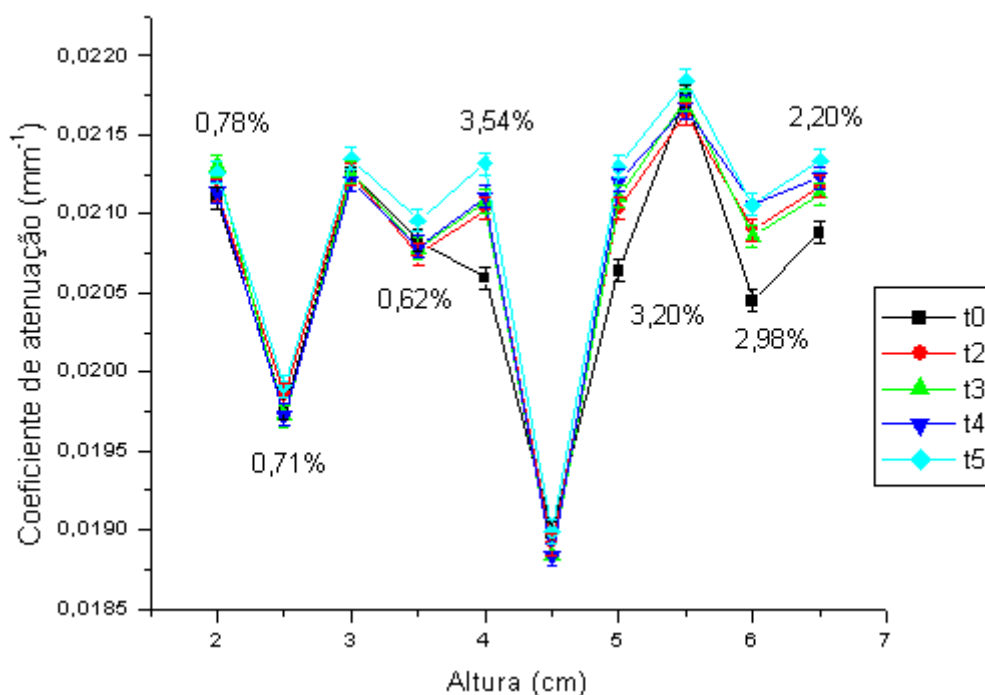
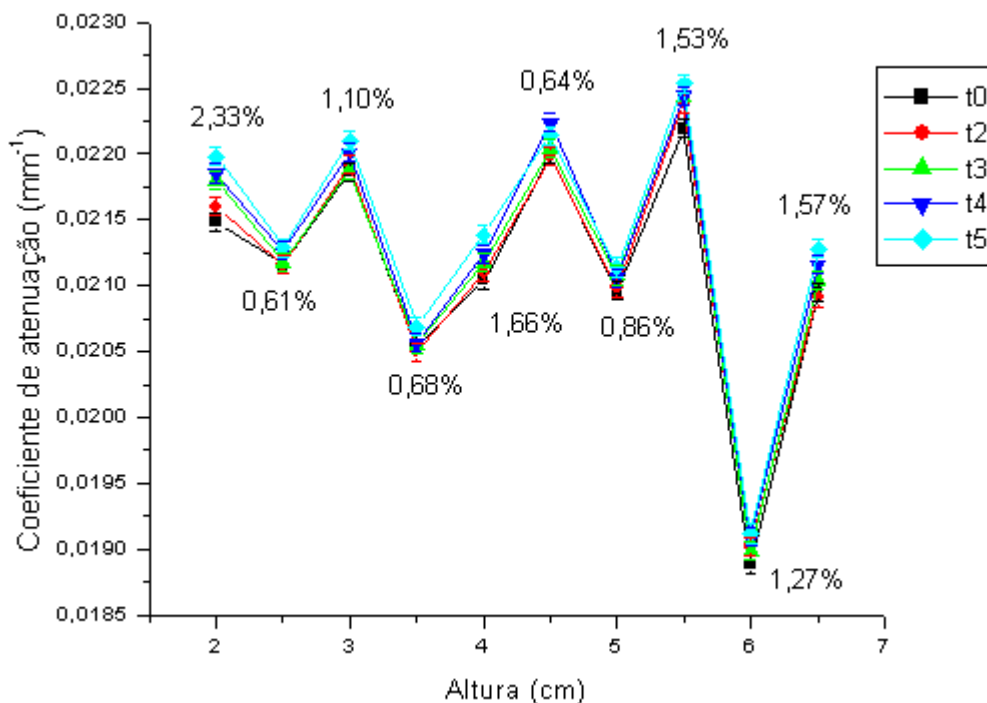


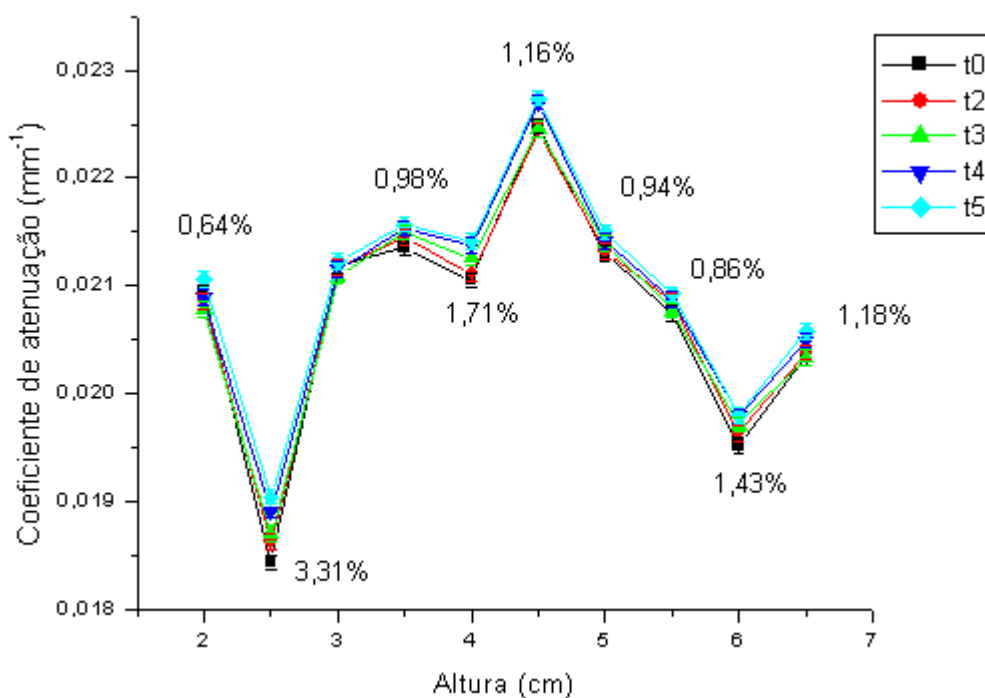
Gráfico 45: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra siderúrgica e calcário velho código SCV<sub>3</sub>.

A coluna do extremo esquerdo apresentou uma variação do coeficiente de atenuação levemente maior que as duas outras colunas, o que pode significar um caminho preferencial para frente de molhamento nesta coluna. No geral, a amostra não apresentou variação significativa em todos os pontos da

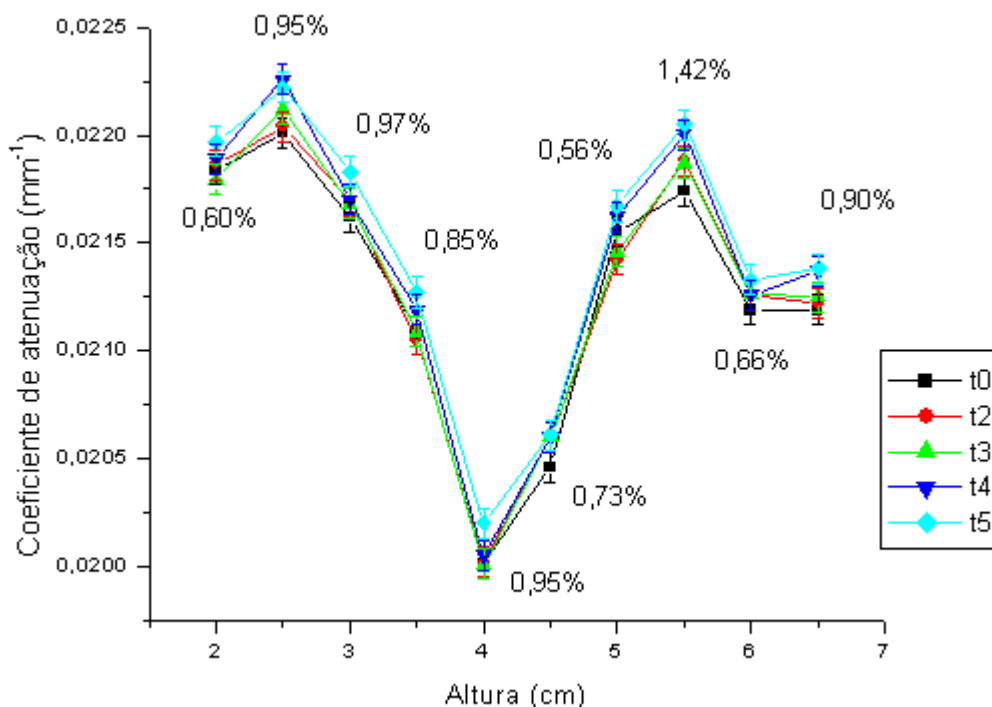
coluna vertical e comparando-a com algumas amostras analisadas anteriormente, essa amostra apresentou uma baixa variação do coeficiente de atenuação.



**Gráfico 46: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra siderúrgica e calcário velho código SCV<sub>4</sub>.**



**Gráfico 47: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra siderúrgica e calcário velho código SCV<sub>4</sub>.**



**Gráfico 48: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra siderúrgica e calcário velho código SCV<sub>4</sub>.**

A coluna do extremo esquerdo apresentou uma variação do coeficiente de atenuação levemente menor que as duas outras colunas, o que pode significar um caminho preferencial para frente de molhamento nas outras colunas e uma pequena diferença na homogeneidade da amostra. Comparando-se esta amostra (réplica) com a amostra SCV<sub>3</sub> (original) verifica-se que as duas possuem comportamentos parecidos e homogeneidade entre as mesmas.

Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical das amostras de códigos SCN<sub>5</sub> e SCN<sub>6</sub> analisada no decorrer do tempo. Essas amostras configuram, respectivamente, amostra original e réplica.

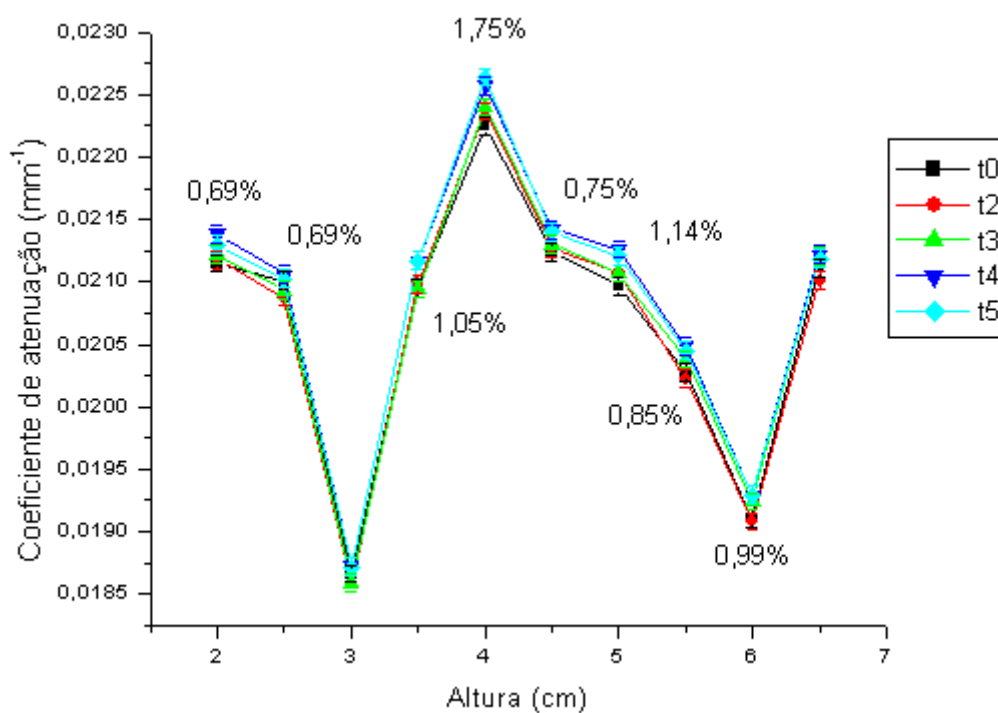


Gráfico 49: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra siderúrgica e calcário novo código SCN<sub>5</sub>.

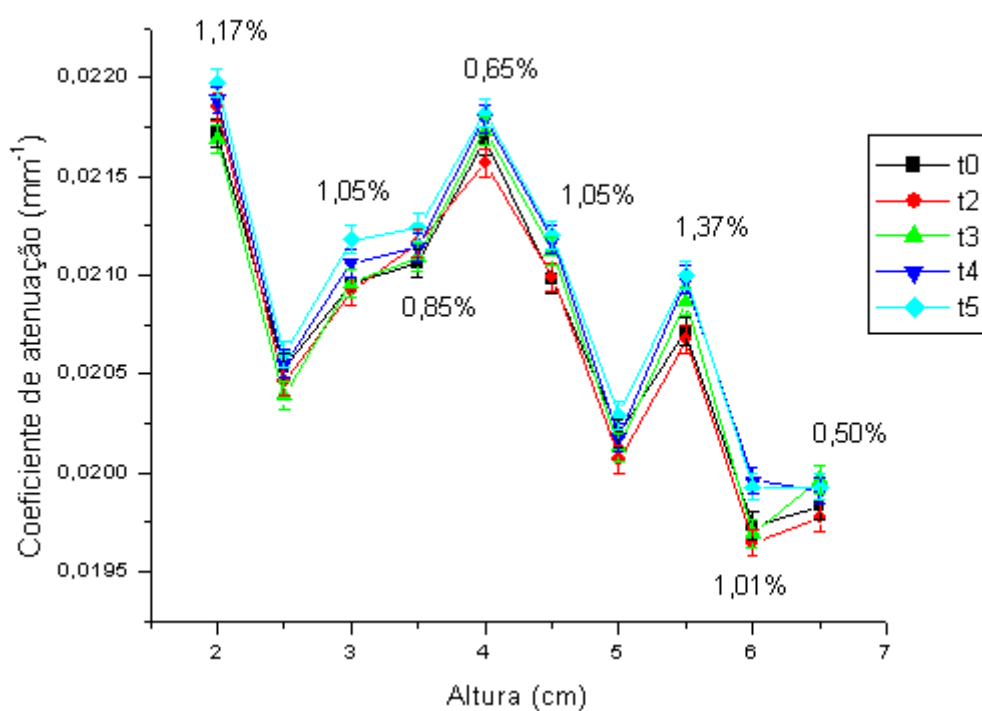


Gráfico 50: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra siderúrgica e calcário novo código SCN<sub>5</sub>.

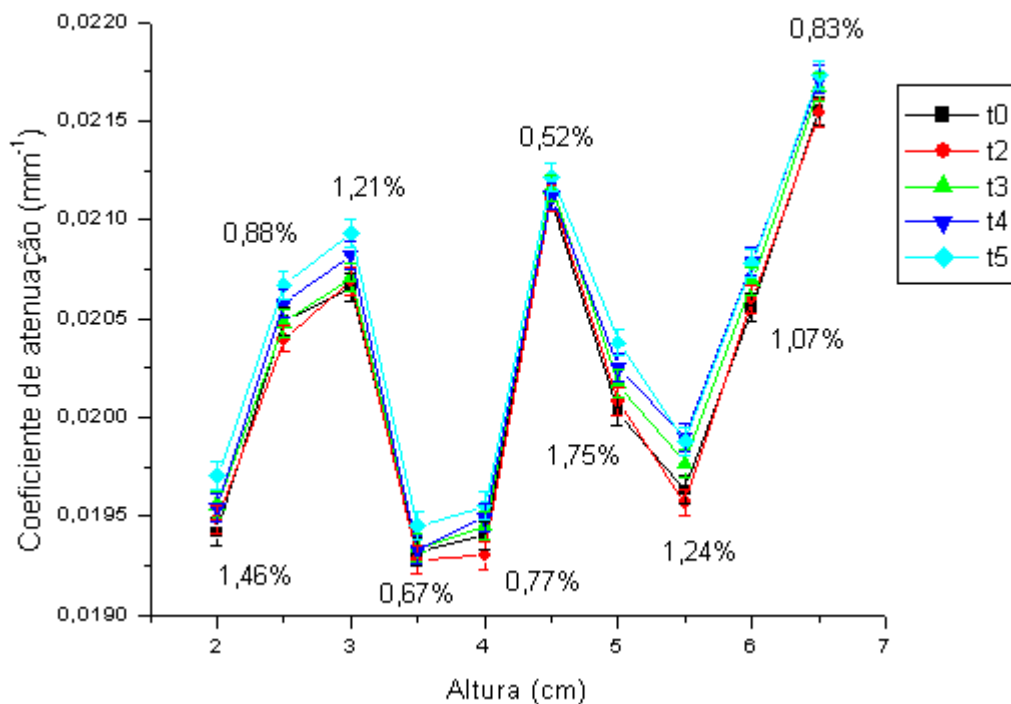


Gráfico 51: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra siderúrgica e calcário novo código SCN<sub>5</sub>.

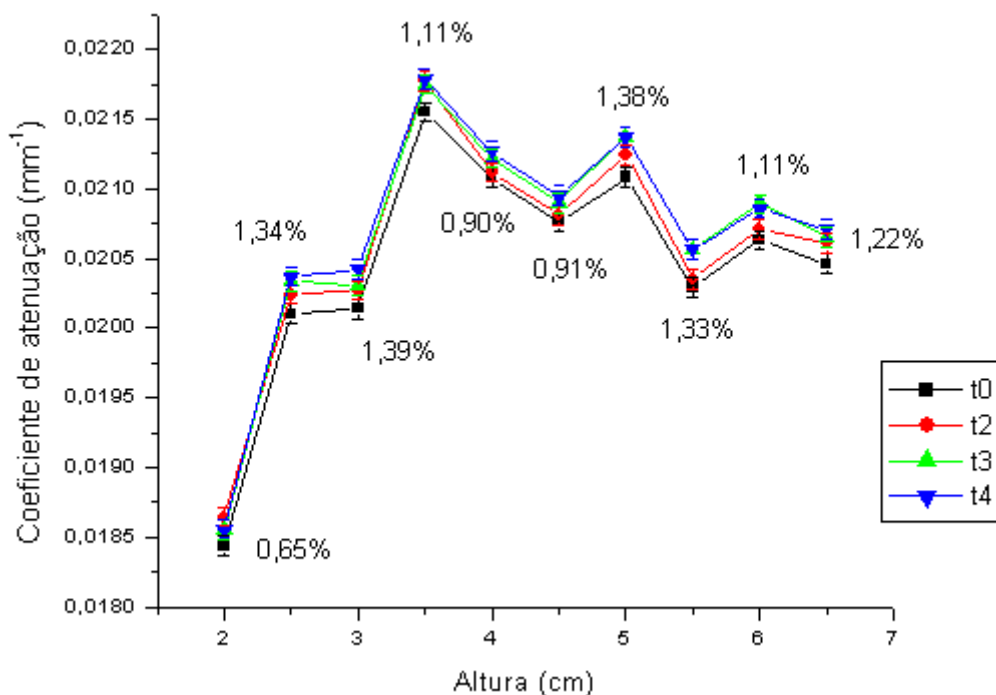


Gráfico 52: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra siderúrgica e calcário novo código SCN<sub>6</sub>.

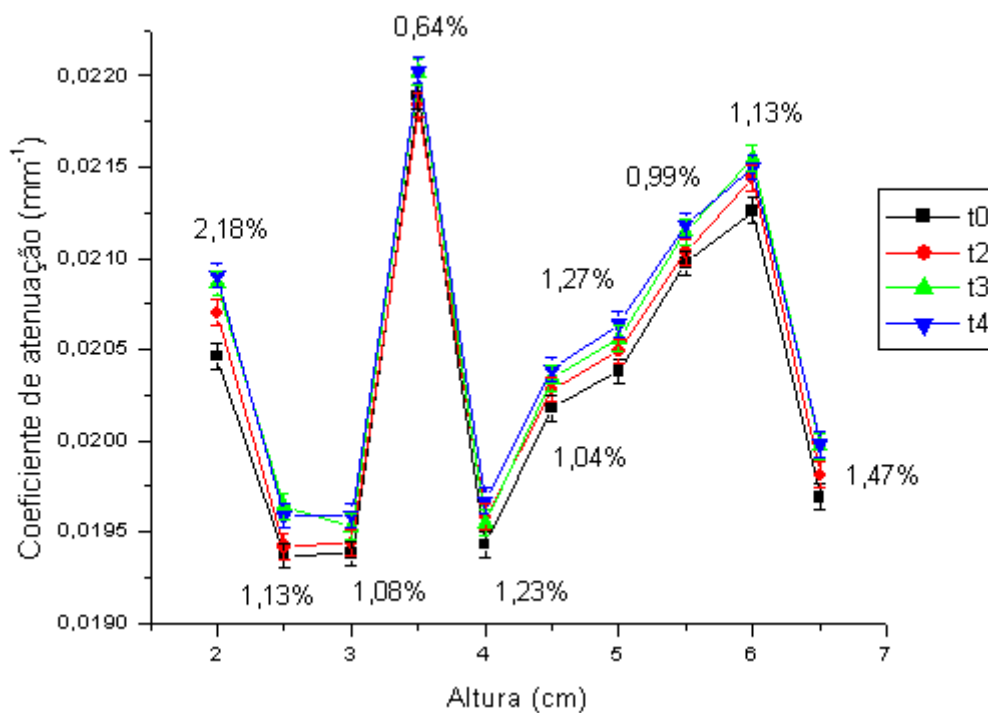


Gráfico 53: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra siderúrgica e calcário novo código SCN<sub>6</sub>.

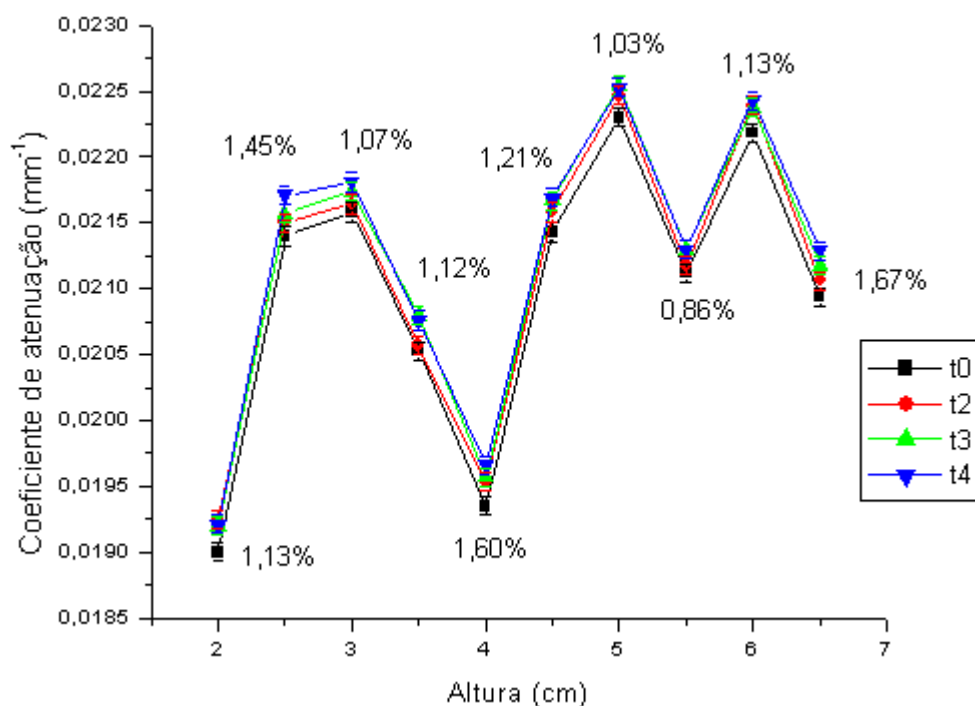
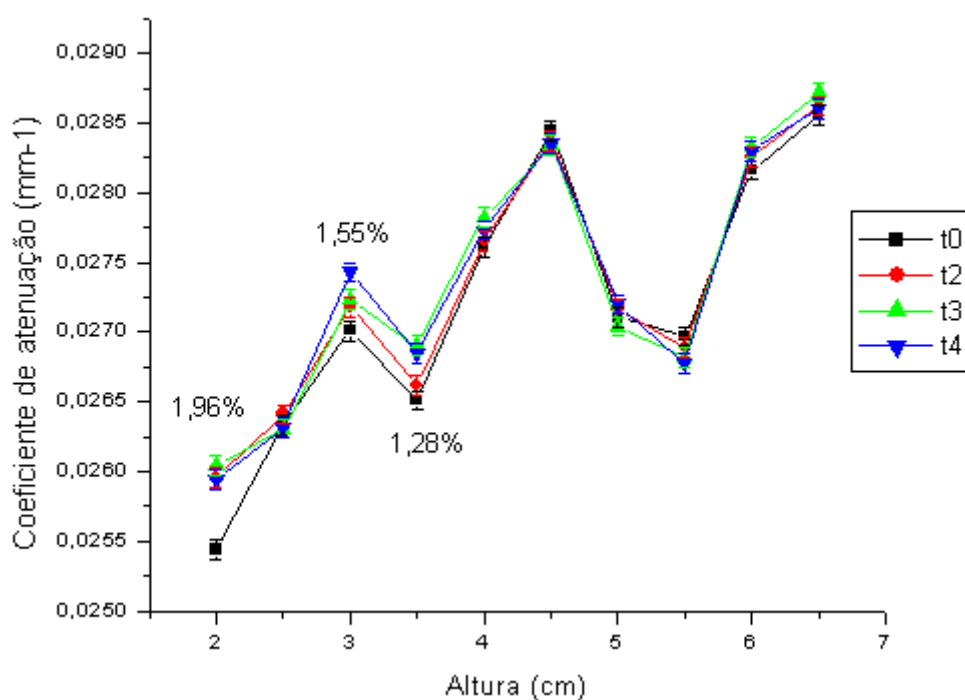


Gráfico 54: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra siderúrgica e calcário novo código SCN<sub>6</sub>.

As amostras de concreto com resíduos siderúrgicos com silício novo não apresentaram diferença significativa, a respeito do comportamento da frente de molhamento, quando comparamos com as amostras de concreto com resíduos siderúrgicos com silício velho. Além disso, as duas amostras com silício novo,

representando amostras iguais (original e réplica), apresentaram praticamente o mesmo comportamento quanto à frente de molhamento. Verificamos assim uma homogeneidade dessas amostras.

Por fim, as amostras de concreto com agregados baríticos escolhidas para verificar o comportamento da frente de molhamento foram as amostras de códigos: BA<sub>5</sub>, BA<sub>6</sub> e BA<sub>7</sub>. Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical das amostras de códigos BA<sub>5</sub> e BA<sub>6</sub> analisada no decorrer do tempo. Essas amostras configuram, respectivamente, amostra original e réplica.



**Gráfico 55: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra barítica código BA<sub>5</sub>.**

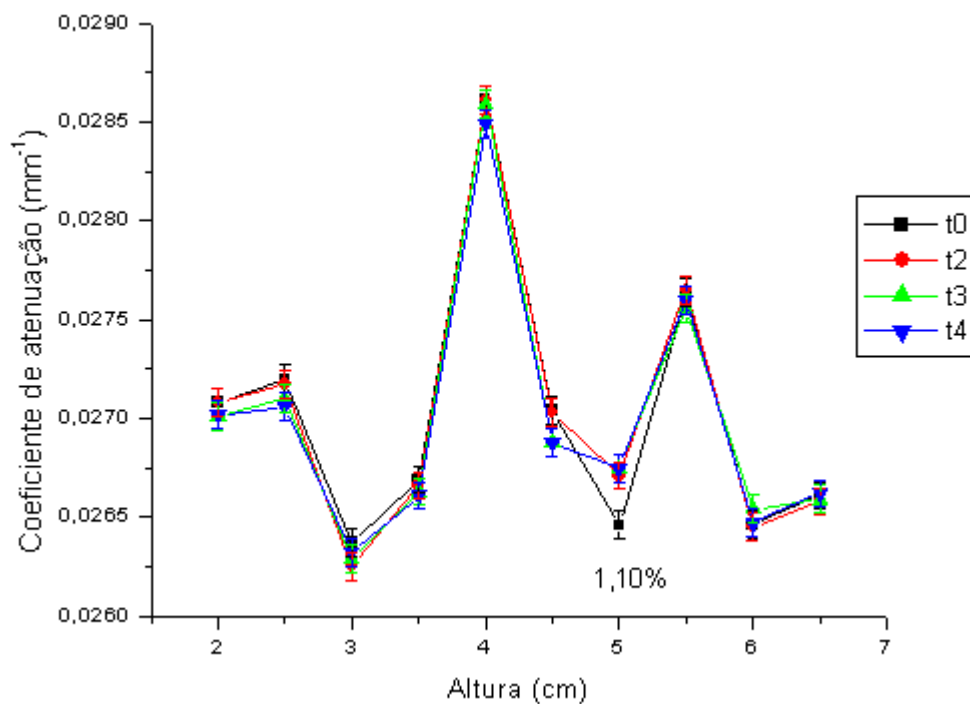


Gráfico 56: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra barítica código BA<sub>5</sub>.

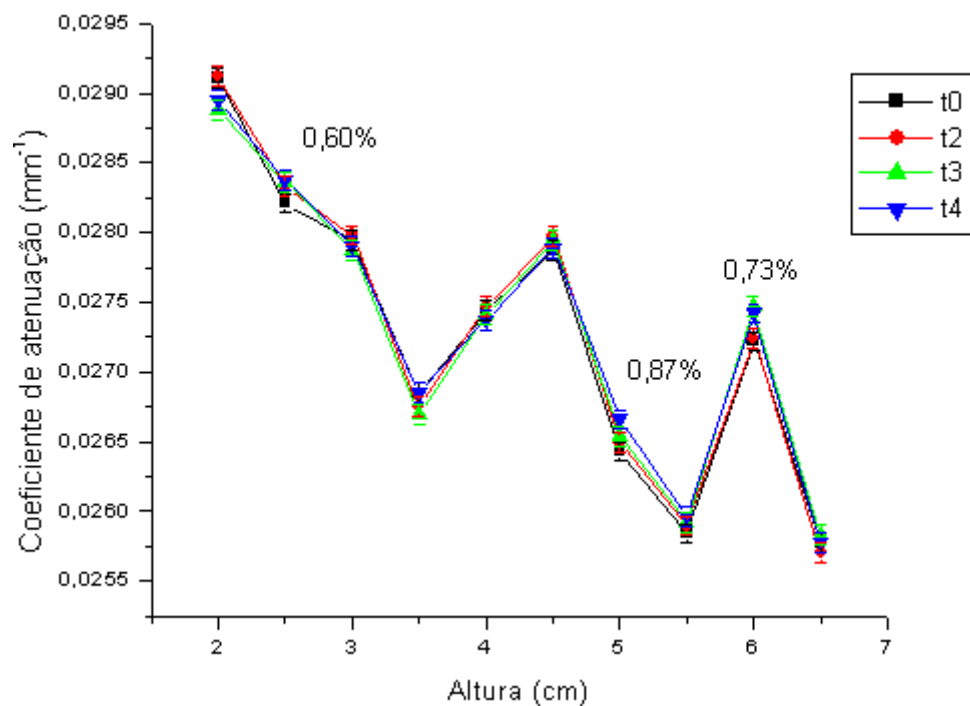


Gráfico 57: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra barítica código BA<sub>5</sub>.

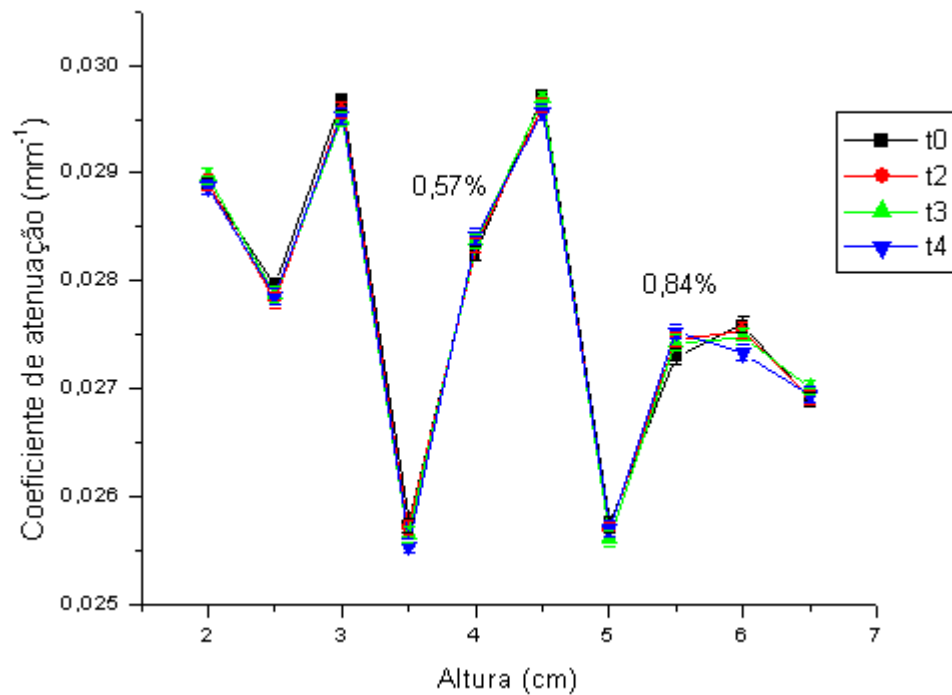


Gráfico 58: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra barítica código BA<sub>6</sub>.

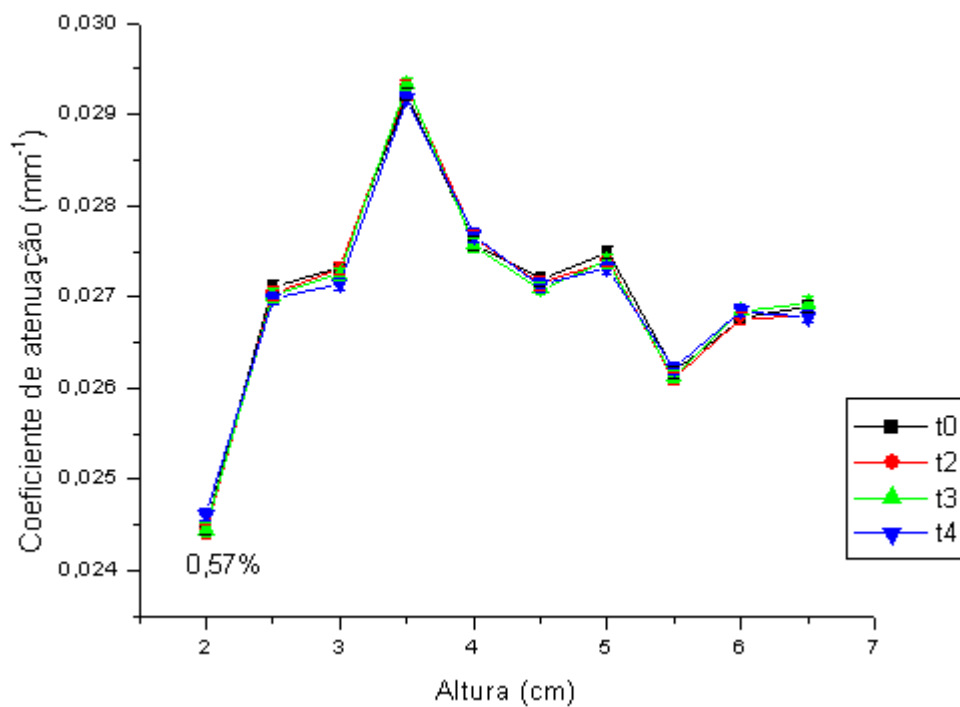
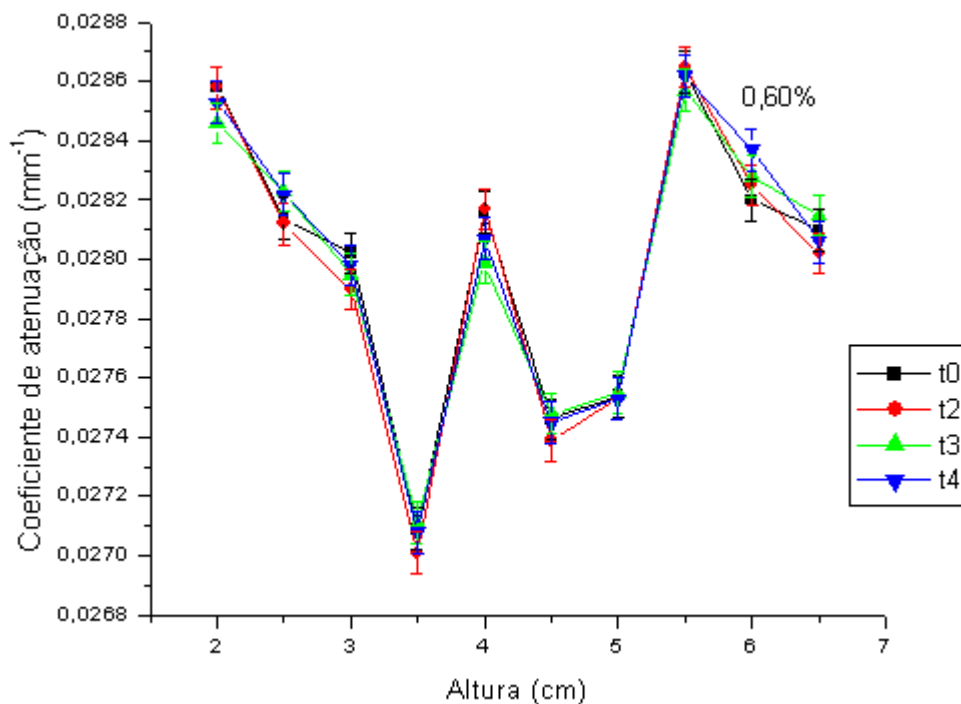


Gráfico 59: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra barítica código BA<sub>6</sub>.



**Gráfico 60: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra barítica código BA<sub>6</sub>.**

As amostras de concreto com agregados baríticos BA<sub>5</sub> e BA<sub>6</sub>, original e réplica respectivamente, apresentaram o mesmo comportamento quanto a frente de molhamento. Isto indica homogeneidade nas amostras analisadas.

Comparando com todas as outras amostras, essas amostras obtiveram a menor variação do coeficiente de atenuação, quando levamos em conta o coeficiente de atenuação com a amostra ainda seca e o coeficiente de atenuação calculado após quatro horas com a amostra parcialmente imersa em água. Vale lembrar, que os pontos em que a taxa percentual de variação não está presente, significa que não houve variação significativa, ou seja, a variação obtida está dentro da margem de erro.

Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical das amostras de códigos BA<sub>7</sub> analisada no decorrer do tempo.

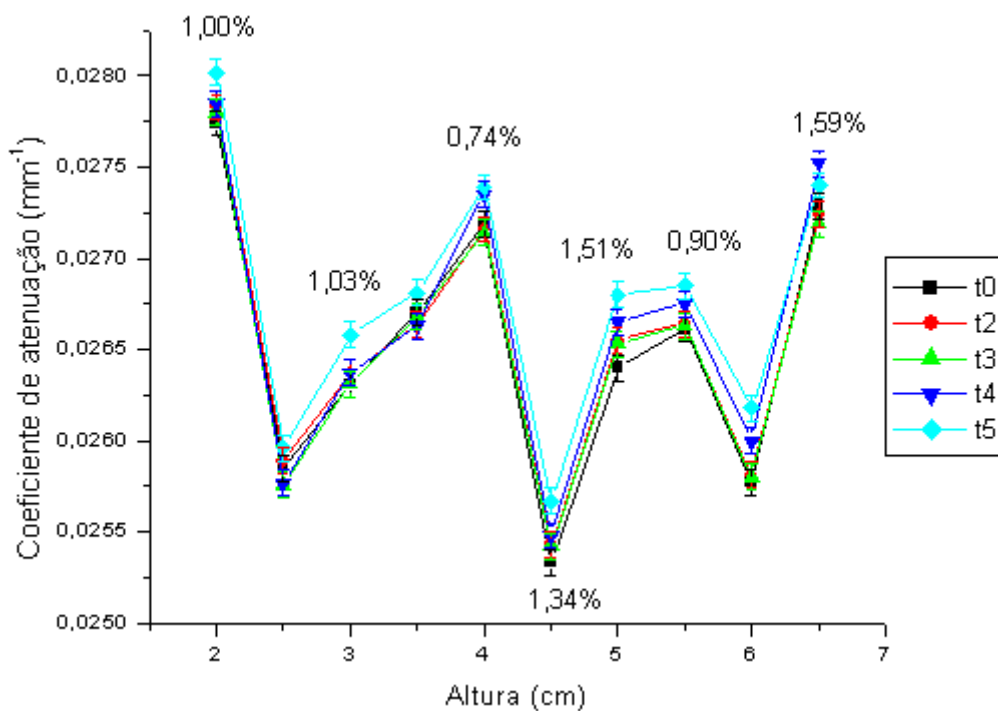


Gráfico 61: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo direito calculado para amostra barítica código BA<sub>7</sub>.

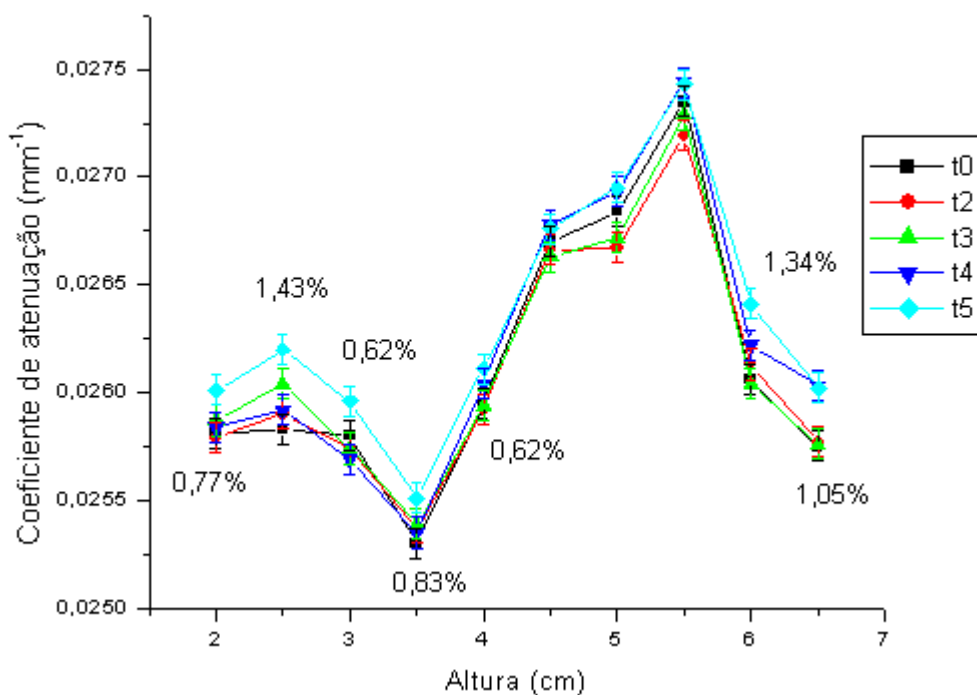
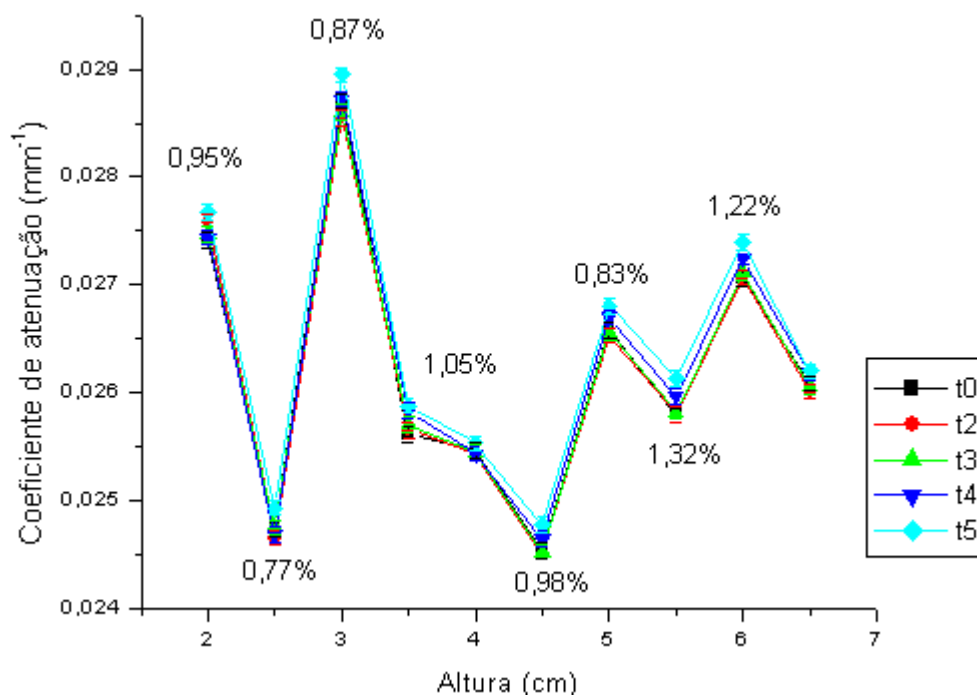


Gráfico 62: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna central calculado para amostra barítica código BA<sub>7</sub>.



**Gráfico 63: Coeficiente de atenuação pela altura da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra barítica código BA<sub>7</sub>.**

A amostra de concreto com agregados baríticos BA<sub>7</sub> foi medida por cinco horas, uma hora a mais que as outras amostras do mesmo grupo. Comparando esta amostra com as outras de agregados baríticos, até quatro horas de molhamento todas apresentaram o mesmo comportamento quanto a frente de molhamento. Após quatro horas de molhamento essa última amostra apresentou uma variação significativa em praticamente todos os pontos analisados, o que significa que este grupo de amostras apresenta uma frente de molhamento mais lenta e comportamento parecido quando comparamos estas com as amostras de concreto convencional.

Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical das amostras de códigos Ref<sub>1</sub> e SAS<sub>5</sub>, analisadas por 48 horas, com o intuito de comparar os resultados com as medidas feitas por quatro ou cinco horas analisadas até aqui.

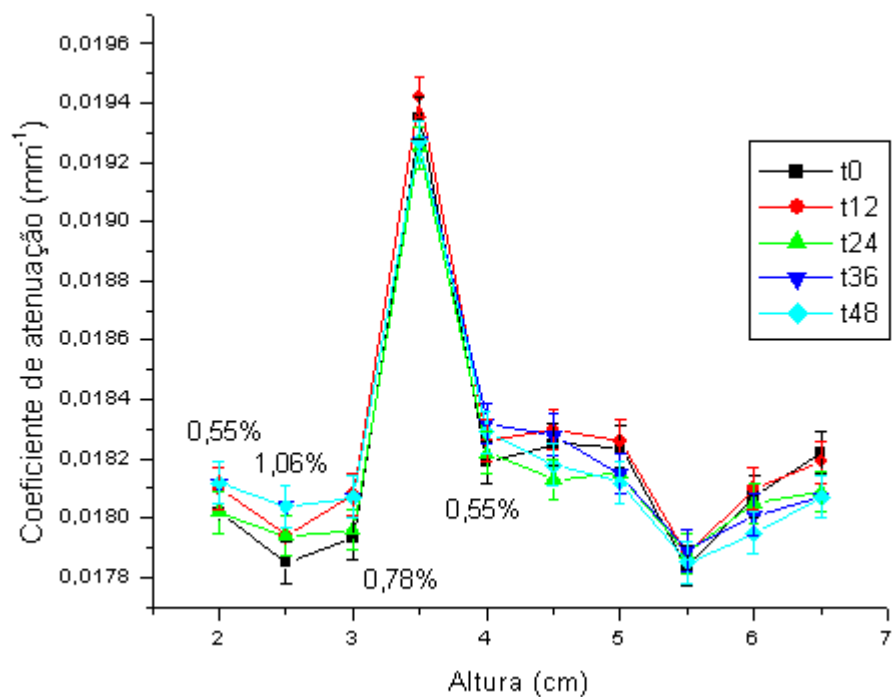


Gráfico 64: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna do extremo direito calculado para amostra de referência de código Ref<sub>1</sub>.

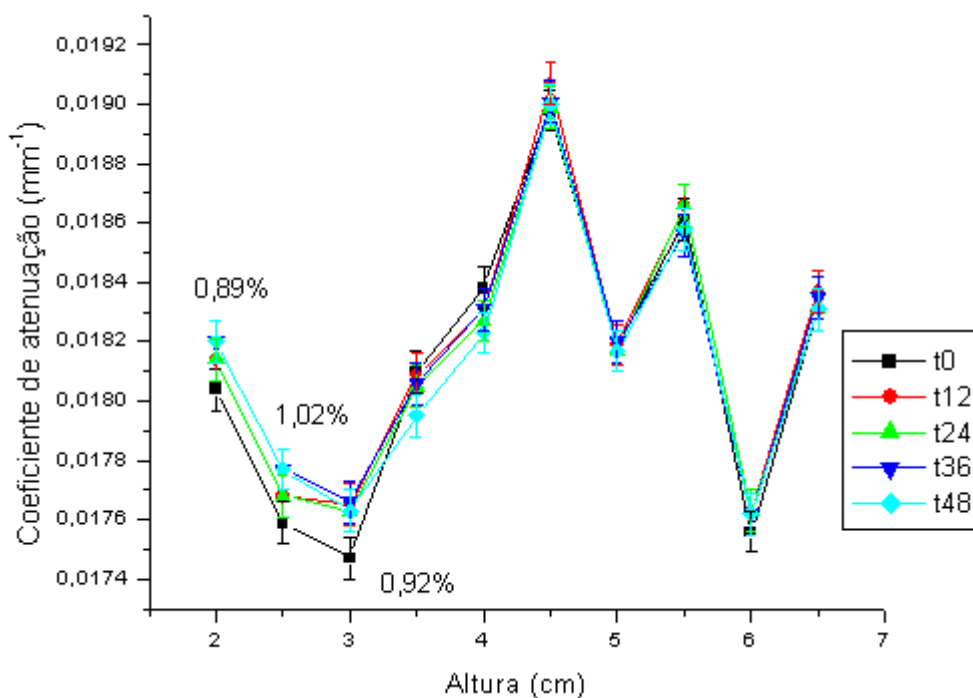


Gráfico 65: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna central calculado para amostra de referência de código Ref<sub>1</sub>.

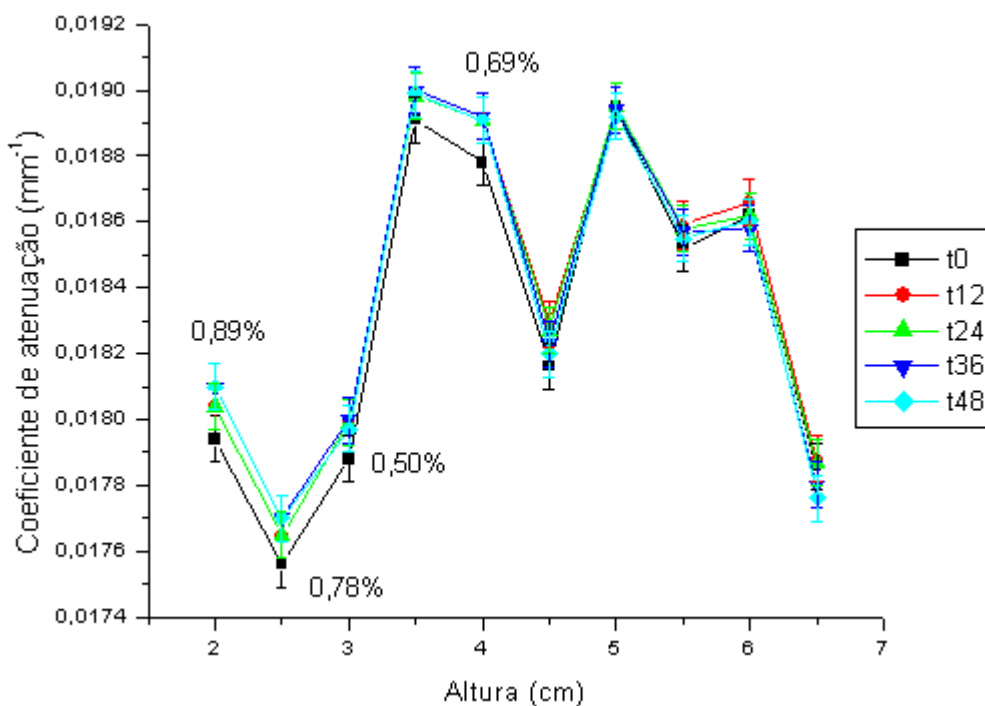


Gráfico 66: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra de referência de código Ref<sub>1</sub>.

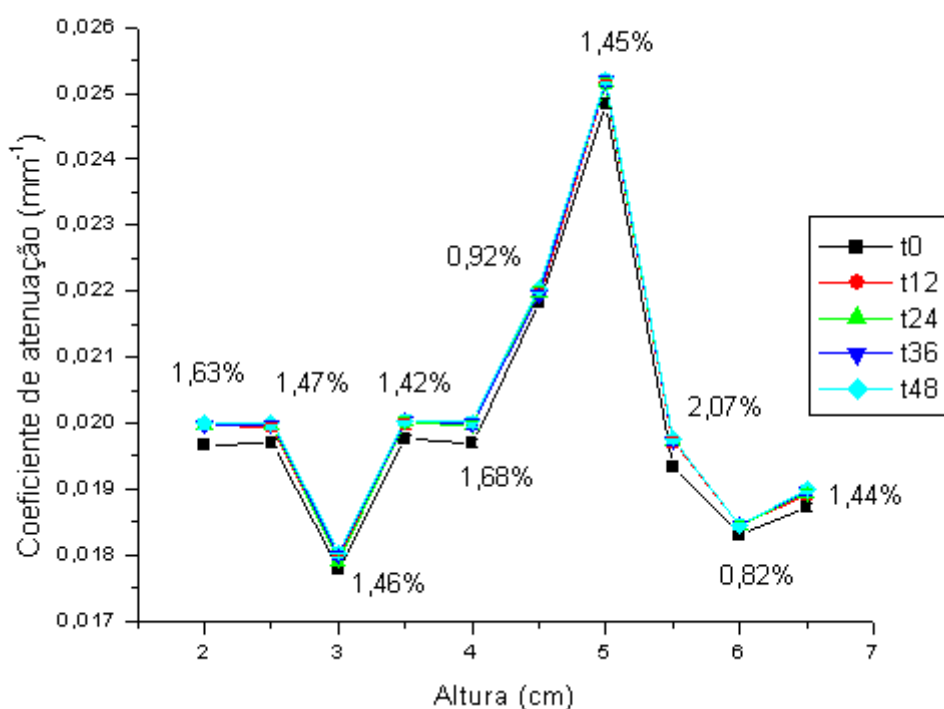


Gráfico 67: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna do extremo direito calculado para amostra de resíduos com siderúrgicos e areia sílica de código SAS<sub>5</sub>.

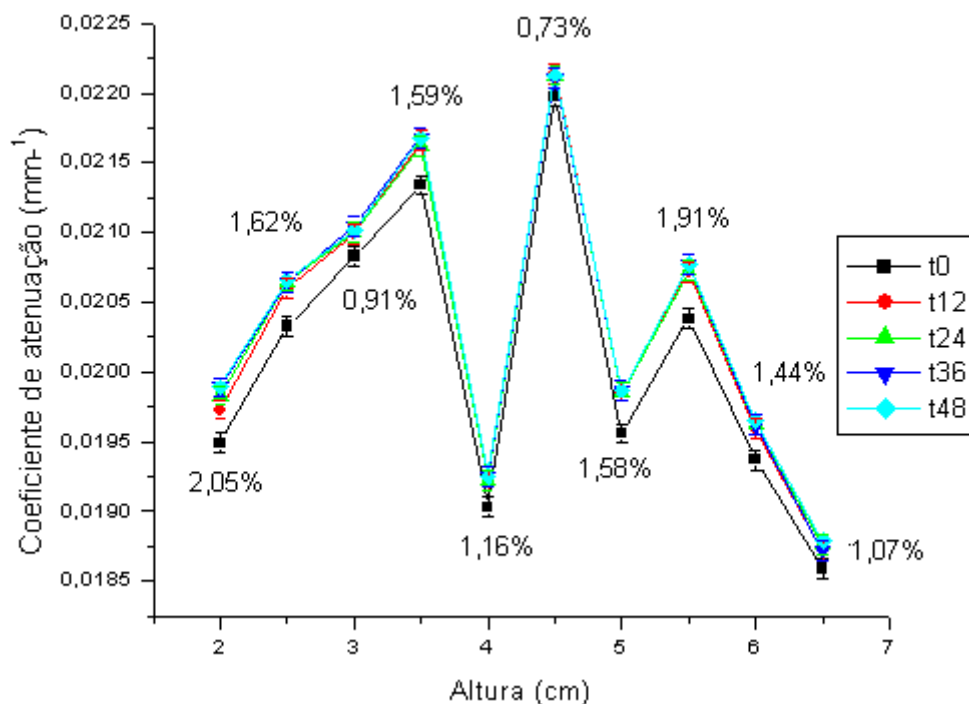


Gráfico 68: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna central calculado para amostra com resíduos siderúrgicos e areia sílica de código SAS<sub>5</sub>.

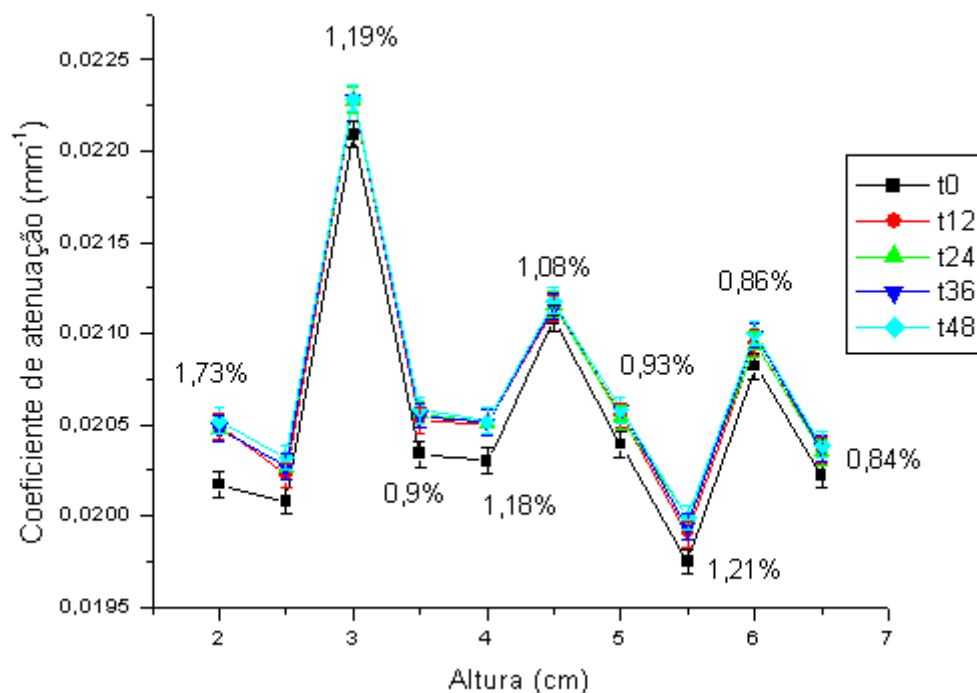
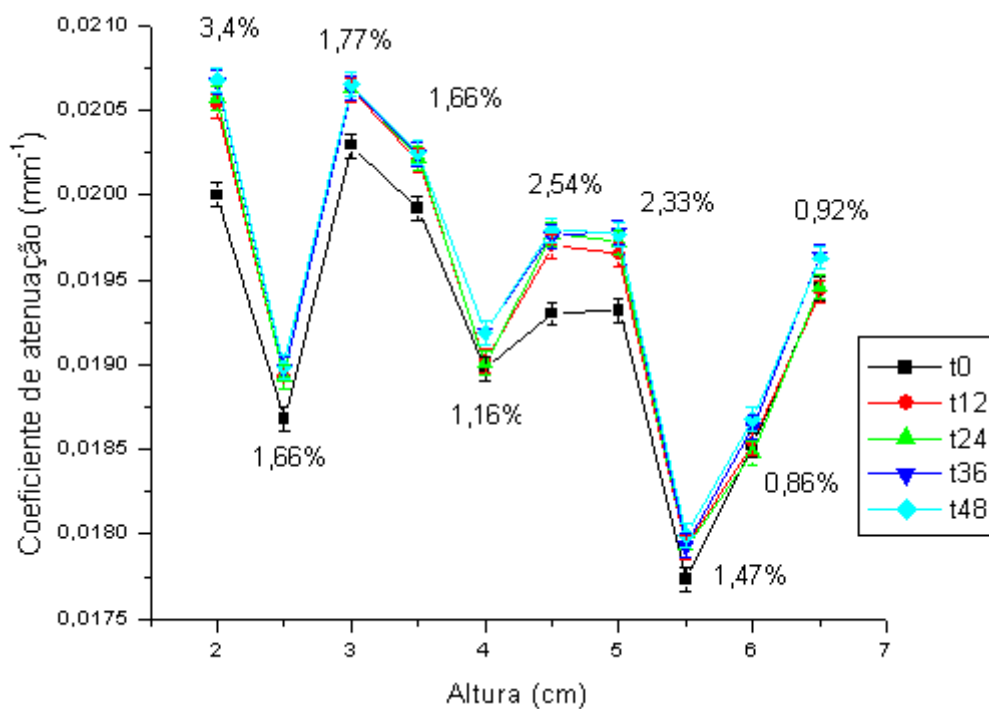


Gráfico 69: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra com resíduos siderúrgicos e areia sílica de código SAS<sub>5</sub>.

As amostras de concreto convencional e de concreto com resíduos siderúrgicos e areia sílica analisadas por um tempo de molhamento de 48 horas não apresentaram diferenças significativas quanto à análise das mesmas

por um período de quatro horas de molhamento. O que indica que estas amostras possuem um tempo de molhamento rápido, e que uma análise do comportamento da frente de molhamento por um período mais curto se mostra bastante viável.

Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical das amostras de códigos SAC<sub>3</sub>, SSV<sub>1</sub> e SCV<sub>3</sub>, analisadas por 48 horas.



**Gráfico 70: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna do extremo direito calculado para amostra de resíduos siderúrgicos e areia calcária de código SAC<sub>3</sub>.**

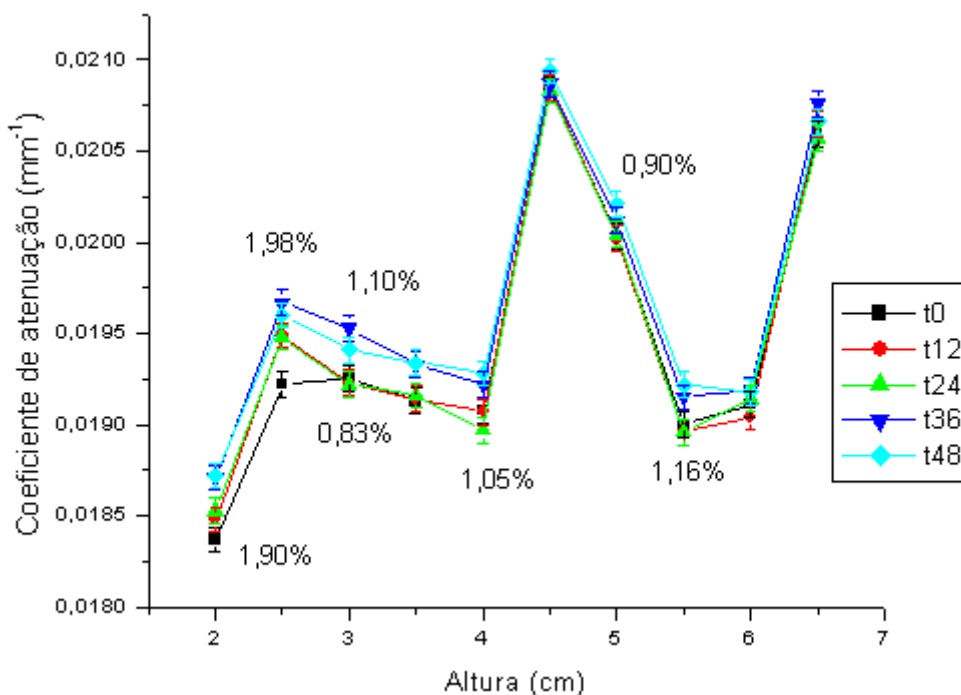


Gráfico 71: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna central calculado para amostra de resíduos siderúrgicos e areia calcária de código SAC<sub>3</sub>.

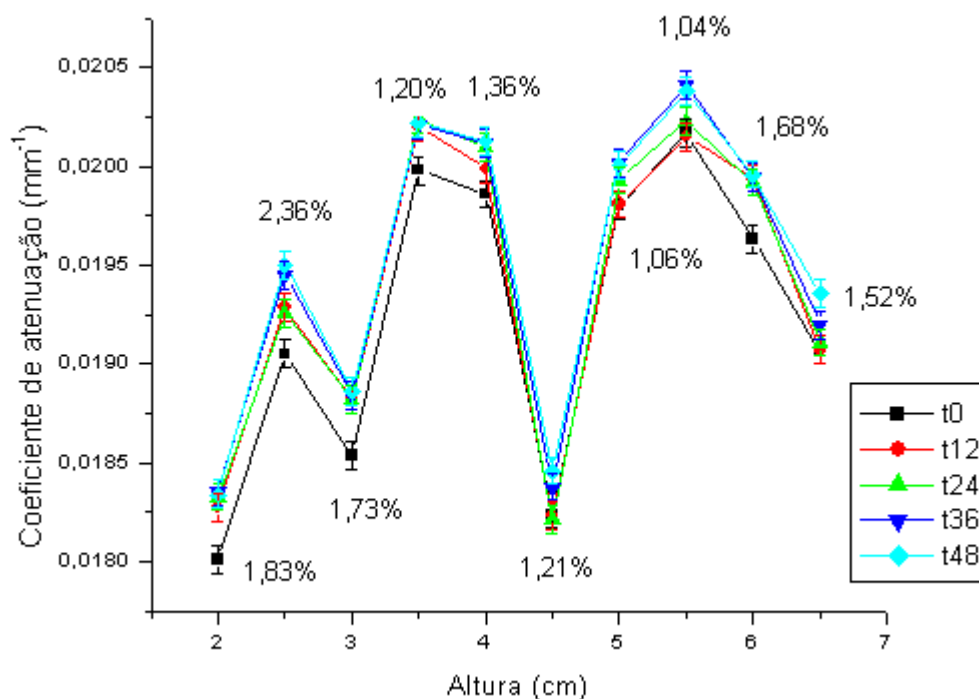
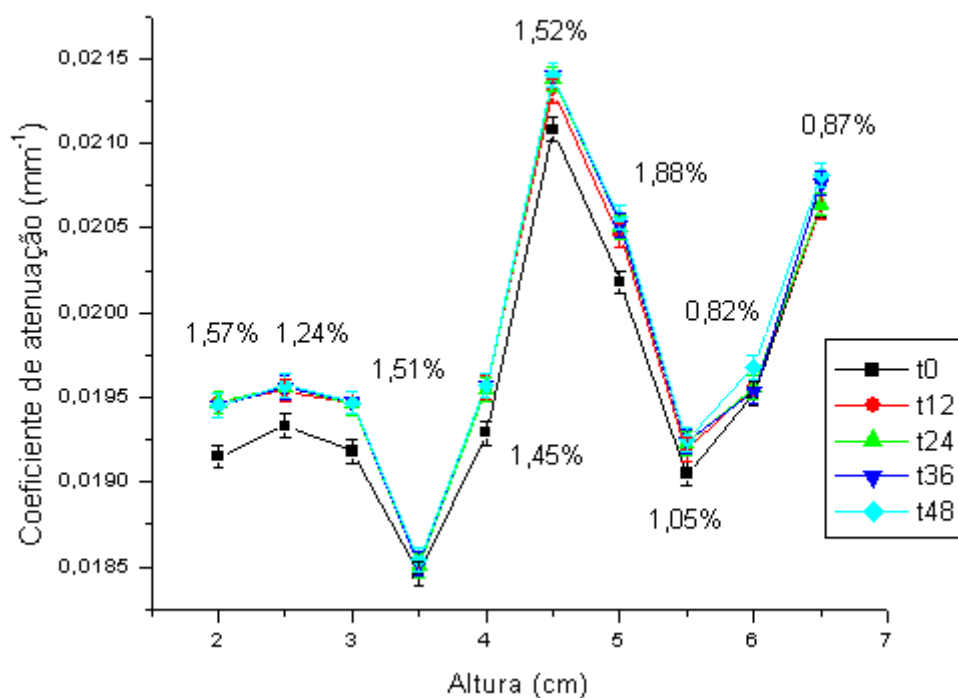
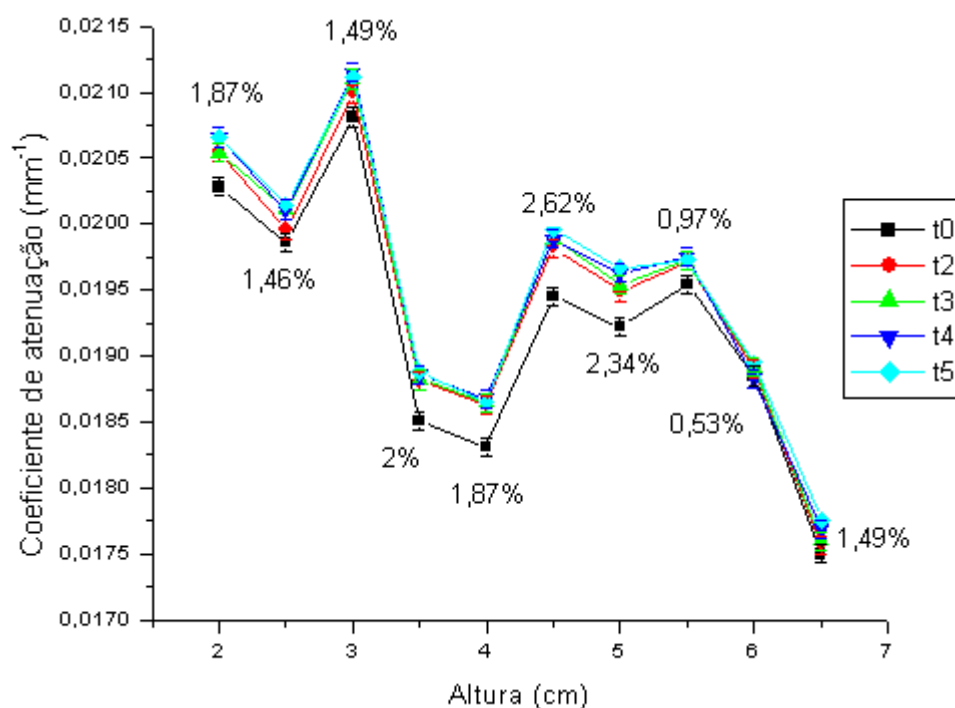


Gráfico 72: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra de resíduos siderúrgicos e areia calcária de código SAC<sub>3</sub>.



**Gráfico 73: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna do extremo direito calculado para amostra de resíduos siderúrgicos e silício velho de código SSV<sub>1</sub>.**



**Gráfico 74: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna central calculado para amostra de resíduos siderúrgicos e silício velho de código SSV<sub>1</sub>.**

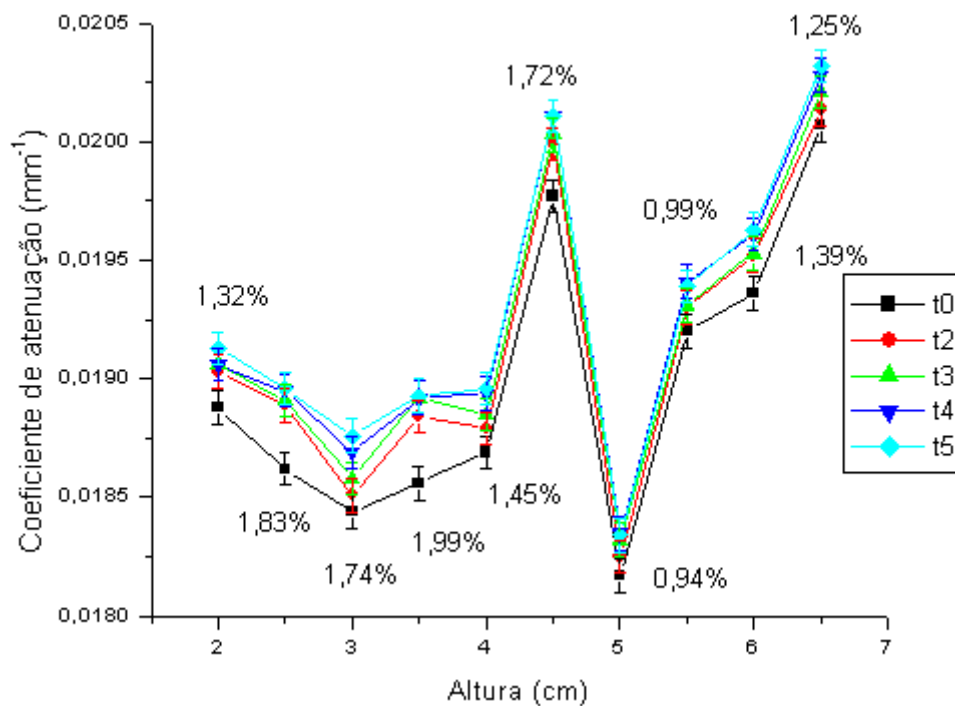


Gráfico 75: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra de resíduos siderúrgicos e silício velho de código SSV<sub>1</sub>.

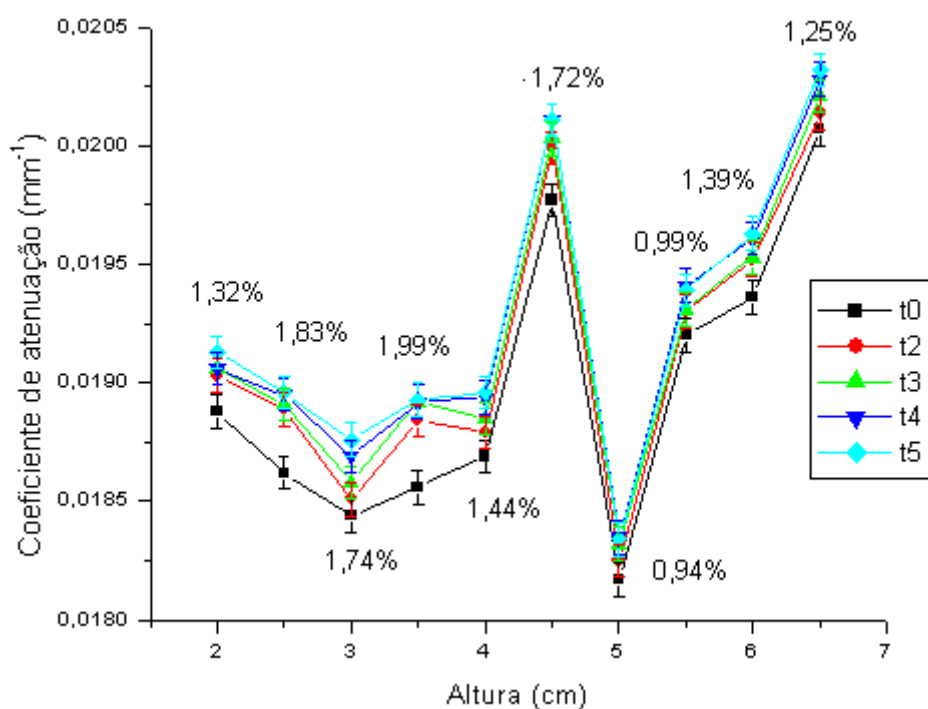
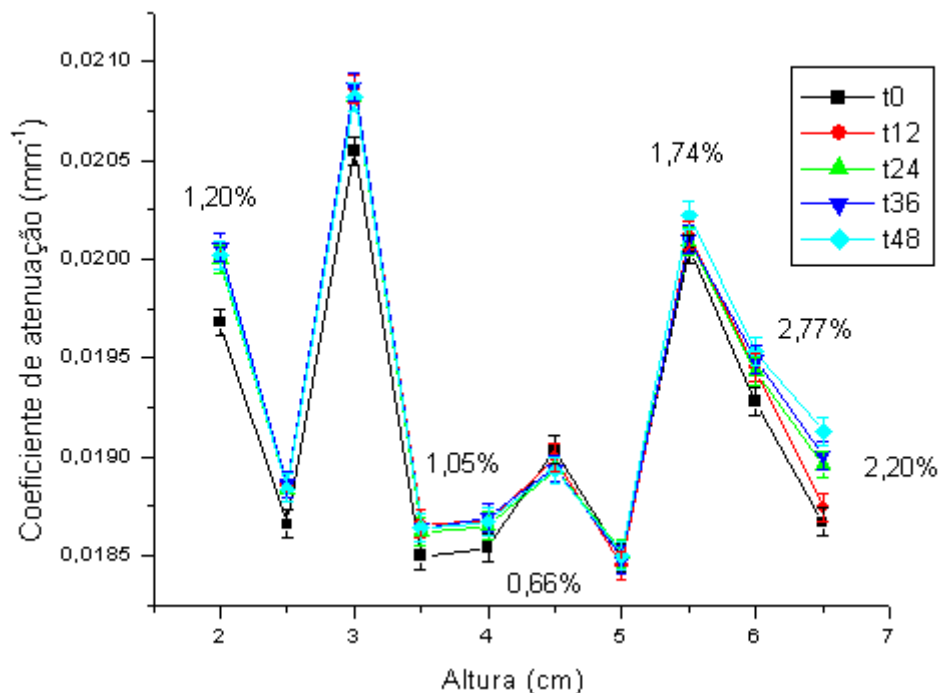
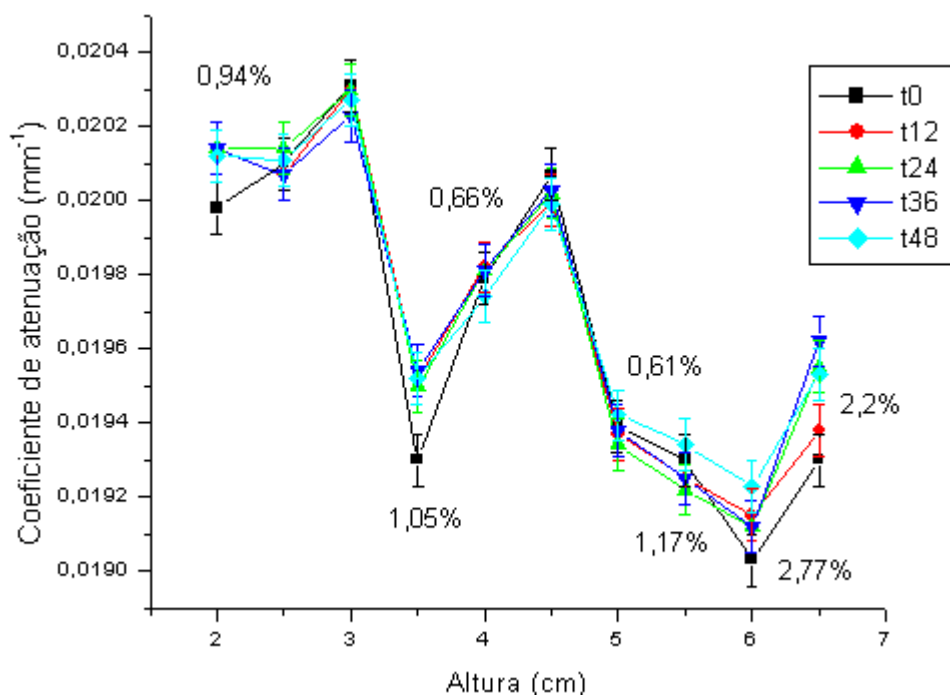


Gráfico 76: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna do extremo direito calculado para amostra de resíduos siderúrgicos e calcário velho de código SCV<sub>3</sub>.



**Gráfico 77: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da central calculado para amostra de resíduos siderúrgicos e calcário velho de código SCV<sub>3</sub>.**

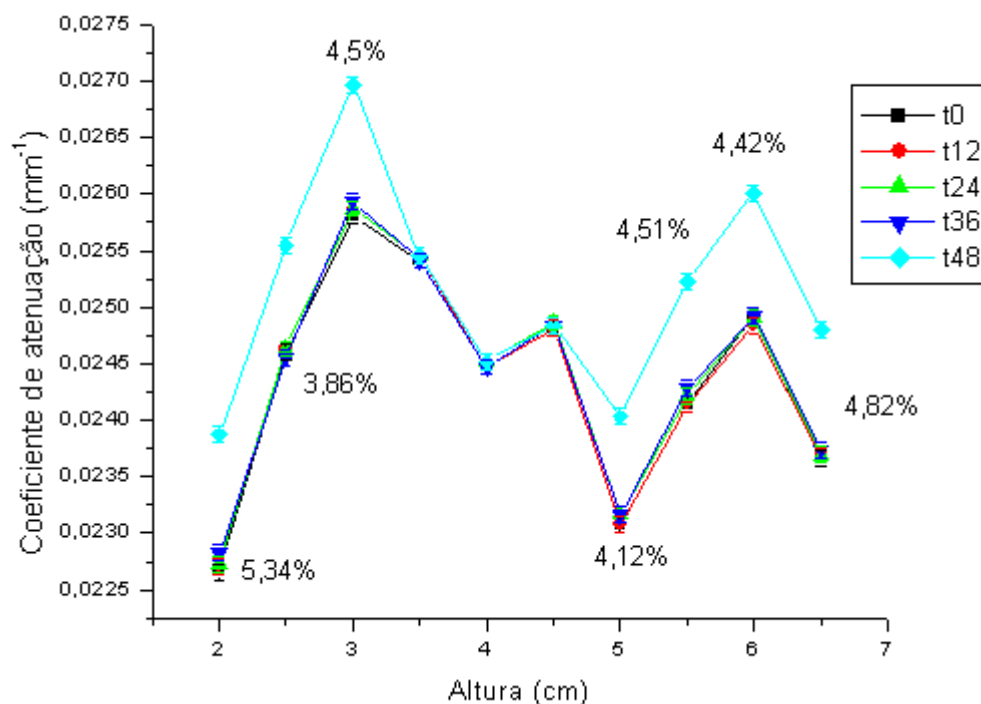


**Gráfico 78: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra de resíduos siderúrgicos e calcário velho de código SCV<sub>3</sub>.**

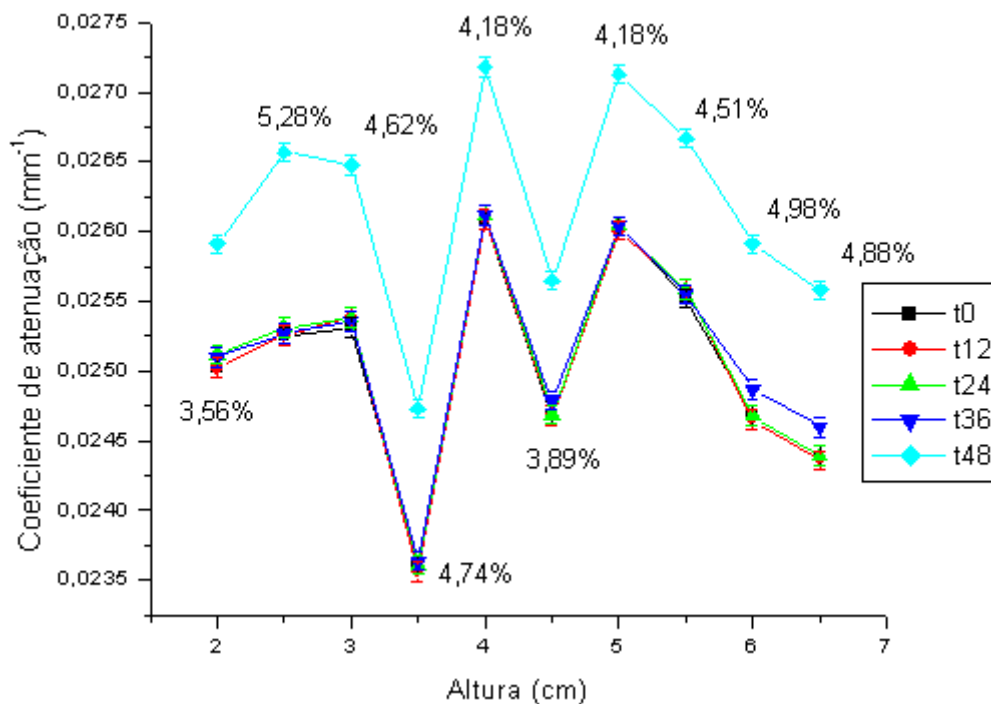
As amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e areia calcária, amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e silício velho e amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e calcário velho analisadas por um tempo de molhamento de 48 horas, também não apresentaram diferenças

significativas quanto à análise das mesmas por um período de quatro horas de molhamento. O que também indica que estas amostras possuem um tempo de molhamento rápido, e que uma análise do comportamento da frente de molhamento por um período mais curto se mostra bastante viável.

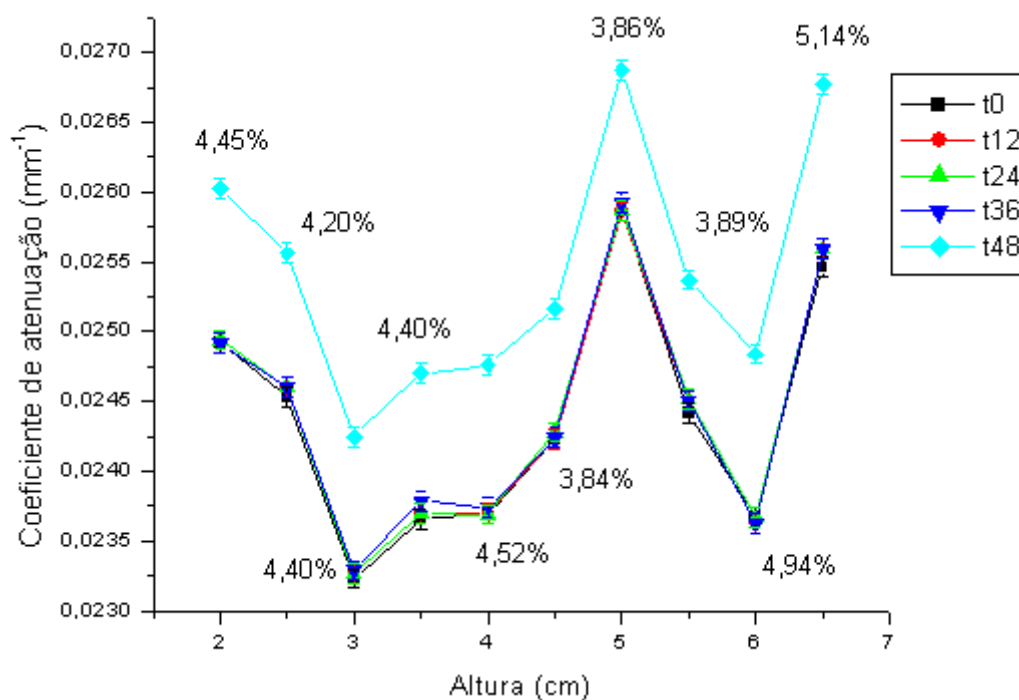
Os gráficos a seguir representam os resultados obtidos para cada coluna vertical das amostras de códigos BA<sub>5</sub>, analisadas por 48 horas.



**Gráfico 79: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna do extremo direito calculado para amostra de agregados baríticos de código BA<sub>5</sub>.**



**Gráfico 79: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna central calculado para amostra de agregados baríticos de código BA<sub>5</sub>.**

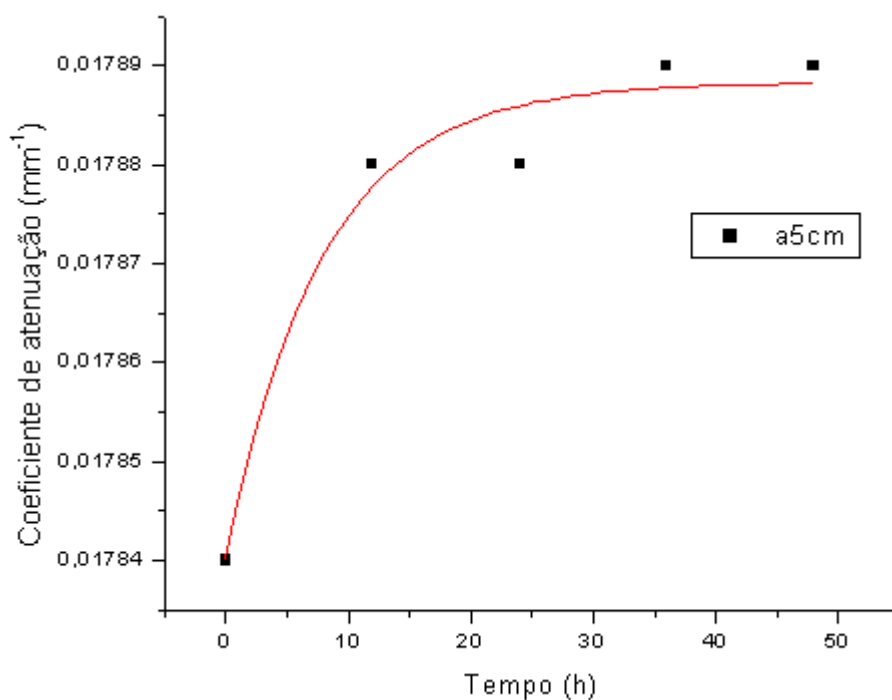


**Gráfico 80: Coeficiente de atenuação pela altura, com um tempo de 48 horas, da coluna do extremo esquerdo calculado para amostra de agregados baríticos de código BA<sub>5</sub>.**

As amostras de concreto com agregados baríticos analisadas por um tempo de molhamento de 48 horas apresentaram diferenças significativas quanto à análise das mesmas por um período de quatro horas de molhamento. O que indica que estas amostras possuem um tempo de molhamento lento, e

que uma análise do comportamento da frente de molhamento por um período mais curto não se mostra viável. Além disso, esta diferença significativa ocorreu nas últimas doze horas de análise, apresentando valores maiores do que todos os outros grupos de amostras analisados até aqui. Esta variação do coeficiente de atenuação mostra um resultado perigoso quando levamos em conta a qualidade das estruturas de concreto armado, tendo em vista a possibilidade de danificação destas estruturas.

Os gráficos a seguir representam a curva de saturação para as amostras analisadas por 48 horas. Foram escolhidos pontos de altura mais elevada das amostras, tendo em vista que estes pontos possuem maior tempo de saturação quando comparados com pontos de alturas inferiores.



**Gráfico 81: Curva de saturação para a coluna do extremo direito da amostra de referência de código Ref<sub>1</sub>.**

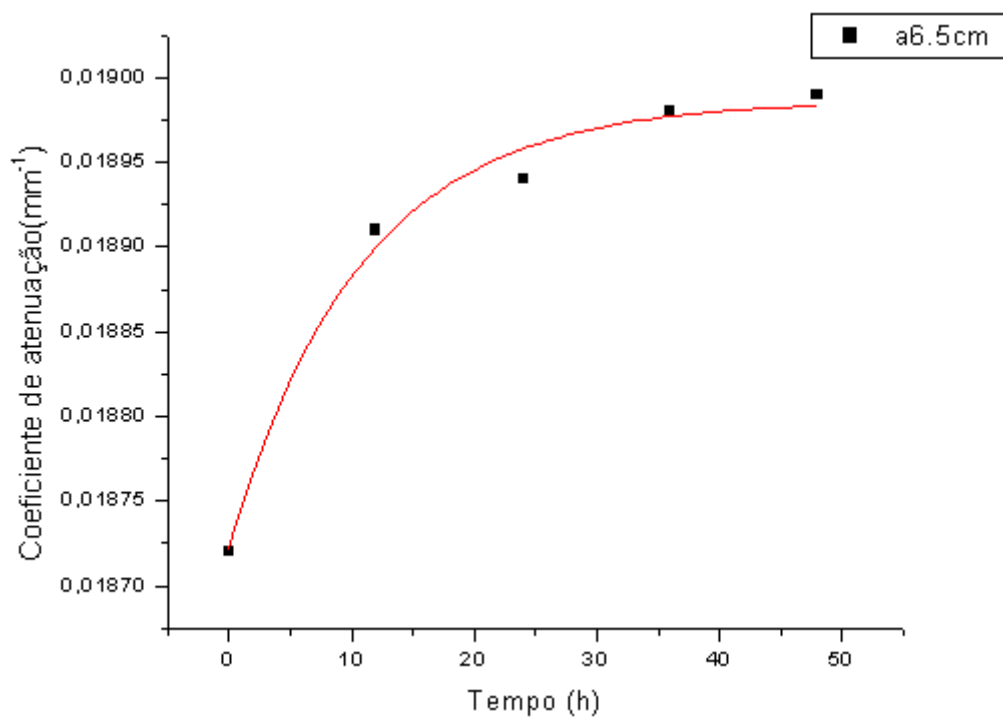


Gráfico 82: Curva de saturação para a coluna do extremo direito da amostra de concreto e areia sílica de código SAS<sub>5</sub>.

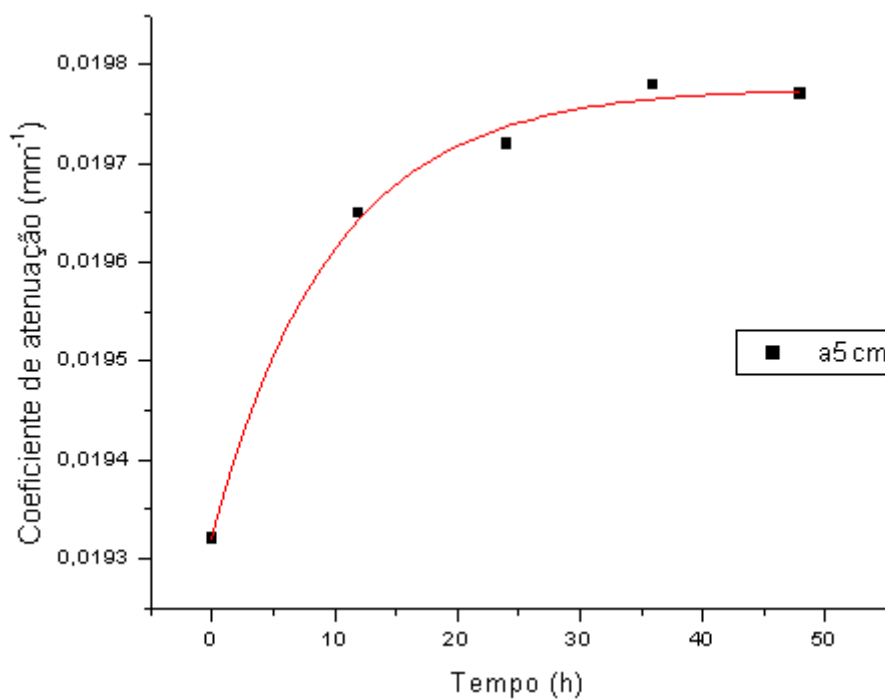


Gráfico 83: Curva de saturação para a coluna do extremo direito da amostra de concreto e areia calcária de código SAC<sub>3</sub>.

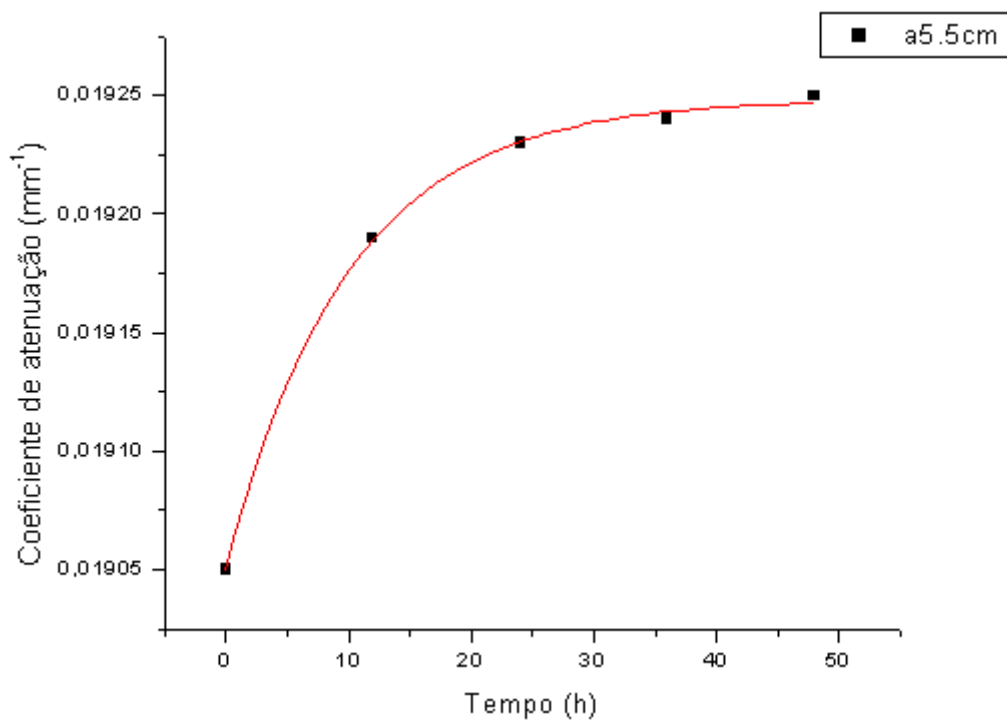


Gráfico 84: Curva de saturação para a coluna do extremo direito da amostra de concreto com silício velho de código SSV<sub>1</sub>.

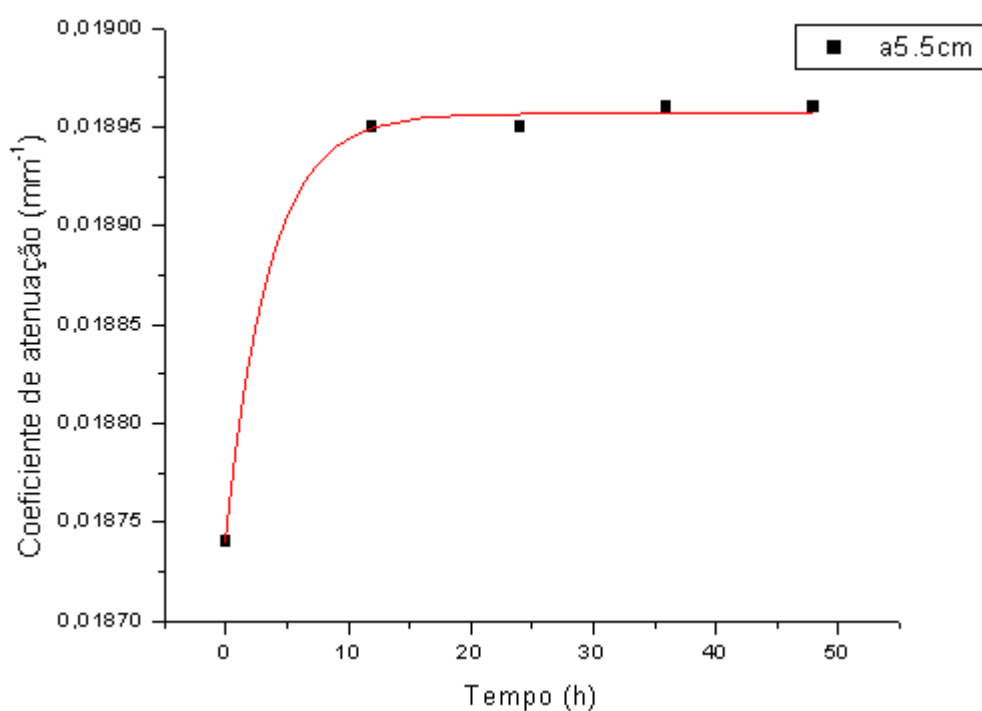
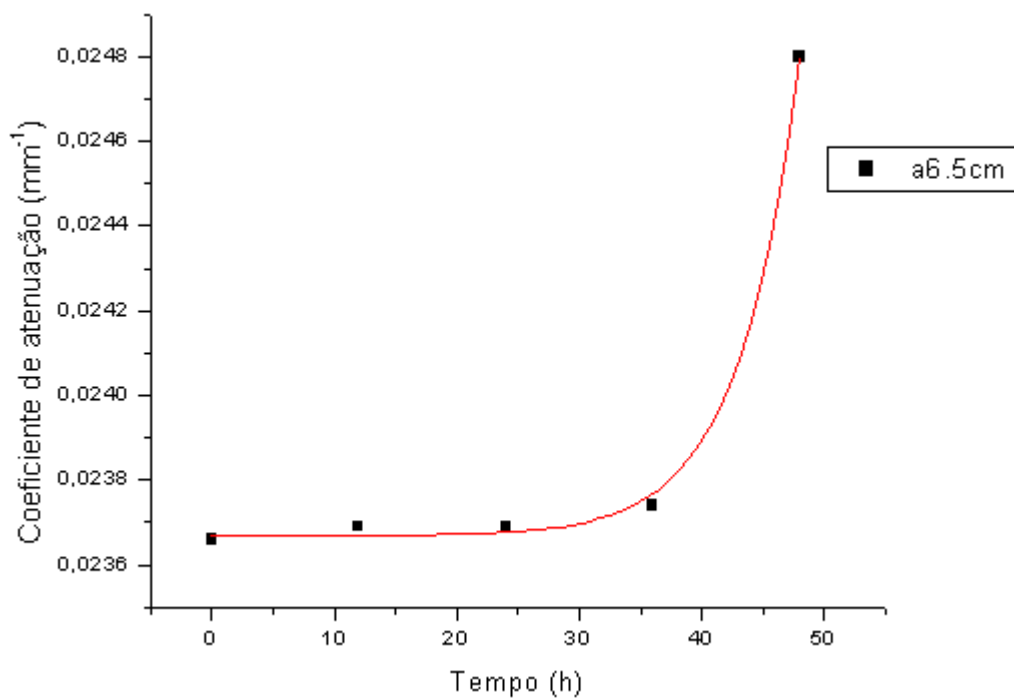


Gráfico 85: Curva de saturação para a coluna do extremo direito da amostra de concreto e calcário velho de código SCV<sub>3</sub>.



**Gráfico 86: Curva de saturação para a coluna do extremo direito da amostra de concreto com agregados baríticos de código BA<sub>5</sub>.**

Todas as amostras apresentaram curva de saturação semelhante, sendo que esta se acentua nas doze primeiras horas e é estabilizada após este período.

A única amostra que não apresenta este comportamento é a amostra com agregados baríticos. Esta amostra apresenta uma acentuação após 36 horas de molhamento, confirmando uma frente de molhamento lenta.

## 7. CONCLUSÕES

A técnica de transmissão de raios gama é rápida e confiável na determinação do coeficiente de atenuação das amostras de concreto analisadas. Em relação ao coeficiente de atenuação médio, as amostras de referência obtiveram a menor atenuação dentre as amostras analisadas. Neste contexto, as amostras de concreto com resíduos siderúrgicos e areia sílica, resíduos siderúrgicos e areia calcária, resíduos siderúrgicos e silício velho, resíduos siderúrgicos e silício novo, resíduos siderúrgicos e calcário velho obtiveram coeficiente de atenuação com baixo desvio padrão e maior que o coeficiente encontrado para as amostras de referência.

As amostras de concreto com agregados baríticos apresentaram o maior valor para o coeficiente de atenuação médio. Este comportamento é justificado pelo elevado número atômico do elemento Bário presente na amostra. Como consequência disso essas amostras precisariam de uma menor espessura para uma diminuição significativa da radiação transmitida.

Em relação a frente de molhamento, as amostras de concreto convencional apresentaram o melhor rendimento, quando levamos em conta a deterioração das estruturas de concreto armado, através do transporte de substâncias nocivas pelos capilares das amostras. As amostras de concreto e resíduos siderúrgicos calcário também obtiveram bom resultado quando levamos em conta este parâmetro.

As amostras não apresentaram grandes variações quando comparadas durante períodos curto e longo. Isso nos mostra que a frente de molhamento neste grupo de amostras é rápida e as variações significativas do coeficiente de atenuação linear ocorrem nas cinco primeiras horas.

A única exceção são as amostras de concreto com agregados baríticos, as quais apresentaram uma frente de molhamento lenta. Analisando este grupo de amostras por um período de quatro horas, é possível concluir ser um grupo de amostra vantajoso no quesito frente de molhamento. Mas este resultado é descartado quando a frente de molhamento deste grupo é analisada por um período de 48 horas, tendo em vista que nas últimas doze horas, estas amostras apresentaram a maior variação do coeficiente de atenuação dentre todas as amostras analisadas.

Por fim, quando levamos em conta atenuação da radiação e comportamento da frente de molhamento, as amostras de concreto convencionais parecem ser mais viáveis como uma possível blindagem para proteção radiológica, tendo em vista o baixo poder de transportar substâncias nocivas através dos capilares para a estrutura de concreto armado.

## REFERÊNCIAS

APPOLONI, C. R. *et al.* Estudo de cerâmica arqueológica do Paraná por técnicas nucleares não destrutivas. **Rev. Do Museu de Arqueologia e Etnologia**. São Paulo, Suplemento 2: p. 135-149, 1997.

BACCHI, O. O. S. *et al.* Atenuação de feixe de raios gama como técnica auxiliar na determinação de curvas de retenção de água no solo. **Sci. agric.**, Piracicaba, v. 55, n. 3, p. 498-502, 1998.

BURCHAM, E. M. **Física Nuclear**. Editorial Reverté, S. A, 1974.

CARNEIRO JÚNIOR, C. **Desenvolvimento de um sistema de inspeção baseado em transmissão da radiação gama para aplicação em dutos flexíveis e colunas industriais**. Dissertação (mestrado em Ciências em Engenharia Nuclear) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

EISEBERG, R., RESNICK, R. **Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. Trad. Paulo Costa Ribeiro, Enio Frota da Silveira e Marta Feijó Barroso. 13 ed. Rio de Janeiro: Campus, 1979, 928 p.

ENDO, L. Y. **Análise de cosméticos de uso infantil e adulto através da metodologia de EDXRF portátil**. Dissertação (mestrado em Física) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2013.

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement**. 3 ed. Michigan. J. Wiley & Sons, INC, 2000.

LEO, W. R. **Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how to approach**. 2 ed. Springer, 2013.

MOREIRA, A. C. **Caracterização da microestrutura de materiais porosos por microtomografia de raios X e transmissão de raios gama**. Dissertação (mestrado em Física) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006.

MOSTARDEIRO NETO, C. . **Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

NASCIMENTO FILHO, V. F. **Técnicas Analíticas Nucleares de Fluorescência de raios X por Dispersão de Energia (ED-XRF) e Reflexão Total (TXRF)**. Centro de Energia Nuclear na Agricultura/CENA-USP, Piracicaba, 1999. 32p.

OLIVEIRA, J. C. M., REICHARDT, K., VAZ, C. M. P. Atenuação da radiação gama no estudo da distribuição de partículas em solo sob floresta de cana-de-açúcar. **Sci. agric.**, Piracicaba, v. 51, n. 3, p. 399-402, 1994.

PÖTTKER, W. E., APPOLONI, C. R. Measurement of amorphous materials porosity by gamma-ray transmission methodology. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 61, n. 3–6, p. 535–536, 2001.

**Sociedade Criacionista Brasileira.** Disponível em: <[http://www.scb.org.br/fc/imagens/FC58\\_Radiacao.JPG](http://www.scb.org.br/fc/imagens/FC58_Radiacao.JPG)>. Último acesso: 4.mai.2014.

TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. Instituto de radioproteção e dosimetria**, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, 2003.

XAVIER, A. M., MORO, J. T., HEILBRON, P. F. **Princípios Básicos de Segurança e Proteção Radiológica.** Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/spr-cadastro/SegurancaProtRad.pdf>> Último acesso: 2.mai.2014.