



Trabalho de Graduação

ENGENHARIAS 2020

MINIMIZAÇÃO DE SOBRECARGA ESTRUTURAL NA BLINDAGEM DA RADIOATIVIDADE

BRANDÃO, Angela Aparecida¹; SILVA, Natália Ribeiro²

Orientador: Prof. Ms. Heitor Berger Campos³

Universidade São Francisco

angela.brandao@mail.usf.edu.br; natalia.ribeiro@mail.usf.edu.br

¹ Aluna do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista.

² Aluna do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista.

³ Professor Orientador Heitor Berger Campos, Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista.

Resumo. O amplo desenvolvimento científico do último século de processos físico-químicos de emissões radioativas refletiu no gerenciamento de seu potencial e proporcionou a extensão do uso de radionuclídeos em diversas atividades econômicas. Fonte de propagação de energia a radiação é emitida por átomos instáveis em busca de equilíbrio, devido ao potencial de ionização de suas partículas pode modificar estruturas atômicas promovendo excitação eletrônica ou nuclear. A ionização de matéria viva pode acarretar efeitos biológicos, por isso, a normatização referente ao uso e exposição de radioisótopos define que diante de fontes intensas e níveis elevados de radiação é necessário introduzir a blindagem como fator de segurança. O mercado atual apresenta como referência de blindagem o concreto pesado e o Chumbo, que apresentam características agravantes, tanto no impacto de sobrecarga nas estruturas, como poluição ambiental. Através de unidades biológicas que dimensionem a exposição à radiação, o traço de um concreto de alto desempenho será desenvolvido, para garantir segurança e blindagem, com baixo peso específico, refletindo nos futuros investimentos desse setor. Além de garantir a segurança e minimizar custos e sobrecargas estruturais pretende-se ampliar o assenso e utilização de elementos radioativos e radionuclídeos, que possuem grande potencial.

Palavras-chave: radioproteção, blindagem biológica, concreto de alto desempenho.

Abstract. *The wide scientific development of the last century of physicochemical processes of radioactive emissions reflected in the management of its potential and provided the extension of the use of radionuclides in several economic activities. Source of energy propagation radiation is emitted by unstable atoms in search of equilibrium, due to the ionization potential of its particles can modify atomic structures promoting electronic or nuclear excitation. The ionization of living matter can cause biological effects, therefore, the standardization regarding the use and exposure of radioisotopes defines that in the face of intense sources and high levels of radiation it is necessary to introduce shielding as a safety factor. The current market presents heavy concrete and lead as shielding references, which have aggravating characteristics, both in the impact of overload on structures, as well as environmental pollution. Through biological units that measure exposure to radiation, the trace of a high-performance concrete will be developed, to ensure safety and shielding, with low specific weight, reflecting on future investments in this sector. In addition to ensuring safety and minimizing costs and structural*

overloads, it is intended to expand the assumption and use of radioactive elements and radionuclides, which have great potential.

Key words: *radioprotection; biological shielding; high performance concrete.*

Introdução

A radiação é a propagação de energia, na forma de partículas ou de ondas eletromagnéticas. O contexto histórico vinculado à radiação apresenta alto desenvolvimento científico em diversas áreas de utilização e grandes erros técnicos que proporcionaram fenômenos com extremos efeitos biológicos em áreas extensas. É perceptível o receio das possíveis consequências do uso de emissões radioativas, compartilhadas principalmente pela estrutura midiática.

A radioatividade é emitida por átomos instáveis em busca de equilíbrio, devido ao potencial de ionização de suas partículas pode modificar estruturas atômicas promovendo excitação eletrônica ou nuclear. A ionização de matéria viva pode acarretar efeitos biológicos, por isso, existe uma normatização específica, referente ao uso e exposição de radioisótopos. Os princípios fundamentais da radioproteção estão diretamente ligados a justificar, otimizar e limitar os efeitos da radiação ionizante, prevenindo e diminuindo efeitos somáticos. A dose acumulada pelo organismo em grandes períodos, mesmo em taxas mínimas, é um fator preponderante para futuros efeitos biológicos.

A regulamentação da radioproteção define que diante de fontes intensas e níveis elevados de radiação é necessário introduzir a blindagem como fator de segurança. O mercado atual apresenta como referência de blindagem o concreto pesado e o Chumbo. A densidade, o peso característico do concreto pesado e a espessura das paredes, geram impacto da sobrecarga nas estruturas, interferindo diretamente no custo estrutural, além disso o resíduo do elemento Chumbo é um poluente ambiental, extremamente tóxico e penetrante, que pode causar efeitos biológicos principalmente no sistema nervoso.

Através do período de meia-vida e unidades biológicas que dimensionem a exposição à radiação, a pretensão é prever o traço de um concreto de alto desempenho, que garanta segurança e blindagem biológica, absorvendo partículas sem reflexão ou refração, com baixo peso específico, resultando na minimização da sobrecarga estrutural e refletindo nos futuros investimentos desse âmbito. Além de garantir a segurança e minimizar custos estruturais, um dos principais objetivos é ampliar o assenso e utilização de elementos radioativos, radionuclídeos e radiofármacos, que possuem grande potencial e se destacam como grandes atrativos econômicos.

Comportamento Atômico

Oficialmente existem 118 elementos químicos, 92 naturais e 26 artificiais, todos eles são formados por conjuntos de átomos. Os átomos já foram considerados partículas indestrutíveis e indivisíveis, mas, ao decorrer do tempo, novas teorias e descobertas como os raios-X e a radioatividade, instigaram novos modelos atômicos. O físico *Ernest Rutherford* chegou à definição mais precisa, onde definiu que o átomo possuía um espaço vazio e seu centro era menor que seu diâmetro, assim, foi delineado a eletrosfera, que concentra a carga negativa (elétrons), e o núcleo, que concentra carga positiva (prótons). *Rutherford* previu que o núcleo também possuía uma carga neutra, fato comprovado em 1932 pelo cientista *James Chadwick* (CESAREO, 2010).

O modelo atômico explica a constituição da matéria, suas propriedades e determina os fatores e condições de como ela se comporta perante os fenômenos da natureza. Cada molécula possui propriedades atômicas distintas, como a massa e seu potencial energético. A quantidade

de elétrons, prótons, nêutrons e massa também pode ser utilizada para comparação entre elementos químicos, que podem ser classificados como isótopos, isóbaros e isótonos (FELTRE; YOSHINAGA, 1974).

Os isótopos são átomos com mesmo número de prótons e diferente número de nêutrons, pertencentes ao mesmo elemento químico. Os átomos são estáveis enquanto a relação nêutron por próton (n/p) é igual a um, conforme o número de prótons aumenta, a relação se torna cada vez maior, porém essa variação não é proporcional, quando se aumenta um próton, podem aumentar um ou mais nêutrons. O aumento desta razão é para evitar autodestruição do núcleo, no entanto quando o núcleo atinge 83 prótons, não consegue atingir estabilidade, tornando a partir deste ponto um núcleo instável (FELTRE; YOSHINAGA, 1974).

Um núcleo instável é uma realidade natural de alguns elementos, para se estabilizar ele sofre decaimento radioativo, onde o núcleo se rompe em razão da instabilidade atômica liberando radiação em partículas alfa (α), beta menos (β^-) ou beta mais (β^+). Juntamente com essas partículas é liberada a radiação gama (γ), desta forma, o átomo alcança estabilidade liberando partículas, alterando a relação n/p . A desintegração espontânea gera a manifestação da radioatividade e pode ser uma ação natural de um átomo instável como forma de adquirir estabilidade. Esse fenômeno emite partículas e ondas, os elementos que apresentam essa característica são denominados de radioativos e possuem alto potencial energético em seu núcleo (CESAREO, 2010).

Radiação

A radiação é a propagação de energia, na forma de ondas eletromagnéticas ou de partículas, ela pode ser emitida por elementos naturais e pode ser gerada em aceleradores de partículas ou por bombardeamento em reatores nucleares (SANTIAGO, 2018).

Toda matéria presente no universo é constituída por átomos, a maneira como eles se combinam varia de acordo com sua própria natureza e suas propriedades. Os átomos estão sempre em busca de estabilidade, níveis energéticos bem definidos, mas, alguns elementos são radioativos por natureza. O núcleo tem uma capacidade máxima de massa, e o aumento da razão de nêutrons para prótons para chegar à estabilidade pode desenvolver a autodestruição do núcleo. Núcleos de átomos instáveis dissipam excesso de energia, emitindo radiação, fenômeno denominado de decaimento, significado do termo radioatividade (SANTIAGO, 2018).

Especificidades

As radiações são produzidas por processos de ajustes, sejam no núcleo ou até mesmo nas camadas eletrônicas, pela interação de outras radiações ou partículas com o núcleo, ou até mesmo com o átomo por inteiro. Existem diferentes comprimentos de ondas e diferentes partículas que compõe as emissões radioativas, cada uma com suas próprias propriedades. Como exemplo, a radiação eletromagnética se origina durante o fenômeno de saltos quânticos, onde os elétrons se aceleram e se afastam do núcleo partindo para outras órbitas, isso ocorre devido a um ganho energético da partícula (FELTRE; YOSHINAGA, 1974).

Quando os átomos realizam ligações químicas, os elétrons são doados, recebidos ou até mesmo compartilhados. Os átomos com perda ou inclusão de elétrons são caracterizados como íons, esses elementos apresentam carga elétrica, os íons positivos (cátions) com elétrons a menos e os íons negativos (ânions) com elétrons a mais (FELTRE; YOSHINAGA, 1974).

As emissões naturais de radiação possuem energia quando são emitidas por núcleos instáveis, no momento que atingem moléculas, como gases no ar, são ionizadas, ou seja, as moléculas perdem seus elétrons e formam íons. Esse tipo de emissão é chamado de radiação ionizante, possuem grande quantidade de energia, suas partículas são denominadas alfa (α), beta (β) e gama (γ), a principal diferença entre elas é seu poder de penetração de matéria,

partículas alfa podem ser bloqueadas por papel, partículas beta por uma camada de Alumínio, os raios gama precisam de camadas grossas de Chumbo ou concreto (SANTIAGO, 2018).

Outra classificação das emissões, é a radiação não ionizante, com baixa energia e frequência, sua propagação é na forma de ondas eletromagnéticas de fontes naturais e artificiais. Geralmente ligadas à geração de luz e calor, aparecem com mais frequência no cotidiano, como as ondas de transmissão de celulares, TVs e redes Wi-Fi (GARCIA, 2015).

Os raios gama pertencem à família das radiações eletromagnéticas, o que inclui desde as ondas longas de calor até os raios cósmicos. As ondas eletromagnéticas emitidas viajam no vácuo com velocidade de 300.000 km/s, fazendo com que sua frequência seja inversamente proporcional ao comprimento da onda. Devido as suas propriedades as ondas podem interagir com matéria como as partículas, sua energia se comporta como se estivesse compactada formando pacotes denominados de fótons, que são partículas elementares da força eletromagnética, sendo pequenos “pacotes” que transportam energia. Os raios-X são radiação eletromagnética, porém possuem energia de fótons de menor intensidade e podem ser gerados artificialmente facilitando suas utilidades industriais e médicas (GARCIA, 2015).

Decaimento

O período de meia-vida ($t_{1/2}$) é o tempo necessário para metade dos átomos de um elemento sofrerem um decaimento radioativo. Átomos instáveis de um mesmo elemento, contidos em uma mesma amostra, não decaem ao mesmo tempo. O decaimento de átomos por segundo deve ser constante (Constante de Decaimento (λ)), independente do tempo de existência do elemento e é característica de cada radionuclídeo (SANTIAGO, 2018).

O intervalo de tempo que o elemento radioativo leva para reduzir uma amostra a metade, pode ser conhecido como período de semidesintegração. À medida que o material sofre decaimento, sua atividade, energia emitida e massa, em função da radioatividade, também se reduz pela metade. A outra metade continuará o processo de semidesintegração e assim o ciclo ocorre sucessivamente (GARCIA, 2015).

Efeitos Biológicos

Quando a radiação ionizante passa através de um corpo, ela sofre interação com os átomos desse material, transferindo toda ou parte de sua energia. O meio receptor de energia recebe o nome de absorvedor. Os efeitos da radiação podem chegar a nível celular em organismos vivos, causando modificação ou até mesmo a morte de células, devido aos danos nas fitas do ácido desoxirribonucleico (DNA) em um cromossomo. Se o número de células afetadas for grande, isso pode ocasionar disfunções ou até mesmo a morte de um órgão. Essa influência no DNA, pode acarretar em modificações nas células que permanecerem vivas, esse fenômeno é denominado de mutação celular, irá causar reflexo nas divisões celulares seguintes e poderá ser hereditário (GARCIA, 2015).

Os sintomas constituem a resposta natural de um organismo a um agente agressor. Os efeitos a saúde devido a exposição à radiação podem ser imediatos ou tardios, eles não caracterizam enfermidades, quando brandos é possível rápida recuperação, como exemplo a exposição aos raios-X que podem causar redução de plaquetas, hemácias e leucócitos, porém, após algumas semanas o organismo retorna a seus níveis normais. Quando os efeitos e danos produzidos pela irradiação desequilibram o organismo, como o funcionamento de um órgão, surgem as enfermidades, lesões internas e externas, sintomas clínicos da incapacidade do organismo, dentre elas o aparecimento de tumores, queimaduras e infertilidade (SES-PR, 2019).

Fontes de Exposição

As últimas décadas tem aumentado consideravelmente o uso da radiação, devido ao desenvolvimento científico em diversas áreas, como produção de energia, aplicações militares a médicas, na produção de eletricidade e aplicações domésticas. Esses fatores aumentam o nível de exposição cotidiano, desde as residências aos locais de trabalho. As doses individuais de irradiação absorvida variam muito e dependem de diversos fatores, principalmente a localização, hábitos e estilo de vida de cada um (UNEP, 2016).

A principal fonte de exposição mundial de radiação artificial é a medicina nuclear, que contribui com 98% da exposição da população a fontes artificiais e com 20% da exposição a fontes naturais. O uso de fontes radioativas na área médica envolve pacientes, indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) e indivíduos do público (UNEP, 2016).

Devido a seu grande potencial energético, a radiação é utilizada em diversas áreas econômicas, como: a indústria de alimentos, para retardar processos fisiológicos; a agricultura, para acompanhar o metabolismo das plantas; e até em técnicas avançadas como a gamagrafia onde a impressão de radiação gama em filme fotográfico, possibilita a verificação de rachaduras e defeitos em válvulas, asas e turbinas de avião (UNEP, 2016).

Unidades de Medida

Diversas análises e estudos comprovam hoje que a energia da radiação pode danificar o tecido vivo, e a quantidade absorvida acumulada no tecido é expressa em termos de unidade determinadas como doses. As quantidades de doses de radiação absorvidas pelo corpo variam de acordo com a parte do corpo e intensidade do período de exposição. A quantidade de energia da radiação absorvida por quilograma de tecido é chamada de dose absorvida e é expressa na unidade Gy denominada *Gray*. No caso de doses absorvidas de diferentes tipos de radiação, é necessário calcular o potencial de certos tipos de danos biológicos, no caso denominadas de dose equivalente, a qual é avaliada em unidade Sv denominada de *Sievert* (UNEP, 2016).

O sistema de análises de quantidade de doses radioativas e efeitos biológicos é necessário para estruturar e permitir os avanços dos estudos e registros específicos, sendo de extrema importância para trabalhadores com exposição ocupacional (UNEP, 2016).

Fissão Nuclear

O desenvolvimento dos estudos referentes a fissão nuclear, iniciaram com a preocupação da física e da engenharia em aproveitar o potencial energético de elementos radioativos da mesma forma que se extrai energia de outros elementos (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Os diferentes processos para obtenção de energia, a partir de elementos combustíveis, químicos ou nucleares, produzem diferentes taxas de energia. A Tabela 1 mostra o potencial energético extraído de 1 kg de matéria por diversos processos:

Tabela 1 - Energia Liberada por 1 Kg de Matéria.

Forma de Matéria	Processo	Tempo*
Água	Queda d'água de 50 m	5 s
Carvão	Combustão	8 h
UO ₂ Enriquecido	Fissão em um reator	690 anos
²³⁵ U	Fissão total	3 x 10 ⁴ anos
Deutério	Fusão total	3 x 10 ⁴ anos
Matéria e Antimatéria	Aniquilação total	3 x 10 ⁷ anos

*Esta coluna mostra o tempo durante o qual a energia gerada manteria acesa uma lâmpada de 100 W.

Fonte: modificado HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016, p. 327.

O nêutron é a base do mecanismo de reação em cadeias da fissão nuclear, onde elementos bombardeados com nêutrons, produzem novos elementos. Devido ao nêutron ser uma partícula que não possui carga elétrica, no final da década de 1930, foi utilizado em pesquisas e experiências onde os químicos dispararam nêutrons contra núcleos de Urânio com a finalidade de deixá-los mais pesados, após absorver um nêutron térmico, o núcleo se dividia liberando energia, em dois fragmentos de mesma massa, um dos quais era o Bário, fenômeno este que foi denominado de fissão. Foi observado que essa reação liberava nêutrons, iniciando outras fissões sucessivas, formando uma reação em cadeia, autossustentável (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Hoje o principal objetivo desse tipo de reação, é o seu potencial energético, sendo utilizada em reatores nucleares para produção de energia, onde há queima do combustível, mexendo diretamente com o núcleo do elemento e reagrupando os núcleos que o compõe em configuração estável (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Energia Nuclear

Segundo a WNA (*World Nuclear Association*), atualmente cerca de 14% da energia elétrica mundial é gerada em usinas nucleares, esse percentual tende a crescer com a ampliação e construção de usinas, mais frequente em países desenvolvidos. Dentre os países com produtividade elétrica nuclear os Estados Unidos, possuem atualmente o maior parque nuclear do planeta, com 104 usinas em operação, a França com 58 reatores nucleares, o Japão com 50, a Rússia com 33 e a Coreia do Sul com 21 usinas (ELETRONUCLEAR, 2019).

Dentre as vantagens na geração de energia elétrica por usinas nucleares, a principal é a minimização do uso de combustíveis fósseis, contribuindo para o meio ambiente e evitando emissão de gases responsáveis pelo aquecimento global e efeito estufa. As áreas ocupadas pelas instalações da usina ocupam áreas relativamente baixas e não dependem de fatores climáticos. O Urânio utilizado como fonte energética é um combustível de baixo custo, várias jazidas são exploráveis para exploração e mineração, não oferecendo riscos de escassez. Pesquisas de opinião realizadas na Europa, EUA e Ásia demonstram aprovação popular, para novas usinas e a reforma dos projetos antigos. Ambientalistas prestigiados como *James Lovelock* (autor da “Teoria de Gaia”) e *Patrick Moore* (fundador do *Green Peace*) são unânimes em declarar que não se pode abdicar da energia nuclear se pretendemos reduzir os riscos do aquecimento global e de todos os problemas relacionados a ele (ELETRONUCLEAR, 2019).

Uma das preocupações, são os resíduos atômicos produzidos por diversas atividades, que podem ser um problema ambiental caso sejam descartados e armazenados em condições inadequadas. Os rejeitos podem contaminar o solo, cursos de água e ar, se ampliando progressivamente. Por isso, é necessário tratar os resíduos, verificar seu nível de toxidez química, tanto de rejeitos sólidos, líquidos e gasosos, além de verificar seu nível de atividade e período de meia-vida (ELETRONUCLEAR, 2019).

Acidentes Nucleares

As taxas de exposição em operações dentro da indústria nuclear, devido aos fatores de radioproteção, são baixas. No entanto, graves acidentes receberam extensiva atenção pública, com consequências que são avaliadas até hoje pelo UNSCEAR (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic*). No período de 1945 a 2007, ocorreram trinta e cinco acidentes graves com radiação em instalações nucleares, resultando em mortes e lesões em trabalhadores, sete destes acidentes ocorreram devido a vazamentos de material radioativo e exposição da população (UNEP, 2016).

Podemos definir como acidentes nucleares, todos os desastres que ocorreram em usinas e instituições, por falta de conhecimento e de técnica usando elementos radioativos e tecnologia

nuclear. O fenômeno também pode ser definido como a perda de controle sobre uma fonte de radiação ionizante, por falha de equipamentos, ações impróprias de colaboradores, desastres naturais ou motivos que possam levar a exposição e contaminação radioativa. As falhas técnicas e humanas são as principais características destes acidentes, e são caracterizados pela liberação de partículas radioativas ao meio ambiente. Esses eventos são classificados segundo o nível de radiação liberado e futuros efeitos biológicos a saúde da população local (UNEP, 2016).

Podemos citar entre os principais acidentes da história *Chernobyl*, na Ucrânia (26 de abril de 1986); Goiânia (Césio-137), no Brasil (13 de setembro de 1987); e o mais recente *Fukushima*, no Japão (11 de março de 2011).

CNEN

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é uma autarquia federal vinculada ao Ministério da Ciência e Tecnologia, Invenções e Comunicações (MCTIC), criada em 1956 e estruturada pela Lei 4.118, de 27 de agosto de 1962, para desenvolver a política nacional de energia nuclear, estabelecendo normas e regulamentos em radioproteção, sendo responsável por regular, fiscalizar e licenciar a produção e utilização de fontes radioativas (CNEN, 2014).

O Brasil utiliza a norma CNEN-NN-3.01 para estabelecer requisitos básicos de proteção radiológica das pessoas em relação à exposição ionizante. Essa norma se aplica as práticas, que incluem o manuseio, produção, posse e utilização de fontes radioativas, e também ao transporte e armazenamento de materiais radioativos, abrangendo todas as atividades relacionadas que possam envolver exposição. Os requisitos se aplicam a exposição ocupacional, médica, do público, em situações normais e potenciais (CNEN, 2005).

O principal propósito da proteção radiológica é fornecer um padrão apropriado de proteção sem limitar os benefícios de uso de elementos radioativos. O objetivo da radioproteção é prevenir e diminuir efeitos somáticos e reduzir mutações genéticas e hereditárias, onde o problema das exposições crônicas adquire fundamental importância. Fatores como doses acumuladas em grandes períodos, são preponderantes, mesmo sendo doses pequenas, por isso, atividades que envolvam exposição devem justificar a sua utilidade em relação a outras alternativas e produzir um benefício positivo a sociedade. A partir da justificativa, pode-se observar as possibilidades e potencial de métodos sem radiação e equipara-los (CNEN, 2005).

Concreto de Alto Desempenho

O material mais utilizado na construção civil é o concreto, composto geralmente pela mistura de cimento, areia, brita e água. Misturas convencionais de cimento sofrem certas deficiências, que podem ser minimizadas a partir de pesquisas e desenvolvimento de processos que resultam em concretos especiais, em sua constituição possuem materiais, dosagens, propriedades físicas, agregados e aplicações próprias (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O termo Concreto de Alto Desempenho (CAD) segundo a literatura é a denominação de concretos com características e propriedades superiores ao concreto convencional, tais como trabalhabilidade, resistência e durabilidade. A cada necessidade construtiva é aplicada uma diferente solução. É projetado para obter alta durabilidade e, se necessário, alta resistência. Sua mistura é composta pelos mesmos elementos do concreto convencional, entretanto, todas as proporções são projetadas e planejadas para se obter as características necessárias para atender os requisitos ambientais e estruturais do projeto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Concreto Pesado

Um dos principais exemplos de CAD, são os concretos contendo minerais de alta densidade, sendo 50% mais pesados que concretos com agregado convencional, são

denominados de Concreto Pesado, com massa específica no estado endurecido e seco especificada pela Norma Brasileira ABNT NBR 8.953, com valor superior a 2.800 Kg/m³. Esse tipo de concreto é mais utilizado para blindagem biológica, ou seja, para bloquear a radiação em usinas de energia nuclear e instalações estruturais que utilizem elementos radioativos, liberando altas doses de radiação (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A trabalhabilidade do concreto pesado fresco apresenta certas dificuldades, é necessário bombear e lançar o material através de calhas em distâncias curtas, pois existe a tendência de o agregado gráudo segregar. O peso específico varia de acordo com os agregados utilizados na composição, com o uso de agregados de Barita, Magnetita ou Ilmenita o peso obtido varia de 3.450 a 3.760 kg/m³. Suas principais características são alta resistência mecânica, durabilidade e proteção radioativa e a temperaturas elevadas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O concreto pesado, é utilizado habitualmente em usinas nucleares, unidades médicas, salas de exames de raios-X, unidades de radiologia, ressonância magnética, instalações para ensaios e pesquisas atômicas e armazenamento de materiais radioativos. Os projetos que necessitam de blindagem, levam em consideração as partículas que serão absorvidas e seu poder de penetração na matéria, os raios X e gama possuem alto potencial de penetração, sendo os primeiros considerados. Muitos materiais atenuam ondas eletromagnéticas de alta frequência e alta energia, porém partículas radioativas que envolvem nêutrons, são mais pesadas e não possuem carga elétrica. Sendo assim, não são afetadas por campos elétricos em sua volta, colisões apenas retardam as partículas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Investimento

O Brasil enfrenta um desperdício de dinheiro público, com a obra da usina nuclear de Angra 3, mesmo com a obra parada, cerca de R\$ 3 milhões por mês são destinados a manutenção dos equipamentos, um gasto de R\$ 36 milhões ao ano. Com várias pausas em seu período construtivo, Angra 3 localizada na Costa Verde do Rio de Janeiro está em construção desde 1984, com previsão de término para 2026. O material destinado a usina encontra-se em depósitos, segundo a Eletronuclear, para futura utilização na unidade, os investimentos são para evitar que o material deteriore. A empresa cita que a rotina no canteiro de obras se resume na preservação de instalações e do maquinário, com expectativa da estatal que as obras retornem em junho de 2021. O valor total previsto de investimentos diretos da união nesta construção chega a R\$ 21 bilhões, do valor total até agora foram investidos R\$ 7 bilhões, com cerca de 62% da usina pronta. O potencial energético esperado da usina é de 1.405 MW (*megawatts*) suficientes para promover energia a 4 milhões e 450 mil pessoas, sendo responsável por 68% do abastecimento de luz no estado do Rio de Janeiro, 6% de toda luz consumida no país. Atualmente Angra 1 e 2 são responsáveis por 40% da energia do estado do Rio de Janeiro, e 3% da energia do país sendo que Angra 1 produz 640 MW e Angra 2 produz 1.350 MW (COELHO; SALLES, 2019).

O Brasil é um grande consumidor de energia elétrica, ficando atrás apenas para países como Alemanha, Suíça e Estados Unidos. A questão da utilização da energia nuclear pode ampliar a disponibilidade e diversificação de fontes energéticas, criando assim um equilíbrio, além disso, o país possui uma grande reserva de Urânio. Comparando com outras fontes de energia, as usinas hidrelétricas, cobram um alto preço ambiental, devido a implantação das fundações, alteração de cursos dos rios e desmatamento da área. Porém, as análises e previsões de investimento para novas usinas nucleares, referentes a estrutura e implantação tecnológica necessárias, apresentam valores exorbitantes. É necessário contrapor o custo benefício de tal implantação, analisar os materiais e processos construtivos. O desenvolvimento e investimento em pesquisas de novos materiais e processos construtivos, poderia suprir com novas tecnologias, princípios e necessidades construtivas que atualmente possuem soluções limitadas,

minimizando custos sem afetar fatores, como neste caso a blindagem que é essencial (COELHO; SALLES, 2019).

Agregado de Ftalocianina

O composto para adição em análise são macromoléculas orgânicas de ftalocianinas, moléculas planares e simétricas que possuem excelentes características, uma delas é o núcleo metálico que lhe permite certa energia para transferência de elétrons. Esse composto vem despertando interesse em diferentes áreas como microeletrônica, dispositivos fotossensíveis, sensores analíticos e memórias óticas, porém, já é comumente utilizado como corante, tais pigmentos são utilizados na área têxtil, plásticos, couro, superfícies metálicas e tintas esferográficas (COSTA, 2016).

O núcleo da molécula de ftalocianina pode ser ocupado por um elemento metálico (metaloftalocianina), esse formato molecular pode gerar alterações nas características específicas do composto. Proporcionando maior absorção, devido ao novo potencial de transferência eletrônica (COSTA, 2016).

A proposta se direciona ao uso da metaloftalocianina no lugar do elemento Chumbo, que apresenta maior estabilidade e menos toxicidade, para ampliar seu potencial de dissipação eletrônica. O uso destas macromoléculas no composto de concreto ou argamassa é em proporções mínimas, minimizando a degradação ambiental e os prejuízos à saúde humana.

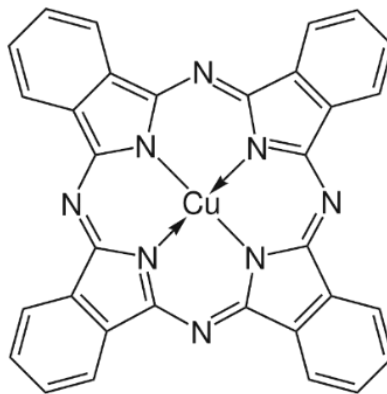


Figura 1 - Metaloftalocianina de Cobre (Fonte: SANTOS, 2006).

Material e Métodos

Através dessa proposta de estudo, se tem a pretensão de prever o traço de um concreto de alto desempenho, que garanta segurança e blindagem biológica, absorvendo partículas emitidas pela radioatividade (fótons), com baixo peso específico, resultando na minimização da sobrecarga estrutural e refletindo nos futuros investimentos desse âmbito. Através de análises referente as doses equivalentes absorvidas, unidades biológicas e período de semidesintegração.

Sensor de Fótons

Uma das necessidades deste experimento é quantificar a energia dos fótons emitidos por aparelhos de raio-X. O Contador de *Geiger-Müller* é um instrumento utilizado para medir níveis de radiações ionizantes, porém, além de seu elevado valor é de difícil acesso para compras e locação, sendo muito específico. Como alternativa, a partir do Mestrado de Edgard Rogério De Siqueira Vasconcelos, tivemos conhecimento de um circuito eletrônico, simples, que conectava resistores a uma bateria, e através de um multímetro seria possível contabilizar a luz ambiente e quantificar fótons emitidos no processo de radiação.

A Tabela 2 apresenta os materiais utilizados e a relação de custos para a confecção do sensor:

Tabela 2 - Materiais utilizados no sensor de fótons.

Material	Quantidade	Custo
Bateria 9 V de potência	1,0 unid.	R\$ 25,00
Resistor dependente de luz (LDR)	1,0 unid.	R\$ 4,50
Resistor de 1 k Ω por ¼ W de potência	1,0 unid.	R\$ 0,15
Multímetro com cabos conectores	1,0 unid.	R\$ 84,90
Fio paralelo de 2,5 mm	6,0 m	R\$ 13,50
Conector para bateria	1,0 unid.	R\$ 5,00
Suporte cônico plástico	1,0 unid.	R\$ 3,00
Solda Cobix Tubo 1,0 mm 22 g	1,0 unid.	R\$ 5,08
Fita isolante	2,0 unid.	R\$ 5,50
Cola Tek Bond (793)	1,0 unid.	R\$ 9,51
	Σ	R\$ 156,14

Fonte: Autor.



Figura 2 - Materiais para a composição do sensor (Fonte: Autor).

Preparação do Sensor

O primeiro passo foi analisar as melhores opções de um sistema eletrônico, para o que o sensor contemplasse o uso do LDR. O circuito eletrônico foi montado conforme o modelo da Figura 3, a associação em série dos componentes compreende uma bateria de 9 V, o LDR e um resistor de 1 k Ω . Para medir a voltagem, foi ligado em paralelo ao resistor um multímetro.

Assim, foi elaborado o seguinte circuito eletrônico:

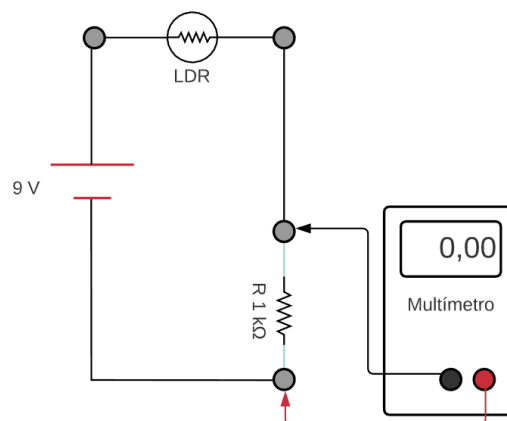


Figura 3 - Representação do modelo eletrônico para o circuito utilizado na construção do sensor (Fonte: Autor).

A base foi preparada com o circuito eletrônico, um suporte em MDF (*Medium Density Fiberboard*) isolou a bateria, o multímetro foi conectado por uma extensão com o fio paralelo, com adaptadores, pinos jacarés e pinos bananas. Na sequência o multímetro marca a capacidade do resistor de 1 k Ω .

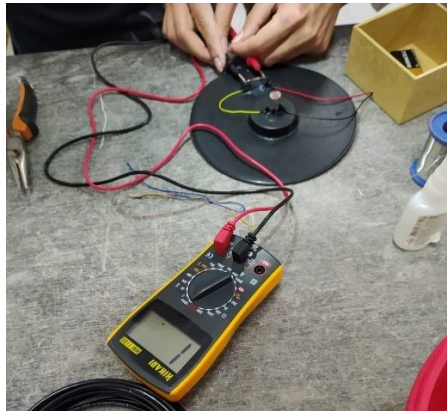


Figura 4 - Circuito eletrônico (Fonte: Autor).

Teste do Sensor

Após a conexão da extensão o equipamento foi soldado e isolado na base. A partir da finalização da extensão, foi possível realizar o primeiro teste com o sensor, com a emissão da luz ambiente.

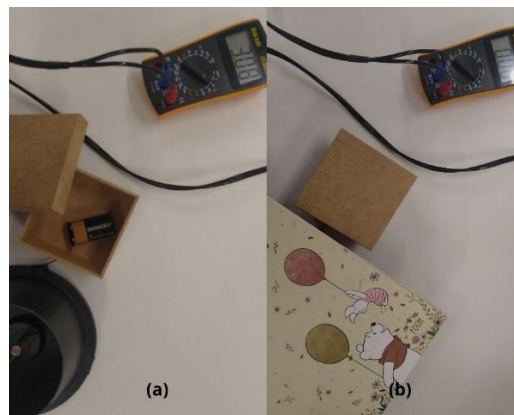


Figura 5 - (a) 1º Teste e (b) 2º Teste (Fonte: Autor).

No 1º teste o Multímetro marcou 3,08 em 20 mV, representação da luz ambiente. No 2º teste, o circuito eletrônico foi isolado por um caderno, para poder contabilizar que ao bloquear as emissões de luz, elas não causariam interferência no resultado.

Moldes de Concreto com adição de Ftalocianinas

As macromoléculas de ftalocianinas foram adicionadas ao composto do concreto como aditivo, porém existe a possibilidade de uma possível reação química com o aço no período da hidratação, gerando uma possível corrosão. O risco é mínimo, pela baixa solubilidade e reatividade do elemento, porém alta atividade. Devido a este fato foi realizada a composição de uma argamassa, sem brita, pois, neste momento o princípio desta pesquisa foca na parte de revestimento como blindagem biológica, não tendo foco na resistência deste material.

O material aplicado para a composição dos moldes são: cimento, areia, água e adição de ftalocianinas. O traço utilizado foi: 1:2:0,8 (cimento, areia e água), com proporções em PPM (partes por milhão) de aditivo.

Tabela 3 - Materiais utilizados nos moldes.

Material	Quantidade	Custo
Cimento Todas Obras Votoram 25 kg	1,0 unid.	R\$ 15,99
Areia 20 kg	1,0 unid.	R\$ 6,78
Acrylic Colors Azul Ftalocianina 59 ml	1,0 unid.	R\$ 11,90
Pigmento Ftalocianina Verde 50 g	1,0 unid.	R\$ 58,90
	Σ	R\$ 93,57

Fonte: Autor.

Os moldes foram misturados separadamente, pois, cada molde tinha uma proporção de aditivo, que deveria ser misturado na composição ainda seca. As proporções em gramas da composição de cada molde foram:

Tabela 4 - Volume dos materiais.

Cimento (g)	Areia (g)	Ftalocianina (g)	Água (ml)
300,0	600,0	Variável	250,0

Fonte: Autor.

As proporções de Ftalocianinas em PPM, são segundo o volume do molde:

$$V = \pi * r^2 * h \rightarrow V = \pi * 7,5^2 * 4,0 \cong 700 \text{ cm}^3 \text{ ou ml ou g}$$

Segundo o volume, 1 PPM é igual:

$$1 \text{ PPM} = \frac{700 \text{ g}}{1.000.000} = 0,0007 \text{ g}$$

Então as amostras terão como proporção:

<p>1ª Amostra: 0,35 g</p> $\frac{0,35 \text{ g}}{0,0007 \text{ g}} = 500 \text{ PPM}$	<p>2ª Amostra: 3,5 g</p> $\frac{3,5 \text{ g}}{0,0007 \text{ g}} = 5.000 \text{ PPM}$	<p>3ª Amostra: 35,0 g</p> $\frac{35,0 \text{ g}}{0,0007 \text{ g}} = 50.000 \text{ PPM}$
--	--	---

Foram realizadas 4 amostras, três delas com proporções em PPM de 500; 5.000 e 50.000 gramas de ftalocianina e uma amostra sem aditivos.

Preparação dos Moldes

Os materiais foram separados e quantificados:



Figura 6 - Mistura cimento e areia (Fonte: Autor).

Os aditivos foram quantificados, com auxílio de uma balança analítica, com alta precisão:



Figura 7 – Ftalocianina Verde 50 g (Fonte: Autor).



Figura 8 - Proporções de Ftalocianina: 0,35 g; 3,5 g; 35,0g (Fonte: Autor).

E assim, as proporções foram misturadas, é perceptível na Figura 9 (a), que a macromolécula libera muito corante. Foram utilizados moldes do Centro Tecnológico, com aplicação de desmoldante, foram preenchidos 4 cm de fundo e foi aplicada vibração manual, para não conter espaços de ar e provocar manifestações patológicas.

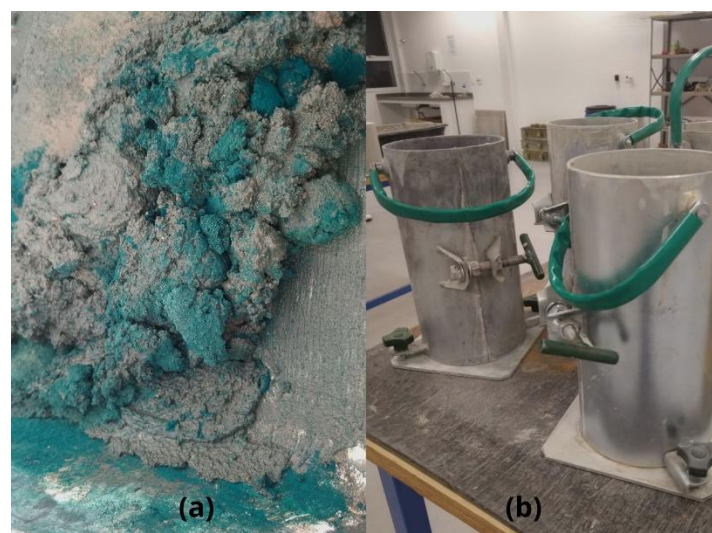


Figura 9 - (a) Mistura da massa; (b) Moldes (Fonte: Autor).

Após 3 dias o material foi desenformado, aparentemente a uniformidade do material mostra que o aditivo agregou com homogeneidade na massa. Seguem em sequência os moldes com doses de 0,35 g; 3,5 g e 35 g de ftalocianina na composição.



Figura 10 - Material desenformado (Fonte: Autor).

Experimento com Raio-X

Após 7 dias de cura foi possível realizar o experimento, o teste foi realizado em uma sala de radiologia na clínica odontológica localizada na Universidade São Francisco, com a utilização do Raio-X *Spectro II* (coluna móvel), com função de realizar exames radiográficos odontológicos. A sala é isolada com uma porta com Chumbo, com a extensão foi possível deixar o multímetro ficado do lado de fora, para quantificar as unidades.

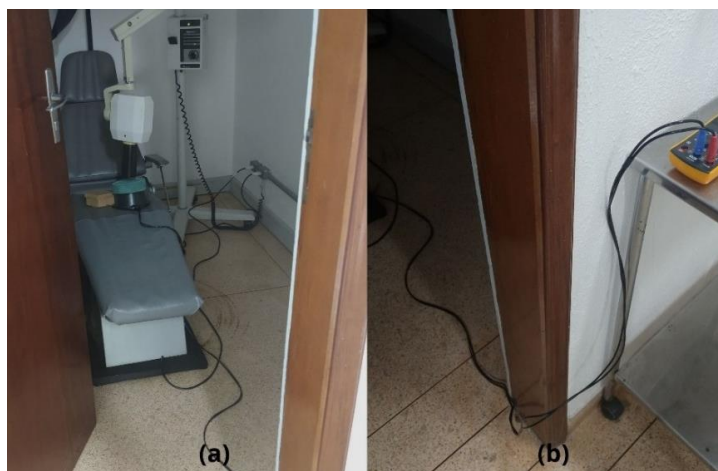


Figura 11 - (a) Sala de Raio-X e (b) Extensão até o multímetro (Fonte: Autor).

Para realizar a experiência foram utilizados o sensor (circuito eletrônico com resistores), 4 moldes de concreto (um puro e 3 com proporções em PPM de 500; 5.000 e 50.000 de Ftalocianina); Raio-X *Spectro II* (coluna móvel), da marca *Dabi Atlante*.

Os testes foram realizados dentro da sala, primeiro sem os moldes, para termos uma base de emissão de fótons para prosseguir observando os resultados a cada molde e determinada proporção de Ftalocianinas.

1º Teste: Sensor

Altura: 40 cm

Carga: 2,0 Sv

Multímetro: **0,04** (em 200mV)

2º Teste: Sensor

Altura: 20 cm

Carga: 2,5 Sv

Multímetro: **0,07** (em 200mV)

3º Teste Concreto Puro

Altura: 20 cm

Carga: 2,5 Sv

Multímetro: **0,04** (em 200mV)

4º Teste: 0,35g de Ftalos

Altura: 20 cm

Carga: 2,5 Sv

Multímetro: **0,02** (em 200mV)

5º Teste: 3,5g de Ftalos

Altura: 20 cm

Carga: 2,5 Sv

Multímetro: **0,01** (em 200mV)

6º Teste: 35g de Ftalos

Altura: 20 cm

Carga: 2,5 Sv

Multímetro: **0,00** (em 200mV)

7º Teste - Concreto Puro, revestido com tinta acrílica a base de Ftalocianina

Altura: 20 cm

Carga: 2,5 Sv

Múltimetro: 0,00 (em 200mV)

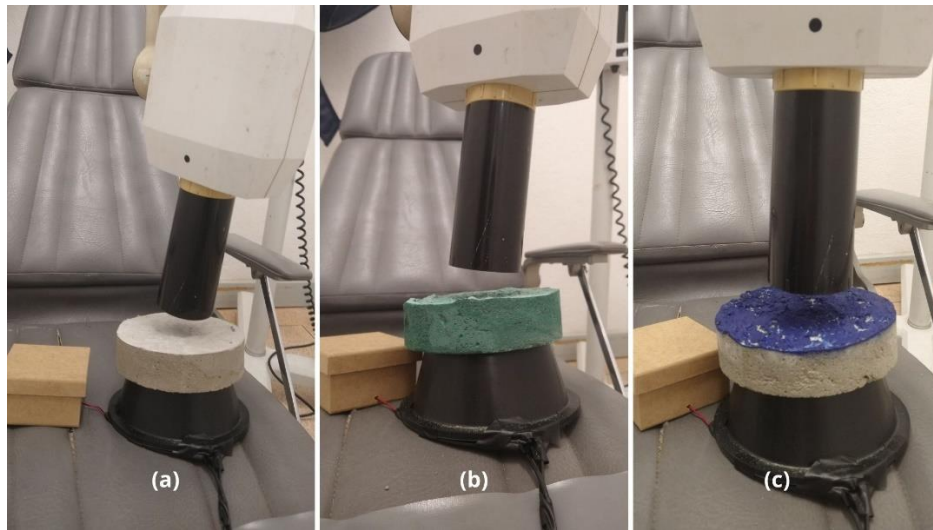


Figura 12 - (a) 3º Teste; (b) 6º Teste; e (c) 7º Teste (Fonte: Autor).

Rompimento do Molde

Para caracterizar a homogeneidade do molde, foi realizado o rompimento do molde com 3,5 g de Ftalocianina; o que apresentou uma ótima agregação do aditivo.



Figura 13 - Rompimento do molde de 3,5 g de Ftalocianina (Fonte: Autor).

Resultados e Discussão

A partir dos dados obtidos, foi possível realizar as seguintes prospecções.

1º - Cálculo da Intensidade (I) de raio-X sobre as blindagens

$$I = \frac{V * Q * \Delta t}{d^2}$$

Onde:

V - é o potencial observado em mV (*milivolt*);

Q - é a carga aplicada pelo equipamento em mC (*milicoulomb*);

Δt - é o tempo de exposição do material ao raio-X;

d - é a distância do sensor até o emissor de raio-X.

Os cálculos foram realizados a partir dos dados coletados nos testes sem blindagem e com os seguintes moldes: Argamassa Pura (AM); Argamassa com 500 PPM de Ftalocianina (AM 500); Argamassa com 5.000 PPM de Ftalocianina (AM 5.000); Argamassa com 50.000 PPM de Ftalocianina (AM 50.000); e Argamassa com tintura de Ftalocianina (AMT).

A Tabela 5, apresenta os resultados obtidos:

Tabela 5 - Cálculo da Intensidade (I) de raio-X sobre as blindagens.

		V (mV)	I (Js/m^2)
Sem blindagem		14	0,112
Com blindagem	AM	8	0,064
	AM 500	4	0,032
	AM 5.000	2	0,016
	AM 50.000	0	Não houve leitura
	AMT	0	Não houve leitura

Fonte: Autor.

2º Passo - Cálculo do Coeficiente linear de atenuação total ($-\mu$) da argamassa (1:2:0,5)

$$I = I_o * e^{(-\mu * x)}$$

Onde:

I - é a intensidade do raio-X sem barreira (blindagem);

I_o - é a intensidade do raio-X com barreira de argamassa (AM);

x - é a espessura em cm .

3º Passo - Cálculos das Camadas semi-redutoras (CSR) e Camadas deci-redutoras (CDR)

Onde:

CSR - Camada para reduzir 50% da emissão de raios-X.

CDR - Camada para reduzir em $\frac{1}{10}$ a emissão de raios-X.

4º Passo - Resultados

1º Resultado - Relação entre $-\mu$, CSR e CDR:

Tabela 6 - Relação entre $-\mu$, CSR e CDR.

	$-\mu$	CSR	CDR
AM	0,1399	4,95 cm	15,9 cm
AM 500	0,3132	2,21 cm	7,35 cm
AM 5.000	0,4865	1,43 cm	4,73 cm

Fonte: Autor.

2º Resultado - Gráficos:

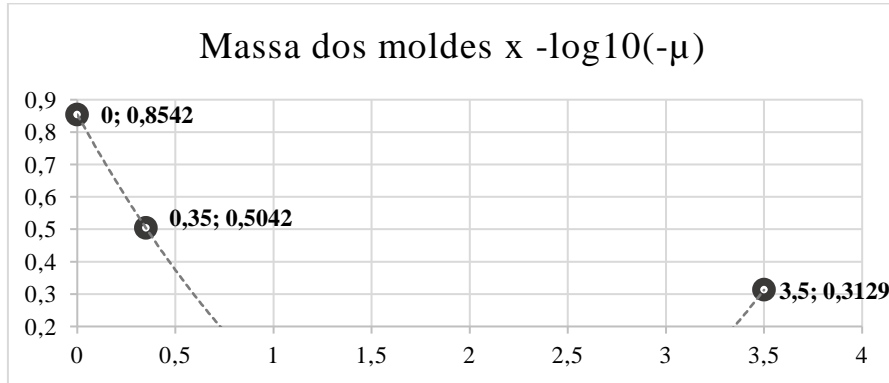


Figura 14 - Gráfico da relação entre a massa x $-\log_{10}(-\mu)$. (Fonte: Autor).

A equação polinomial do 2º grau foi calculada, através de sistemas, resultando em:

$$y = \frac{2,9587}{11,025}x^2 - \frac{0,382874}{0,35}x + 0,8542$$

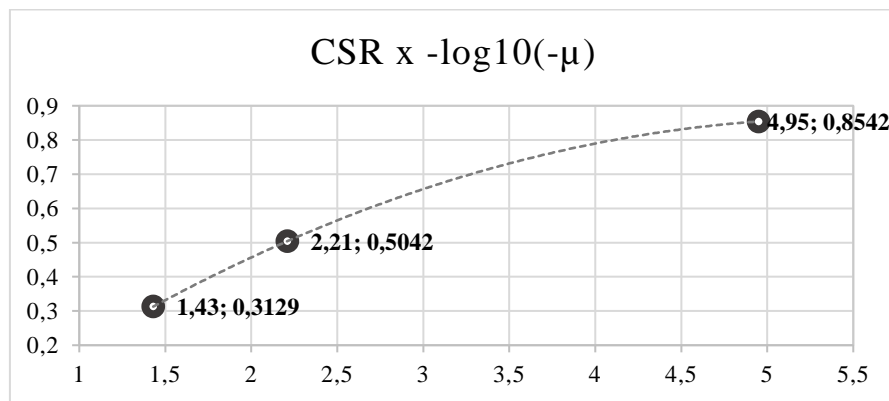


Figura 15 - Gráfico da relação entre CSR x $-\log_{10}(-\mu)$. (Fonte: Autor).

A equação polinomial do 2º grau foi calculada, através de sistemas, resultando em:

$$y = -0,0334x^2 + 0,3667x - 0,1432$$

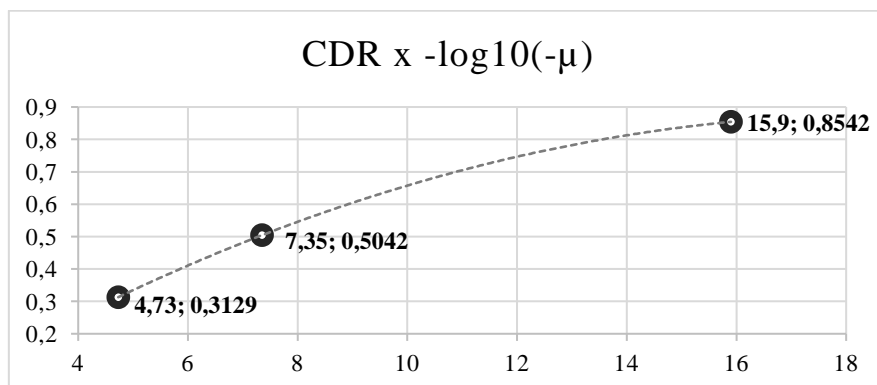


Figura 16 - Gráfico da relação entre CDR x $-\log_{10}(-\mu)$. (Fonte: Autor).

A equação polinomial do 2º grau foi calculada, através de sistemas, resultando em:

$$y = -0,0029x^2 + 0,1077x - 0,1322$$

3º Resultado - CSR e CDR dos elementos Chumbo e Concreto:

Tabela 7 - Relação CSR e CDR: Chumbo e Concreto.

	CSR	CDR
Chumbo	0,06 mm	0,17 mm
Concreto	0,43 cm	1,5 cm

Fonte: CNEN, 2014.

5º Passo - Hipótese

A partir das equações polinomiais de 2º grau, não é possível partir para uma linha de tendência dos resultados, pois com a determinação em gramas das PPM (Partes Por Milhão) de ftalocianinas contidas nos moldes, através do cálculo de *Bhaskara*, se obtém um Δ (delta) negativo, no caso o resultado $x \notin \mathbb{R}$ (não pertence aos números reais).

Os moldes AM 50.000 e AMT ao qual o sensor não teve a sensibilidade de leitura, podem apresentar com um sensor mais apurado em quantificações a tendência de amortização, observada na Tabela 6, pois, quanto maior a quantidade em ftalocianinas, as camadas redutoras atenuavam a espessura. Existe também a possibilidade, no caso do molde AMT, que recebeu aplicação de tintura, apresentar nesta aplicação aditivos que geraram reflexão das partículas.

Observando os gráficos CSR x $-\log_{10}(-\mu)$ e CDR x $-\log_{10}(-\mu)$, cada uma das situações segue a tendência de variação da parábola, no caso do primeiro gráfico a camada semi-redutora tende a atenuar quanto mais próximo de 1,39 for o coeficiente linear de atenuação total ($-\mu$); no segundo gráfico a camada deci-redutora tende a atenuar quanto mais próximo de 1,35 for o coeficiente linear de atenuação total ($-\mu$).

Conclusões

Os riscos ocupacionais são os perigos que incidem sobre a saúde humana e o bem-estar de trabalhadores associados a determinadas profissões. De acordo com o Ministério da Economia, Secretaria Especial de Previdência e Trabalho, por meio das Normas Regulamentadoras os riscos ocupacionais são classificados em cinco tipos: físicos, químicos, biológicos, ergonômicos e acidentais.

A percepção de risco é a habilidade de interpretar uma situação com potencial dano à saúde, quando fontes intensas e níveis elevados de radiação são operados, é necessário introduzir outro fator de segurança, além de Equipamentos de Proteção Individual (EPI), a blindagem biológica.

O objetivo de promover uma melhor desempenho entre um concreto leve, com a adição de macromoléculas orgânicas de ftalocianinas, que permitem certa energia para transferência de elétrons, gerando uma barreira de partículas radioativas, gerou as seguintes análises.

Quando as partículas radioativas atravessam um material, denominado de absorvedor, pode-se observar a perda de intensidade de sua energia. A cada processo de interação com a matéria são removidos fótons, por absorção ou espalhamento. A característica de atenuação pode ser específica de acordo com material e espessura. O cálculo da intensidade (I) de raio-X sobre as blindagens permite quantificar a presença dos fótons diante do material absorvedor, a ocorrência da atenuação é uma probabilidade, calculada pelo coeficiente linear de atenuação total ($-\mu$), nesse caso de acordo com o material utilizado a argamassa, com aditivo de ftalocianinas.

A partir destes resultados, foi possível aplicar outros conceitos, como a camada semi-redutora (CSR), que corresponde a espessura do material necessária para atenuar a metade da intensidade de carga inicial; e a camada deci-redutora (CDR), que corresponde a espessura do material necessária para atenuar um décimo da intensidade de carga inicial. Os resultados e

gráficos apresentaram uma tendência de atenuação, devido ao aditivo. As equações polinomiais de 2º grau, não apresentaram resultados reais, impossibilitando as hipóteses de atenuação dos moldes que não apresentaram leitura, porém, as parábolas apresentadas pelo gráfico proporcionaram uma continuidade, limitando uma tendência para o coeficiente linear de atenuação total ($-\mu$).

Deve-se levar em conta que os dados foram obtidos de um protótipo de sensor, um simples circuito eletrônico, capaz de quantificar fótons, porém com sensibilidade limitada. Houveram duas não leituras, devido ao potencial de quantificação disponível e a possibilidade de a tinta aplicada ao molde ter aditivos capazes de refletir a emissão radioativa.

Outras prospecções poderiam ser obtidas com sensores mais aprimorados, como o contador *Geiger-Müller*, o estudo da viabilidade econômica da macromolécula de ftalocianina pode ser aprimorado, devido ao alto custo de pequenas proporções, sua manipulação, proporção e produção são detalhes que podem ser observados para detalhar se este produto é comercialmente viável e os fenômenos ópticos como a refração e reflexão podem ser estudados, através de equipamentos específicos.

Os elementos radioativos quando bem manipulados, apresentam eficácia na utilização. A manipulação de fontes radioativas tem sido cada vez mais abrangida em diversas áreas do conhecimento humano, exemplos como diagnósticos de tumores e tratamento do câncer através de Teleterapia ou Braquiterapia, mostram esperança de vida, a rentabilidade e uso de fontes naturais radioativas como fonte energética minimizam o uso em excesso e a extração de combustíveis naturais, contribuindo com a gestão de matéria prima natural, além de diversos desenvolvimentos científicos em diferentes setores industriais como o farmacêutico e o alimentício. Esses fatores são preponderantes para incentivar o desenvolvimento contínuo de pesquisas dessa fonte natural que pode e deve ser utilizada por sua ampla aplicabilidade.

Agradecimentos. Dedico este trabalho aos nossos pais, pelo que somos. As nossas escolhas pelo que seremos. Aos professores que tivemos, formais e informais, todos, aos bons e aos mais, pelo que nos fizeram ser e não ser. Aos nossos amores, que mesmo elevando nossos pés do chão, nos ajudaram a enfrentar a realidade. Em especial aos nossos Professores, Orientadores e Mestres Heitor Berger Campos e André Augusto Gutierrez Fernandes Beati, por acreditarem no potencial de nossa pesquisa, fomos instruídas, além da dissertação de um trabalho acadêmico, para a carreira de nossas vidas, os Senhores foram essenciais. A todos somos eternamente gratas! Muito obrigada!

Referências Bibliográficas

CESAREO, Roberto. **Dos Raios X à Bomba Atômica (1895-1945):** Os 50 anos que mudaram o mundo. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. 543 p.

COELHO, André; SALLES, Robson. **Obras em Angra 3 estão paradas e têm custo anual de R\$ 36 milhões para a União,** 2019. G1. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2019/07/15/obras-em-angra-3-estao-paradas-e-tem-custo-anual-de-r-36-milhoes-para-a-uniao.ghtml>>. Acesso em: 31 mai. 2020.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes básicas de proteção radiológica.** D.O.U.: nov. 14, p. 22, 2005. (CNEN-NN-3.01). Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>>. Acesso em: 08 mai. 2020.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Princípios básicos de Segurança e proteção radiológica.** 2014. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, jul. 2014. Versão Eletrônica. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/documen>>

tos/Princ%3%ADpios_B%3%A1sicos_de_Seguran%3%A7a_Prote%3%A7%3%A3o_Radiol%3%B3gica.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2020.

COSTA, Cassiano Batesttin. **Propriedades Fotofísicas da Hidróxido Ftalocianina de Alumínio em diferentes meios**. 2016. p. 93. Dissertação de Mestrado - Ciência do Departamento de Física, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016. Versão Eletrônica. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/6452/1/DISSERTA%3%87%3%83O_PropriedadesFotof%3%ADsicasHidr%3%B3xido.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2020.

ELETRONUCLEAR. **Energia Nuclear**, 2019. Eletrobrás Eletronuclear. Disponível em: <<https://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Espaco-do-Conhecimento/Paginas/Energia-Nuclear.aspx>>. Acesso em: 16 mai. 2020.

FELTRE, Ricardo; YOSHINAGA, Setsuo. **Atomística: Teoria e Exercícios**. vol. 2. São Paulo, SP: Câmara Brasileira do Livro, 1974. p. 472.

GARCIA, Eduardo A. C. **Biofísica**. 2ª ed. São Paulo: SARVIER, 2015. 361-455 p.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física, volume 1: mecânica**. Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC. vol. 1, 2016, p. 797. Disponível em: <http://www.fisica.ufpb.br/~jgallas/CURSOS/Estrutura02/energia_nuclear_cap43.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2020.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2014. p.741.

SANTIAGO, André. **Guia Definitivo de Radioproteção: Tudo que você precisa saber sobre proteção radiológica**. Rio de Janeiro, RJ: Avellar Media, 2018, 127 p. Disponível em: <<cms/files/44769/1515587340guia-definitivo-de-radioprotecao-linceradio-v1-1.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2020.

SANTOS, Allan Cezar Vieira dos. **Uso de Técnicas Eletroanalíticas em Fluxo no Estudo da Adsorção de Cd(II), Pb(II), e Cu(II) em Vermiculita Visando Tratamento Alternativo para Efluentes da Indústria de Tintas**. 2006. p. 93. Dissertação de Mestrado - Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Versão Eletrônica. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/46/46133/tde-24112006-154234/publico/MestradoAllanSantos.PDF>>. Acesso em: 21 jun. 2020.

SECRETÁRIA DE SAÚDE DO PARANÁ. **Efeitos Biológicos da Radiação**, 2019. Curitiba - PR. Disponível em: <<http://www.saude.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=824>>. Acesso em: 30 abr. 2020.

UNEP. **Radiação: Efeitos e Fontes**. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2016, Versão eletrônica, p. 55. Disponível em: <<http://www.aben.com.br/Arquivos/544/544.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2020.

VASCONCELOS, Edgard Rogério de Siqueira. **Detector para raios-X usando sensor LDR para mensurar a energia dos fótons emitidos e testar a eficiência de aparelhos hospitalares**. 2014. 104 f. Dissertação de Mestrado - Engenharia Biomédica, Universidade de Brasília, Brasília. 2014. Versão Eletrônica. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/15846/1/2014_EdgardRogerioSiqueiraVasconcelos.pdf>. Acesso em: 30 out. 2020.