

## Estudo de blindagem para salas de radioterapia: uma aplicação para concretos baritados

### A radiation shielding study for radiotherapy rooms: an application for barium concrete

Maikon Moreira de Pires<sup>1</sup> , Chiara das Dores do Nascimento<sup>2</sup> ,  
Everton Granemann Souza<sup>2</sup> , Gabriela Hoff<sup>3</sup> , Marlova Piva Kulakowski<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Avenida Unisinos, 950, 93022-000, São Leopoldo, RS, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Católica de Pelotas, Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação. Rua Gonçalves Chaves, 373, 96015-560, Pelotas, RS, Brasil.

<sup>3</sup>Hospital de Clínicas de Porto Alegre, Serviço de Física Médica e Radioproteção, Rua Ramiro Barcelos, 2350, 90035-903, Porto Alegre, RS, Brasil.

e-mail: maikonpires@edu.unisinos.br, chiara.nascimento@ucpel.edu.br, everton.granemann@ucpel.edu.br, ghoff.gesic@gmail.com, marlovak@unisinos.br

#### RESUMO

Para garantir a proteção dos indivíduos, diversos materiais são utilizados para blindagem de radiação ionizante, dentre eles o sulfato de bário (barita), que se destaca por apresentar boa atenuação de feixes de fótons em diferentes energias, incluindo aqueles utilizados em radioterapia. Nesse contexto, este trabalho propõe três traços de concretos baritados: T.REF (referência), T.10%SA (com substituição de 10% de cimento Portland por sílica ativa) e T.10%CV (com substituição de 10% de cimento Portland por cinza volante) para investigar os efeitos da blindagem da radiação ionizante gerada por um equipamento de radioterapia. As amostras de concreto foram caracterizadas em relação as suas densidades aparentes e resistência à compressão axial. Para avaliar eficácia da blindagem, foram realizadas medidas de atenuação da radiação do feixe primário gerado por um acelerador linear, para tensões máximas de aceleração de 6 MV e 10 MV, em função da espessura dos corpos de prova. Quanto à densidade, todos os concretos baritados foram classificados como “normais” conforme a NBR 8953 e, em relação aos ensaios de resistência à compressão, todos atenderam aos critérios estruturais e de severidade do meio, segundo a NBR 6118. No tocante a blindagem da radiação ionizante, o concreto baritado T.10%CV apresentou maior eficiência reduzindo as espessas paredes das salas de radioterapia em 80,91% e atenuando 95% da radiação incidente. Este traço é composto por cinza volante, um resíduo proveniente da queima do carvão mineral em usinas termelétricas. Portanto, além de propor um método de reaproveitamento e uma destinação adequada ao resíduo sólido, foi possível reduzir o consumo de clínquer; material responsável pela maioria das emissões de gases poluentes no processo de fabricação de cimento. Ademais, os concretos baritados T.REF e T.10%SA também se mostraram adequados para serem aplicados em barreiras de proteções de salas de radioterapia, embora tenham apresentados atenuações menores que o T.10%CV.

**Palavras-chave:** Concreto Baritado; Blindagem; Radiação Ionizante; Salas de Radioterapia.

#### ABSTRACT

To ensure the protection of individuals, different materials have been used as shielding from ionizing radiation, among them the barium sulfate (barite) stands out for presenting good attenuation of photon beams for distinct energies, including those used in radiotherapy. In this context, this work provides three compositions of barium concretes: T.REF (reference), T.10% SA (with 10% replacement of Portland cement with silica fume) and T.10% CV (with 10% replacement of Portland cement with fly ash) to investigate shielding effects against ionizing radiation generated by radiotherapy equipment. Concrete samples were characterized with respect to bulk density and axial compression strength. Regarding the effectiveness of the shielding, measurements of attenuation of the

primary beam generated by a linear accelerator were carried out, for maximum acceleration voltages of 6 MV and 10 MV, as a function of the thickness of the samples. The density measurements show that the concretes were classified as “normal” as stated in NBR 8953. In the compressive strength tests, the concretes were in line with structural and severity criteria, according to NBR 6118. Concerning the shielding of ionizing radiation, the barium concrete T.10%CV showed the greater efficiency among all the proposed compositions, reducing the thickness of the wall of radiotherapy rooms by 80.91% with an attenuation of 95% of incident radiation. This trace is composed of fly ash, a residue from the burning of coal in thermoelectric plants. Therefore, in addition to proposing a reuse method and an adequate destination for solid waste, it was possible to reduce the consumption of clinker; the material responsible for most gaseous emissions in the cement manufacturing process. Furthermore, other barium concretes as T.REF and T.10%SA also proved to be suitable for application in protective barriers in radiotherapy rooms, although they presented lower attenuations than T.10%CV.

**Keywords:** Barium Concrete; Radiation Shielding; Ionizing Radiation; Radiotherapy Rooms.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da ciência e da tecnologia o uso das radiações ionizante na medicina tem se tornado cada vez mais significativo, especialmente no setor radioterápico, onde o princípio das radiações ionizantes é adotado em até 70% de casos para tratamento de câncer maligno [1]. Estudos constataram que a radiação ionizante era danosa ao tecido humano somente após duas décadas de utilização, desde a descoberta de Röntgen. A partir de então, a *Röntgen Society* foi uma das pioneiras em publicar recomendações em relação à proteção radiológica dos usuários. Desta forma, estudos incipientes foram iniciados para a proteção de ambientes onde existam fontes radiológicas a fim de que se possa prevenir os possíveis efeitos colaterais provenientes das radiações [2, 3, 4, 5 e 6].

Para atendimento às normas nacionais e recomendações internacionais, as barreiras de proteções (blindagens) devem estar dimensionadas a fim de garantir a saúde dos profissionais de saúde ocupacionalmente expostos e do público externo à sala para que estes, não fiquem expostos a taxas de dose acima do limite permitido. Atualmente as salas de radioterapia são blindadas a partir de sua construção sendo executadas em concreto armado convencional, acarretando estruturas robustas de custo significativo. A espessura da maior parede do *bunker* (sala de radioterapia também pode ser denominada *bunker*) pode ultrapassar a 2,00 metros [7, 8, 9, 10].

Além do concreto convencional, ainda são encontradas salas de radioterapia com revestimento em folhas de chumbo (metal pesado), seja pela sua facilidade construtiva na concepção de novas salas, seja pela aceitação e adaptação em espaços existentes. O sulfato de bário (conhecida também como barita) de fórmula química  $BaSO_4$ , também tem sido uma opção na composição de materiais aplicados na blindagem de salas de radiologia, por apresentar elevada densidade tem-se demonstrado adequado na aplicação em barreiras protetivas, além de sua disponibilidade no mercado nacional e custo acessível [11]. Novos estudos são necessários a fim de investigar opções construtivas capazes de fornecer uma redução de custos na concepção deste tipo de sala, desde que mantida a eficácia da proteção e a otimização da área física ocupada por estes ambientes. Um caminho para atingir tal objetivo é a avaliação de novos materiais aplicados para este fim [7, 12, 13].

A necessidade de mitigar as demandas de energia e a geração de  $CO_2$  é uma preocupação emergente quando o assunto é a produção de cimento Portland [14, 15, 16]. Nesse sentido, a substituição parcial do clínquer por Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) em matrizes de cimento é de longe a estratégia mais realista para reduzir o impacto ambiental [17, 18, 19]. Dessa forma, é possível produzir pastas, argamassas e concretos de cimento Portland com propriedades mecânicas e de durabilidade equivalentes a matriz Portland convencional, no entanto, reduzindo as emissões de gases poluentes. Segundo a revisão sistemática da literatura elaborada por GOMES *et al.* [20], foi possível constatar que os MCS preponderantes são a sílica ativa e cinza volante em estudos recentes que avaliaram diversos materiais em variados teores de substituições ao cimento Portland em matrizes cimentícias.

Sendo assim, com intuito de otimizar a área ocupada por um bunker, uma alternativa é deter-se ao estudo de materiais a serem utilizados na sua construção de forma a suprir a escassez de estudos específicos de dosagens de concretos aplicados para este fim. Neste contexto, a presente pesquisa investigou a viabilidade da elaboração de três formulações distintas de concretos baritados identificados como T.REF (traço referência), T.10%SA (substituição de 10% de cimento Portland por sílica ativa) e T.10%CV (substituição de 10% de cimento Portland por cinza volante) para serem aplicados na construção de uma sala de radioterapia, de forma a reduzir as espessuras das paredes mantendo a atenuação à radiação X considerando como referência blindagens já existentes feitas em concreto armado convencional.

Deste modo, os novos concretos baritados propostos devem atuar em escala real na blindagem da radiação ionizante proveniente de um acelerador linear (aparelho utilizado em salas de radioterapia para tratamento do

câncer). Para comprovar a eficiência dos concretos propostos a densidade aparente e a resistência à compressão axial com 7 e 28 dias de idade para corpos de prova cilíndricos ( $5,0 \times 10,0$  cm) foram avaliadas, assim como, a capacidade de atenuação frente a exposição à radiação ionizante para blocos prismáticos de concreto de seção transversal  $12,0 \times 12,0$  cm e espessuras de 1,0 cm, 3,0 cm e 6,0 cm.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

Alguns materiais foram selecionados para serem utilizados como componentes na construção das amostras, observando compósitos que detivessem uma boa interação na aplicação de concretos, conforme ilustrado na Figura 1. Deste modo, levou-se em consideração a seleção de materiais que estivessem acessíveis no mercado regional e que detivessem constância de produção, garantido o fornecimento dos mesmos e exequibilidade do empreendimento na ocasião da construção de uma sala de radioterapia.

O aglomerante adotado para elaboração dos concretos baritados é o cimento do tipo CPV de alta resistência inicial (ARI), estando suas propriedades físicas e químicas indicadas na Tabela 1. Este cimento possui maior porcentagem de clínquer, por este motivo é considerado um cimento mais puro e por fim, possui granulometria mais fina quando comparado aos outros tipos de cimento, o que viabiliza o desenvolvimento da resistência em favor da sua maior área superficial disponível [21].

Concretos baritados são assim chamados pois utilizam em sua composição sulfato de bário natural (ou barita), sendo este um mineral de constituição inorgânica, quimicamente inerte, extraído de jazidas e disposto em diferentes granulometrias. Possui fórmula química  $BaSO_4$  e sua densidade pode variar de acordo com a amostra da barita utilizada, podendo ser barita branca bruta ( $3,79 \text{ g/cm}^3$ ), barita branca mista ( $3,10 \text{ g/cm}^3$ ), barita roxa bruta ( $2,99 \text{ g/cm}^3$ ), entre outras [23]. A barita utilizada nesse trabalho foi fabricada pela empresa NEON, Comercial Reagentes Químicos Ltda., da cidade de Suzano/SP, do tipo branca bruta com grau de pureza de 98,46%.

Como agregado foi utilizado rocha de basalto adquirido em brita 1 (de 9,50 mm a 19 mm) da empresa Pedracon Mineração Ltda, da cidade de Campo Bom/RS. Em relação aos materiais cimentícios suplementares foram utilizadas cinza volante e sílica ativa na incorporação dos concretos baritados avaliados. A cinza volante de carvão mineral utilizada neste trabalho é oriunda e cedida da Usina Termelétrica Presidente Médici da CGTEE/Eletróbrás localizada na cidade de Candiota/RS. Por outro lado, a sílica ativa utilizada foi obtida da empresa Diprotec localizada em Curitiba/PR. Por fim, como aditivo utilizou-se o *PowerFlow* 1180, um aditivo superplastificante de alto desempenho fornecido pela empresa Concreto Schumann de Pelotas/RS.



**Figura 1:** (a) – cimento CPV (ARI), (b) sulfato de bário (barita), (c) rocha de basalto, (d) sílica ativa e (e) cinza volante.

**Tabela 1:** Propriedades físicas e químicas do cimento, segundo dados do fabricante.

Propriedades Físicas		Valor	Limites*	Propriedades Químicas	Valor (%)	Limites*
Tempo de pega	Inicial (h:min)	02:13	≥1:00	SO <sub>3</sub>	3,15	≤4,5
	Final (h:min)	03:00	≤10:00	MgO	4,99	≤6,5
Finura na peneira # 200 (%)		0,13	≤6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,24	–
				SiO <sub>2</sub>	19,06	–
Finura na peneira # 325 (%)		1,24	–	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,58	–
				CaO	60,23	–
Consistência normal (%)		29,2	–	Perda ao fogo	3,24	≤6,5
				Resíduo insolúvel	0,68	≤6,5
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )		3,12	–	CaO livre	1,43	–
				Equivalente alcalino	0,59	–
*Limites Normativos – NBR 16697 (ABNT, 2018) [22]				*Limites Normativos – NBR 16697 (ABNT, 2018) [22]		

Fonte: Votoran (2021).

## 2.2. Densidades e granulometrias dos materiais

O ensaio de determinação da densidade real tem como objetivo avaliar e quantificar a densidade real e efetiva do material ensaiado de acordo com a norma DNER-ME 093/94 [24]. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Católica de Pelotas (UCPel) sendo os resultados apresentados na Tabela 2.

Conhecer os MCS quanto ao seu tamanho granulométrico é de suma importância quando se pretende um melhoramento de matrizes cimentícias. A finura destes materiais impacta diretamente no processo de hidratação do cimento; quanto maior a finura, mais reativo tende ser o material e mais efetivo será o efeito fíler ocasionado [25]. Deste modo, a técnica escolhida para obtenção dos tamanhos médios das partículas foi a granulometria por difração a laser, sendo amplamente aplicada para materiais de pequeno diâmetro. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais (Novonano) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel) para avaliar a granulometria do cimento CPV, sulfato de bário, sílica ativa e cinza volante. As curvas e histogramas de distribuição granulométricas obtidas estão ilustradas na Figura 2 e na Tabela 3, estão indicados os resultados do diâmetro médio (DMédio) e diâmetros D10, D50 e D90.

Para o basalto adquirido em brita 1 que possui diâmetro de grão superior ao permitido no ensaio de difração a laser, foi realizado o ensaio de granulometria de acordo com a NBR NM 248/2003 [26] para obtenção da respectiva curva, assim como, a determinação do módulo de finura. A curva granulométrica do basalto está ilustrada na Figura 3 e o módulo de finura obtido foi de 4,48.

A partir da brita de 1 de basalto, outras granulometrias foram geradas pelo processo de moagem da referida rocha. Essas granulometrias foram obtidas através do equipamento denominado “Los Angeles” utilizado para determinar a abrasão de materiais constituintes de uma pavimentação, conforme preconiza a NBR 16974/2021 [27]. Neste equipamento adotou-se um ciclo de 500 voltas com 10 esferas de ferro em seu interior. A partir desse procedimento outras duas granulometrias foram obtidas, a primeira denominada areia artificial de basalto e a segunda, pó de basalto, conforme diâmetros médios indicados na Tabela 4.

**Tabela 2:** Densidade real dos materiais estudados.

Material	Densidade real (g/cm <sup>3</sup> )
Cimento CPV (ARI)	3,06
Sulfato de Bário	3,73
Areia Artificial de Basalto	3,27
Pó de Basalto	2,58
Sílica Ativa	2,04
Cinza Volante	1,60

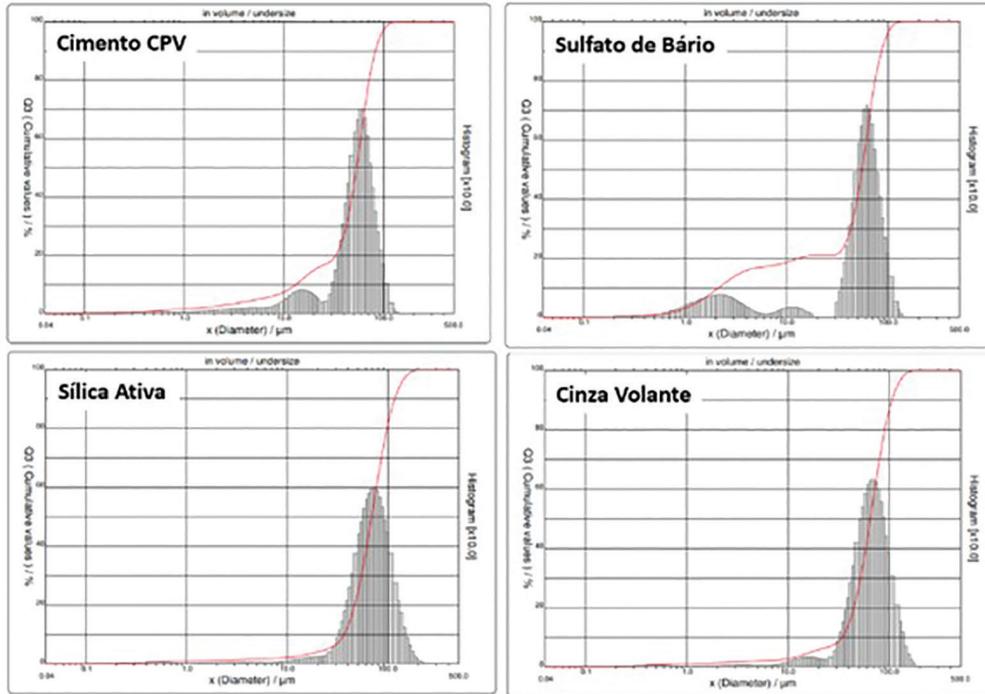


Figura 2: Curvas e histogramas de distribuição granulométricas.

Tabela 3: Análise granulométrica dos materiais estudados.

Material	DMédio (μm)	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
Cimento CPV (ARI)	51,88	13,16	53,47	82,38
Sulfato de Bário	51,00	2,12	55,16	85,65
Sílica Ativa	72,76	36,49	68,74	116,55
Cinza Volante	67,12	34,14	64,68	106,06

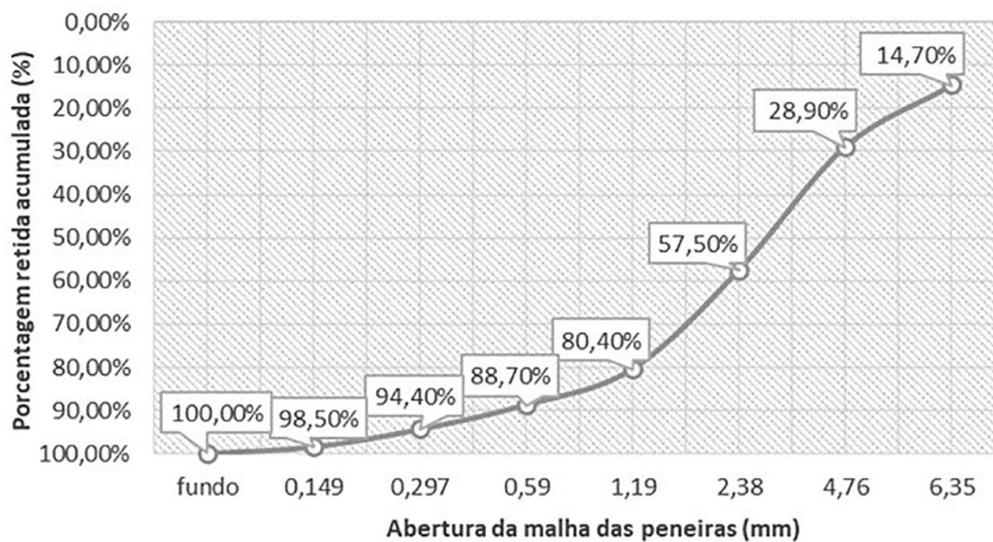


Figura 3: Curva granulométrica do basalto.

Tabela 4: Diâmetros médio do basalto beneficiado.

Material	DMédio (μm)
Areia Artificial de Basalto	297,00
Pó de Basalto	149,00

**Tabela 5:** Composições unitárias dos traços de concreto.

Material	T.REF	T.10%SA	T.10%CV
Água	0,25	0,25	0,25
Aditivo Superplastificante PowerFlow 1180	0,03	0,03	0,03
Areia Artificial de Basalto	0,55	0,55	0,55
Cimento CPV – ARI	1,00	0,90	0,90
Cinza Volante	0,00	0,00	0,10
Pó de Basalto	0,70	0,70	0,70
Sílica Ativa	0,00	0,10	0,00
Sulfato de Bário (Barita)	0,30	0,30	0,30

### 2.3. Dosagem dos concretos baritados

Este trabalho propôs três traços distintos de concretos baritados para viabilizar a análise comparativa de desempenho das diferentes composições frente à blindagem de radiação ionizante. Os traços de concretos baritados propostos foram denominados T.REF (traço referência), T.10%SA (traço com substituição de 10% de cimento Portland por sílica ativa) e T.10%CV (traço com substituição de 10% de CP por cinza volante) sendo seus valores unitários expressos na Tabela 5.

É possível perceber que todas as composições propostas neste trabalho possuem em sua composição o sulfato de bário, sendo este o motivo de serem denominados concretos baritados. As composições T.10%SA e T.10%CV se diferem do T.REF pela substituição de 10% de cimento Portland CPV por material pozzolânico (sílica ativa ou cinza volante).

### 2.4. Mistura, moldagem e cura dos concretos baritados

O processo de preparação das amostras, mistura, moldagem e cura foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Católica de Pelotas (UCPel). Para moldagem dos corpos de prova (CP's) de cada traço proposto, o processo foi iniciado pela secagem de todos os materiais em estufa com temperatura controlada, seguido do resfriamento em temperatura ambiente e pesagem dos materiais dadas as proporções necessárias.

O primeiro processo de mistura se deu a seco através de um misturador elétrico de argamassas da marca Cortag com 1600 watts de potência. Foi estipulado um tempo mínimo de 10 minutos para realização deste processo. Nesta etapa da mistura foi adotada rotação aproximada de 440 rpm. Após a mistura a seco, iniciou-se o processo de mistura com a adição de água e aditivo superplastificante. O tempo médio necessário para os traços atingirem a homogeneização foi de 12 minutos e a rotação do equipamento atingiu 660 rpm. Na Figura 4 (a, b, c, d) é ilustrado o processo de homogeneização adotado da elaboração dos concretos baritados deste estudo. Os CP's foram moldados obedecendo as premissas fixadas segundo a NBR 5738/2015 [28]. Para este estudo foram elaborados corpos de prova cilíndricos e prismáticos.

#### 2.4.1. Corpos de prova cilíndricos

Foram moldados ao todo 18 CP's cilíndricos para serem rompidos metade com 7 dias e a outra metade com 28 dias de idade. Os referidos CP's possuem 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura, sendo utilizados para determinação da densidade aparente e resistência à compressão axial simples dos concretos baritados. Na Tabela 6 é possível verificar a quantidade de corpos de prova moldados para cada traço em função do tipo de concreto baritado e idade das amostras.

O adensamento adotado foi o de forma manual obedecendo a NBR 5738/2015 [28]. A haste utilizada no ensaio é do tipo haste metálica de 16 mm de diâmetro por 600 mm de comprimento para realização dos respectivos golpes a fim de viabilizar o adensamento por camada. Nas primeiras 24 horas de cura os corpos de prova permaneceram em temperatura ambiente, após este período foram desformados passando para o processo de cura submersa em temperatura ambiente por 28 dias. A cura submersa foi adotada tanto para os corpos de prova cilíndricos quanto para os prismáticos, tendo em vista que curas com temperatura elevada, por exemplo, pode acelerar a velocidade de hidratação da matriz, no entanto, pode impactar negativamente na formação da microestrutura da amostra e por consequência, impactar negativamente nas propriedades mecânicas das matrizes cimentícias, conforme observado por SILVA *et al.* [29] e MATOS *et al.* [30].



**Figura 4:** (a) misturador vertical utilizado na homogeneização, (b) processo de mistura a seco, (c) processo de mistura úmida e (d) moldagem dos corpos de prova.

**Tabela 6:** Número de CP's cilíndricos por tipo de traço.

Ensaio	Resistência à Compressão Axial		Total de corpos de Prova por traço
	7 dias	28 dias	
T.REF	3	3	6
T.10%SA	3	3	6
T.10%CV	3	3	6
			18

#### 2.4.2. Corpos de prova prismáticos

Foram moldados sete CP's prismáticos para cada traço com seção de  $12,0 \times 12,0$  cm e espessuras variadas (1,0 cm, 3,0 cm e 6,0 cm). Na Tabela 7 é ilustrado o número de CP's moldados para cada espessura proposta, ou seja, para o CP de 1,0 cm foi moldado apenas uma amostra para cada traço.

O adensamento adotado foi de forma mecânica obedecendo a NBR 5738/2015 [28]. Nas primeiras 48 horas de cura os CP's ficaram em temperatura ambiente e após este período, foram desformados passando para o processo de cura submersa em temperatura ambiente por 28 dias. Na Figura 5 estão ilustrados os CP's prismáticos utilizados no processo de irradiação.

Os CP's prismáticos foram moldados para serem expostos à radiação ionizante com 28 dias de idade. O processo de irradiação foi iniciado com a exposição dos sete CP's de cada traço posicionados na frente da fonte de radiação, partindo da espessura de 1,0 cm e até atingir a espessura máxima de 34,0 cm. Para determinar a eficácia da blindagem, uma câmara de ionização foi posicionada atrás dos CP's durante o processo de irradiação de forma a mensurar a radiação transmitida.

**Tabela 7:** Número de CP's prismáticos por tipo de traço.

Dimensão (cm)	Espessura (cm)	Número
12,0 × 12,0	1,0	1
12,0 × 12,0	3,0	1
12,0 × 12,0	6,0	5
Número de CP's por traço		7
Número total de CP's (3 traços)		21


**Figura 5:** CP's prismáticos utilizados durante o processo de irradiação.

## 2.5. Verificação das propriedades mecânicas dos concretos baritados

As verificações das propriedades mecânicas dos concretos propostos foram realizadas com os corpos de prova cilíndricos a fim de avaliar as densidades aparentes e resistências à compressão axial obtidas. Estas duas técnicas foram executadas no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Católica de Pelotas (UCPel).

### 2.5.1. Densidade aparente

As densidades aparentes dos concretos baritados foram obtidas pela razão de suas massas pelos seus respectivos volumes. Para este cálculo foram utilizados CP's cilíndricos por possuírem volume definido e pela sua versatilidade, podendo ser empregados para realização de outros ensaios como de resistência à compressão axial, resistência à tração, durabilidade frente ao ataque de cloretos e sulfatos, entre outros. Com o auxílio da balança de precisão registrou-se as massas dos 18 corpos de prova, sendo seis CP's para cada traço. Obedecendo a NBR 9778/2009 [31] os corpos de prova tiveram suas massas registradas após 72 horas de secagem em estufa com temperatura controlada entre 90 e 100°C. O resultado da densidade foi obtido através da média de seis leituras realizadas para os CP's cilíndricos de mesmo traço.

### 2.5.2. Resistência à compressão axial simples

Para determinar os valores de resistência à compressão axial simples, os CP's cilíndricos foram ensaiados na sua integralidade conforme descreve a NBR 5739/2018 [32] com 7 e 28 dias de idade. O processo foi iniciado com o posicionamento dos CP's na prensa da marca WPM, modelo 300 b, com capacidade de 300 t, seguido da inserção de pratos nas faces inferior e superior dos CP's para receberem forças verticais de forma distribuída. Na sequência, a prensa hidráulica foi acionada com aplicação de carga contínua sem choque, com velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s. Esta velocidade foi mantida enquanto o CP sofria deformação até atingir a sua ruptura. O valor final de resistência à compressão foi obtido dividindo a carga de ruptura pela área da seção transversal do CP.

## 2.6. Determinação da espessura mínima de blindagem e cálculo do coeficiente de atenuação linear (k)

A etapa final do programa experimental foi realizada a partir da exposição dos corpos de prova prismáticos à radiação na sala da radioterapia de um hospital localizado da região sul do Brasil. O equipamento emissor da radiação ionizante na sala de radioterapia é o acelerador linear, conforme ilustrado na Figura 6. Estes ensaios têm por objetivo analisar a capacidade de blindagem dos concretos baritados, através da determinação da espessura mínima de blindagem e do cálculo do coeficiente de atenuação linear (k) para cada traço proposto.

O coeficiente de atenuação linear foi obtido para cada um dos três traços propostos para duas tensões (energias) distintas de penetração, 6 MV e 10 MV, tendo em vista que o acelerador linear utilizado é configurado pelo fabricante (Varian – Clinac CX Accelerator) para trabalhar somente com estas duas tensões.

A eficácia da blindagem radioativa de cada CP prismático foi avaliada por uma câmara de ionização posicionada no verso de cada amostra, na face oposta a fonte de emissão de raios X, de forma a mensurar a radiação transmitida através do referido CP de concreto baritado. A câmara de ionização utilizada nesse estudo está ilustrada na Figura 7 posicionada frente ao acelerador linear. O processo de exposição consiste em posicionar o CP no foco do equipamento, ficando a câmara de ionização na face posterior a face exposta à radiação, conforme mostra a Figura 8.

Foi incidida radiação na amostra de menor espessura (1,0 cm) e medida pela câmara de ionização a intensidade de energia transmitida na ocasião. Este processo de incidência de radiação e leitura foi repetido cinco vezes tendo como resultado a média destas cinco leituras. Após, foi inserido juntamente ao CP de 1,0 cm, o CP de 3,0 cm totalizando uma espessura de 4 cm, sendo a radiação novamente incidida e a leitura realizada. O processo foi repetido acrescentando-se os blocos de concreto baritado até que a espessura final de 34,0 cm fosse atingida, conforme ilustrado na Figura 9.



Figura 6: Acelerador Linear na sala de radioterapia.

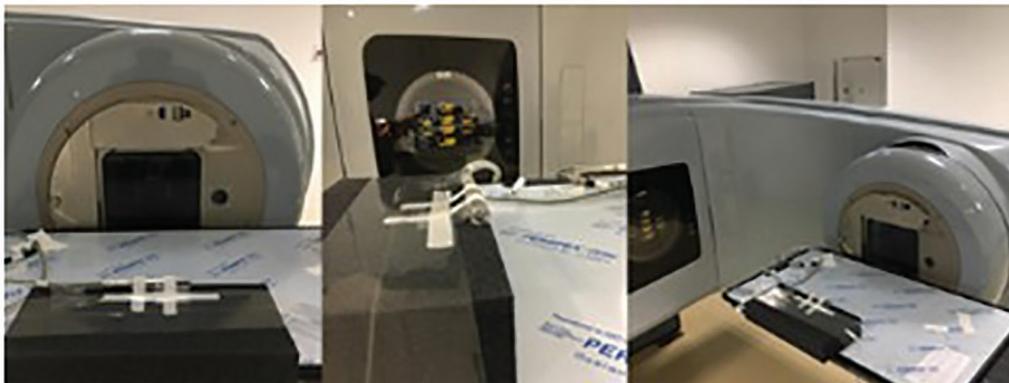
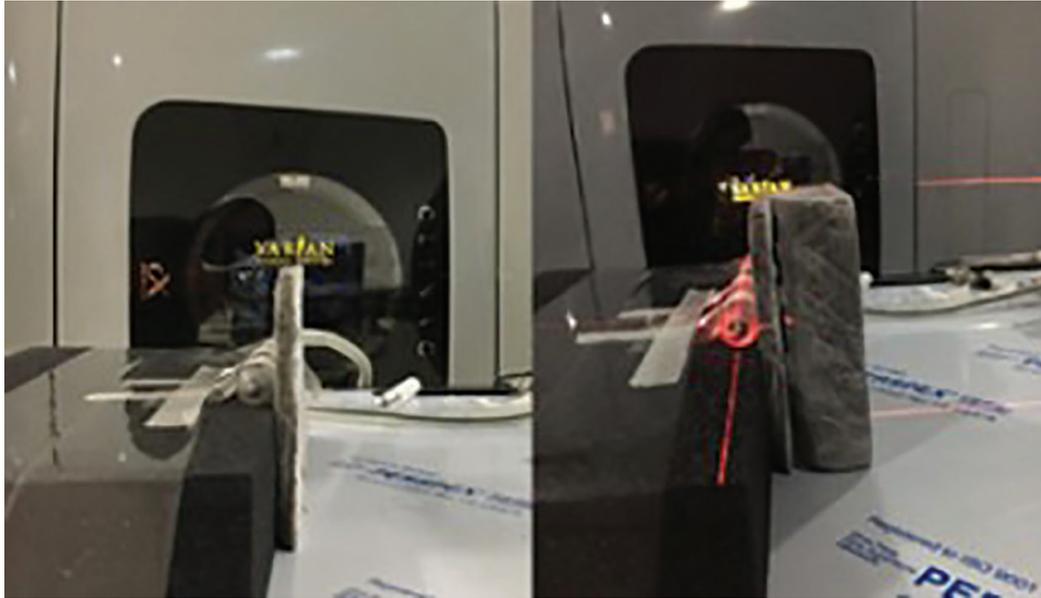


Figura 7: Câmara de ionização instalada junto ao acelerador linear.



**Figura 8:** Câmara de ionização no verso dos corpos de prova prismáticos.



**Figura 9:** Espessura máxima atingida (34,0 cm) com sete CP's prismáticos.

Para cada espessura de CP era obtido um valor correspondente a radiação transmitida pelo CP. Vale ressaltar que a radiação emitida pela fonte de raios X é dividida em radiação atenuada e radiação transmitida. A radiação atenuada é a radiação absorvida pelo CP (matéria), por outro lado, a radiação transmitida é a radiação que percorreu (atravessou) a amostra de concreto baritado. A partir destes resultados foram elaborados gráficos onde cada ponto possui uma coordenada; o eixo da abscissa indica a espessura dos corpos de provas em centímetros e o eixo da ordenada indica a radiação transmitida em porcentagem.

O coeficiente de atenuação linear (parâmetro  $k$ ) foi obtido através do expoente da equação que gerou a linha de tendência dos pontos marcados no gráfico. Segundo SCAFF [33] o coeficiente de atenuação linear ( $k$ ) indica a velocidade de queda da curva exponencial, em outras palavras, indica a eficácia do material frente a blindagem da radiação. Quanto maior o valor de “ $k$ ”, mais eficaz é a atenuação da radiação à medida que se aumenta a espessura do material absorvedor. Sendo assim, para cada traço proposto e para cada tensão, foi obtido um único “ $k$ ”.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Densidade aparente

O resultado de densidade aparente para cada traço foi obtido pelo valor médio das densidades obtidas de 6 corpos de prova. Os resultados médios estão acompanhados do respectivo desvio padrão conforme ilustrado na Figura 10.

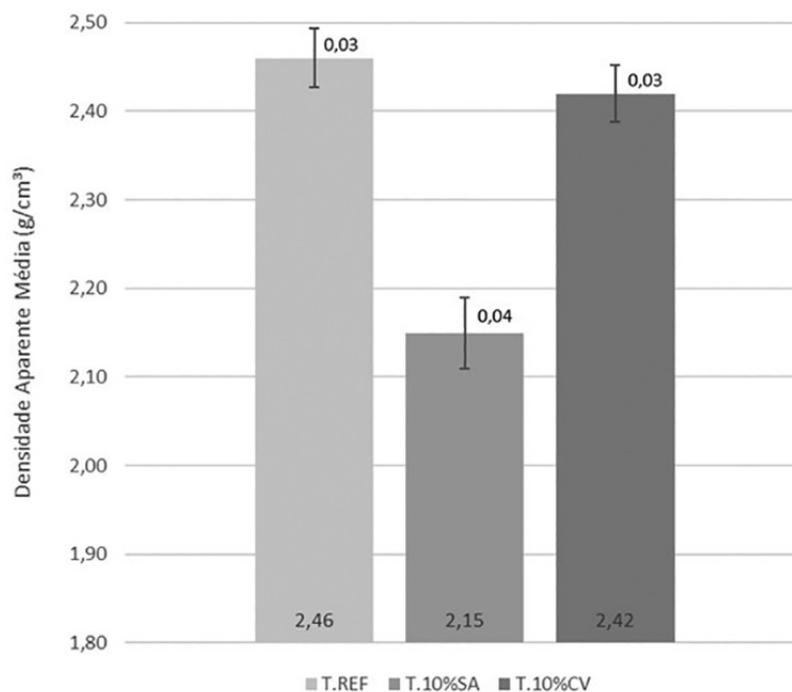
As densidades médias aparentes de 2,46 g/cm<sup>3</sup>, 2,15 g/cm<sup>3</sup> e 2,42g/cm<sup>3</sup> obtidas para as composições T.REF, T.10%SA e T.10%CV, respectivamente, conferem a estes concretos baritados a classificação “normal” de acordo com a NBR 8953/2015 [34]. Diferentemente dos concretos pesados com densidades superiores a 2,80 g/cm<sup>3</sup>, os novos compostos por serem considerados “normais”, viabilizam a concepção de estruturas de menor carregamento. Deste modo estruturas “aliviadas” acarretam num melhoramento do projeto de fundações, otimizam a demanda de espaço físico, assim como, facilitam o processo construtivo deste tipo de obra.

Os resultados de densidades aparentes apresentados também estão de acordo com os de SILVA *et al.* [29], onde as densidades com material pozolânico apresentaram valores menores quando em comparação à mistura referência (sem adição). Isto pode ser explicado em virtude de a densidade do cimento Portland ser maior do que a densidade da sílica ativa e a cinza volante, portanto, a partir das substituições é esperado que as densidades das matrizes com adições sejam menores.

A partir dos resultados apresentados espera-se que o T.10%SA apresente o menor desempenho mecânico, tendo em vista sua respectiva densidade apresenta redução de aproximadamente 12% quando comparada aos demais traços. Possivelmente o processo de cura não impactou nestes resultados, isto porque os CP's foram moldados de igual forma, ou seja, na mesma data e em temperatura ambiente igual a todos os traços. Sendo assim, constata-se que o processo de hidratação da microestrutura das matrizes foi determinante nesta variação da densidade do T.10%SA. Para corroborar o resultado de densidade, o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio comprovaria a elevada porosidade adquirida pelo traço de concreto com sílica ativa, que pôde ser observada visualmente no instante do rompimento das amostras no ensaio de resistência à compressão. Ademais, destaca-se os reduzidos desvios padrão obtidos, que por sua vez, fornecem maior confiabilidade aos resultados apresentados.

#### 3.2. Resistência à compressão axial simples

Os resultados de resistências à compressão axial para cada CP estão indicados nas Figuras 11, 12 e 13 em megapascal (MPa), acompanhados de suas médias e os respectivos desvios-padrão. Estes resultados foram obtidos



**Figura 10:** Densidades aparentes médias obtidas para cada traço em g/cm<sup>3</sup>, com seus respectivos desvios padrão.

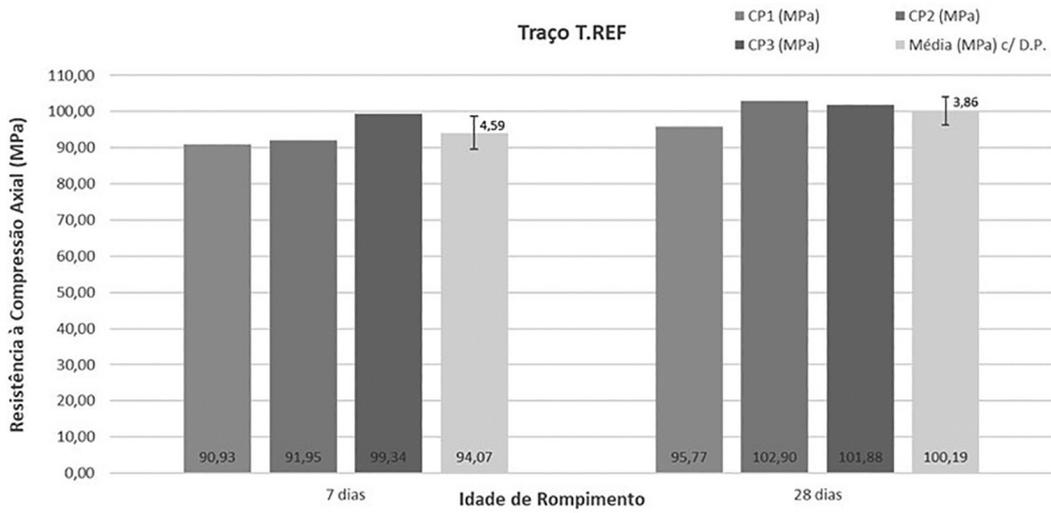


Figura 11: Resistências à compressão axial obtidas para cada CP do traço T.REF e média dos resultados com o desvio padrão.

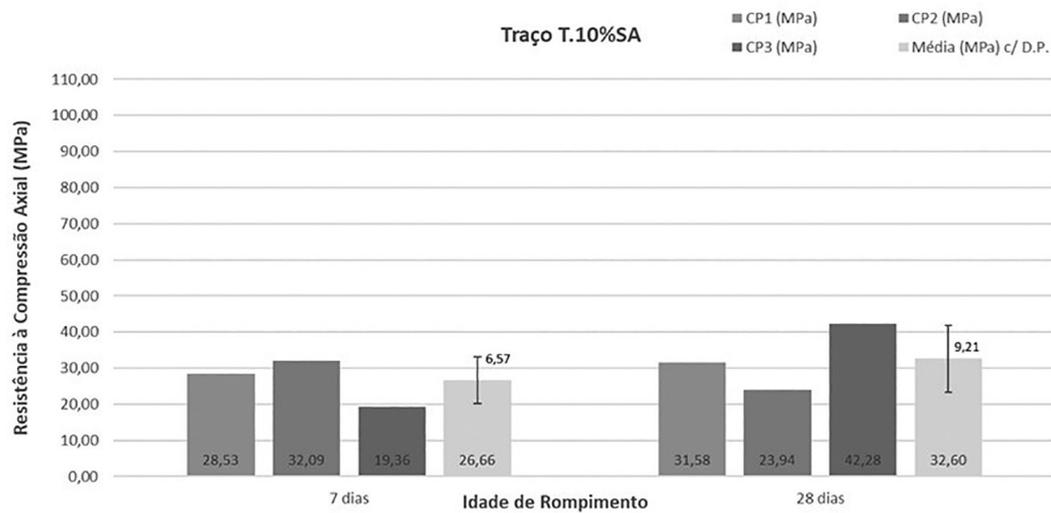


Figura 12: Resistências à compressão axial obtidas para cada CP do traço T.10%SA e média dos resultados com o desvio padrão.

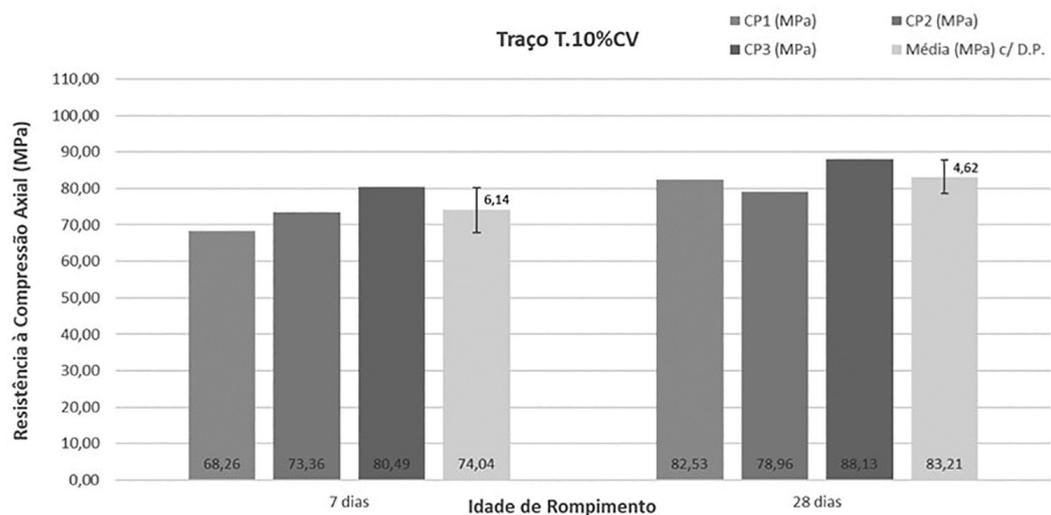


Figura 13: Resistências à compressão axial obtidas para cada CP do traço T.10%CV e média dos resultados com o desvio padrão.

para as idades de 7 e 28 dias a fim de avaliar a evolução da resistência à compressão axial no período. Como esperado, os valores dos rompimentos aumentaram com o decorrer no tempo atingindo o patamar de 102,90 MPa para o T.REF, 42,28 MPa para o T.10%SA e 88,13 MPa para o T.10%CV, todos com 28 dias de idade.

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o da classe CPV, também denominado cimento ARI (Alta Resistência Inicial) pois apresenta alta reatividade em baixas idades por ser um material com maior grau de pureza, ou seja, possui menor teor de adições. Dessa forma, a evolução e o ganho da resistência à compressão axial dos 7 dias para os 28 dias, avaliando os valores médios obtidos foram de 6,51% para o T.REF, 22,28% para o T.10%SA e 12,39% para o T.10%CV. Este percentual evolutivo pouco expressivo se justifica pelo emprego do cimento em questão; para constatação de uma evolução mais significativa da resistência, rompimentos em poucas idades devem ser realizados (1, 3 e 5 dias).

A evolução da resistência do T.10%SA apresentou maior representatividade dentre os traços apresentados, em virtude de seu baixo valor de resistência no primeiro rompimento proporcionando uma evolução mais significativa quando comparada ao resultado com 28 dias de idade. Por outro lado, foi a composição que apresentou menor desempenho em relação as demais; a resistência com 7 dias de idade é aproximadamente 253% menor quando comparada ao T.REF, e 178% menor quando comparada ao T.10%CV nas mesmas idades de rompimento. Este resultado pode ser justificado pelo emprego de 10% sílica ativa em substituição ao cimento Portland, acarretando num maior teor de ar aprisionado nos corpos de prova, avaliado visualmente quando da desmoldagem destes. O menor resultado obtido de densidade aparente em relação ao restante dos traços de concreto baritado, também corrobora a maior porosidade do T.10%SA e seu respectivo rendimento frente às propriedades mecânicas obtidas.

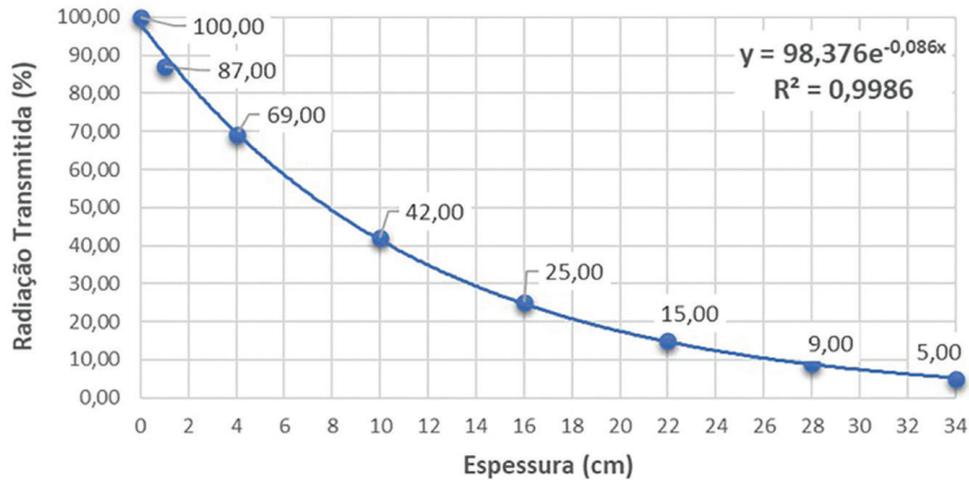
A sílica ativa utilizada neste estudo possui tamanho de partícula aproximadamente 10% maior quando comparada a cinza volante, conforme caracterização física realizada através da granulometria por difração a laser. Nesse sentido, por não conseguir preencher os vazios ao redor das partículas de cimento, a adição de sílica ativa pode ter impactado negativamente nas propriedades mecânicas dos concretos. Estes resultados vão ao encontro dos obtidos por ANDRADE [35] que avaliou pastas de cimento Portland contendo 10% de sílica ativa que também apresentaram maior porosidade quando comparadas as pastas referência. ANDRADE [35] observou ainda que o embora a porosidade total seja maior, os tamanhos médios e característicos dos poros foram reduzidos com a adição da sílica ativa, avaliados através da picnometria por intrusão de mercúrio. Outra possível justificativa para redução das propriedades mecânicas dos concretos elaborados com T.10%SA, está na elevada área superficial da sílica ativa que ocasiona uma maior retração química das matrizes cimentícias por demandar mais água da mistura para geração dos produtos de hidratação, conforme observado por LURA [36]. Nesse sentido, sendo a relação a/c constante para todos os traços avaliados, uma possível justificativa para o desempenho mecânico dos concretos T.10%SA está na ausência de água na matriz para formação de produtos hidratados, pois a água proveniente da relação a/c foi absorvida pela sílica ativa e dessa forma, inviabilizou a hidratação adequada dos compostos e a formação de hidratos.

Os concretos T.10%CV apresentaram resultados mais próximos ao T.REF do que o T.10%SA, isto porque a cinza volante utilizada nesta pesquisa possui tamanho de grão menor que a sílica ativa, viabilizando dessa forma um maior empacotamento da matriz. Os resultados de densidade aparente dos concretos também comprovam essa densificação e refinamento da matriz com o aumento de aproximadamente 13% no valor da densidade do concreto T.10%CV quando comparado ao T.10%SA. Dessa forma, é possível inferir que no concreto T.10%CV houve um maior número de produtos hidratados em relação ao traço com sílica ativa, tendo em vista que a cinza volante pode apresentar área superficial específica até 30 vezes menor que a sílica ativa, conforme observado por LIMA e IWAKIRI [37], o que acarreta numa menor demanda de água da matriz e consequentemente, disponibiliza uma maior quantidade desta ao sistema para formação dos produtos de hidratação.

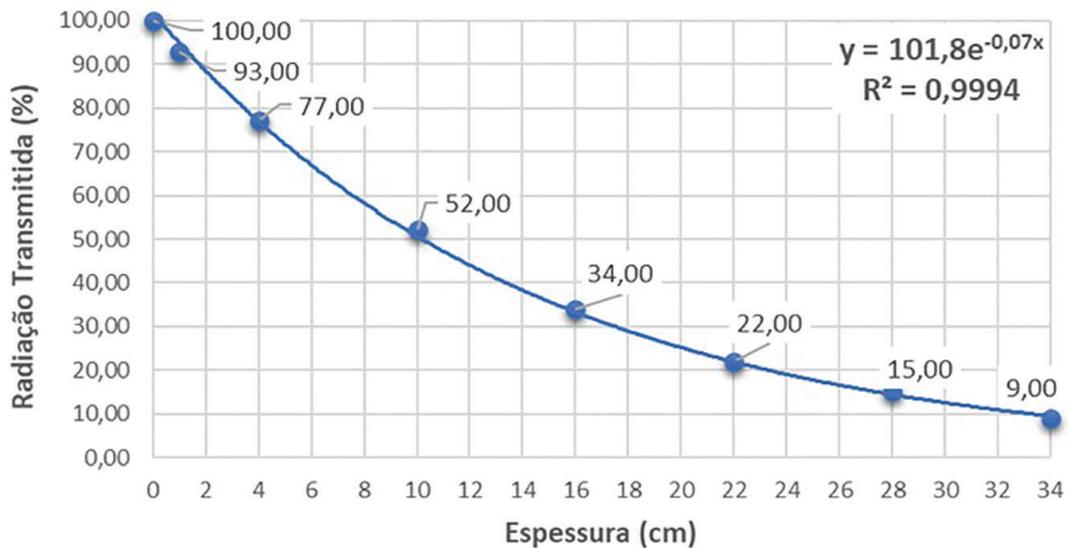
A NBR 6118/2014 [38] em termos de concepção, divide os concretos em protendidos e armados, sendo o último aplicado na construção de salas de radioterapia, por exemplo. Para concretos armados estruturais a resistência mínima a ser atingida é de 30 MPa. No entanto, se esta estrutura estiver localizada na classe de agressividade ambiental mais severa (classe IV) a resistência mínima deve ser de 40 MPa. Sendo assim, é possível observar que as resistências à compressão axial obtidas para os concretos baritados, atendem aos critérios estruturais e de severidade do meio conforme estipulado pela normativa vigente, tendo superado o valor mínimo (40MPa) da referida norma em 157%, 6% e 121% para os traços T.REF, T.10%SA e T.10%CV, respectivamente, avaliando os valores de resistências à compressão potenciais obtidos (máximos).

### 3.3. Determinação da espessura mínima de blindagem e cálculo do coeficiente de atenuação linear (k)

O comportamento dos concretos baritados a partir da exposição à radiação ionizante, está ilustrado nas Figuras 14 a 29 que exibem a dependência da espessura dos CP's com a porcentagem da radiação transmitida através destes.



**Figura 14:** Radiação transmitida (em %) versus espessuras dos CP's prismáticos (em cm), para o traço T.REF com tensão de 6 MV.

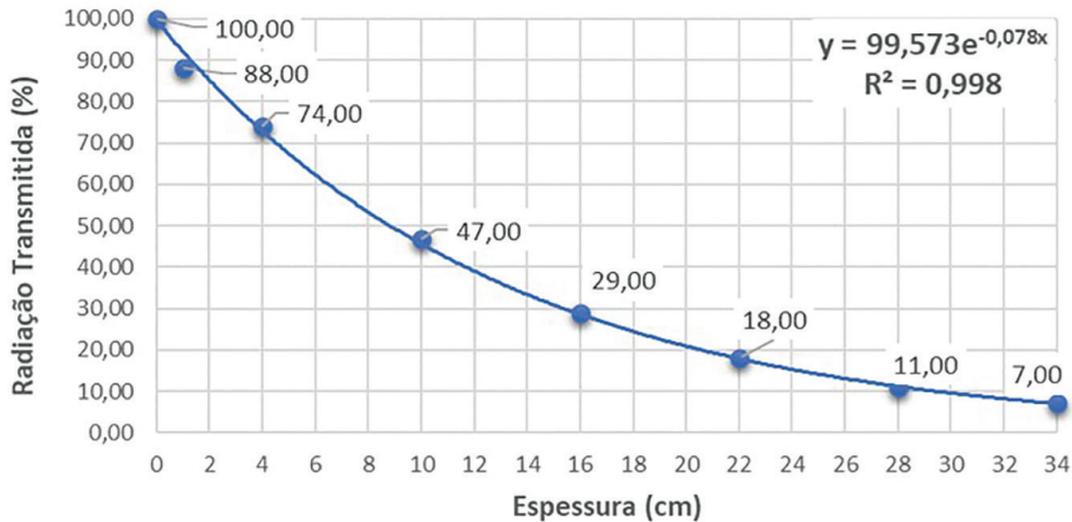


**Figura 15:** Radiação transmitida (em %) versus espessuras dos CP's prismáticos (em cm), para o traço T.REF com tensão de 10 MV.

Cada ponto no gráfico representa uma média entre cinco medidas experimentais (cinco leituras na câmara de ionização), onde o desvio padrão máximo obtido para todas as leituras realizadas foi de 0,01%. Assim, as barras de desvios padrão foram suprimidas das Figuras 14 a 19, já que dificultam a visualização em virtude da escala pequena.

Vale ressaltar que a radiação emitida pela fonte é dividida em duas partes: atenuada e transmitida. A parte atenuada é aquela absorvida pelos CP's (matéria), por outro lado, a parte transmitida é aquela que atravessa as amostras de concreto baritado pois estas não foram capazes de efetuar a blindagem necessária. De acordo com as determinações impostas pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária através da Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 330 de 2019 [39], a atenuação da radiação ionizante admissível para espaços acessíveis a indivíduos deve ser de no mínimo 95%.

Conforme ilustrado na Figura 14 a atenuação da radiação ionizante do T.REF para os moldes de 1,0 cm, 4,0 cm, 10,0 cm, 16,0 cm, 22,0 cm, 28,0 cm e 34,0 cm foram, respectivamente de 13%, 31%, 58%, 75%, 85%, 91% e 95%, para um feixe com tensão de 6 MV. Ainda em relação ao mesmo traço, a Figura 15 apresenta as atenuações para tensão de 10 MV, onde obteve-se 7%, 23%, 48%, 66%, 78%, 85% e 91% para os moldes com espessuras variando de 1,0 a 34,0 cm.



**Figura 16:** Radiação transmitida (em %) versus espessuras dos CP's prismáticos (em cm), para o traço T.10%SA com tensão de 6 MV.

Dessa forma é possível constatar que com uma espessura de apenas 34,0 cm para uma tensão de 6 MV, o T.REF atende a condição de segurança imposta pela RDC nº 330 [39], ou seja, atenuou a radiação em 95%. Já para tensão de 10 MV a atenuação de 95% será atingida com um bloco de 43,0 cm, conforme calculado pela equação de ajuste da Figura 15, também para o T.REF.

A radiação incidida em um material diminui exponencialmente à medida que se aumenta sua a espessura, conforme previsto pela Lei de BEER-LAMBERT [40] vista na Equação 1:

$$I = I_0 e^{-kx} \quad (1)$$

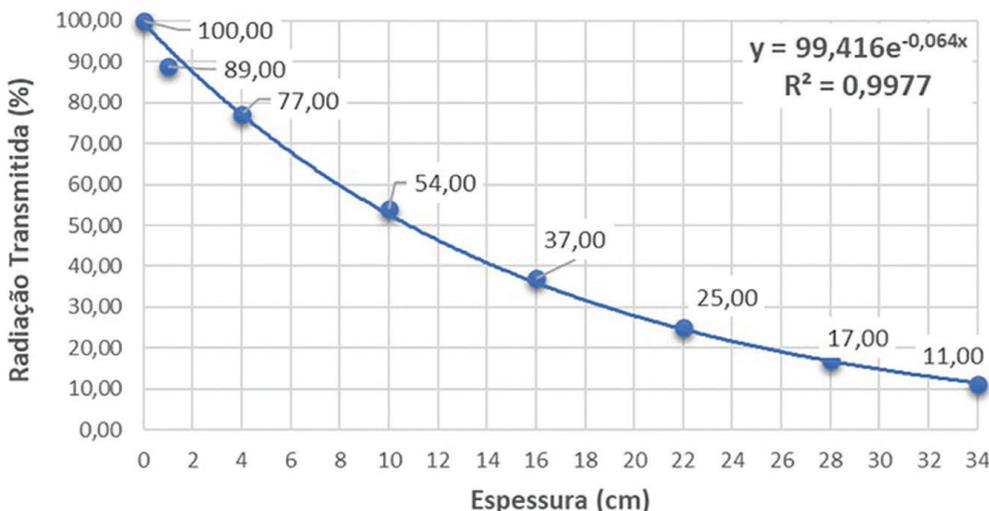
O  $I_0$  representa a intensidade de radiação do feixe de raios X incidente nos CP's e  $I$  é a intensidade transmitida por esse mesmo feixe após ser atenuada pelas mesmas amostras de espessura  $x$ . O parâmetro "k" é denominado coeficiente de atenuação e controla a velocidade de queda da curva exponencial. Quanto maior o valor de "k", mais eficaz é a atenuação da radiação à medida que se aumenta a espessura. Levando em consideração que a aquisição da intensidade transmitida foi realizada pela câmara de ionização no mesmo intervalo de tempo para todas as amostras, ela segue os princípios da Lei de BEER-LAMBERT [40]. Esse resultado está exibido nas Figuras 14 a 19, na forma normalizada e em escala percentual, ou seja, dividida pela intensidade da fonte sem a blindagem e multiplicada por 100.

Para o T.REF através do ajuste exponencial obteve-se um coeficiente de atenuação  $k = 0,086$  para tensão de 6 MV e  $k = 0,070$  para tensão de 10 MV. Essa diminuição no valor do  $k$  é condizente com o aumento progressivo da tensão do equipamento, ou seja, a velocidade de queda da curva para tensão de 6 MV foi 18,60% maior que para a tensão de 10 MV.

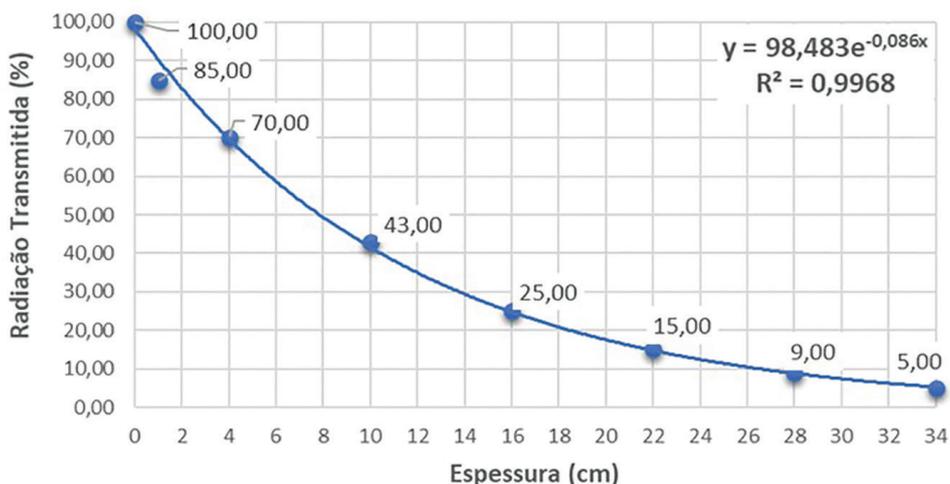
Na Figura 16 estão ilustrados os resultados obtidos para o T.10%SA com uma tensão de 6 MV. As atenuações foram de 12%, 26%, 53%, 71%, 82%, 89% e 93% para os corpos de prova de 1,0 cm, 4,0 cm, 10,0 cm, 16,0 cm, 22,0 cm, 28,0 cm e 34,0 cm. Dessa forma o bloco com 34,0 cm teve sua atenuação diminuída em 2% quando comparada ao T.REF de mesma tensão e espessura, portanto, nesta ocasião o T.10%SA não atenderia a RDC nº 330 [39] para garantir a segurança aos usuários.

Com o acelerador ajustado para tensão de 10 MV, os moldes do T.10%SA com espessuras variando de 1,0 cm a 34,0 cm obtiveram atenuações de 11%, 23%, 46%, 63%, 75%, 83% e 89%, de acordo com o representado na Figura 17. Assim como para tensão anterior, o bloco de 34,0 cm apresentou queda de 2% na atenuação em relação ao traço T.REF de mesma espessura e tensão (10 MV).

Em relação ao "k" do T.10%SA obteve-se 0,078 para tensão de 6 MV e 0,064 para tensão de 10 MV; nos dois casos houve redução nos resultados obtidos em comparação ao T.REF, representando 9,30% de queda para menor tensão do equipamento e 8,57% para maior. Este desempenho acompanha os resultados obtidos anteriormente tendo em vista que o T.10%SA foi o que apresentou menor densidade e menor resistência



**Figura 17:** Radiação transmitida (em %) versus espessuras dos CP's prismáticos (em cm), para o traço T.10%SA com tensão de 10 MV.

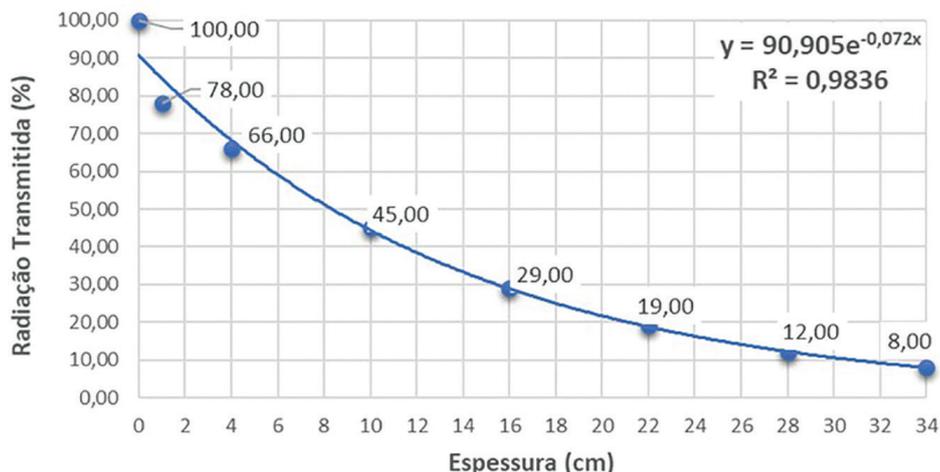


**Figura 18:** Radiação transmitida (em %) versus espessuras dos CP's prismáticos (em cm), para o traço T.10%CV com tensão de 6 MV.

mecânica. Para atendimento as normativas vigentes, ou seja, para atenuação mínima de 95% seria necessária uma espessura de 39,0 cm para tensão de 6 MV e 47,0 cm para tensão de 10 MV, de acordo com a equação de ajuste das Figuras 16 e 17.

Na Figura 18 estão ilustradas as atenuações obtidas para os blocos moldados com o T.10%CV para uma tensão de 6 MV. Para as mesmas espessuras dos blocos citados anteriormente (de 1,0 cm a 34,0 cm), as atenuações foram de 15%, 30%, 57%, 75%, 85%, 91% e 95%. O resultado de 95% de atenuação obtido para maior espessura de bloco (34,0 cm) atende a normativa vigente, ou seja, uma parede construída com tal espessura a partir do T.10%CV, seria suficiente para atenuar a radiação ionizante a valores aceitáveis e admissíveis para os usuários. Este mesmo resultado também foi obtido no T.REF para mesma tensão do equipamento.

Em relação ao mesmo traço (T.10%CV) para tensão de 10 MV, os resultados estão ilustrados na Figura 19 onde pode ser constatado que para os moldes com espessuras de 1,0 cm, 4,0 cm, 10,0 cm, 16,0 cm, 22,0 cm, 28,0 cm e 34,0 cm as atenuações atingidas foram, respectivamente, 22%, 34%, 55%, 71%, 81%, 88% e 92%. Na maior espessura do bloco para maior tensão o T.10%CV obteve atenuação de 92%, se aproximando muito do ideal estipulado pela ANVISA, ou seja, uma atenuação mínima de 95%. Para atendimento às normas, seria necessária uma espessura de 42,0 cm para garantir a segurança dos usuários com o mesmo traço e tensão do equipamento.



**Figura 19:** Radiação transmitida (em %) versus espessuras dos CP's prismáticos (em cm), para o traço T.10%CV com tensão de 10 MV.

**Tabela 8:** Valores obtidos de “k” e a porcentagem de radiação atenuada para todos os traços estudados.

Variável	T.REF		T.10%SA		T.10%CV	
	6 MV	10 MV	6 MV	10 MV	6 MV	10 MV
k	0,086	0,070	0,078	0,064	0,086	0,072
Porcentagem de radiação atenuada para o bloco de 34,0 cm	95%	91%	93%	89%	95%	92%

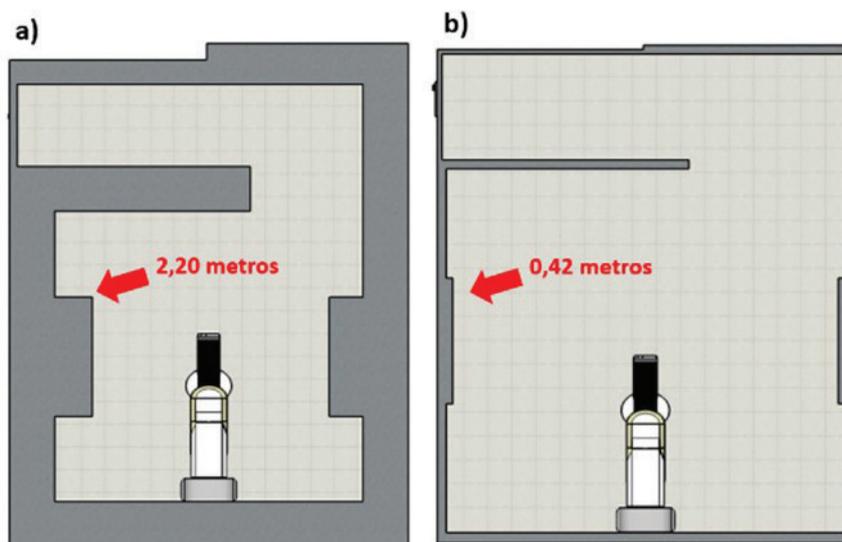
Os resultados demonstraram similaridade no que se refere a queda proporcional do coeficiente “k” a partir do aumento da tensão do feixe irradiado no acelerador linear. Os traços T.10%SA e T.10%CV geraram uma variação de 0,014 no valor de “k”, o que representa um decréscimo de 16,28% no resultado do coeficiente conforme o aumento da tensão do equipamento. Quanto a variação de “k” do T.REF em decorrência da variação da tensão do acelerador, este valor foi similar aos obtidos anteriormente, 0,016, acarretando 18,60% de queda a partir do aumento da tensão de 6 para 10 MV. Vale ressaltar que em todos os gráficos apresentados nesta seção foi possível verificar que os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) das curvas, para todos os casos, indicam valores acima de 0,99 sendo que o valor máximo é 1,00. Dessa forma, é possível constatar a confiabilidade dos resultados e a baixa dispersão obtida.

Na Tabela 8 está indicado um resumo dos resultados obtidos acerca do coeficiente de atenuação linear “k” para cada traço e para cada uma das tensões do equipamento. Estão indicadas também a porcentagem de radiação atenuada para maior espessura de bloco (34,0 cm), onde é possível observar o atendimento a RDC n° 330 [39] de 95% de atenuação para tensão de 6 MV com o T.REF e T.10%CV. Em destaque ainda o menor valor obtido de atenuação (89%) resultante T.10%SA para tensão de 10 MV, composição esta que obteve o menor rendimento no restante das verificações realizadas nesta pesquisa.

É possível perceber que todos os concretos propostos, para as duas energias de ativação do acelerador linear de elétrons, apresentaram atenuações próximas a 90% com bloco de 34,0 cm de espessura. Deste modo, percebe-se que mesmo não atendendo às exigências mínimas da RDC n° 330 [39], os concretos propostos ainda assim se mostram adequados para utilização em barreiras de proteção, pois com um aumento de poucos centímetros na espessura do bloco, é possível blindar a radiação em acordo com os limites estipulados pela norma de 95% de atenuação mínima.

A parede de maior espessura da sala de radioterapia utilizada neste estudo possui 2,20 metros de concreto armado convencional, conforme ilustrado na Figura 20(a) onde pode ser conferido o layout da referida sala elaborado a partir do seu projeto arquitetônico em escala real. Na Figura 20(b) está ilustrada uma proposta de concepção da mesma sala, caso esta fosse construída com o concreto baritado do T.10%CV que obteve a melhor eficácia de atenuação da radiação.

Deste modo, é possível perceber que a parede mais espessa passaria de 2,20 metros para 0,42 metros de espessura, representando uma redução de 80,91% de material utilizado, se considerarmos a referência de



**Figura 20:** (a) planta baixa da situação atual da sala de radioterapia utilizada nos ensaios e (b) planta baixa da mesma sala de radioterapia construída com o traço T.10%CV.

concreto armado convencional. Consoante a esta redução expressiva do consumo de concreto, está a garantia de atendimento à saúde dos usuários, haja vista que a parede mais esbelta atende a atenuação mínima de 95% exigida pela ANVISA. O restante das espessuras das paredes foi reduzido na mesma proporção de redução da maior, apenas para que viabilizasse a representação da sala e tornasse possível a visualização gráfica da redução das espessuras das paredes e do aumento da área útil da referida sala.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi apresentada a viabilidade do uso de concretos baritados aplicados na blindagem de radiação ionizante em salas de radioterapia, sendo as propriedades mecânicas e macroscópicas destes materiais estudadas.

Do ponto de vista mecânico, os concretos baritados foram classificados como “normal” pela NBR 8953/2015 [34] de acordo com as densidades aparentes obtidas. Este resultado demonstra que estruturas construídas com estes concretos baritados proporcionam menores sobrecargas do ponto de vista de seus carregamentos, comparadas às estruturas construídas com concretos ou materiais de elevadas densidades.

Em relação a resistência à compressão axial, os resultados aos 28 dias do T.REF, T.10%SA e T.10%CV apresentaram, respectivamente, um aumento de 157%, 6% e 121% de acordo com o normatizado pela NBR 6118/2014 [38] para pior condição de agressividade e de severidade do meio (40 MPa). Portanto, é possível afirmar que os concretos baritados propostos atenderam com folga as exigências da norma vigente para fins de aceitação estrutural.

Na avaliação da radiação transmitida frente a blindagem dos concretos baritados, para a menor tensão do equipamento de 6 MV, a atenuação do T.REF e do T.10%CV para um bloco de 34,0 cm esteve de acordo com a RDC nº 330 [39] pois obtiveram-se atenuações de 95% (valor mínimo exigido). No entanto, para o T.10%SA com o bloco de mesma espessura, a atenuação atingiu 93%, valor abaixo do exigido pela norma da ANVISA. Nesse caso, para atender a legislação vigente um bloco com 39,0 cm seria necessário, estimado a partir da equação de ajuste da Figura 16.

Deste modo, o resultado obtido do coeficiente de atenuação para o T.10%SA com tensão de 6 MV, por ser o menor entre as três composições, corroboram os resultados de desempenho mecânico onde também foram constatados os menores valores de resistência à compressão e de densidade aparente. Deste modo, é possível inferir que a densidade dos concretos baritados está diretamente relacionada com o seu desempenho mecânico e com sua capacidade de atenuação da radiação ionizante.

Em relação a tensão de 10 MV, o maior desempenho foi obtido com o concreto baritado do T.10%CV que atenuou 92% da radiação emitida pela fonte, seguido do T.REF com 91% de atenuação por fim, o T.10%SA com 89% de atenuação. Para atendimento a legislação vigente seria necessária uma espessura de concreto de 42,0 cm para o T.10%CV, 43,0 cm para o T.REF e 47,0 cm para o T.10%SA o que representa uma redução de 80,91% para o T.10%CV, 80,45% para o T.REF e 78,63% para o T.10%SA quando comparadas a parede mais

espessa da sala de radioterapia onde foram realizados os ensaios, que possuía 2,20 metros de espessura de concreto armado convencional.

A partir dos concretos baritados propostos foi possível constatar que o concreto produzido com o T.10%CV foi o que apresentou maior atenuação do feixe de fótons incidente. Ademais, atingiu os critérios de aplicação para fins estruturais, apresentando densidade “normal”, ou seja, pode ser uma alternativa aos atuais materiais de blindagem mesmo não sendo um material “pesado” como empregado habitualmente. No T.10%CV foi utilizado a cinza volante em substituição parcial do cimento, uma pozolana proveniente do processo de produção de energia elétrica a partir da queima do carvão mineral. Portanto, além de propor uma destinação viável para este resíduo, foi possível diminuir o consumo de cimento, e por consequência, reduzir a consumo de clínquer, um tema sempre atual e necessário devido suas altas emissões de gases poluentes provenientes do seu processo de fabricação.

## 5. AGRADECIMENTOS

Aos Físicos Médicos Sergio Masanori Otsubo e Luciano Schwanck Lopes pela gentileza e assistência. Ao Laboratório de Caracterização de Materiais (Novonano) da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) pelas análises realizadas. À empresa Concreto Schumann pela cedência do aditivo superplastificante. Ao Engenheiro Civil Marcelo e Silva Gonçalves pelo auxílio na elaboração dos moldes. À Engenheira e Mestre em Engenharia Civil Cristhiana Carine Albert pela colaboração.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] FERREIRA, B.V., CARNEIRO, P.F.P., “Avaliação dos principais erros na prática da proteção radiológica no radiodiagnóstico”, *Caderno De Graduação – Ciências Biológicas E Da Saúde*, v. 3, n. 3, pp. 11–22, 2018.
- [2] HUHNS, A., VARGAS, M.A.O., “Plano de proteção radiológica e responsabilidade ética”, *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 4, n. 1, pp. 1–7, 2016. <https://doi.org/10.15392/bjrs.v3i2A.184>
- [3] HUHNS, A., VARGAS, M.A.O., MELO, J.A.C., *et al.*, “Implementation of a radiation protection program: opinion of the health team working in a radiology service”, *Texto & Contexto – Enfermagem*, v. 26, n. 1, e5370015, 2017. <https://doi.org/10.1590/0104-07072017005370015>
- [4] LUCENA, E.A., REIS, R.G., PINHO, A.S., *et al.*, “Radiação ionizante, energia nuclear e proteção radiológica para a escola”, *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 5, n. 1, pp. 1–17, 2017. <https://doi.org/10.15392/bjrs.v5i1.215>
- [5] ANDREUCCI, R., *Proteção Radiológica*. São Paulo: Treinamento em Proteção Radiológica, 2019. <http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/biblioteca/apostilaradioprotecao.pdf>
- [6] SALES, D.A.G., SALES, A.F.G., PADILHA FILHO, L.G., *et al.*, “Impactos da RDC 330/19 no radiodiagnóstico”, *Revista Cathedral*, v. 3, n. 1, pp. 1–9, 2021.
- [7] ALMEIDA, P., *Projeto estrutural de uma construção enterrada tipo bunker, destinada à instalação de equipamento acelerador linear de elétrons*. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2018.
- [8] ALVES, P., “A Radiologia no Início do Século XXI”, *Gazeta Médica*, v. 5, n. 4, pp. 265–269, 2018. <https://doi.org/10.29315/gm.v5i4.213>
- [9] OKUNO, E., *Radiação efeitos, riscos e benefícios*. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.
- [10] JESUS, C.C., *Importância da proteção radiológica com uso do fluoroscópio durante os procedimentos cirúrgicos: uma revisão de literatura*. Monografia de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Radiologia), Faculdade Maria Milza, Governador Mangabeira, 2021.
- [11] PIRES, M.M., NASCIMENTO, C.D., SOUZA, E.G., *et al.*, “The use of barium sulfate as a constituent of concrete for shielding of radiology rooms”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, n. 4, e13103, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1303>
- [12] GABRIEL, F.A., *Estudo da viabilidade econômica e social da implantação de serviços de radioterapia*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Física Médica), Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.
- [13] VIEIRA, V.C., *Os principais desafios a serem enfrentados na implementação do plano de expansão de radioterapia do SUS*. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Orçamentos e Políticas Públicas), Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

- [14] SHARMA, M., BISHNOI, S., MARTIRENA, F., *et al.*, “Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review”, *Cement and Concrete Research*, v. 149, 106564, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>
- [15] SCRIVENER, K., AVET, F., MARAGHECHI, H., *et al.*, “Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC<sup>3</sup>)”, *Green Materials*, v. 7, n. 1, pp. 3–14, 2019. <https://doi.org/10.1680/jgrma.18.00029>
- [16] ZHANG, D., JAWORSKA, B., ZHU, H., *et al.*, “Engineered Cementitious Composites (ECC) with limestone calcined clay cement (LC<sup>3</sup>)”, *Cement and Concrete Composites*, v. 114, 103766, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103766>
- [17] UN Environment, SCRIVENER, K.L., JOHN, V.M., *et al.*, “Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry”, *Cement and Concrete Research*, v. 114, pp. 2–26, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- [18] RIBEIRO, A.V.S., PRUDÊNCIO JR, L.R., MATOS, P.R., “Influência de adições minerais na elevação da temperatura de concretos massa de elevada resistência à compressão”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, n. 1, e12915, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210001.1215>
- [19] NGUYEN, Q.D., KHAN, M.S.H., CASTEL, A., “Engineering Properties of Limestone Calcined Clay Concrete”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 16, pp. 343–357, 2018. <https://doi.org/10.3151/jact.16.343>
- [20] GOMES, C.L., POGGIALI, F.S.J., AZEVEDO, R.C., “Concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição e adições minerais: uma análise bibliográfica”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 2, e-12358, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0673>
- [21] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M., *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Ibracon, 2014.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Cimento Portland – Requisitos. NBR 16697*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [23] JUNIOR, A.T.A., *Caracterização de argamassas de barita como blindagens contra a radiação X e determinação experimental dos coeficientes de atenuação desses materiais*. Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.
- [24] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). *Solos – Determinação da densidade real – Método de ensaio. DNER-ME 093 – 1994*. Brasília: DNER, 1994.
- [25] ZUNINO, F., MARTIRENA, F., SCRIVENER, K., “Limestone Calcined Clay Cements (LC<sup>3</sup>)”, *American Concrete Institute*, v. 118, n. 3, pp. 49–60, (2021). <https://doi.org/10.14359/51730422>
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Agregados – Determinação da composição granulométrica. NBR NM 248*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Agregado graúdo – Ensaio de abrasão Los Angeles. NBR 16974*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. NBR 5738*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- [29] SILVA, E.J., VELASCO, F.G., LUZARDO, F.M., *et al.*, “Compósito cimentício com elevado teor de fibra de coco tratada: propriedades físicas e durabilidade”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 23, n. 3, e-12165, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0499>
- [30] MATOS, P.R., JUNCKES, R., PRUDÊNCIO JR, L.R., “Influência do uso de cinza volante na elevação adiabática de temperatura e resistência à compressão de concretos”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 2, e-12359, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0674>
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. NBR 9778*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Concreto – Ensaio de compreensão de corpos de prova cilíndricos. NBR 5739*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [33] SCAFF, L.A.M., *Física na Radioterapia: A Base Analógica de uma Era Digital*. São Paulo: Editora Projeto Saber, 2010.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resis-tência e consistência. NBR 8953*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

- [35] ANDRADE, D.D.S., *Microestrutura de Pastas de Cimento Portland com Nanossílica Coloidal e Adições Minerai s Altamente Reativas*. Tese (Doutorado), Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- [36] LURA, P. *Autogenous deformation and internal curing of concrete*. Thesis (Doctoral), Technical University Delft, Delft, 2003.
- [37] LIMA, A.J.M., IWAKIRI, S., “Análise da redução da alcalinidade de compósitos cimento-madeira em função da substituição parcial do cimento Portland por pozolanas”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 4, e-12514, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0839>
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. NBR 6118*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- [39] AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Resolução RDC nº 330, de 20 de dezembro de 2019. Brasília: Diário Oficial, 2019.
- [40] FOX, M., *Optical Properties of Solids*. 2 ed. Oxford: Oxford University Press, 2010.