



CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS INTERNAS DO CONCRETO APÓS A INTERAÇÃO COM A RADIAÇÃO GAMA

Luan Ferreira Bastos

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador: Davi Ferreira de Oliveira

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2023

CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS INTERNAS DO CONCRETO APÓS A
INTERAÇÃO COM A RADIAÇÃO GAMA

Luan Ferreira Bastos

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Orientador: Prof. Davi Ferreira de Oliveira

Aprovada por: Prof. Ricardo Tadeu Lopes

Prof^a. Gabriela Ribeiro Pereira

Prof. Joaquim Teixeira de Assis

Dr^a. Olga Maria Oliveira de Araujo

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2023

Bastos, Luan Ferreira

Caracterização das estruturas internas do concreto após a interação com a radiação gama / Luan Ferreira Bastos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

XIV, 140 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Davi Ferreira de Oliveira

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 145-155.

1. Caracterização das Estruturas Internas do concreto. 2. Microtomografia por raios X. 3. Carbonatação. 4. Difração de raios X. 5. Irradiação do concreto. I. Oliveira, Davi Ferreira. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Caracterização das estruturas internas do concreto após a interação com a radiação gama.

“Deixa algum sinal de alegria por onde passes.”
Francisco Cândido Xavier

AGRADECIMENTO

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus e a nosso Mestre Jesus Cristo, por estar sempre me iluminando, me inspirando e me auxiliando nessa jornada e por ter mantido a minha saúde durante e após a pandemia de covid19.

Também gostaria de agradecer a minha esposa, Isabela, por me acompanhar durante esses quatro anos e pela paciência em diversos momentos e que ao iniciar o doutorado era apenas namorada.

Aos meus pais, Cida e João, e a minha irmã Mariah por todo o companheirismo, conversas, brigas e brincadeiras.

Ao meu orientador, prof. Davi Ferreira de Oliveira, por toda ajuda e auxílios durante a elaboração da tese e ao prof. Ricardo Tadeu Lopes pela oportunidade de realizar os experimentos no LIN e me dar a oportunidade de ter participado dos trabalhos de colaboração e os realizados na usina de Angra I.

Ao prof. Marcelo Gonçalves por ter confeccionado as amostras utilizadas nesse trabalho e fornecido o laboratório para a realização dos ensaios necessários.

Um agradecimento em especial a minha avó Hilda, que infelizmente não poderá assistir ao desfecho dessa trajetória, mas tenho certeza que estará feliz com essa defesa.

Aos amigos do LIN, tanto alunos e funcionários, pelos ensinamentos, conversas descontraídas durante o café, discussões sobre criptos e, principalmente, futebol. Um agradecimento especial para a Olga e a Alessandra.

Aos meus amigos da época de colégio e que até hoje estão ao meu lado. Agradeço pelas risadas, zoações e discussões, principalmente a cada rodada do brasileirão.

À ciência, por ter permitido o controle da pandemia pelas vacinas e por ter dado todo o fundamento para realização deste trabalho.

Ao CNPq pela bolsa de fomento.

E a todos aqueles que não foram citados, mas contribuíram direta e indiretamente neste trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS INTERNAS DO CONCRETO APÓS A INTERAÇÃO COM A RADIAÇÃO GAMA

Luan Ferreira Bastos

Fevereiro/2023

Orientador: Davi Ferreira de Oliveira

Programa: Engenharia Nuclear

O concreto é importante na construção civil devido a suas propriedades mecânicas, sendo composto por cimento hidratado e agregados. O estudo de seu comportamento sobre diferentes condições é necessário para melhor entendimento da durabilidade e a forma como que elas podem influenciar a estrutura interna, dessa forma, foi estudada a interação entre a radiação gama e a mistura. O objetivo deste trabalho é avaliar as modificações que ocorrem em três diferentes traços de argamassas com diferentes agregados miúdos após as doses absorvidas de 10, 30, 50 e 100 kGy a uma baixa taxa de dose. A análise avaliou o coeficiente de atenuação experimentalmente e através da plataforma WinXCOM, a densidade, a porosidade através da microCT, a resistência à compressão e estrutura molecular através da DRX. A densidade e o coeficiente de atenuação não apresentaram modificações significativas. A porosidade apresentou alteração apenas no histograma através da diminuição na quantidade dos menores poros, a resistência à compressão aumentou até a dose de 50 kGy e diminuiu após a dose de 100 kGy, a concentração dos compostos sofreu alteração nas moléculas amorfas, calcita e quartzo à medida que a dose aumentava e a foi possível definir uma equação para determinar o coeficiente de atenuação. O trabalho concluiu que a radiação gama modifica a estrutura interna da mistura, afetando tanto a matriz de cimento como os agregados.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (M.Sc.)

Impact of gamma ray on concrete and determination of the best traits to be used as shielding

Luan Ferreira Bastos

February/2023

Advisor: Davi Ferreira de Oliveira

Department: Nuclear Engineering

Concrete is important in civil construction due to its mechanical properties, being composed of hydrated cement and aggregates. The study of its behavior under different conditions is necessary for a better understanding of durability and how external factors can influence the internal structure. Thus, the interaction between gamma radiation and the mixture was studied. The aim of this study is to evaluate the modifications that occur in three different mortar mixes with different fine aggregates after absorbed doses of 10, 30, 50, and 100 kGy at a low dose rate. The analysis evaluated the experimental attenuation coefficient and through WinXCOM platform, density, porosity through microCT, compressive strength, and molecular structure through DRX. Density and attenuation coefficient did not show significant changes. Porosity only showed changes in the histogram by decreasing smaller pores, compressive strength increased up to a dose of 50 kGy and decreased after a dose of 100 kGy, amorphous structure, calcite, and quartz concentration's changed absorbed dose increased, and it was possible to define an equation to determine the attenuation coefficient. The study concluded that gamma radiation modifies the internal structure of the mixture, affecting both the cement matrix and the aggregates.

Índice

Capítulo I	15
1. Introdução	15
Capítulo II	18
2. Revisão Bibliográfica	18
2.1. <i>Concreto</i>	18
2.1.1. <i>Cimento</i>	18
2.1.2. <i>Agregados</i>	21
2.1.3. <i>Porosidade</i>	22
2.1.4. <i>Processo de carbonatação</i>	25
2.2. <i>Interação da radiação com o concreto</i>	27
Capítulo III	41
3. Fundamentação Teórica	41
3.1. <i>Interação da radiação com a matéria</i>	41
3.2. <i>Atenuação da radiação gama</i>	43
3.2.1. <i>Coefficiente de atenuação</i>	43
3.2.2. <i>Coefficiente de Atenuação de Massa</i>	43
3.2.3. <i>Buildup</i>	44
3.3. <i>Transmissão</i>	44
3.4. <i>Concreto</i>	47
3.4.1. <i>Cimento</i>	50
3.4.2. <i>Agregados</i>	51
3.4.3. <i>Porosidade</i>	53
3.4.4. <i>Processo de carbonatação</i>	54
3.5. <i>Massa Específica</i>	57
3.6. <i>MicroCT</i>	58
3.7. <i>Irradiação</i>	62
3.8. <i>Difração de raios X</i>	63

3.9. <i>A Plataforma WinXCOM</i>	66
3.10. <i>Propriedades Mecânicas</i>	67
Capítulo IV	73
4. Materiais e Métodos	73
4.1. <i>Amostras de concreto</i>	73
4.2. <i>Processo de irradiação das amostras</i>	75
4.3. <i>Determinação do coeficiente de atenuação</i>	76
4.4. <i>Determinação da porosidade através do processo de MicroCT</i>	78
4.5. <i>Determinação da massa específica</i>	81
4.6. <i>Ensaio à compressão</i>	82
4.7. <i>Determinação dos cristais através da difração</i>	82
4.8. <i>Determinação do coeficiente de atenuação através da plataforma WinXCOM</i>	83
Capítulo V	85
5. Resultados e Discussões	85
5.1. <i>Resultado para a massa específica</i>	85
5.2. <i>Resultado para a transmissão usando a fonte de Cs¹³⁷</i>	87
5.3. <i>Resultado para a transmissão usando a fonte de Am²⁴¹</i>	92
5.4. <i>Resultado para a porosidade</i>	96
5.5. <i>Resultado para o ensaio mecânico</i>	106
5.6. <i>Resultado para a difração de raios X</i>	108
5.7. <i>Resultado para a simulação através da plataforma WinXCOM</i>	122
5.8. <i>Discussão dos Resultados Obtidos</i>	130
Capítulo VI	140
6. Conclusão	140
Capítulo VII	141
7. Sugestões para trabalhos futuros	141
Capítulo VII	142
8. Produção Bibliográfica	142

Referências	145
--------------------------	------------

Lista de Figuras

Figura 1 - Predominância das formas de interação entre um fóton e a matéria em função de sua energia e número atômico do material. (Figura adaptada de (KNOLL, 2000)).	42
Figura 2 - A falta de colimação permite que fótons espalhados cheguem ao detector e prejudicam a medida devido ao espalhamento. (Figura adaptada de (KNOLL, 2000)).	44
Figura 3 - Exemplo de pulso diferencial (Figura adaptada de (KNOLL, 2000)).	47
Figura 4 - Relação entre a resistência mecânica, a relação água e cimento e compactação do concreto. (Adaptado de (NEVILLE, 2011)).	50
Figura 5 - Relação entre a resistência à compressão e a porosidade calculada para poros com o diâmetro acima de 20 nm. Adaptado de (NEVILLE, 2011).	54
Figura 6 - Esquema de equipamento gerador de raios X. Adaptado de: (BUZUG, 2008).	59
Figura 7 - Os pontos de Bravais Lattice. Figura adaptada de (CULITY, 1978).	65
Figura 8 - Representação da geometria da difração segundo a Lei de Bragg.	66
Figura 9 - Evolução da capacidade mecânica com o tempo para três diferentes relações a/c. Figura adaptada de (NEVILLE, 2011).	68
Figura 10 - Diagrama tensão-deformação idealizado para o concreto quando comprimido. Figura adaptada de (NBR6118, 2014).	70
Figura 11 - Amostras de concreto utilizadas na pesquisa.	74
Figura 12 – Irradiador Gammacell utilizado para irradiar as amostras de concreto.	76
Figura 13 - Aparato experimental montado para a determinação do coeficiente de atenuação para uma energia de 661,66 keV.	77
Figura 14 – Microtomógrafo de raios X Vtomex m.	78
Figura 15 - Realização da binarização com o auxílio visual e com o histograma para uma amostra do grupo IPT no programa CTAn.	79
Figura 16 - Determinação do ROI para uma amostra do grupo IPT através do programa CTAn.	80
Figura 17 - Aparato experimental para a determinação da massa específica das amostras de concreto.	82
Figura 18 - Interface para a inserção de dados na plataforma NIST WinXCOM.	84
Figura 19 – Evolução da massa específica após a irradiação das amostras.	86
Figura 20 – Espectros com e sem a presença de uma amostra do grupo ART não irradiada entre o detector e a fonte.	87
Figura 21 – Espectros com e sem a presença de uma amostra do grupo ART após a dose absorvida de 10 kGy entre o detector e a fonte.	88
Figura 22 – Variação para coeficiente de atenuação linear.	91

Figura 23 – Variação para o coeficiente de atenuação de massa.	91
Figura 24 – Espectro com e sem a presença de uma amostra do grupo ART não irradiado entre o detector e a fonte.	92
Figura 25 - Espectro com e sem a presença de uma amostra do grupo ART após a dose absorvida de 10 kGy entre o detector e a fonte.	93
Figura 26 – Variação para o coeficiente de atenuação linear.	96
Figura 27 – Variação para o coeficiente de atenuação de massa.	96
Figura 28 - Comparação dos valores para a porosidade para o grupo CON.	97
Figura 29 – Variação para as porosidades abertas e fechadas.	99
Figura 30 – Variação no histograma de poros para o grupo ART.	100
Figura 31 – Variação no histograma de poros para o grupo CON.	101
Figura 32 – Variação para o histograma de poros para o grupo IPT.	102
Figura 33- Evolução da porosidade total após a irradiação.	103
Figura 34 – Comportamento da porosidade.	104
Figura 35 – Variação da resistência à compressão.	107
Figura 36 - Comparação da resistência à compressão as encontradas na literatura.	108
Figura 37 – Variação na quantidade de compostos cristalinos.	109
Figura 38 – Comparação da concentração de compostos cristalinos com a literatura.	110
Figura 39 – Concentração para a calcita, para a aragonita e para os compostos amorfos.	113
Figura 40 – Concentração para a calcita, para a vaterita, para os compostos amorfos e para o quartzo para o grupo ART.	114
Figura 41 – Concentração para a calcita, para a vaterita, para os compostos amorfos e para o quartzo para o grupo CON.	115
Figura 42 – Concentração para a calcita, para a vaterita, para os compostos amorfos e para o quartzo.	117
Figura 43 - Comparação da concentração encontrada para a calcita com a literatura.	118
Figura 44 - Comparação da concentração encontrada para a portlandita com a literatura.	119
Figura 45 - Comparação da concentração encontrada para a portlandita com a literatura.	120
Figura 46 - Comparação da concentração d quartzo para os grupos ART, CON e IPT.	121
Figura 47 - Comparação da concentração de vaterita para os grupos ART, CON e IPT.	122
Figura 48 – Coeficiente de atenuação de massa para energia de 59,54 keV determinado através da plataforma WinXCOM.	123

Figura 49 – Coeficiente de atenuação de massa para energia de 661,66 keV determinado através da plataforma WinXCOM.	124
Figura 50 – Comparação entre os coeficientes de atenuação de massa teórico e experimental para a energia de 59,54 keV.	125
Figura 51 – Coeficiente de atenuação de massa teórico e experimentalmente para a energia de 662 keV.	126
Figura 52 – Equação para o coeficiente de atenuação por massa para o grupo ART.	128
Figura 53 – Equação para o coeficiente de atenuação por massa para o grupo CON.	129
Figura 54 – Equação para o coeficiente de atenuação por massa para o grupo IPT.	129
Figura 55 – Equação para o coeficiente de atenuação por massa para o cimento CPIII.	130
Figura 56 – Comparação de um slice de uma amostra do grupo ART, em que a imagem a) representa a amostra não irradiada; b) a amostra irradiada com a dose de 10 kGy; c) a amostra irradiada com a dose de 30 kGy; d) a amostra irradiada com a dose de 50 kGy; e e) a amostra irradiada com a dose de 100 kGy.	132
Figura 57 - Comparação de um slice de uma amostra do grupo CON, em que a imagem a) representa a amostra não irradiada; b) a amostra irradiada com a dose de 10 kGy; c) a amostra irradiada com a dose de 30 kGy; d) a amostra irradiada com a dose de 50 kGy; e e) a amostra irradiada com a dose de 100 kGy.	133
Figura 58 - Comparação de um slice de uma amostra do grupo IPT, em que a imagem a) representa a amostra não irradiada; b) a amostra irradiada com a dose de 10 kGy; c) a amostra irradiada com a dose de 30 kGy; d) a amostra irradiada com a dose de 50 kGy; e e) a amostra irradiada com a dose de 100 kGy.	134
Figura 59 – Relação entre a resistência à compressão e a porosidade.	135
Figura 60 – Relação entre a porosidade com a concentração de calcita, quartzo e compostos amorfos.	137
Figura 61 – Relação entre a porosidade com a concentração de calcita, quartzo e compostos amorfos.	138
Figura 62 – Relação entre a porosidade com a concentração de calcita, quartzo e compostos amorfos.	139

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tipos de cimentos e suas características. Fonte: (NBR 16697, 2018).	20
Tabela 2 - Requisitos mecânicos que o cimento deve preencher. Fonte: (NBR 16697, 2018)....	20
Tabela 3 - Valores padrões para radiação gama de alguns radionuclídeos	46
Tabela 4 - Sistemas de Cristais e Pontos Bravais lattice. (Adaptado de (CULITY, 1978)).	64
Tabela 5 - Distribuição granulométrica da areia a ser utilizada no ensaio. Adaptado de (NBR7215/2019).....	71
Tabela 6 - Quantidade de materiais utilizados na determinação do traço. Adaptado de (NBR7215/2019).....	72
Tabela 7 – Traço utilizado para a preparação das amostras de concreto.....	74
Tabela 8 - Altura média de cada grupo.....	75
Tabela 9 - Parâmetros de aquisição dos espectros de transmissão.....	77
Tabela 10 - Valores encontrados para a massa específica para os corpos de prova.	85
Tabela 11 – Valores para o coeficiente de atenuação linear e para o coeficiente de atenuação de massa para a energia 661,66 keV.	89
Tabela 12 - Valores para o coeficiente de atenuação linear e para o coeficiente de atenuação de massa para a energia de 59,54 keV.	94
Tabela 13 - Porosidade total para as amostras de cada grupo antes e após a irradiação.....	98
Tabela 14 – Resistência média à compressão encontrada para cada grupo.....	106
Tabela 15 - Composição química dos corpos de prova.....	112
Tabela 16 – Fórmula química para os compostos identificados pela DRX.....	122
Tabela 17 – Erro relativo encontrados entre o WinXCOM e o determinado experimentalmente para a energia de 59,54 keV.	127
Tabela 18 – Erro relativo encontrados entre o WinXCOM e o determinado experimentalmente para a energia de 662 keV.	127
Tabela 19 – O coeficiente de atenuação de massa determinados através da WinXCOM.	128

Capítulo I

1. Introdução

O concreto é um importante material utilizado no mercado brasileiro e é o elemento estrutural mais utilizado no mundo devido a facilidade de obtenção e a plasticidade apresentada pelo material quando hidratado, que o possibilita adotar diferentes formatos. A sua utilização pode ser caracterizada como estrutural, preenchimento e blindagem. O concreto estrutural é a forma em que o material é mais utilizado, pois a alta resistência aos esforços mecânicos permite a concepção de estruturas comerciais, residenciais, dentre outras. O concreto utilizado para preenchimento é importante para vedar locais em que há baixos esforços mecânicos. O concreto utilizado como blindagem é o menos usual, pois a sua fabricação exige a utilização de materiais mais densos que os usuais, provocando o aumento do peso próprio. A principal característica do concreto utilizado para blindagem é a atenuação das radiações gama e X em instalações nucleares, em salas de radioterapia e em consultórios que utilizam equipamentos de raios X.

A ASTM C125 (2018) define o concreto como um material composto que consiste essencialmente de um meio de ligação dentro do qual estão incorporados partículas ou fragmentos dos agregados, sendo composto por cimento, que é um material inorgânico, agregados, que é um material granular que pode ser dividido entre grãos e miúdos de acordo com o módulo de finura apresentado pelas partículas, e água, que é o elemento responsável por provocar as reações químicas no cimento. Os agregados podem ser provenientes de diferentes materiais, como areia e brita.

A utilização de diferentes tipos de agregados define o tipo de utilização do concreto. Normalmente, para a fabricação do concreto estrutural é utilizado a areia e a brita como agregados miúdos e grãos, respectivamente. No concreto de preenchimento, a brita não tem necessidade de ser utilizada e existe a possibilidade de utilização de elementos recicláveis. O concreto utilizado para blindagem exige a utilização de elementos mais densos como a barita e hematita. Apesar da utilização do concreto como blindagem, é notória que a incidência da radiação gama provoca alteração em sua estrutura interna, provocando o rompimento das moléculas de água e modificando as estruturas cristalinas

da matriz cimentícia, conforme pode ser visto em (VODÁK, *et al.* 2005) e (ZATLOUKALOVÁ, *et al.* 2020).

O estudo de seu comportamento sobre diferentes condições é necessário para melhor entendimento da durabilidade e a forma como os fatores externos podem influenciar a estrutura interna. A ideia de execução desse trabalho surgiu ao perceber a necessidade de utilização de concreto em vez de alvenaria tradicional como paredes de clínicas de radioterapia. A utilização de concreto tem como objetivo blindar o usuário externo para que não entre em contato com a radiação, porém foi identificado em trabalhos científicos que a radiação gama provoca alterações nas propriedades do concreto quando há a deposição da energia do fóton no meio. Dessa forma, o estudo da interação do concreto com a radiação torna-se essencial para entender a forma como o material interage com a radiação gama. A utilização de doses de até 100 kGy neste trabalho é justificada pelo acúmulo de dose que uma parede estará sujeita, sendo possível a deposição de doses mais baixas até que seja alcançada uma dose mais elevada.

Para a realização deste trabalho, foram utilizados três diferentes traços de concreto (a concentração de cada elemento na mistura) que se diferenciam pelo elemento utilizado como agregado miúdo. Em uma das amostras foi utilizada areia padronizada, conforme orientado pela (NBR7211, 2009), em outra foi utilizada uma areia convencional, que é encontrada em diversas lojas de material de construção e não possui um controle de qualidade, e em outra foi areia artificial que possui majoritariamente pó de brita misturada com uma pequena quantidade de areia na composição. Cada amostra foi estudada após serem irradiadas com as doses de 10, 30, 50 e 100 kGy.

Esse trabalho tem como objetivo avaliar as modificações que ocorrem após a interação de três argamassa cimentícia, que divergem em relação ao tipo de agregado miúdo, através da caracterização de sua estrutura interna. Foram realizadas avaliações na capacidade de atenuação da radiação gama, na densidade, na porosidade e na resistência mecânica antes e após a exposição das amostras às doses de 10, 30, 50 e 100 kGy. Buscando um melhor entendimento das modificações que ocorrem na matriz de cimento, foi irradiada uma quantidade de cimento CP III antes que fosse hidratado e misturado com os agregados miúdos.

A avaliação da capacidade de atenuação é importante para este trabalho, visto que foi identificado a utilização desse material nas paredes de clínicas de radioterapia. Por estar

diretamente associada ao coeficiente de atenuação de massa, a análise da densidade também foi realizada. A análise da porosidade é justificada pelos relatos encontrados nos trabalhos acadêmicos analisados, assim como a resistência mecânica e a estrutura molecular.

Até o momento, diversos estudos foram realizados para entender o comportamento do concreto após a sua irradiação e é observado o aumento da região de carbonatação. Os estudos se notabilizam pela diferença no traço, que é a proporção de cada material utilizado na fabricação do concreto, e na metodologia adotada. A revisão bibliográfica será apresentada no capítulo II.

A utilização de diferentes técnicas permite um maior entendimento de como a radiação gama interage com o concreto, dessa forma, foi aferida a densidade, o coeficiente de atenuação para diferentes energias, a porosidade através da técnica de microtomografia por raios X, a resistência à compressão, avaliação das estruturas cristalinas através da técnica de difração de raios X, além da utilização da plataforma WinXCOM para estimar e definir as curvas de atenuação e equações de atenuação para as misturas utilizadas. A ciência por trás de cada método será apresentada no capítulo III, enquanto a metodologia adotada para a realização deste trabalho será apresentada no capítulo IV.

No capítulo V serão apresentados os resultados encontrados e a discussão geradas após a sua observação. Foi possível perceber que a irradiação das amostras provocou uma alteração na resistência à compressão, no histograma de poros e na estrutura cristalina das moléculas. No capítulo VI será apresenta a conclusão do estudo. O capítulo VII será apresentada sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo II

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica, que é importante para entender o estado da arte do tema escolhido através de trabalhos que apresentam a interação do concreto com a radiação e as técnicas utilizadas para determinar as modificações apresentadas pelo concreto.

2.1. Concreto

O concreto é muito importante para a indústria da construção civil e pode ser definido como um material composto que consiste essencialmente de um meio de ligação composto pelo cimento e que possui partículas ou fragmentos, conhecidos como agregados, incorporados em sua estrutura (ASTM C125-18, 2018). Os agregados podem ser de diferentes tamanhos e materiais, o que influencia na utilização do concreto. Esses materiais modificam as propriedades que o concreto alcança após a cura, como a porosidade e capacidade mecânica. A utilização de diferentes agregados e até tipos de cimento permitem que a mistura adquira propriedades únicas e um rigoroso controle deve ser utilizado para permitir a repetição dos resultados alcançados. Essa seção será dividida entre os componentes do concreto e a forma como ele interage com a radiação.

2.1.1. Cimento

O cimento é o principal componente para a fabricação do concreto e é caracterizado como uma mistura de materiais inorgânicos que desenvolvem resistência a esforços por meios de reações químicas através da formação de hidratos (ASTM C125-18, 2018).

A granulometria das partículas de cimento influencia diretamente em algumas propriedades que podem ser alcançadas pela argamassa. A utilização de grãos de cimento com uma menor granulometria faz com que a mistura adquira uma maior resistência inicial, pois há um aumento nas reações de hidratação. A utilização de grãos com menor

granulometria também provoca uma redução na porosidade e, conseqüentemente, um aumento na resistência aos esforços mecânicos (LANGE, *et al.* 1997).

A forma como ocorre a hidratação dos grãos de cimento depende da granulometria. Os grãos menores tendem a reagir mais rapidamente, sendo que os grãos com até 1 μm sofrem uma redução até o sétimo dia, seguido de um aumento na concentração e uma nova redução, pois há uma quebra dos grãos com maiores diâmetros (GALLUCCI, *et al.* 2007).

(HU, *et al.* 2014) realizaram um estudo em que verificaram a estrutura do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) em gel em misturas com diferentes valores de água-cimento (a/c) com e sem agregado miúdo. Os autores puderam verificar que quando uma alta relação a/c é utilizada, a mistura apresenta uma menor relação entre Ca/Si na mistura, o que indica que para uma baixa relação de a/c o C-S-H em gel apresentará uma maior quantidade de elementos presentes entre os cristais de C-S-H. A formação de grandes cristais de cálcio hidratado dentro da matriz C-S-H faz com que a mistura apresente um elevado módulo de elasticidade e dureza. Enquanto que a existência de poros com grande diâmetro na matriz C-S-H, o que ocorre quando uma maior quantidade de água é utilizada, faz com que haja um menor módulo de elasticidade e de dureza. A variação da relação água-cimento entre 0,23 e 0,53 faz com que os cristais de C-S-H internos apresentem um módulo de indentação, que mede a dureza do material, mais elevado do que os cristais C-S-H das partes mais externas.

O tipo de cimento utilizado é importante e a qualidade dos grãos modifica o resultado final. Existem no mercado brasileiro diferentes tipos de cimento, sendo os mais comuns os denominados como CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V (ABCP, 2023). A diferença entre os tipos de cimento encontra-se na adição de materiais na sua composição e, conseqüentemente, na sua utilização. A tabela 1 apresenta a diferença entre cada tipo de cimento.

Tabela 1 - Tipos de cimentos e suas características. Fonte: (NBR 16697, 2018).

Tipo de Cimento	Nome	Característica
CP I	Cimento Portland Comum	1 a 5% de material pozolânico, escória de alto forno (EAF) ou carbonato de cálcio e o restante de clínquer;
CP II	Cimento Portland Composto	Adição de escória, pozolana e fíler maiores que o CP I;
CP III	Cimento Portland de Alto-Forno	35 a 75% de adição de escória de alto forno (EAF);
CP IV	Cimento Portland Pozolânico	15 a 50% de adição de pozolana;
CP V	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	Até 10% de adição de material carbonático

Apesar de possuir diferentes adições, a (NBR16697, 2018) prevê a existência de diferentes classes, que correspondem à resistência alcançada por cada tipo de cimento quando hidratado. Para terem a qualidade aferida, cada tipo de cimento deve atingir uma resistência mínima nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias. Os valores previstos são requisitos mecânicos que o cimento Portland deve preencher. A tabela 2 apresenta os tipos, as classes e as resistências à compressão que o cimento deve atingir. A classe para o cimento CP V denominada ARI significa alta resistência inicial.

Tabela 2 - Requisitos mecânicos que o cimento deve preencher. Fonte: (NBR 16697, 2018).

Sigla	Classe	Resistência à compressão (MPa)			
		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
CP I, CP II	25	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
	32	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
	40	-	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0
CP III, CP IV	25	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
	32	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
	40	-	≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0
CP V	ARI	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-

Apesar de apresentarem diferenças em suas composições, é esperado que cada cimento apresente determinados requisitos mecânicos, de forma que não haja diferença na resistência à compressão entre as classes após os 28 dias de idade, independentemente do tipo utilizado.

2.1.2. Agregados

Os agregados também são extremamente importantes para o concreto, pois eles permitem que a mistura atinja algumas de suas particularidades. Eles são materiais inertes, ou seja, não reagem com a água e nem com o cimento, dessa forma, eles podem representar o volume entre 60 e 80% do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

(WANG, *et al.* 2011) realizaram vários experimentos com uma diferente proporção de agregados graúdos em relação ao volume do concreto, mas mantendo-se sempre o mesmo traço para o cimento, água e areia. A resistência à compressão apresentou um acréscimo com o aumento percentual do volume dos agregados graúdos. A resistência à tração mostrou que a amostra sem agregados apresentou o melhor desempenho entre todas. O teste da permeabilidade demonstrou melhores resultados para quando o volume ocupado pelos agregados graúdos varia entre 60 e 75%. Foi possível verificar que a modificação da proporção de agregados graúdos modifica a capacidade mecânica e porosidade do concreto.

Fibras de aço também podem ser incorporadas a uma mistura de concreto, provocando um aumento da resistência mecânica, desde que sejam utilizadas com uma granulometria e quantidade adequadas. A utilização de agregados graúdos, granulometria e quantidade afetam o direcionamento das fibras (LIU, *et al.* 2013).

A utilização de agregados pesados possui a capacidade de gerar concretos mais densos, mas também modificam a capacidade mecânica da mistura. (MASLEHUDDIN, *et al.* 2003) realizou um estudo em que compararam o concreto com escória de aço, que atingiu uma densidade de 3.510 kg/m³, com o concreto com calcário, que atingiu uma densidade de 2.540 kg/m³. Quando o percentual de agregados de escória de aço foi maior que 60% dos agregados total, houve um melhor desempenho mecânico para o concreto pesado. Os autores também analisaram a contração do concreto após a hidratação e não foram encontradas diferenças significativas.

A utilização de agregados pesados também gera alguns problemas na mistura e pode ocasionar perda dos esforços mecânicos. (TOPÇU, 2003) realizou um estudo em que definiu as propriedades físicas do concreto pesado com a utilização da barita. O autor concluiu que para manter a trabalhabilidade e a melhor resistência à compressão a relação

de água-cimento de 0,4 é a ideal de ser utilizada com a barita. Também é destacado a importância de se manter a estrutura da mistura com a utilização da barita na granulometria de agregados miúdos e realizar a mistura por pouco tempo para que não haja segregação dos agregados.

A norma (NBR 7211:2009, 2009) também prevê a utilização de agregados recuperados de concreto fresco, mas diz que se não houver um controle em relação à granulometria do agregado recuperado, ele não deve ser utilizado em quantidades maiores que 5% do total de agregados para o novo concreto.

A utilização de agregados graúdos reciclados exige uma maior atenção, pois há uma maior necessidade de utilização de água para que uma mesma fluidez de concreto sem agregados recicláveis seja atingida. Também é importante destacar que a capacidade mecânica final é menor e apresentam um ganho de resistência mais lento, além de uma menor densidade, quando comparados com traços de concreto que não utilizam agregados reciclados (CHAKRADHAR RAO, *et al.* 2010).

2.1.3. Porosidade

Para determinar a porosidade de uma mistura de concreto existem algumas técnicas e as mais utilizadas são a microtomografia por raios X (microCT) e a por intrusão de mercúrio (MIP). Nessa seção serão apresentados alguns estudos em que a técnica de microCT foi aplicada no concreto com o objetivo de estudar a porosidade e outras características.

(RATTANASAK e KENDALL, 2005) identificaram a porosidade e as características apresentadas pelos poros em argamassas de cimento com e sem compostos pozolânicos utilizando a técnica de microCT. Os autores identificaram que a utilização de compostos pozolânicos aumenta a porosidade da mistura e apresentam uma média de poros com maior diâmetro.

Um experimento realizado com radiação sincrotron durante o processo de cura do concreto por (GALLUCCI, *et al.* 2007) permitiu a visualização da evolução da porosidade na pasta de cimento à medida que as reações de hidratação ocorreram. No primeiro dia, a pasta pode apresentar até 20% de porosidade, mas após os 60 dias ela diminui para próximo de 1%.

(PROMENTILLA, *et al.* 2007) realizaram a caracterização através da microCT do sistema de vazios em quatro amostras de concreto com diferentes traços, sendo que em duas foi inserido um aditivo para que a argamassa desenvolvesse características aeradas.

(CNUUDE, *et al.* 2009) realizou um estudo em que compararam a técnica de microCT, com o MIP e com a de absorção de água pelo vácuo para determinar a porosidade de uma amostra de concreto e de rochas. Os resultados encontrados para os três métodos foram próximos e foi sugerido a utilização do microCT e do MIP para estudos futuros.

(PESSÔA, 2011) utilizou o concreto para comparar os resultados da porosidade alcançados com a microCT com os resultados obtidos por um escâner comercial com resolução de 2400 dpi e pelo método proposto pela NBR 9778:2005. O trabalho apresentou uma compatibilidade nos três métodos, mas foi sugerido a adoção da microCT para a determinação da porosidade.

(CHEN, *et al.* 2013) realizaram um estudo em que buscavam relacionar a porosidade com a resistência à compressão e com a resistência à tração. Eles identificaram que a relação entre a resistência dos diferentes esforços mecânicos não é constante entre si, mas é dependente da porosidade e decresce à medida que há um aumento na quantidade de poros.

(KIM, *et al.* 2013) utilizou a técnica de microCT para estudar como o concreto se comporta durante um incêndio. O sistema avaliou a evolução da porosidade na região central e o surgimento de fraturas na região externa. A técnica de difração de raios X (DRX) mostrou que a portlandita, Ca(OH)_2 , se deteriora a partir da temperatura de 450 °C.

(KORAT, *et al.* 2013) utilizaram a técnica de microCT, MIP e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para estudar o processo de evolução dos poros em argamassas de agregados leves após o aquecimento.

(LIU, *et al.* 2013) utilizaram a técnica de microCT para estudar a distribuição de fibras de aço em uma amostra de concreto e como a disposição dos agregados graúdos afetam a sua direção e distribuição ao longo da amostra.

(HENRY, *et al.* 2014) utilizaram a técnica de microCT para estudar a variação dos poros no concreto de treze semanas após simularem um processo de incêndio e como a realização da cura, no ar e na água, após o aquecimento afeta a porosidade.

(LYDZBA, *et al.* 2014) utilizaram a técnica de microCT para identificar a carbonatação no concreto. Para identificar a região de interesse, foi necessário analisar as curvas de atenuação, pois não foi possível identificar a carbonatação apenas com as imagens da microCT.

(PESSÔA, *et al.* 2014) compararam a porosidade de amostras de concreto através da técnica de microCT e de um escâner comercial. As imagens foram processadas e analisadas através de um código gerado pelo programa MATLAB e os resultados comparados com os obtidos através dos testes previsto pela NBR 9778:2005 que versa sobre a determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica e prevê a utilização do MIP.

(BYWALSKI, *et al.* 2015) estudou a evolução da porosidade em amostras de concreto de uma barragem construída entre 1914 e 1917 através da técnica de microCT. Ao comparar a porosidade encontrada e a resistência mecânica das amostras, foi possível perceber que os concretos prospectados pertenciam a diferentes lotes.

(ĆOSIĆ, *et al.* 2015) utilizaram a técnica de microCT para determinar o sistema de poros e a interligação entre eles em amostras com diferentes agregados. Os poros das amostras com dolomita mostraram possuir uma maior conexão. O estudo também permitiu concluir que os poros conectados no concreto permeável são mais influenciados pelos tipos de agregados do que pelo tamanho.

(WILSON, 2015) desenvolveu uma metodologia que permitiu a identificação de agregados e poros através do processamento de imagens através da utilização da técnica de microCT e de um escâner comercial. A metodologia se mostrou satisfatória para o escâner comercial, mas a utilização da microCT não permitiu a total identificação dos agregados.

(LU, *et al.* 2016) utilizou a técnica de microCT para estudar a porosidade de amostras de concreto em uma estrada e do pilar de um píer no Canadá. Os autores propuseram uma metodologia que permitia a identificação dos poros conectados e dos agregados, mas ela se mostrou eficaz apenas para a identificação dos poros conectados.

(LORENZONI, 2017) utilizou a técnica de microCT para avaliar os danos causados no cimento utilizado em berços de oleodutos no fundo do oceano. As amostras foram

submetidas ao aquecimento e à esforços cíclicos e foi possível aferir os danos sofridos pelo material.

(PESSÔA, *et al.* 2018) sugeriu uma metodologia para determinação da porosidade através do processamento de imagens digitais adquiridas através da técnica de microCT e comparou-a com método proposto pela NBR 9778:2009.

(SCHAEFER, *et al.* 2018) utilizou a técnica de microCT para identificar como a utilização de resíduos plásticos afetam a porosidade do concreto e como a utilização dos resíduos irradiados pode modificar a estrutura de poros conectados.

(BASTOS, 2019) utilizou a técnica de microCT para caracterizar as estruturas internas e aferir o volume ocupado por cada componente do traço de um concreto leve. Foi sugerida uma metodologia de aplicação de um *threshold* global seguido de operações morfológicas para a aferição dos agregados mais densos.

(ZHOU, *et al.* 2019) utilizou a técnica de microCT para determinar a corrosão do concreto armado com e sem a utilização de fibras de polímeros. O estudo concluiu que a utilização de fibras reforçadas de polímero e uma maior cobertura de concreto diminuíram a corrosão apresentada nas barras de aço. Também foi possível determinar o volume de ferrugem e a corrosão das barras de aço.

(BASTOS, *et al.* 2020) aplicaram a técnica de microCT para a avaliar a porosidade do concreto leve. Os agregados mais densos, fibras de piaçava e E.V.A. também foram classificados de acordo com a granulometria prevista pela ASTM C125-18. A utilização da fibra de piaçava e do E.V.A. causaram um aumento na porosidade das amostras.

Diante do que foi exposto até aqui, é possível perceber a vasta utilização da técnica de microCT para a caracterização de argamassas e do concreto.

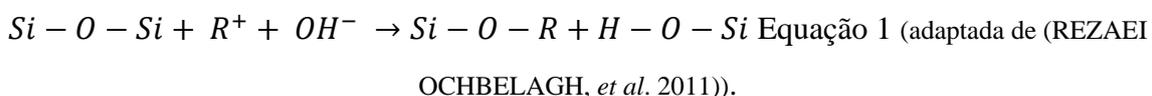
2.1.4. Processo de carbonatação

A carbonatação é um fenômeno natural e que atinge o concreto que está inserido em um ambiente úmido. Ele acontece quando o gás carbônico reage com a água existente no interior da mistura, formando o ácido carbônico, que, por sua vez, reage com as moléculas de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e possui a calcita (CaCO_3) como produto. Essa reação modifica o pH da argamassa, pois são liberadas moléculas de H^+ , fazendo com que a proteção

passiva dos aços presentes no concreto armado seja retirada. Outra modificação que ocorre devido a carbonatação é o preenchimento dos poros, pois as moléculas de calcita são maiores que as moléculas de portlandita (NEVILLE, 2011).

(AUROY, *et al.* 2018) apresentaram um estudo em que estudaram o efeito da carbonatação natural e acelerada na portlandita, etringita e silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) sintetizados em laboratório e em amostras de cimento através de diferentes técnicas como a DRX e a MIP. Os resultados nas moléculas sintetizadas mostraram que a carbonatação natural da portlandita gera calcita, enquanto a acelerada gerou aragonita e calcita (as moléculas que estão nomeadas primeiro foram encontradas em maiores quantidades). A carbonatação natural na etringita gerou gipsita e aragonita, enquanto a acelerada gerou bassanita e aragonita. A carbonatação natural no C-S-H gerou calcita e vaterita, enquanto a acelerada gerou vaterita e calcita. Quando as amostras de cimento foram analisadas, foi possível identificar uma maior presença de vaterita, seguida por calcita e aragonita após a carbonatação natural e acelerada. Os autores afirmam que a presença da vaterita e aragonita indicam a ocorrência da carbonatação, independentemente de ter sido acelerada ou não. Também é importante ressaltar que a calcita apresenta os mesmos elementos que a vaterita e a aragonita (CaCO₃), porém com os átomos ligados em diferentes estruturas cristalinas. A presença da calcita era esperada em maior quantidade, mas a vaterita foi a mais representativa. O MIP identificou uma menor porosidade após a carbonatação. Também foi possível identificar com o auxílio do MEV o surgimento de fissuras nas amostras com os mesmos aspectos, independente da carbonatação ser acelerada ou natural.

Dessa forma, os tipos naturais de carbonatação são a que ocorre com a difusão de CO₂ e consequente formação do ácido carbônico e a carbonatação que ocorre mediante ao stress provocado nas fibras pelo esforço mecânico (NEVILLE, 2011). A radiação gama ao incidir no concreto pode induzir o processo de carbonatação ao reagir com as moléculas de água e provocando a sua quebra em H⁺, que sai pela superfície do elemento, e o OH⁻, que reage com os silicatos, produzindo íons livres e reduzindo os micros poros (REZAEI OCHBELAGH, *et al.* 2011). A reação induzida pela incidência da radiação gama pode ser encontrada na equação 1, onde o R⁺ pode ser o íon de Na⁺ ou de Ca⁺.



Além da reação demonstrada na equação 1, (VODÁK, *et al.* 2011) apresentou um estudo em que utilizou a técnica de difração de raios X para verificar a transformação da portlandita em calcita após a incidência da radiação gama. Com isso, a interação entre a radiação gama e o concreto é outra possibilidade de provocar o efeito de carbonatação. A forma como a radiação induz a carbonatação será apresentada de forma mais detalhada na seção 2.2.

2.2. *Interação da radiação com o concreto*

O concreto é um ótimo material para ser utilizado como blindagem devido ao baixo custo e a capacidade de modificar as suas propriedades através da utilização de diferentes concentrações de cimento, água e agregados, além da possibilidade de utilização de diferentes tipos de minerais como agregados. Por ser um elemento que possui funções estruturais, a interação entre o concreto e a radiação deve ser estudada para compreender se a capacidade de atenuar a radiação interfere em suas propriedades mecânicas. Essa seção tem como objetivo apresentar estudos que apresentaram o resultado da interação entre o concreto e a radiação e mudanças provocadas na estrutura interna do concreto.

(SOO e MILIAN, 2001) realizaram um estudo em que submeteram argamassas a diferentes condições durante um processo estendido de cura em relação a temperatura e a irradiação. Os autores estudaram três diferentes traços em que não utilizaram agregados graúdos. Os autores concluíram que a cura em uma temperatura de 20 °C permite que o concreto atinja uma resistência maior que a temperatura de 10 °C. Em relação a irradiação, os autores utilizaram uma taxa de dose de 31 Gy/h e outra de $3,8 \times 10^5$ Gy/h. Eles observaram que as amostras irradiadas com a taxa de dose de 31 Gy/h apresentou uma resistência final menor que a taxa de dose de $3,8 \times 10^5$ Gy/h e concluíram que menores taxas de dose é prejudicial à resistência mecânica do concreto. Os autores também acreditam que essa diferença foi induzida pela radiólise da água durante a cura, o que ocasionou uma diminuição nas reações de hidratação do cimento e prejudicou o resultado final.

(AKKURT, *et al.* 2005) elaboraram dois grupos de concreto, sendo um com agregados convencionais e outro apenas com a barita como agregado graúdo e miúdo, determinaram o coeficiente de atenuação e compararam os valores com o encontrado no XCOM. As amostras com barita apresentaram uma densidade maior que as outras, porém os melhores

valores para a resistência à compressão foram encontrados para as amostras com os agregados tradicionais. O resultado para a atenuação experimental foi próximo ao indicado pelo XCOM nas energias analisadas de 660 e 1.250 keV. Os autores concluíram que as amostras com barita atenuaram mais fótons que as com agregados tradicionais, que a modificação no fator água-cimento não provocou alterações significativas na atenuação, que a atenuação não depende da resistência à compressão e a atenuação é proporcional a densidade da mistura.

(SALINAS, *et al.* 2005) realizou um estudo em que determinou a densidade efetiva e o coeficiente de atenuação de massa para alguns elementos utilizados na construção civil brasileira para a faixa de energia entre 50 e 3.000 keV. Uma fonte de ^{137}Cs e um detector portátil de 20% HPGe foram utilizados para a determinação da densidade efetiva e, com isso, inserir o valor encontrado em uma simulação para determinar o coeficiente de atenuação para a faixa de estudo com a utilização do MCNP4B (Monte Carlo). O estudo concluiu que um concreto com 6,0 centímetros de espessura possui um coeficiente de atenuação de massa próximo do coeficiente de atenuação de massa para um tijolo com cimento nas duas faces e uma espessura de 11,4 centímetros. Esse estudo demonstra como a utilização de concreto em vez de alvenaria em paredes de clínicas de radioterapia é importante, pois uma menor espessura de concreto possui uma maior capacidade de atenuação de radiação gama.

(VODÁK, *et al.* 2005) apresentaram um estudo do traço do concreto utilizado para a construção da usina nuclear de Temelin na República Tcheca. Após confeccionarem os corpos de prova, eles irradiaram as amostras durante 83 dias, porém a dose absorvida final não ultrapassou 1 MGy. Após 180 dias da confecção dos corpos de prova, foram realizados testes mecânicos para aferir as resistências à compressão e à flexão. A resistência à compressão apresentou uma queda de 10% nas amostras irradiadas, enquanto os testes para determinação da resistência à flexão apresentaram uma queda menos abrupta. O estudo da porosidade através do MIP mostrou que houve uma redução na porosidade. A DRX mostrou que as amostras irradiadas apresentaram uma maior quantidade de calcita. Os autores concluíram que a radiação gama induz o fenômeno de carbonatação do concreto por meio da radiólise da água.

(LEE, *et al.* 2007) propuseram uma equação que permite estimar a atenuação da radiação gama de um concreto com espessura entre 10 e 20 cm com uma fissura de até 2 mm. Para

chegar até a equação, foram estudados concretos com a espessura variando entre 10, 15 e 20 cm e com fissuras com 0, 0,5, 1, 1,5 e 2 mm. Após realizar a transmissão, os autores observaram que o tamanho da fissura influencia na atenuação através de uma relação logarítmica. Esse estudo demonstra como a influência de uma fissura afeta o coeficiente de atenuação do concreto.

(BAR-NES, *et al.* 2008) estudaram como a presença do estrôncio, Sr, e do cézio, Cs, na mistura do cimento e a carbonatação são afetados após a irradiação. O cimento Portland foi utilizado e misturado com três diferentes relações de água-cimento e tiveram o acréscimo de uma solução de $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ e CsNO_3 durante a mistura do material. A exposição foi de 10 MGy. As amostras de dois grupos foram irradiadas em uma câmara que permitia a captura dos gases que eram expelidos durante o processo de irradiação e recolhidos após diferentes doses para serem analisados. As amostras em que não houve captura dos gases passaram por um teste de lixiviação em que foi comparado como a radiação altera a movimentação das moléculas com Sr e Cs na pasta. Para o fator de a/c de 0,3, houve uma diminuição na movimentação das moléculas após irradiação, enquanto que as de Cs permaneceram praticamente constantes. Para o fator de a/c de 0,45, o Sr apresentou o mesmo comportamento, enquanto o Cs apresentou um aumento maior na movimentação das moléculas quando comparada com as amostras não irradiadas. Esse comportamento pode ser explicado pela maior quantidade de água para a amostra com o fator de a/c de 0,45, pois a presença da água acelera a carbonatação e a molécula de estrôncio forma o composto SrCO_3 que é insolúvel, dificultando a difusão do elemento. Ao analisar os gases expelidos após a irradiação, foi verificada uma quantidade de hidrogênio maior que a quantidade de oxigênio, o que indica a reação de moléculas de oxigênio com a pasta de cimento e a radiólise da água, através da formação do peróxido de hidrogênio. A carbonatação foi aferida com a utilização de uma solução de fenolftaleína e as amostras irradiadas apresentaram uma maior carbonatação quando comparadas com dois grupos, um que estava exposto ao ar atmosférico e outro que estava em uma cápsula que evitava o contato com o ar e, conseqüentemente, o efeito da carbonatação.

(LOWINSKA-KLUGE e PISZORA, 2008) realizaram um estudo do impacto de altas doses no concreto com o auxílio do MEV e da DRX em concretos com grãos ativos com aditivos, outros com pasta de cimento, mas com os mesmos aditivos e outro com cimento Portland e sem a presença de aditivos. As doses absorvidas pelos corpos de prova

variaram de 68 MGy a 1409 MGy. Após a irradiação, já foi possível verificar modificações visíveis na estrutura de alguns traços com a dose absorvida de 68 MGy, sendo que pasta de cimento se decompôs após a dose absorvida de 1.188 MGy. Para o concreto com grãos ativos, a análise pelo MEV permitiu verificar que os cristais começaram a se tornar amorfos para a dose de 685 MGy e a DRX não identificou nenhuma estrutura cristalina após a dose absorvida de 1.409 MGy. O estudo verificou que as amostras de concreto com grãos ativos apresentaram uma melhor resistência à radiação que as demais.

(AKKURT, *et al.* 2010) apresentaram um estudo em que determinaram a camada de valor médio (HVL) e camada de valor décimo (TVL) do concreto baritado e para o chumbo experimentalmente para as energias de 662, 1.173 e 1.332 keV e compararam para os valores encontrados na plataforma XCOM. Os autores concluíram que os valores experimentais eram próximos dos encontrados no XCOM e que uma maior concentração de barita aumenta a atenuação de raios X e gama.

(VODÁK, *et al.* 2011) estudou como a radiação pode induzir a carbonatação no concreto, visto que a carbonatação, que ocorre em ambientes onde não há uma incidência elevada de raios gama, atinge apenas a superfície, mas pode se espalhar para o interior através dos sistemas de poros. Durante o estudo foram analisadas a mudança na composição do cimento, mudança no tamanho médio dos poros e mudanças nas propriedades mecânicas. As amostras de concreto possuíam o mesmo traço, mas as condições de cura, exposição ao CO₂ e tempo de exposição (foi utilizada uma fonte de ⁶⁰Co) foram diferenciados. A carbonatação foi identificada não apenas na superfície do concreto, mas também em seu interior. A DRX identificou que houve um aumento no pico da intensidade relativa da calcita. A análise da porosidade foi realizada através do MIP, que identificou que a média do diâmetro dos poros reduz (isso ocorreu devido ao fato de os cristais de calcita possuírem um volume maior que os cristais de portlandita), houve um aumento da quantidade de poros com o diâmetro na ordem do nanômetro e uma diminuição da quantidade dos poros menores. Um aumento na resistência à compressão foi perceptível após a irradiação. A massa das amostras também sofreu uma alteração devido à hidrólise provocada pela incidência da radiação seguida pela secagem dos corpos de prova. O estudo concluiu que a radiação acelera o processo da carbonatação, não se restringindo apenas à superfície.

(KHATTAB, *et al.* 2011) estudou o comportamento do concreto comum e do concreto com cinzas de casca de arroz após serem impregnados por uma resina de poliéster insaturada e irradiados com uma dose de 30 kGy em diferentes condições. Após as amostras de concreto comum e com cinzas de casca de arroz ficarem sete dias dentro de um tanque com água para a cura, elas foram colocadas em uma estufa a temperatura de 105 °C para que pudessem secar. Após esse processo, parte das amostras foram colocadas em uma câmara de impregnação durante três horas. Após a impregnação, elas foram irradiadas e colocadas em três câmaras, uma com água do mar, outra com uma solução de sulfato de magnésio e outra com água de torneira. O MIP mostrou que os concretos não irradiados tiveram um aumento no tamanho dos poros quando imersos na água do mar maior do que os que ficaram submersos na água de torneira após seis meses. Para os concretos irradiados o mesmo efeito foi observado, porém em menor escala. O MEV mostrou que a resina de poliéster acumulou nas regiões onde haviam os poros, criando uma pequena camada. As amostras que foram irradiadas apresentaram um aumento na resistência à compressão. As amostras que ficaram imersas na água marinha e nas diferentes concentrações de sulfato de magnésio apresentaram uma redução na resistência à compressão maior que as que estavam impregnadas com a resina de poliéster. As amostras no tanque com água de torneira também apresentaram um aumento na resistência à compressão.

(REZAEI OCHBELAGH, *et al.* 2011) realizaram um estudo em que compararam um traço de argamassa com e outro sem areia, sendo que algumas amostras foram irradiadas durante os sete dias de cura a uma taxa de 121,14 mGy/dia. As amostras irradiadas mostraram possuir uma maior resistência à compressão. O aumento da resistência ocorreu devido a reação das moléculas de H₂O com a radiação proveniente de uma fonte de ¹³⁷Cs, o que acarretou na radiólise da molécula e na sua interação com os íons presentes no concreto (alcalinos e sílica - Na⁺ ou Si⁺), fazendo com que haja um preenchimento dos microporos pelas substâncias formadas. Os autores também estudaram o acréscimo de chumbo em pó no traço de concreto iguais aos anteriores e sob as mesmas condições. Os concretos com chumbo apresentaram o mesmo comportamento que os traços sem chumbo em relação à resistência à compressão. A diferença se tornou visível para a atenuação, pois houve um menor número de contagem para as amostras com chumbo. A resistência dos concretos com chumbo aumentou até a relação de 0,9 entre chumbo e concreto, acima disso houve uma diminuição da capacidade mecânica. O aumento da resistência das

amostras com chumbo ocorreu devido à formação da molécula de Pb(OH) após a radiólise da água, o que permitiu a formação de uma maior quantidade de Silicatos de Cálcio Hidratados (C-S-H).

(YLMAZ, *et al.* 2011) realizaram um estudo em que compararam o coeficiente de atenuação experimental com o determinado através da plataforma XCOM para radiação gama e a NXCOM para nêutrons rápidos. O estudo envolveu a utilização de doze amostras de concreto com e sem a adição de aditivos minerais. O coeficiente de atenuação experimental foi determinado para as energias de 59,5 e 662 keV e ficaram próximos dos simulados. Para que pudessem inserir os dados no XCOM e NXCOM, os autores utilizaram a técnica de fluorescência de raios X para determinar os elementos e suas proporções.

(DAMLA, *et al.* 2012) calcularam o coeficiente de atenuação de massa, número atômico efetivo, densidade efetiva dos elétrons e a seção de choque para a interação com fótons para materiais utilizados na construção civil turca, dentre eles o concreto aerado e o concreto leve. As amostras foram preparadas de forma que as impurezas orgânicas pudessem ser eliminadas e convertidas em pastilhas de 13 milímetros de diâmetro. O estudo utilizou um detector de HPGe e sete fontes para determinar os valores para 14 diferentes energias na faixa de 81 a 1.332 keV. Os valores obtidos foram comparados com os valores tabulados e que podem ser encontrados na plataforma XCOM e com os disponíveis na literatura. Os resultados experimentais convergiram com os encontrados na plataforma e na literatura com um erro relativo de 6 a 8%.

(GULER e AKAR TARIM, 2012) determinaram o coeficiente de atenuação de massa experimental do cimento, do cimento Portland e do concreto para seis diferentes energias. Com a densidade e a composição química dos materiais conhecidos, foi utilizada a plataforma XCOM e código de Monte Carlo para calcular o coeficiente de atenuação de massa. Os resultados indicaram uma boa aproximação entre os valores experimentais e simulados.

(KHATTAB, 2012) realizou um estudo sobre a utilização da areia branca (proveniente do Sinai, no Egito) para a fabricação de cimento, algumas dessas amostras também contaram com a inserção de polímeros látex modificados no traço. Como a areia branca tem alta capacidade de inchamento (capacidade de absorção de água e consequente aumento do volume) foi necessário a utilização de uma alta relação água/cimento (a/c)

para que a mistura de concreto não apresentasse uma desidratação. Dessa forma, a utilização da areia branca provoca uma diminuição da resistência à compressão quando utilizada. Quando as amostras foram irradiadas, houve um aumento na resistência à compressão e uma diminuição para a porosidade e para a absorção da água.

(MOSTOFINEJAD, *et al.* 2012) comparou a eficiência do concreto baritado com o concreto com calcário e com sílica ativa. A maior capacidade de blindagem foi encontrada para o concreto baritado, enquanto os melhores resultados mecânicos foram encontrados para o concreto com calcário, desde que a relação água-cimento seja de máximo 0,5, pois acima desse valor a resistência entre os concretos não apresentam diferença significativa. O concreto com sílica ativa apresentou o pior resultado para a atenuação. Os valores determinados de forma experimental para o coeficiente de atenuação linear ficaram próximos dos determinados pelo XCOM.

(AL-HUMAIQANI, *et al.* 2013) apresentaram um estudo em que relacionaram a densidade, a resistência à compressão, o coeficiente de atenuação linear e o coeficiente de atenuação linear de massa de três grupos de concreto. Cada grupo se diferencia pelos traços de concreto utilizados, porém eles apresentavam três traços de concreto tradicionais e dois de concreto pesado. Os autores concluíram que o aumento da resistência à compressão e a atenuação linear apresentam uma relação direta e quase linear; quando apenas o concreto com os agregados tradicionais foram analisados, mas não foi possível relacionar o aumento da resistência à compressão com o aumento do coeficiente de atenuação linear; o aumento da densidade do concreto provoca um aumento na atenuação dos raios gama; os concretos com barita e hematita apresentaram os melhores resultados para o coeficiente de atenuação linear.

O concreto possui três tipos de água em sua composição, sendo a primeira aquela que se encontra livre por não ter reagido com nenhum elemento, a segunda que se encontra em forma de gel e ligada fisicamente à superfície dos produtos de hidratação, podendo evaporar, e a terceira é a que se encontra ligada quimicamente aos produtos de hidratação e não podem evaporar. Os agregados possuem água que pode ser evaporada e aquela que se encontra ligada quimicamente em sua estrutura, porém em pouca quantidade. A radiação gama pode provocar a radiólise da água, além de provocar um aquecimento que pode fazer com que haja evaporação da água livre e que não tiveram as ligações rompidas. O peróxido de hidrogênio e os radicais livres que são gerados na radiólise reagem com os

produtos de hidratação e alteram as propriedades químicas da pasta de cimento. Os agregados não sofrem com esse efeito, porque eles possuem pouca água na sua composição. Quando há a interação do concreto com nêutrons rápidos, há maior ocorrência de efeitos na pasta de cimento do que nos agregados. O efeito dos nêutrons rápidos na pasta de cimento ocorre através da excitação das moléculas de água, mas devido às diferenças na densidade de transferência de energia, os átomos ejetados tendem a se mover pela pasta através de sua estrutura porosa, diminuindo os defeitos que surgem em sua estrutura. Quando há interação de nêutrons rápidos com os agregados, ocorre uma colisão com a cadeia molecular que se expande acarretando em uma expansão dos agregados. Dessa forma, a presença da radiação gama tende a provocar uma retração do concreto, enquanto a interação com nêutrons rápidos tende a expandi-lo (KONTANI, *et al.* 2014).

(BINICI, *et al.* 2014) realizaram um estudo do concreto com vários minerais e como eles afetam a atenuação da radiação gama e a resistência mecânica. Dentre os minerais utilizados, estão a barita, a pedra-pomes, a colemanita e a escória de alto forno. Os autores concluíram que não há relação entre a capacidade mecânica e a blindagem, sendo que o concreto baritado apresentou a melhor blindagem e o concreto com escória de alto forno apresentou a maior resistência mecânica.

(GONZÁLEZ-ORTEGA, *et al.* 2014) compararam a capacidade mecânica e a de blindagem para a radiação gama do concreto convencional, com o concreto baritado e com o concreto com escória de forno elétrico a arco. Os resultados mostraram que apesar do concreto baritado ser o mais denso, ele foi o que apresentou a menor resistência à compressão. Essa característica do concreto baritado pode ser explicada pela alta capacidade de fragmentação do material, provocando um aumento da área da zona de transição interfacial. O concreto convencional e o concreto com escória de alto forno apresentaram valores próximos para a resistência à compressão. O concreto baritado foi o que apresentou o melhor desempenho na atenuação da radiação gama, seguido pelo concreto com escória de forno elétrico e pelo concreto convencional. Os autores concluíram que a utilização do concreto com escória de forno elétrico atende as necessidades estruturais e de atenuação.

(KONTANI, *et al.* 2014) irradiaram dois traços de concreto, que possuíam diferentes relações de água/cimento, com ^{60}Co e controle de temperatura em 25, 40 e 60 °C dentro

de um container que capturava os gases liberados pelas amostras a uma taxa de dose de 0,93, 4,27 e 8,23 kGy/h durante 17 dias. A análise dos gases permitiu identificar a presença de água, hidrogênio e oxigênio. Os autores concluíram que o aumento das taxas de dose e o aumento da quantidade de água das amostras aumentam as taxas de geração de hidrogênio, no entanto, não foi possível relacionar esse aumento com a temperatura; o aumento da dose absorvida aumenta as taxas de geração de hidrogênio linearmente nas faixa energética entre 1 e 10 kGy/h, independentemente da dose, quantidade de água das amostras e temperaturas de irradiação; a água quimicamente ligada deve ser decomposta sob irradiação de raios gama, no entanto, apenas 1,5% da água quimicamente ligada está sujeita a esse efeito.

(CRAEYE, *et al.* 2015) tiveram como objetivo irradiar amostras de concreto CPI e CPIII durante a cura (até 28 dias) com uma alta (2 kGy/h) e baixa taxa de dose (10 Gy/h). As amostras irradiadas com uma taxa mais alta apresentaram uma melhor capacidade mecânica que as irradiadas com uma baixa dose. A densidade das amostras não apresentou diferenças significativas. A irradiação do concreto durante a cura provocou uma diminuição na capacidade mecânica e aumentou a quantidade de poros. Os problemas relatados foram maiores quando o CPIII foi utilizado.

(RAMACHANDRAN, *et al.* 2017) realizaram uma comparação entre dois traços de concreto com cinza volantes, mas um com o acréscimo de hematita, e aferiram a resistência à compressão, porosidade e o surgimento da carbonatação. O concreto com hematita apresentou uma maior resistência à compressão e uma menor porosidade. Para aferir a carbonatação, foram realizados cortes nos corpos de prova e utilizada uma solução de fenoltaleína que demonstrou a ocorrência do efeito apenas para as amostras sem hematita. A utilização da DRX indicou uma menor concentração dos elementos hidratados para o concreto com hematita, gerando uma maior quantidade de silicatos de cálcio hidratados (H-C-S) através do consumo de hidróxido de cálcio, o que aumenta a resistência na zona de transição interfacial entre a pasta e os agregados miúdos.

(GOKÇE, *et al.* 2018) elaboraram diferentes tipos de concreto pesado com barita, mas com diferentes tipos de aditivos e relação água/cimento e determinaram o coeficiente de atenuação, o MFP, HVL e TVL de cada traço para as energias de 662, 1.173 e 1.332 keV. Após a determinação dos valores, os autores compararam o resultado com o encontrado pelo XCOM, que mostrou uma melhor aproximação para a energia de 662 keV do que

para as mais elevadas. Os autores concluíram que a substituição do cimento pelos aditivos minerais afetou negativamente o coeficiente de atenuação para o concreto pesado e sugerem a utilização da menor quantidade possível na elaboração de traços de concreto para serem utilizados na blindagem.

(SAYYED, *et al.* 2018) estudaram a capacidade de atenuação de oito conjuntos de amostras de concreto com diferentes concentrações de sepiolita, que é uma argila porosa, não dilatável e com densidade que varia entre 2.000 e 2.500 kg/m³, e carbetos de boro e compararam o valor definido experimentalmente com o simulado na plataforma XCOM e pelo código MCNPX. Os autores utilizaram como fontes o ²²Na, ⁶⁰Co, ¹³³Ba e ¹³⁷Cs e utilizaram a espectroscopia de raios X para determinar os elementos químicos presentes em cada traço. As amostras que apresentaram um melhor resultado foram as que apresentaram uma adição de 10% de sepiolita, porém para as energias acima de 356 keV o coeficiente de atenuação passa a ser bem próximo para todas as amostras. Os resultados encontrados experimentalmente foram bem próximos dos encontrados no MCNPX e XCOM, com exceção da amostra que teve uma adição de 30% de sepiolita.

(SCHAEFER, *et al.* 2018) estudaram como o uso de resíduos plásticos afeta o concreto. Para que houvesse um aumento na resistência atingida no concreto, os plásticos foram irradiados com doses baixas e altas (10 e 100 kGy), pois a irradiação do plástico provoca a quebra das cadeias de moléculas e provoca o fenômeno de *crosslinking*, que é quando as ligações de um polímero são rompidas para que haja a formação de outras moléculas, fazendo com que o plástico adquira uma consistência mais rígida. Dessa forma a irradiação do plástico passa a ser fundamental para permitir que maiores resistências sejam alcançadas pelo concreto. A resistência à compressão apresentou um acréscimo à medida que a dose absorvida recebida pelo plástico aumentava. A DRX apresentou uma pequena variação nas concentrações, que foram responsáveis pelo preenchimento dos poros conectados, diminuindo a porosidade.

(OBAID, *et al.* 2018) estudaram e compararam o coeficiente de atenuação para o concreto com areia convencional, para o basalto feldspato, para o basalto compacto, para a rocha vulcânica, para o granito rosa, para o arenito e para a diabase. Após a determinação do valor experimental, foi utilizada a técnica de fluorescência de raios X para determinar os dados de entrada na plataforma XCOM. A faixa de energia abrangida no estudo variou

de 122 a 1.332 keV. Os autores concluíram que os basaltos, rocha vulcânica, granito rosa e diábase são melhores que o arenito e o concreto tradicional quando atuam na blindagem.

(OUDA e ABDELGADER, 2019) realizaram um estudo em que determinaram o coeficiente de atenuação de diferentes traços de concreto, em que houveram a substituição dos agregados miúdos e parte dos agregados graúdos através de uma fonte de ^{137}Cs . Os autores também determinaram a resistência aos esforços mecânicos de cada traço. A amostra de concreto em que houve substituição de 60% dos agregados miúdos tradicionais para os agregados miúdos de alta densidade foi a que apresentou a maior resistência à compressão, enquanto o percentual com maior quantidade de agregados miúdos de alta resistência começou a ter uma redução na resistência, sendo o com 100% dos agregados miúdos apresentando o pior resultado. A substituição de parte dos agregados graúdos pelos miúdos apresentou uma queda expressiva na resistência à compressão. O mesmo resultado foi encontrado para a resistência à tração. O coeficiente de atenuação aumentou de acordo com a concentração de agregados miúdos de alta densidade utilizados, as amostras em que houve substituição de parte dos agregados graúdos foram as que apresentaram maior atenuação dos fótons. Os autores sugerem utilizar traços de concreto em que haja uma substituição de até 60% dos agregados miúdos pelos agregados miúdos de alta densidade para blindagem.

(GOKÇE, 2019) realizou um estudo em que comparou os valores para o coeficiente de atenuação linear e o coeficiente de atenuação por massa para o concreto pesado obtido de forma experimental com o encontrado pelo XCOM e por outras referências. O autor também calculou o MFP, o HVL e o TVL e comparou com os simulados para o concreto tradicional e o chumbo. Os valores experimentais convergiram com os do XCOM para as energias de 662, 1.173 e 1.332 keV.

(MAHMOUD, *et al.* 2020) confeccionaram dois grupos de concreto contendo três diferentes traços com 25% de cimento e 75% de basalto. O primeiro grupo continha grãos de basalto com o diâmetro médio de 107, 71 e 25 μm , enquanto o segundo grupo possuía apenas grãos com o diâmetro médio de 25 μm , mas se diferenciam em relação à pressão aplicada para a compactação dos grãos. Foram utilizadas fontes de ^{137}Cs , ^{60}Co e ^{152}Eu para determinar a transmissão de cada traço e os valores foram comparados com o encontrado no XCOM. O maior valor encontrado para o coeficiente de atenuação foi para os grãos de basalto com a menor granulometria. Dentre os menores grãos, aqueles em que

foi exercida uma maior pressão de compactação apresentou o maior valor, enquanto o que não foi compactado apresentou o menor. Os dados obtidos através do XCOM apresentaram uma variação para as amostras em que houve uma aplicação de pressão, o que pode ser explicado através de uma menor porosidade.

(ZATLOUKALOVÁ, *et al.* 2020) estudaram a influência da radiação após uma dose de 2 MGy em três traços de concreto, um com cimento Portland, outro com uma mistura de cimentos e outro com a presença de elementos químicos. Para determinar as modificações após a irradiação, foram utilizadas as técnicas de MEV, DRX e nanoidentação, que é uma técnica que permite analisar as propriedades mecânicas de um material com pequeno volume. O SEM não identificou modificações para o concreto com cimento Portland, para o concreto com uma mistura de cimentos foram identificadas manchas claras e para o concreto com presença de elementos químicos foram identificadas manchas escuras. Para a identificação das manchas, foi utilizada a técnica de espectroscopia de raios X por dispersão (EDX), que classificou as manchas escuras como carbonatos de sódio. O DRX apresentou modificação em todas as quantidades identificadas antes da irradiação, com exceção da Portlandita, não houve aumento significativo da calcita, houve uma redução na quantidade de charlesita para o concreto com elementos químicos e uma redução de etringita para os outros dois traços. A nanoidentação indicou a criação de uma nova fase nas pastas graças à irradiação com valores médios de módulo de elasticidade de Young em torno de 35 e 38 GPa, o que provavelmente corresponde a carbonatação.

(BYKOV, *et al.* 2021) tiveram como objetivo avaliar as propriedades do cimento Portland comum, incluindo a evolução gasosa, resistência mecânica e outras propriedades, após irradiação a altas doses. Além disso, compararam os efeitos exercidos pela irradiação do material com ^{60}Co e com elétrons acelerados de alta energia (8 MeV). Os CP's analisados demonstram uma diminuição da porosidade e do diâmetro máximo encontrado após a irradiação. O aumento da dose absorvida provocou um aumento na quantidade de carbonato de cálcio e na diminuição da concentração de silicato de dicálcio ($(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$). As doses utilizadas foram 0,4, 0,8, 1,6 e 3,2 MGy. A incidência da radiação não causou nenhuma modificação estatística na resistência à compressão. Um efeito que deve ser destacado é quando há radiólise na água que se encontra em poros fechados, pois a formação do H^+ pode provocar um aumento da pressão e causar fissuras na matriz de cimento.

Ao irradiar amostras submetidas a um esforço de compressão que varia entre 10 e 15 MPa com uma dose entre 12 e 15 MGy, é possível verificar uma diminuição no peso quando comparadas a amostras não irradiadas. A análise pela DRX também não apresenta diferenças significativas na intensidade dos picos, mas a irradiação provoca um aumento na porosidade, modificando principalmente o histograma de poros e provocando o aparecimento de microfissuras (KHMUROVSKA, *et al.* 2021).

(POTTS, *et al.* 2021) estudaram como a radiação gama afeta o concreto após um longo período de exposição. Os autores dividiram as amostras em quatro grupos, o primeiro com amostras que ficaram durante mais de trinta anos em um depósito de rejeitos radioativos, o segundo com amostras controles que ficaram expostas em condições ambientais, o terceiro grupo com amostras que ficaram em uma estufa durante dois anos com a temperatura encontrada no depósito de rejeitos, o quarto grupo com amostras controle que foram irradiadas durante seis meses para receberem uma dose próxima da recebida pelas amostras do grupo um (32,8 MGy) e foram revestidas por papel alumínio para evitar o efeito da carbonatação natural. A fenolftaleína demonstrou que as amostras do grupo dois apresentaram uma carbonatação maior que as do grupo um. O teste de esforço mecânico mostrou que as amostras do grupo quatro apresentaram a maior resistência, enquanto as do grupo um apresentaram um valor acima do apresentado pelas do grupo dois. A utilização do SEM e do EDS permitiu visualizar as reações que ocorreram na pasta e determinar os elementos em cada ponto escolhido para análise, sendo possível observar que a radiação gama provocou uma diminuição da porosidade e no diâmetro dos poros. A DRX não apresentou nenhuma mudança significativa entre as amostras, pois a presença de calcário como agregado, não permitiu a visualização do fenômeno de carbonatação por causa da presença já existente da calcita nos agregados. A carbonatação pode ser observada pela presença da portlandita apenas na região central das amostras e sua ausência nas superfícies externas.

Com o que foi apresentado até aqui, é possível entender que a radiação interage com o concreto e com a argamassa de diferentes formas, sendo a taxa de dose o principal fator que modifica a matriz de cimento (SOO e MILIAN, 2001; CRAEYE, *et al.* 2005). O total de dose absorvida também demonstra afetar a estrutura interna através da ocorrência do fenômeno da carbonatação seguido pela redução da porosidade.

A presença do agregado não demonstra afetar de forma significativa a interação dos corpos de prova com a radiação gama de acordo com o encontrado na literatura. A radiólise ocorre principalmente na água livre, provocando a reação com os silicatos de cálcio e a portlandita com o OH^- da região próxima onde a água se encontra (KONTANI, *et al.* 2014).

É esperado avaliar a forma como as reações ocorreram na parte interna quando houver a radiólise da água. É esperado que a calcita, principal produto da carbonatação e por possuírem uma estrutura molecular maior que a portlandita, provoquem um preenchimento dos poros e, conseqüentemente, redução da porosidade. Com a redução da porosidade, também é esperado um aumento na capacidade mecânica para cada grupo.

Capítulo III

3. Fundamentação Teórica

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento desta tese.

3.1. *Interação da radiação com a matéria*

A forma como a radiação interage com a matéria é importante para que haja um entendimento da forma como as reações ocorrem. Os principais tipos de interação da radiação com a matéria são o efeito fotoelétrico, o espalhamento Compton e a produção de pares.

O efeito fotoelétrico ocorre quando um fóton interage com um átomo absorvedor, fazendo com que um elétron seja ejetado de uma camada interna. O buraco deixado pelo elétron ejetado é preenchido por outro de uma camada mais externa ou do meio, fazendo com que seja liberado um ou mais fótons de raios X característicos. Esse efeito é predominante em interações de baixa energia e para elementos atômicos com o número atômico elevado (KNOLL, 2000).

O efeito Compton ocorre quando um fóton, proveniente da radiação gama ou X, é defletido por um elétron em uma angulação θ em relação a sua direção original após o choque. O fóton transfere parte de sua energia para o elétron, que é considerado como inicialmente em repouso. Como o fóton pode ser desviado em qualquer angulação θ , a energia transferida para o elétron pode variar de zero até a energia inicial apresentada pelo fóton. A probabilidade de o efeito Compton ocorrer depende diretamente do número de elétrons disponíveis como alvo em um átomo, ou seja, aumenta linearmente com o número atômico e geralmente diminui com o aumento da energia do fóton. Um caso particular do efeito Compton, que merece ser citado, é o espalhamento Compton coerente ou efeito Rayleigh, que consiste na interação de fótons de baixa energia com elétrons muito ligados. Nesse efeito, o fóton não perde energia, pois ao se chocar com o átomo, ele é rebatido, ocasionando uma mudança na direção, e o átomo sofre apenas um recuo.

Esse feito tem maior probabilidade de ocorrer quando fótons de baixa energia interagem com elemento de elevado número atômico (KNOLL, 2000).

Quando a energia incidente excede a energia de repouso do elétron em duas vezes (1,022 MeV), o efeito de produção de pares passa a ocorrer. Como resultado dessa interação, a radiação desaparece e dá origem a um par de elétron-pósitron, sendo a energia excedente ao valor de 1,022 MeV convertida em energia cinética das partículas. Como o pósitron interage com o meio logo após a sua criação, dois fótons de aniquilação são produzidos nas interações secundárias (KNOLL, 2000).

A figura 1 apresenta um gráfico em que temos a relação entre o número atômico do material alvo e a energia da partícula incidente com a predominância de ocorrência dos efeitos fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares.

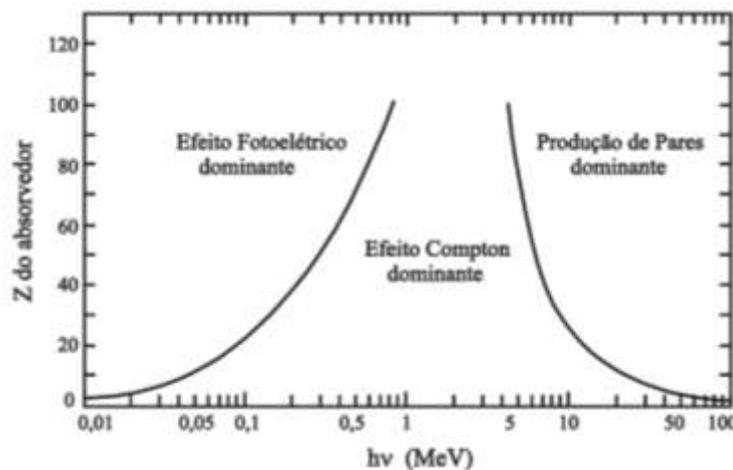


Figura 1 - Predominância das formas de interação entre um fóton e a matéria em função de sua energia e número atômico do material. (Figura adaptada de (KNOLL, 2000)).

Os principais efeitos que serão observados nesse trabalho são o efeito fotoelétrico e o efeito Compton, que estão presentes na interação da radiação com os corpos de prova durante a execução dos experimentos.

3.2. Atenuação da radiação gama

Nesta seção será apresentada as possíveis formas de atenuar a radiação gama. A atenuação de um fóton ocorre quando a partícula possui uma energia E_0 antes de penetrar um meio e após percorrer a espessura total do meio, o fóton possuirá uma menor energia (E_1). Entre as formas de interação entre a radiação gama e a matéria que permitem a redução energética do fóton são o coeficiente de atenuação, o comprimento de absorção de massa (*absorber mass thickness*) e *Buildup*.

3.2.1. Coeficiente de atenuação

O coeficiente de atenuação (μ) é a razão que irá determinar o quanto um fóton irá penetrar em uma superfície antes que sua energia seja depositada no meio. O fóton deposita a energia através do efeito fotoelétrico e do espalhamento Compton. Para determinar o coeficiente de atenuação é necessário conhecer a probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico (τ), do espalhamento Compton (σ) e da produção de pares (κ) e somá-los, conforme a equação 2. O coeficiente de atenuação linear é calculado experimentalmente segundo a lei de Beer-Lambert's para um feixe monoenergético através do número de fótons contados pelo detector com (I) e sem (I_0) a presença do meio entre a fonte e o detector, a fórmula pode ser conferida na equação 3 onde x é a espessura do meio (KNOLL, 2000). A unidade usual para o coeficiente de atenuação linear é o cm^{-1} .

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \text{ Equação 2}$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \text{ Equação 3}$$

3.2.2. Coeficiente de Atenuação de Massa

Seguindo a equação 3 e acrescentando a densidade do meio na equação é possível definir a capacidade de atenuação da massa dividida pela área que o fóton pode percorrer. Dessa forma, convencionou-se de que a medida em espessura de massa é mais usual que a espessura, porque é uma quantidade física mais fundamental. A unidade usual é g/cm^2 e a fórmula é encontrada na equação 4, onde o μx é um importante parâmetro que determina a capacidade de atenuação conhecido como espessura de massa (KNOLL, 2000).

$$\frac{I}{I_0} = e^{-(\mu/\rho)\rho x} \text{ Equação 4}$$

Essa relação permite aferir que quanto maior a densidade no meio, mais efetiva será a atenuação da radiação gama.

3.2.3. *Buildup*

O fator *buildup* deve ser considerado quando a geometria entre a fonte, o meio e o detector não é ideal ou quando o sistema não está colimado, o que permitirá que fótons espalhados possam chegar no detector, conforme o demonstrado na figura 2. Esse fator tende a corrigir a equação 3 ao inserir uma função B em relação à espessura do meio e à energia do feixe e é encontrada na equação 5 (KNOLL, 2000).

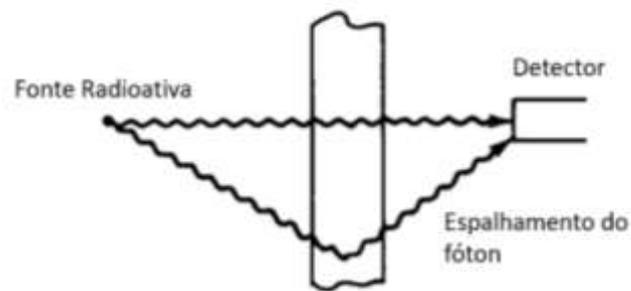


Figura 2 - A falta de colimação permite que fótons espalhados cheguem ao detector e prejudicam a medida devido ao espalhamento. (Figura adaptada de (KNOLL, 2000)).

$$\frac{I}{I_0} = B(x, E_\gamma) e^{-\mu x} \text{ Equação 5}$$

Durante esse trabalho o fator *Buildup* não foi considerado, pois houve a utilização de colimadores e a realização do alimento entre o detector e a fonte para evitar que os fótons espalhados influenciassem nas medidas.

3.3. *Transmissão*

A radiação pode possuir características eletromagnéticas e corpuscular e cada uma possui penetrabilidades diferentes na matéria, sendo a radiação gama a que possui maior

capacidade de penetrar na matéria. A lei de Beer-Lambert, vista na seção 3.2.1, relaciona como um material modifica o fluxo de fótons quando colocado entre uma fonte radioativa e o detector.

A capacidade de atenuar os fótons está ligada à probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares serem observados após a interação do fóton com o meio, conforme o visto na seção 3.1. Então, o coeficiente de atenuação é a razão que irá determinar o quanto um fóton com uma energia conhecida E irá penetrar no meio antes que tenha a sua energia depositada em sua totalidade no meio absorvedor.

O coeficiente de atenuação de massa irá relacionar o coeficiente de atenuação com a densidade e indicará o quanto de espessura de massa é necessário para que o fóton que penetre no material tenha sua energia depositada no meio. Conforme visto na seção 3.2.2, essa razão relaciona o coeficiente de atenuação com a densidade do meio e um material com elevada densidade tem maior probabilidade de absorver a energia do fóton que um elemento de baixa densidade.

Um sistema de transmissão que permita determinar o quanto de energia de um fóton foi absorvida por meio ao percorrer um caminho linear deve apresentar um correto alinhamento entre a fonte e o detector, além de utilizar colimadores que impeçam a contagem dos fótons provenientes de outras interações. A fonte deve possuir uma atividade que permita a identificação do pico característico para que a contagem dos fótons atenuados seja realizada na energia que ele define. Dessa forma, é importante que sejam utilizadas fontes que possuem uma energia característica conhecida. A tabela 3 apresenta as principais fontes e a energia características delas.

Tabela 3 - Valores padrões para radiação gama de alguns radionuclídeos

Radionuclídeo	E_{γ} (keV)
^{40}K	1.460,82
^{60}Co	1.173,22 1.332,49
^{137}Cs	661,66
^{226}Ra	186,21
^{241}Am	26,35 59,54

O detector tem a função de registrar uma partícula ou um fóton de uma corrente que flui por um tempo igual a um tempo de coleta de carga. Ao chegar no detector, é gerado um pulso que é direcionado ao amplificador e direcionado a um contador. Os detectores que possuem a capacidade de registrar um quantum de radiação opera em pulsos. Ressalta-se que a liberação de um fóton com a energia conhecida é um processo aleatório que obedece a distribuição de Poisson (KNOLL, 2000).

Em detector de radiação que funciona no modo pulso, cada amplitude de pulso individual carrega informações sobre a carga gerada por uma interação particular de radiação. As amplitudes dos pulsos não serão iguais, pois podem ocorrer devido à diferentes energias dos fótons ou a resposta inerente do detector à radiação monoenergética. A maneira mais comum de verificar as informações de amplitude de pulso é por meio da distribuição diferencial de altura do pulso. A figura 3 apresenta um exemplo de distribuição, em que a abscissa é uma escala de amplitude de pulso linear e a ordenada é o número diferencial dN de pulsos observados com uma amplitude dentro do incremento de amplitude diferencial dH dividido por um incremento dN/dH . O eixo X tem unidades de amplitude de pulso (volts) e o eixo Y tem unidades de amplitude inversa (volts^{-1}). O número de pulsos entre dois valores específicos H_1 e H_2 , que estão representados na área hachurada da figura 3, pode ser definido conforme a equação 6 (KNOLL, 2000).

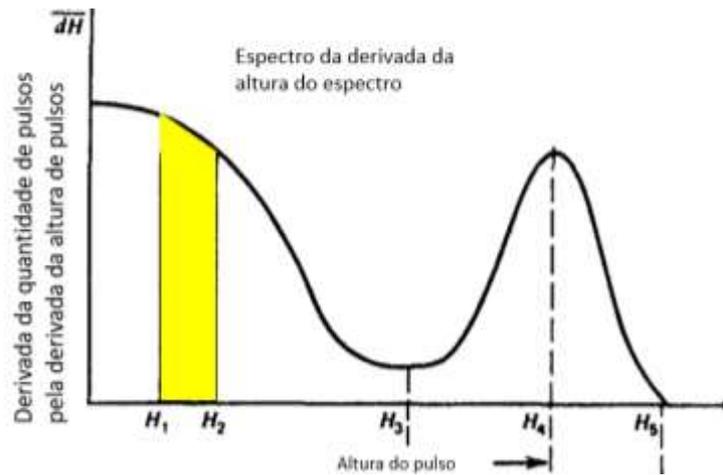


Figura 3 - Exemplo de pulso diferencial (Figura adaptada de (KNOLL, 2000)).

$$N = \int_{H_1}^{H_2} \frac{dN}{dH} dH \text{ Equação 6}$$

3.4. Concreto

O concreto é muito importante para a indústria da construção civil e pode ser definido como um material composto que consiste essencialmente de um meio de ligação composto pelo cimento e que possui partículas ou fragmentos, conhecidos como agregados, incorporados em sua estrutura (ASTM C125-18, 2018).

Devido ao baixo custo e a sua capacidade estrutural, o concreto é um importante material utilizado no mercado brasileiro e é o elemento estrutural mais utilizado no mundo (MEHTA e MONTEIRO, 2006). O estudo de seu comportamento sobre diferentes condições é necessário para melhor compreender os fatores que afetam a sua durabilidade, as suas condições em serviço e a sua vida útil.

Apesar de não ser tão resistente quanto o aço, o concreto possui uma excelente resistência a água e é o material ideal para ser usado em projetos que a controla, a armazena e a transporta. Uma das aplicações mais antigas para o concreto são os aquedutos e barragens de contenção de água romanas. Devido a suas características plásticas, ele pode ser moldado em diferentes formatos quando ainda fresco através da utilização de formas (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

A resistência do concreto depende da coesão da pasta de cimento, da sua adesão com as partículas dos agregados e, de certa forma, da resistência dos próprios agregados (NEVILLE, 2011), o que torna necessário que haja um rigoroso controle sobre o material utilizado para evitar que ocorram acidentes e prejuízos econômicos.

O concreto pode ser entendido como a mistura de cimento, água e agregados. Quando há a hidratação do cimento, ocorre uma reação exotérmica em que há o endurecimento do material. A utilização de materiais inertes como o agregado é importante para a que haja um maior preenchimento de vazios, no caso de agregados miúdos, e na resistência, no caso de agregados graúdos, do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Os componentes ativos são caracterizados pelas reações químicas e possuem seu potencial energético ativado quando hidratados e geram uma pasta, podendo ser o cimento e a cal. Os componentes inertes possuem o potencial energético ativo através de uma ação mecânica de mistura, que é quando os agregados começam a ser envolvidos pela pasta, e sua contribuição para o desempenho da massa pode ser dividido nos estados frescos e endurecido. Quando estão no estado fresco, a areia preenche os vazios da pasta, sendo também responsável por reter a água de amassamento sem que haja perda da trabalhabilidade. Já no estado endurecido, a areia atenua as tensões oriundas do endurecimento da pasta e de solicitações exteriores, reduz a permeabilidade, pois preenchem os vazios, e contribui para o aumento das resistências mecânicas e do módulo de deformação (CARNEIRO e CINCOTTO, 1999).

Após o concreto ser lançado em uma forma para adquirir o formato desejado, o processo de cura tem início. Durante esse processo, é necessário que haja um resfriamento, pois as reações que ocorrem são exotérmicas e o concreto possui uma baixa condutividade térmica. Caso não haja um resfriamento da estrutura, há o surgimento de fissuras, prejudicando a resistência final do material (NEVILLE, 2011). Dessa forma, o processo de cura exige um rigoroso cuidado e é extremamente importante para que o concreto alcance a sua resistência definida em projeto (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Por ser constituído basicamente de três componentes (cimento, água e agregados) é importante que seja estudado como ocorre a atuação de cada elemento para que o concreto atinja a resistência desejada. Dessa forma, (GILKEY, 1961) elaborou a seguinte proposição após estudar a relação entre a resistência e o fator água-cimento (a/c – relação

da quantidade do volume de água sobre a quantidade de massa do cimento utilizado em um determinado traço para a fabricação de uma argamassa ou concreto):

Para um determinado cimento e agregados em condições aceitáveis, a resistência que pode ser desenvolvida por uma mistura adequada de cimento, água e agregados (sob as mesmas condições de mistura, cura e teste) é influenciada por:

- a) relação água-cimento;
- b) proporção entre o cimento e os agregados;
- c) classificação, textura superficial, forma, resistência e rigidez das partículas agregadas;
- d) tamanho máximo do agregado;

(GILKEY, 1961) também demonstrou que a resistência alcançada pelo concreto aumenta proporcionalmente ao tamanho dos agregados graúdos utilizados, desde que não ultrapassem o diâmetro de 40 mm.

Também é possível encontrar na obra de (NEVILLE, 2011) que complementa a proposição formulada por Gilkey dizendo que quando agregados acima de 40 mm são utilizados, as proposições (b) e (c) são menos importantes que a proposição (a), porque a relação água-cimento irá afetar o surgimento de vazios. Esses vazios surgem naturalmente com a utilização dos agregados graúdos e são conhecidos como zona de transição interfacial, que é a região em que há a modificação entre os elementos, ou seja, entre a pasta de cimento hidratado e o agregado, fazendo com que haja uma maior porosidade no elemento. A figura 4 apresenta como a relação água e cimento modifica a resistência à compressão atingida pelo concreto e a importância da compactação para o melhor desempenho.

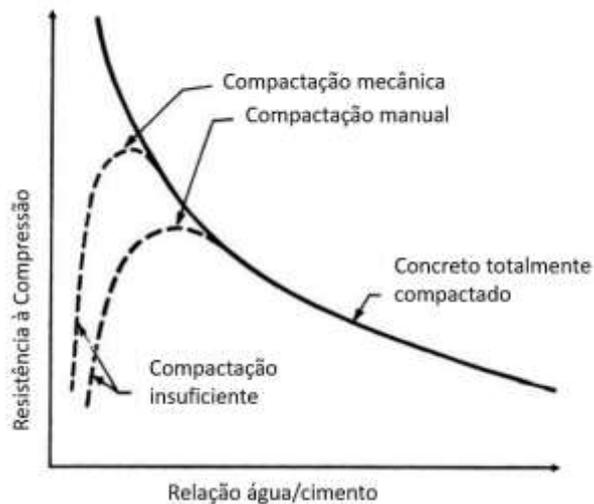


Figura 4 - Relação entre a resistência mecânica, a relação água e cimento e compactação do concreto. (Adaptado de (NEVILLE, 2011).

3.4.1. Cimento

O cimento é o principal componente para a fabricação do concreto e é caracterizado como uma mistura de materiais inorgânicos que desenvolvem resistência a esforços por meios de reações químicas através da formação de hidratos (ASTM C125-18, 2018). A formação desses hidratos ocorre quando há a interação entre os minerais presentes no cimento e a água. O cimento em que os produtos de hidratação se encontram estáveis em um ambiente aquoso é conhecido como cimento hidráulico e o mais conhecido deles é o cimento Portland, que possui silicatos de cálcio reativos (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Os compostos presentes no cimento Portland são anidros. Quando colocados em contato com a água, são aderidos ou decompostos formando compostos hidratados. Formam-se soluções supersaturadas e instáveis, depositando gradativamente o excesso de sólidos. Uma vez que as solubilidades dos compostos anidros originais são muito maiores do que as dos produtos de hidratação, a hidratação completa deve ocorrer. Os principais componentes do cimento Portland são o silicato tricálcio (C3S), silicato dicálcio (C2S), aluminato tricálcio (C3A) e aluminato ferrato tetracálcio (C4AF) e apresentam diferentes cinéticas de hidratação, formando diferentes produtos. As fases de silicato no cimento Portland são as mais abundantes, muitas vezes compreendendo mais de 80% do material total. O C3S é o principal constituinte, com uma concentração de até 70%. A quantidade de C2S normalmente não excede 20%. O material é praticamente amorfo e, portanto, é comumente chamado de “gel C-S-H”. O gel C-S-H compreende cerca de 70% do cimento

Portland totalmente hidratado em condições ambientais e é considerado o principal aglutinante do cimento endurecido. Em contraste, o hidróxido de cálcio (portlandita) é altamente cristalino e ocorre como placas hexagonais. Sua concentração no cimento endurecido costuma estar entre 15% a 20% (MICHAUX, et al. 1990).

Um cimento de qualidade é caracterizado pela finura dos grãos que o constituem. Esse módulo de finura é determinado pelos grãos que são capazes de atravessarem uma peneira que determina o diâmetro médio deles. Um cimento deve ter mais de 50% dos grãos com o diâmetro entre 3 e 30 μm para desenvolver uma melhor resistência inicial. Quando a quantidade de grãos entre 3 e 30 μm presentes é de até 95%, acredita-se que as resistências iniciais e finais serão maiores (NEVILLE, 2011).

3.4.2. Agregados

Os agregados também são extremamente importantes para o concreto, pois eles permitem que a mistura atinja as principais propriedades, como a resistência aos esforços mecânicos, através do preenchimento de vazios. Eles são materiais inertes, ou seja, não reagem com a água e nem com o cimento, dessa forma, eles podem representar o volume entre 60 e 80% do concreto. Eles são materiais granulares como areia, cascalho, brita, escória de alto forno triturada, ou resíduos de construção e demolição (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Segundo a (ASTM C125-18, 2018), os agregados miúdos são todos aqueles que possuem os grãos capazes de passar por uma peneira com abertura de 4,75 mm, mas ficam retidos em uma peneira com abertura de 75 μm . Os agregados graúdos são todos aqueles que passam por uma peneira com 75 mm de abertura, mas ficam retidos em uma com abertura de 4,75 mm.

Os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidades que possam afetar a hidratação, o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade, ou, quando for requerido e o aspecto visual externo do concreto (NBR7211, 2009).

A densidade dos agregados utilizados na produção do concreto é importante para definir a densidade final da mistura, visto que correspondem por até 80% do volume final. Os

agregados mais comuns são os minerais como areia e cascalho e possuem uma densidade entre 1.520 a 1.680 kg/m³, sua utilização faz com que surja o concreto com a densidade próxima a 2.400 kg/m³. Os agregados leves, como a argila e cinzas volantes, possuem densidade inferior a 1.120 kg/m³. Enquanto isso, os agregados pesados possuem a densidade acima de 2.080 kg/m³ e podem ser escória de alto forno, minérios de ferro, minério de titânio e um produto sintético conhecido como escória de ferro-fósforo (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Conforme visto na seção 3.4 com (GILKEY, 1961), o tamanho dos agregados graúdos modifica as capacidades do concreto. Dessa forma, uma mudança no tamanho máximo de um agregado graúdo de uma dada mineralogia pode ter dois efeitos opostos na resistência do concreto. Com o mesmo teor e consistência de cimento, uma mistura de concreto com os agregados graúdos maiores requer uma menor quantidade de água na mistura do que as misturas que possuem agregados graúdos menores. Os agregados maiores tendem a formar uma zona de transição interfacial mais fraca, gerando uma maior quantidade de microfissuras. O efeito irá variar com a relação água-cimento do concreto e o tipo de esforço aplicado. Isso ocorre porque em uma menor relação água-cimento, a reduzida porosidade na zona de transição interfacial desempenha um importante papel na resistência do concreto. Além disso, uma vez que as características da zona de transição interfacial têm mais efeito sobre a resistência à tração do concreto em comparação com a resistência à compressão, é de se esperar que com uma dada mistura de concreto quaisquer mudanças nas propriedades de agregados graúdos influenciariam a relação de resistência à tração. Por exemplo, uma diminuição no tamanho dos agregados graúdos, com uma mesma relação água-cimento, irá aumentar a relação de resistência à tração e à compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

A forma como que os agregados estão compactados antes de formar o concreto influencia no comportamento da mistura. Agregados graúdos mais compactados exigem que haja uma menor quantidade de cimento e água para que o vazio entre eles seja preenchido. Dessa forma, a utilização de agregados graúdos mais compactados faz com que uma maior resistência final seja alcançada com a mistura (KWAN e MOURA, 2001).

3.4.3. Porosidade

A resistência final alcançada por um elemento de concreto é muito importante para garantir o que foi definido em projeto. Dessa forma, o estudo da porosidade é imprescindível, pois a resistência do concreto é influenciada pelo volume de todos os vazios existentes, como ar aprisionado, poros capilares, poros de gel e ar arrastado (WARD, *et al.* 1969).

Também é importante mencionar que uma grande quantidade de poros conectados entre si e com o ambiente podem ser prejudiciais à pasta, pois permitem que substâncias externas penetrem na argamassa (GALLUCCI, *et al.* 2007). Essas substâncias podem ser tanto no estado líquido, como ácidos e água marinha, como no estado gasoso, como o gás carbônico, e podem provocar a degradação do material.

Com a possibilidade de existir diferentes tipos de vazios no concreto, a determinação da relação entre porosidade e resistência no concreto é mais complexa que na pasta de cimento. A presença de micro fissuras na zona de transição entre o agregado graúdo e a matriz aumenta a dificuldade em prever a resistência através das relações precisas de resistência-porosidade (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Dessa forma, é possível concluir que o tipo e a granulometria dos agregados utilizados irão afetar a porosidade do concreto.

Dessa forma, o efeito da porosidade na pasta de cimento hidratada tem sido amplamente estudado, porém é necessário cuidado ao traduzir as observações em amostras feitas em laboratórios com pasta de cimento puro em informações úteis sobre o concreto, mas uma compreensão do efeito da porosidade na resistência da pasta de cimento hidratada também é valiosa (NEVILLE, 2011). A figura 5 apresenta a relação entre a capacidade mecânica e a porosidade, em que foram considerados apenas poros com o diâmetro acima de 20 nm. O estudo também indica a possibilidade de um corpo de prova com porosidade acima de 9,5% alcançar uma resistência próxima de 50 MPa. A relação entre porosidade e resistência à compressão apresentada por (NEVILLE, 2011) possui uma relação linear.

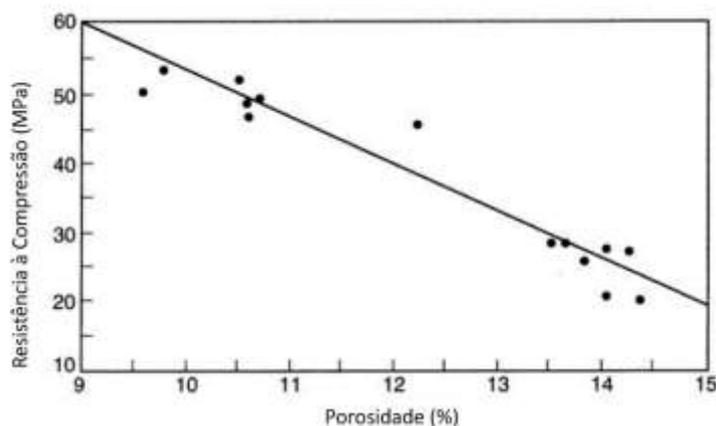


Figura 5 - Relação entre a resistência à compressão e a porosidade calculada para poros com o diâmetro acima de 20 nm. Adaptado de (NEVILLE, 2011).

3.4.4. Processo de carbonatação

Um fenômeno importante que afeta o concreto é a carbonatação. Segundo (NEVILLE, 2011), a carbonatação ocorre quando há um aumento da umidade que envolve o concreto, pois o CO₂ presente nos poros do concreto reage com a água e forma o ácido carbônico. Dessa forma, o pH do concreto fica mais ácido e a portlandita (Ca(OH)₂) reage com o ácido carbônico (H₂CO₃) e tem como produto da reação a calcita (CaCO₃), a reação é detalhada na equação 7. Quando o Ca(OH)₂ de uma região se esgota, é possível que haja a carbonatação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), resultando na formação do CaCO₃, e no gel de sílica, que possui uma grande quantidade de poros com o diâmetro acima de 100 nm, facilitando a disseminação da carbonatação. A carbonatação faz com que o pH do concreto, que varia entre 12,6 a 13,5, chegue ao valor de 9 e, quando há uma carbonatação completa na região, pode chegar a 8,3. Essa alteração no pH é prejudicial para as barras de aço presentes no concreto armado, pois o alto pH mantém a passividade da barra protegendo-a da ocorrência de incrustações e corrosões, essa proteção ocorre durante a cura do concreto armado, pois a pasta adere rapidamente ao aço. Caso haja surgimento de fissuras no concreto, pode ocorrer a penetração do CO₂ e provocar uma carbonatação local, que pode se espalhar caso haja uma alta conectividade entre os poros.



A carbonatação ocorre da região externa para a interna, que é alcançada através das interligações dos poros. Quando os poros estão preenchidos por água, a difusão do CO₂ ocorre em uma magnitude quatro vezes menor, caso os poros não estejam preenchidos

por nenhuma água. As maiores taxas de carbonatação ocorrem entre as umidades de 50 a 70% e variam de acordo com a relação a/c utilizada. Para uma relação a/c de 0,60, a profundidade da carbonatação pode atingir os 15 mm após os 15 anos, mas para uma relação a/c de 0,45, a mesma profundidade de carbonatação de 15 mm pode ocorrer somente após os 100 anos. Quando o concreto está inserido em um ambiente com a umidade entre 25 e 100%, o processo de carbonatação ocorre de forma mais intensa que fora desse intervalo. Quando os poros estão preenchidos com água, a difusão do CO_2 é mais lenta e também pode ocorrer a difusão de íons de cálcio presentes na pasta, causando a formação de CaCO_3 nos poros superficiais e levando ao entupimento deles. Em ambientes com umidade abaixo de 25%, não ocorre a formação do ácido carbônico devido à baixa disponibilidade de água (NEVILLE, 2011).

A utilização de diferentes tipos de agregados também afeta a forma com que a carbonatação ocorre no concreto. As cinzas volantes, que são utilizadas em traços de concretos leves, reagem com a Ca(OH)_2 resultante da hidratação do cimento Portland, o que ocasiona uma menor concentração do hidróxido de cálcio, o que exige uma menor quantidade de CO_2 para remover todo o Ca(OH)_2 e produzir o CaCO_3 . (BIER, 1987) demonstrou que a penetração da carbonatação é menor quando se tem uma menor concentração de Ca(OH)_2 disponível; dessa forma, a presença de cinzas volantes resulta em um processo de carbonatação mais rápido. Porém outro efeito deve ser considerado nesse tipo de concreto e que ocorre quando a sílica pozzolânica e o Ca(OH)_2 reagem e formam uma estrutura mais densa na pasta de cimento, resultando na diminuição da difusão do CO_2 e em uma diminuição da carbonatação. O efeito dominante depende da qualidade em que a cura do concreto é realizada, pois é quando as reações pozzolânicas ocorrem.

O uso das escórias de alto forno na mistura do concreto exige uma melhor condição da cura e caso não seja bem executada, há a ocorrência de uma grande quantidade de carbonatação, que pode chegar a uma profundidade de 10 a 20 mm após um ano. Com isso, uma grande quantidade de escórias provoca uma maior profundidade de carbonatação. O uso de outros tipos de cimento, como o cimento resistente a sulfatos e o concreto contendo cimento regulado são menos resistentes ao processo de carbonatação. A carbonatação ocorre também em concreto de cimento de alta alumina, mas como a hidratação desse cimento não produz Ca(OH)_2 , são os hidratos de aluminato de cálcio CaAlH_{10} e Ca_3AlH_6 que reagem com o CO_2 . Os produtos finais são o CaCO_3 e o gel de

alumina, que têm uma resistência menor que os hidratos. Ao se comparar o concreto com cimento Portland e o concreto com um cimento de alto teor de alumina com a mesma resistência, o segundo apresenta o dobro da carbonatação. A carbonatação no concreto de alta alumina faz com que o aço deixe de trabalhar de forma passiva, provocando vários problemas nos elementos estruturais (NEVILLE, 2011).

Quando o concreto está exposto a um esforço de compressão, ocorre uma concentração de carbonatação pela dissolução de cristais de Ca(OH)_2 e depósito de CaCO_3 em espaços livres de tensão, o que faz com que o elemento possa ser mais comprimido. Se ocorrer a desidratação do C-S-H, produzirá um maior encolhimento devido a carbonatação (NEVILLE, 2011).

A carbonatação pode ser identificada no concreto através da aplicação de diferentes técnicas como as análises químicas a aplicação de indicadores de pH como a fenolftaleína diluída em álcool, a utilização da difração de raios X e da espectroscopia de infravermelho e análise termogravimétrica. É necessário destacar que a cor rosa adquirida pela fenolftaleína indica a presença da Ca(OH)_2 , mas não uma total ausência da carbonatação. O uso da fenolftaleína afere a presença de um pH acima de 9,5, mas não consegue distinguir um pH baixo causado pela carbonatação ou pela presença de outros gases. O teste com a fenolftaleína não pode ser aplicado aos concretos que utilizam cimento com alta alumina, pois ele não possui cal livre (NEVILLE, 2011).

A principal forma de controlar a carbonatação é através do controle da difusão do CO_2 na pasta. Essa difusão é consequência da conectividade dos poros, e é proveniente do cimento utilizado, da relação a/c e da hidratação realizada durante a cura do concreto. Apesar de ser um processo que pode alcançar as barras de aço presentes no concreto armado, a carbonatação também pode provocar alguns benefícios. Como a molécula de CaCO_3 ocupa um volume maior que a molécula de Ca(OH)_2 , a porosidade do concreto é reduzida, além de que a água liberada pela reação, que está demonstrada na equação 8, auxilia na hidratação de moléculas que não tiveram contato com a água durante a mistura. Essas mudanças provocam o aumento da dureza da parte externa da peça, aumento da resistência aos esforços mecânicos na superfície e reduz a permeabilidade (NEVILLE, 2011).

3.5. Massa Específica

A massa específica é uma grandeza escalar que expressa a relação entre massa e volume e foi pela primeira vez determinada pelo grego Arquimedes no século III a.C. A história conta que o rei Hierão encomendou uma coroa de ouro maciço, mas desconfiou que foi enganado pelo ourives. Para descobrir se a coroa era realmente de ouro maciço, o rei chamou Arquimedes para encontrar uma solução. Durante um banho, Arquimedes percebeu que o aumento no volume de água era igual ao volume do corpo que estava submerso. Dessa forma, era possível determinar a densidade do material. Arquimedes descobriu que a coroa não era de ouro maciço, pois apresentou uma densidade menor que a do ouro, sendo provável que houvesse prata, pois, a coroa deslocou menos água que a mesma massa de ouro e mais água que a mesma massa de prata. Para a determinação da massa específica (ρ), basta dividir a massa do corpo (m) pelo volume (V) que ele ocupa, conforme a equação 8.

$$\rho = \frac{m}{V} \text{Equação 8}$$

A massa específica de cada elemento é única. Dessa forma, existe a possibilidade de usar elementos com a densidade conhecida para determinar a densidade de uma substância composta, conforme feito por Arquimedes. A água é conhecida por possuir a densidade de $0,997 \text{ g/cm}^3$, assim como a prata que possui a densidade de $10,5 \text{ g/cm}^3$ e o ouro de $19,3 \text{ g/cm}^3$.

A massa específica também tem relação com o estado da matéria, sendo o estado sólido o mais denso, devido às ligações mais fortes entre as moléculas, e o gasoso o estado com menor densidade, pois apresenta ligações mais fracas entre as moléculas. Como o volume de uma matéria no estado gasoso é variável, a massa específica apresentada dependerá da pressão que estará sendo exercida sobre ela. Um exemplo é que a massa específica do ar a uma pressão de 1 atm é de $1,21 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, mas quando está submetida a uma pressão de 50 atm, a massa específica é de $60,5 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, mantendo a temperatura constante a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (HALLIDAY, *et al.* 2016).

Quando um corpo está totalmente ou parcialmente submerso existem algumas forças que atuam sobre ele. Assim como todo corpo, existe a força peso, que estará atuando sobre ele e possuirá o sentido para baixo, mas também existirá a força de empuxo, que é uma consequência da pressão que a água exerce em todas as superfícies do corpo e terá o

sentido contrário da força peso, sendo que a água em uma maior profundidade exercerá uma pressão maior que a água em uma menor profundidade. O módulo da força de empuxo (F_E) é definido como o peso do fluido deslocado pelo corpo e pode ser conferido na equação 9, onde m_F é a massa do fluido deslocado e g é a gravidade. Esse é o princípio de Arquimedes (HALLIDAY, *et al.* 2016).

$$F_E = m_F \times g \text{ Equação 9}$$

Através dos conceitos até aqui vistos, é possível determinar a massa específica de um corpo, desde que seja conhecido a massa específica do fluido, a massa do corpo no ar e a massa do corpo submerso. A determinação da massa específica de um fluido (ρ_F) pode ser determinada através de uma substância pura com massa e volume conhecidos, conforme a equação 10, onde M_{CF} é a massa do corpo no fluido e V é o volume do corpo.

$$\rho_F = \frac{M_{CF}}{V} \text{ Equação 10}$$

Após a determinação da massa específica do fluido, é possível determinar a massa específica do corpo (ρ_C) estudado através do peso apresentado no ar e do peso apresentado quando submerso no fluido com densidade conhecida. A equação 11 apresenta essa relação, sendo M_{ar} a massa do corpo no ar e M_{FL} a massa do corpo no fluido.

$$\rho_C = \frac{M_{ar}}{M_{FL}} \times \rho_F \text{ Equação 11}$$

3.6. *MicroCT*

A descoberta do raio X por Wilhelm Conrad Röntgen em 1895 proporcionou a possibilidade de novos tipos de pesquisas e em diferentes áreas. O trabalho desenvolvido com tubos catódicos pode ser conferido em (RÖNTGEN, 1896). A principal aplicação passou a ser através da técnica de radiografia, que permite a inspeção tanto de tecidos ósseos e alguns órgãos, como na indústria.

A radiografia mostrou ser uma poderosa ferramenta para realizar estudos em apenas dois planos, mas com o passar do tempo, houve a necessidade de estudar a distribuição espacial. (CORMACK, 1963; 1964) aplicou um algoritmo que permitiu a reconstrução de imagens de tomografia. (HOUNSFIELD, 1973) desenvolveu um aparato experimental que permitiu a tomografia por raios X de um cérebro humano, enquanto isso,

(AMBROSE, 1973) determinou as aplicações clínicas que o sistema desenvolvido poderia alcançar.

O estudo matemático que permitiu a conversão das imagens de uma radiografia em imagens espaciais de forma rápida e com melhor resolução foi desenvolvido por (FELDKAMP, et al. 1984) através da aplicação da transformada inversa de Randon (RADON, 1917).

O fenômeno que permite a geração de raios X é conhecido como radiação de freamento. Um tubo de raios X deve possuir um cátodo e um ânodo e a diferença de potencial (U_a) entre eles irá determinar a energia com que os elétrons serão direcionados ao ânodo. Ao chegarem próximo da superfície do ânodo, os elétrons terão a trajetória interrompida abruptamente, o excesso de energia irá gerar os raios X. A presença de um campo elétrico no tubo de raios X é essencial para que os elétrons se mantenham na trajetória (BUZUG, 2008). A figura 6 apresenta uma representação de um tubo de raios X.

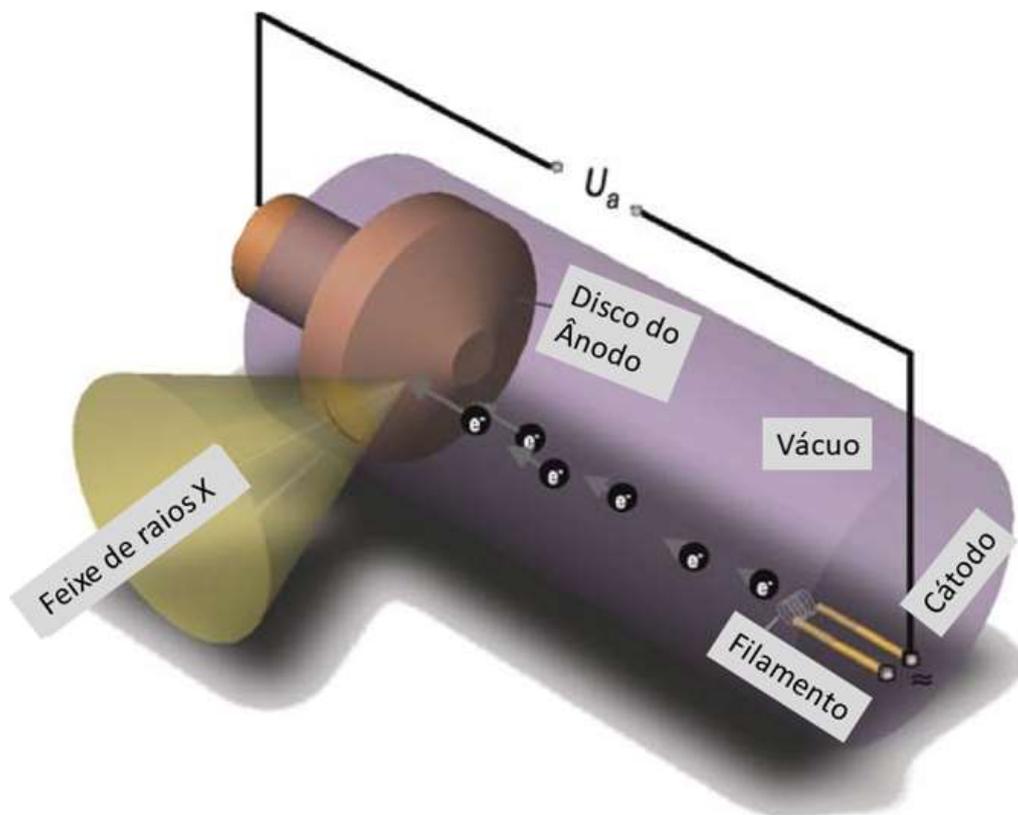


Figura 6 - Esquema de equipamento gerador de raios X. Adaptado de: (BUZUG, 2008).

O feixe de raios X gerado é direcionado para a amostra a partir de uma abertura no tubo. A radiação irá interagir com a amostra, sendo possível a observação dos efeitos fotoelétrico e o espalhamento Compton. Ao atravessarem a amostra, o detector registrará a intensidade da energia dos fótons (BUZUG, 2008). A passagem dos fótons pela amostra segue a Lei de Beer-Lambert, conforme explicado na seção 3.2.1.

Os tomógrafos evoluíram ao longo do tempo e sua aplicação se consagrou no meio científico como uma técnica não destrutiva, pois permite a caracterização do objeto sem que ele seja destruído. A microCT, que é quando o ponto focal se encontra na ordem de micrômetros, permitiu a realização de vários estudos como o de órgãos e ossos de animais (RITMAN, 2011; e DOS SANTOS, *et al.* 2021), de dentes humanos (BASTOS, *et al.* 2021), de rochas (MACHADO, 2015), de concreto (BASTOS, *et al.* 2020), além de outros materiais (RIQUE, *et al.* 2015; NASCIMENTO DIAS, *et al.* 2019; OLIVEIRA, *et al.* 2019).

Os raios X são gerados dentro do tubo enquanto o objeto rotaciona em seu próprio eixo a um passo definido pelo operador e a intensidade da energia dos fótons é registrada pelo detector. O objeto rotaciona de acordo com o definido pelo operador, sendo o mais comum rotacionar 180° ou 360° em torno do seu próprio eixo. A cada radiografia, o detector registra a energia dos fótons e a converte em dados que permitem a reconstrução de uma imagem tridimensional, a partir da aplicação do algoritmo de Feldkamp.

A aplicação do algoritmo de Feldkamp é amplamente utilizada na reconstrução de imagens de microtomografia devido à simplicidade e à vantagem de lidar com o truncamento de dados na longitudinal, tornando-se comum em pesquisas do meio acadêmico e em diagnósticos médicos (LI, *et al.* 2008).

A imagem digital pode ser definida como uma função $f(x,y)$, em que x e y são as coordenadas espaciais, e a amplitude de f em qualquer par de coordenadas (x,y) é o nível de cinza da imagem nesse ponto (MACHADO, 2015). Dessa forma, as coordenadas (x,y) formam uma matriz, onde o menor elemento é definido como pixel e o conjunto de pixels formará uma imagem, em que cada elemento apresentará um valor numérico em um tom de cinza que é proporcional à densidade do material, (GONZALEZ E WOODS, 2013) citado por (MACHADO, 2015).

A qualidade da imagem depende de parâmetros fundamentais durante a aquisição, como a resolução espacial e a resolução de contraste. Esses parâmetros dependem de algumas variáveis, como o tamanho focal, a magnificação da imagem, a matriz de pixels do detector, o passo angular, a rotação em torno do próprio eixo, o número de projeções, a potência do tubo de raios X e a utilização de filtros físicos.

Em uma situação ideal, os raios X deveriam ser provenientes de uma fonte pontual, pois a existência de uma divergência entre os fótons faz com que ocorra um aumento na área de penumbra, que é uma área onde há a perda de resolução da imagem e afeta as bordas. A conversão dos elétrons para um único ponto é realizada através da utilização de lentes eletromagnéticas. Entretanto, devido a área necessária para deposição do calor, para se obter feixes de alta energia é necessária uma maior angulação, o que impede que o tamanho focal seja pontual (BUZUG, 2008).

A magnificação apresentada pelo objeto é determinada pela posição do objeto em relação ao tubo de raios X e ao detector. Em um tubo de raios X convencional, a magnificação aumenta a região de penumbra, enquanto que para pequenos tamanhos focais ela auxilia a obtenção de uma melhor resolução espacial e redução do pixel efetivo (BUSHBERG et al. 2012).

Os detectores *Flat Panel* são compostos por sensores chamados de pixels, que registram a intensidade da energia de chegada dos fótons de forma individual. Dessa forma, quanto menor for o tamanho de *pixels* de um detector *Flat Panel*, melhor será a resolução espacial (BUZUG, 2008).

O número de projeções está ligado à quantidade de imagens que será adquirida e está relacionada ao passo angular escolhido para realizar a aquisição. Dessa forma, quanto menor for o passo angular, maior será a quantidade de imagens adquiridas. Também é possível definir a quantidade de radiografias a serem realizadas em cada passo. Ao final da tomografia, as projeções em cada passo angular são interpoladas, permitindo uma maior riqueza na qualidade de detalhes. Por possuir uma natureza polienergética, é necessária a utilização de filtros para evitar o surgimento de ruídos.

Um problema que ocorre na tomografia é que os fótons que atravessam as bordas dos objetos apresentam uma intensidade de energia maior que os que atravessam o centro de um objeto que possui geometria cilíndrica. Esse fenômeno é conhecido como *beam hardening* e pode ser suavizado durante a reconstrução da imagem. O processamento da

imagem digital permite a correção de possíveis ruídos e artefatos, sendo aplicadas as correções de *smoothing*, *misalignment compensation*, *beam hardening* e *ring artifacts*.

O *smoothing* é a suavização de cada pixel de acordo com os pixels vizinhos MxN, onde M representa a direção horizontal e N a direção vertical. Apesar de permitir a redução de ruídos, a aplicação do *smoothing* pode desfocar imagens de objetos com pequena espessura.

O *misalignment compensation* é a correção de qualquer desalinhamento que possa surgir durante as radiografias. Esse desalinhamento pode provocar embaçamento e o surgimento de sombras.

O *beam hardening* é a correção da intensidade energética com que os fótons sejam no detector, visto que os fótons que atravessam a borda dos objetos chegam ao detector mais energéticos.

O *ring artifacts* é a correção do surgimento de uma característica inexistente do material devido a rotação no próprio eixo.

3.7. Irradiação

Conforme visto na seção 2.1.1, a interação entre a radiação gama e a matéria produzem os fenômenos denominados de efeito fotoelétrico, de espalhamento Compton e de produção de pares. Durante essa interação, o fóton pode depositar parcialmente ou integralmente a sua energia no meio. Essa interação provoca alteração no meio, seja com a ejeção de um elétron ou com o rompimento de uma ligação química.

O conceito de exposição à radiação é definido em termos do efeito de um dado fluxo de raios gama em um volume de teste de ar e é em função da intensidade da fonte, da geometria entre a fonte e o volume de teste, e de qualquer atenuação dos raios gama que possa ocorrer entre os dois. A exposição é linear, de forma que se a intensidade da fonte for dobrada, a taxa de exposição em todos os lugares ao redor da fonte também dobrará. No sistema internacional de unidades a exposição é conhecida historicamente como roentgen (R) que é a geração de uma carga eletrostática ($2,08 \times 10^9$ pares de íons) por 0,001293 g de ar. Dessa forma, 1 roentgen é igual a $2,58 \times 10^{-4}$ coulombs por quilograma (C/kg) (KNOLL, 2000).

Caso dois materiais diferentes sejam expostos a uma mesma fonte de radiação gama, a quantidade de energia absorvida por cada um deles será diferente. A energia absorvida de qualquer tipo de radiação por unidade de massa do absorvedor é definida como dose absorvida e a unidade que a corresponde é conhecida como gray (Gy) e é igual a 1 joule por quilograma (J/kg). Dessa forma, a dose absorvida é uma medida razoável dos efeitos físicos e químicos provocados em um material absorvedor após uma dada exposição à radiação (KNOLL, 2000).

3.8. *Difração de raios X*

As substâncias possuem ligações químicas entre os átomos que formam uma estrutura de cristais, que possuem a geometria de sólidos conhecidos. Os vértices das estruturas são conhecidos como pontos de lattice. As faces dos cristais formam sólidos que com as arestas de tamanho a , b e c e ângulos α , β e γ , conforme a tabela 4. A variação do comprimento das arestas e as angulações é que definem o formato da estrutura cristalina. Os compostos podem assumir até sete geometrias, porém os pontos de lattice podem assumir até quatorze configurações diferentes, que são conhecidas como *Bravais* lattice, a figura 7 apresenta as estruturas cristalinas com a variação dos pontos de lattice (CULITY, 1978). Caso a molécula não possua nenhuma das configurações descritas na tabela 4 e demonstradas na figura 7, ela é considerada uma molécula com estrutura amorfa.

Tabela 4 - Sistemas de Cristais e Pontos *Bravais* lattice. (Adaptado de (CULITY, 1978)).

Sistema	Comprimento das Arestas e Angulações	<i>Bravais</i> lattice
Cúbico	$a = b = c$	Simples;
	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Centrado no meio do sólido;
		Centrado na face;
Tetragonal	$a = b \neq c$	Simples;
	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Centrado no meio do sólido;
Ortorrômico	$a = b \neq c$	Simples;
	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Centrado no meio do sólido;
		Centrado na face;
		Centrado na base;
Romboédrico	$a = b = c$	Simples;
	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Hexagonal	$a = b \neq c$	Simples;
	$\alpha = \beta = 90^\circ$ e $\gamma = 120^\circ$	
Monoclínico	$a \neq b \neq c$	Simples;
	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	Centrado na base;
Triclínico	$a \neq b \neq c$	Simples;
	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

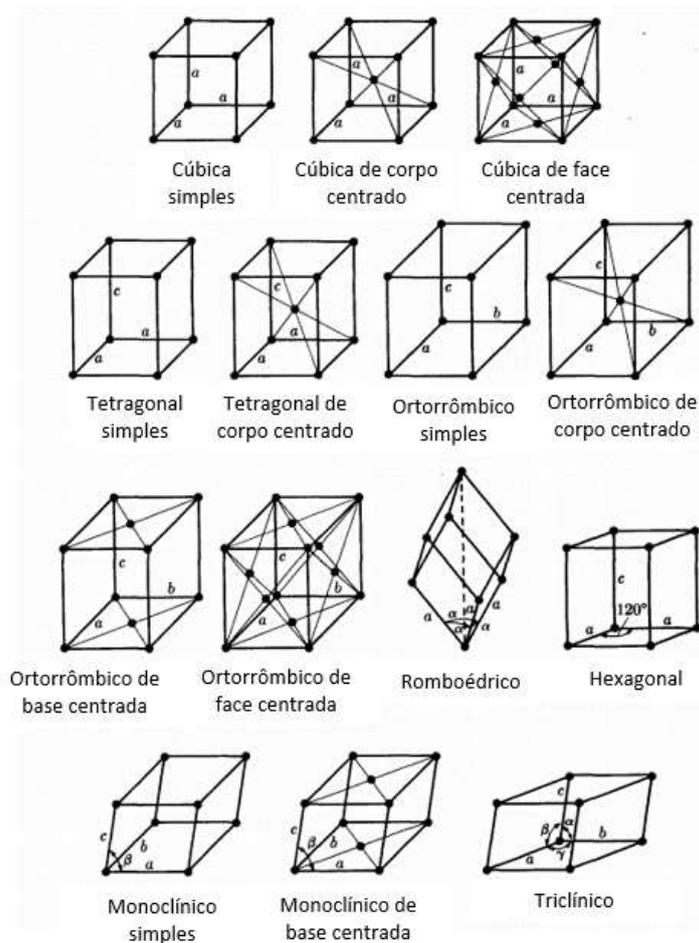


Figura 7 - Os pontos de Bravais Lattice. Figura adaptada de (CULITY, 1978).

A estrutura cristalina da molécula faz com que a radiação incidente possua o mesmo comprimento de onda do espaçamento, de forma que permita a ocorrência de interferências construtivas e destrutivas. A difração é caracterizada pelo espalhamento de raios X com uma interferência construtiva. O espalhamento coerente, quando a energia do fóton não sofre alteração, ocorre quando o fóton incide com uma angulação denominada ângulo de Bragg. Quando a lei de Bragg, representada na equação 12 em que λ é o comprimento de ondas dos raios X, d é a distância interplanar entre os átomos, θ é o ângulo de Bragg e os índices h, k e l são os índices de Miller, que caracterizam os planos e direções dentro da rede cristalina, é satisfeita, ocorre a interferência construtiva. A figura 8 apresenta uma geometria da difração segundo a Lei de Bragg (CULITY, 1978). Dessa forma, o sistema de cristais apresentado pela ligação dos átomos pode ser identificado.

$$\lambda = 2 \times d_{hkl} \times \sin \theta_{hkl} \text{ Equação 13}$$

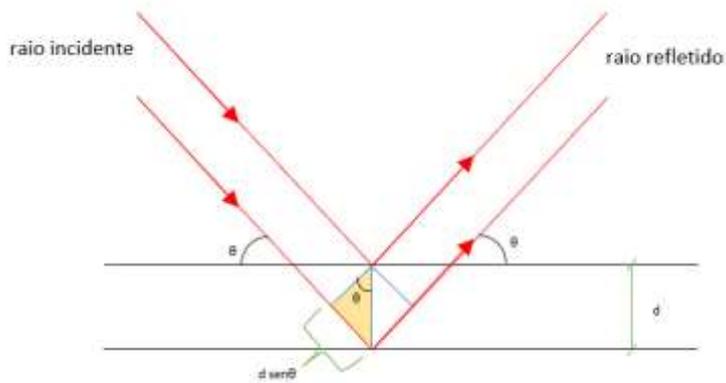


Figura 8 - Representação da geometria da difração segundo a Lei de Bragg.

3.9. A Plataforma WinXCOM

O entendimento de como substâncias compostas e misturas interagem com a radiação é vital para a realização de estudos que buscam a validação de dados experimentais e entender o efeito que a radiação provocará em um determinado material ou tecido. Essa tarefa pode ser realizada através da utilização de tabelas que possuem os valores de probabilidade de ocorrência para o efeito fotoelétrico, para o espalhamento Compton e para a produção de pares para cada elemento atômico. Para agilizar o processo e diminuir erros matemáticos durante a interpolação de diversos valores, Berger e Hubbell elaboraram um código em Fortran que busca auxiliar os cálculos e determinar os valores dos efeitos decorrentes da interação entre a radiação e a matéria que ficou conhecido como “XCOM Photon Cross Sections Database”.

O XCOM é um programa que calcula a seção de choque, os coeficientes de atenuação e as seções de choque parciais através da interpolação dos valores para o espalhamento incoerente, espalhamento coerente, efeito fotoelétrico e produção de pares no nível atômico e da eletrosfera. Quando o cálculo é relativo aos compostos, é realizada uma multiplicação entre as seções transversais correspondentes e o número de moléculas alvo por unidade de massa do material, sendo que a soma para os processos de interação individuais é igual ao valor do coeficiente de atenuação total. Os coeficientes de interação e coeficientes de atenuação totais para compostos ou misturas são obtidos através da soma das quantidades correspondentes para cada átomo. Os fatores de ponderação são calculados pelo XCOM a partir da composição química inserida pelo usuário. Para misturas, o usuário deve fornecer as frações em peso dos vários componentes. A tabela

de dados do XCOM conta com os elementos de número atômico entre 1 e 100 e para compostos e misturas a unidade de saída do material é a cm^2/g e a faixa energética varia entre 1 keV e 100 GeV (BERGER e HUBBELL, 1987).

Apesar das vantagens apresentadas, o XCOM apresenta algumas limitações, pois o banco de dados leva em consideração apenas átomos isolados e não os efeitos moleculares e o estado da matéria, o que modifica a seção de choque. Os efeitos de espalhamento de Delbruck, espalhamento Compton de dois fótons e produção de fóton-meson não são considerados pelo programa, assim como o efeito fotoelétrico nuclear na região de ressonância de dipolo entre 5 e 30 MeV (BERGER e HUBBELL, 1987).

(GERWARD, *et al.* 2001) reescreveram o código do XCOM, que estava em Fortran, para a linguagem Borland Delphi, em que modificaram a interface e pode ser utilizada diretamente no Windows, e os resultados de saída passaram a ser em arquivos ASCII, que facilitam a impressão, e podem ser exportados para o Excel. Assim a plataforma foi atualizada e ficou conhecida como “WinXCOM – A Program for Calculating X-Ray and Gamma-Ray Spectra and Photon Interaction Data”.

Dessa forma, o Instituto Nacional de Normas e Tecnologia dos Estados Unidos, NIST, passou a disponibilizar acesso à plataforma WinXCOM através do site <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>.

3.10. Propriedades Mecânicas

O concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio de ligação composto pelo cimento e que possui partículas ou fragmentos, conhecidos como agregados, incorporados em sua estrutura (ASTM C125-18, 2018). Por ser utilizado na construção civil o entendimento de suas propriedades mecânicas é importante para a realização de projetos com diferentes características estruturais. De acordo com (NEVILLE, 2011), corpos de prova de argamassa podem ser utilizados para estudar o efeito sobre a matriz de cimento sem que haja prejuízo do resultado.

Apesar da utilização de diferentes softwares para a determinação da resistência mecânica de uma mistura, algumas situações exigem um acompanhamento de como a capacidade mecânica de uma mistura evoluirá ao longo do tempo. A capacidade mecânica do concreto não é constante e aumenta com o passar do tempo, sendo que após o terceiro dia

a mistura pode atingir entre 40 a 55% da resistência mecânica atingida após o vigésimo e oitavo dia, que é a idade em que a curva de resistência do concreto começa a ficar constante (NEVILLE, 2011). A figura 9 apresenta um gráfico com a evolução da capacidade mecânica em decorrência do tempo para três diferentes relações de a/c.

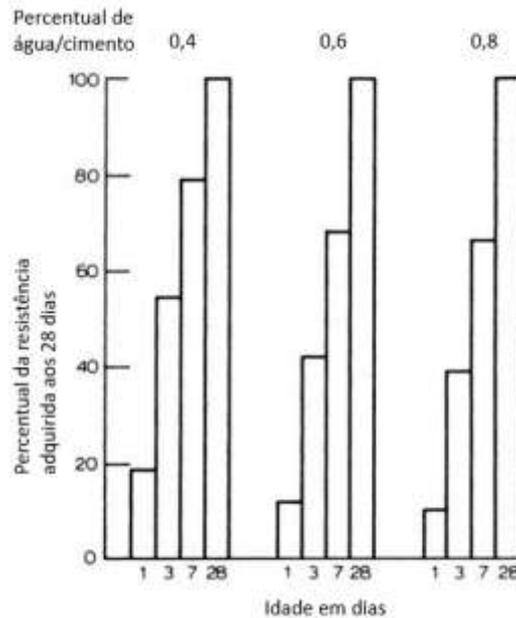


Figura 9 - Evolução da capacidade mecânica com o tempo para três diferentes relações a/c. Figura adaptada de (NEVILLE, 2011).

O gráfico da figura 9 mostra como a relação entre água e cimento (a/c) afeta a evolução da capacidade mecânica do concreto. Ressalta-se que, assim como descrito nas seções 3.4.2 e 3.4.3, a utilização de uma maior quantidade de água e de diferentes tipos de agregados afetam a capacidade mecânica da mistura. A equação 13 apresenta a relação de Abrams em que relaciona a relação água-cimento (a/c) com a resistência, em que k_1 e k_2 são constantes empíricas e a/c é a relação água-cimento.

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \text{ Equação 13}$$

(MEHTA e MONTEIRO, 2006) diz que a relação a/c, o ar que é incorporado na mistura, o tipo de cimento, o tipo e a granulometria dos agregados, a água utilizada na mistura e a utilização de aditivos afetam a resistência da mistura do concreto. Dessa forma, é

necessário que seja realizado um controle de qualidade para verificar se o concreto atingiu a resistência mecânica definida em projeto.

Um material pode estar submetido a diferentes tipos de tensões, como a tensão a tração e a tensão a compressão. Essas tensões ocorrem quando existe uma força sendo aplicada em uma superfície e, caso ela seja uniformemente distribuída, pode-se aplicar a equação 14 para determinar o valor da tensão, em que P é a força e A é a área da superfície, a unidade usual em mecânica dos materiais é o Megapascal (MPa). A equação 14 ainda pode ser útil mesmo se a tensão não for uniformemente distribuída, pois ela permite definir a tensão média na seção em que a força está sendo submetida (GERE e GOODNO, 2010).

$$\sigma = \frac{P}{A} \text{ Equação 14}$$

Um material que esteja sujeito a uma tensão sofrerá uma deformação. Essa deformação não é constante e varia à medida que a tensão aumenta. Os materiais que sofrem deformações permanentes antes da fratura são denominados dúcteis, enquanto aqueles que retornam parcialmente à sua forma original são denominados parcialmente elásticos e aqueles que retornam completamente ao formato original são os elásticos. Essa é uma propriedade importante que permite entender o comportamento de um material quando estiver submetido a uma tensão, seja de compressão como de tração. A tensão máxima em que o material pode ser submetido para que consiga retornar à forma original é conhecida como limite elástico do material. A característica do material em sofrer deformações inelásticas além da deformação no limite elástico é conhecida como plasticidade (GERE e GOODNO, 2010).

O módulo de elasticidade é a grandeza proporcional à rigidez do material quando está submetido a uma tensão externa de tração ou compressão na região elástica linear do material. Ele auxilia na definição da deformação que o material sofrerá quando submetido a uma tensão. A equação 15 apresenta a Lei de Hooke que define a tensão necessária para deformar um material, em que ϵ é a deformação e E é o módulo de elasticidade (GERE e GOODNO, 2010).

$$\sigma = E \times \epsilon \text{ Equação 15}$$

O material se comporta de forma diferente ao ser comprimido e tracionado. Ao ser comprimido, há uma deformação negativa ao longo do seu eixo axial, que provoca um

encurtamento da sua altura, mas também há uma deformação que promove o aumento da lateral. Esse aumento na lateral durante a compressão faz com que haja uma diminuição na tensão para uma mesma força aplicada. Enquanto isso, ao ser tracionado há uma deformação ao longo do eixo axial, que provoca um aumento da sua altura, mas também uma diminuição da região lateral. Essa diminuição na região lateral não ocorre ao longo de toda peça, mas apenas na região em que haverá a fratura e que estará submetida a maiores tensões devido à redução da área. O coeficiente de Poisson é o responsável por relacionar a deformação lateral com a deformação axial. A equação 16 apresenta o coeficiente de Poisson, em que ε é a deformação axial, ε' é a deformação lateral e o sinal negativo é utilizado para compensar a diferença dos sinais entre as deformações, pois as deformações axiais e laterais possuem sinais contrários (GERE e GOODNO, 2010).

$$\nu = - \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \text{ Equação 16}$$

A figura 10 apresenta um diagrama tensão-deformação do concreto, em que o f_{ck} é a resistência característica do concreto, o f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão do concreto, o ε_{c2} é a deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico, o ε_{cu} é a deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura.

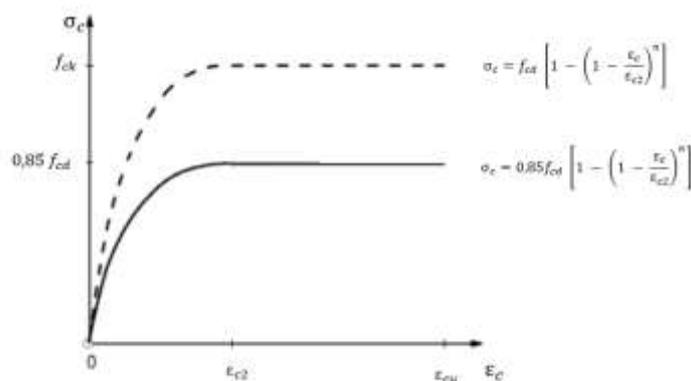


Figura 10 - Diagrama tensão-deformação idealizado para o concreto quando comprimido. Figura adaptada de (NBR6118, 2014).

A NBR 7215 (NBR7215, 2019) é a norma responsável por regular a determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos e descreve os procedimentos que devem ser adotados para realização do preparo dos moldes, dos equipamentos utilizados e da interpretação dos resultados.

Os moldes devem ser untados com um desmoldante antes de iniciar o preparo da mistura. A tabela 5 apresenta a distribuição de areia de acordo com a granulometria que deve ser utilizada, enquanto a tabela 6 apresenta os materiais utilizados para a realização da mistura. A água deve ser o primeiro material acrescentado na cuba seguido pelo cimento. A cuba deve estar rotacionando em velocidade baixa por 30 segundos após o cimento entrar em contato com a água. Após esse tempo, deve-se acrescentar quatro frações de 468 g de areia misturada durante o intervalo de 30 segundos e modificar a rotação para a velocidade alta por mais 30 segundos. Após esse tempo, deve-se desligar o misturador durante 90 segundos. Nos primeiros 30 segundos deve-se retirar com auxílio de uma espátula a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba e colocá-la no interior da cuba. A argamassa deve ficar em repouso durante 60 segundos para depois o misturador ser ligado por mais 60 segundos na velocidade alta (NBR7215, 2019).

Tabela 5 - Distribuição granulométrica da areia a ser utilizada no ensaio. Adaptado de (NBR7215/2019).

Denominação da fração	Abertura nominal de malha das peneiras (mm)	Porcentagem retida em massa de material nas peneiras (%)
Grossa	2,4 e 1,2	25 ± 5
Média grossa	1,2 e 0,6	50 ± 5
Média fina	0,6 e 0,3	75 ± 5
Fina	0,3 e 1,5	97 ± 3

Tabela 6 - Quantidade de materiais utilizados na determinação do traço. Adaptado de (NBR7215/2019).

Material	Massa para mistura (g)
Cimento Portland	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Areia fração grossa	468 ± 0,3
Areia fração média grossa	468 ± 0,3
Areia fração média fina	468 ± 0,3
Areia fração fina	468 ± 0,3

A moldagem dos corpos de prova deve ser feita imediatamente após a cuba ser desligada. A argamassa deve ser colocada no molde dividida em quatro camadas iguais e cada camada deve ser golpeada trinta vezes de forma uniforme por uma haste. O excesso de argamassa deve ficar acima do topo do molde e eles devem ser levados a uma câmara úmida por 6 horas. Após esse tempo, deve-se nivelar a argamassa com o topo do molde com o auxílio de uma espátula metálica e recolocados na câmara úmida por um tempo que varie de 20 a 24 horas com uma proteção que evite o gotejamento no topo da argamassa. Os corpos de prova devem ser desmoldados e colocados em um tanque de água não corrente e saturada com cal onde devem permanecer até o momento da ruptura (NBR7215, 2019).

O equipamento utilizado para realização do ensaio a compressão deve possuir pratos de compressão e as amostras devem estar centradas em relação ao eixo de carregamento. Até a idade do ensaio, os corpos de prova devem ser mantidos em processo de cura úmida. O carregamento deve ser realizado a uma velocidade de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s e com velocidade constante durante todo o ensaio. O cálculo da resistência média é realizado através da média aritmética de quatro corpos de prova de cada grupo (NBR7215, 2019).

Capítulo IV

4. Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentadas as amostras e a metodologia adotada para o desenvolvimento do estudo.

4.1. Amostras de concreto

Para a realização desse trabalho foram realizadas amostras de concreto confeccionadas em colaboração com o Centro Universitário Geraldo di Biasi, UGB, em Volta Redonda. A proposta foi estudar o comportamento de argamassa com diferentes traços de agregados miúdos após a irradiação.

A presença de agregados graúdos, que é o que diferencia o concreto da argamassa, prejudica a interpretação de alguns resultados, pois acabam surgindo zonas de transição interfacial com a matriz de cimento, aumentando a porosidade da amostra. Dessa forma, a extrapolação de resultados observados em argamassa para o concreto pode ser realizada, visto que os efeitos não se modificam (NEVILLE, 2011).

As amostras foram preparadas com a utilização de um cimento CPIII 40, areia padronizada de acordo com a NBR 7215/2019, areia convencional, que pode ser encontrada em qualquer loja de material de construção e que não possui nenhum controle de qualidade, e areia industrial, que é formada basicamente de uma mistura entre pó de pedra e areia com baixa granulometria. Foi utilizado um fator de água/cimento de 0,48, não apresentando variação nas proporções de cimento e agregado miúdo em cada traço (a proporção de cada material utilizada para a realização da mistura). A proporção utilizada para realizar a mistura de cada traços é encontrada na tabela 7.

Tabela 7 – Traço utilizado para a preparação das amostras de concreto

Amostras	Cimento (g)	Areia padronizada (g)	Areia convencional (g)	Areia artificial (g)	Água (ml)
ART	624	-	-	1.872	300
CON	624	-	1.872	-	300
IPT	624	1.872	-	-	300

Foram confeccionados vinte e seis corpos de prova para cada proporção. Eles foram moldados em cilindros com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, mantendo a relação proposta pela NBR7215. Ainda conforme o estipulado pela NBR7215, foi utilizado o adensamento manual, em que foram dados 30 golpes em cada camada. Os corpos de prova permaneceram durante 28 dias em cura em uma câmara úmida e é esperado que tenham adquirido uma resistência a compressão de pelo menos 40 MPa.

A figura 11 apresenta alguns dos corpos de prova utilizados nesse estudo e a tabela 8 apresenta a altura média dos corpos de prova de cada grupo.



Figura 11 - Amostras de concreto utilizadas na pesquisa.

Tabela 8 - Altura média de cada grupo.

Grupo de amostras	Altura média (mm)	Desvio Padrão	CV (%)
ART	96,83	3,48	3,59
CON	95,64	4,49	4,70
IPT	98,22	0,42	0,43

4.2. *Processo de irradiação das amostras*

As amostras foram divididas em cinco grupos com quatro corpos de prova e um outro grupo com seis corpos de prova para cada traço. Os grupos com quatro corpos tiveram uma dose absorvida de 10, 30, 50 e 100 kGy, sendo que o quinto grupo não foi irradiado. Em seguida, foram realizados o ensaio mecânico e a difração de raios X para esses corpos de prova ao completarem a idade de 76 dias.

O sexto grupo, que possui seis amostras, foi utilizado para a determinação da massa específica, coeficiente de atenuação e porosidade, sendo irradiados gradativamente. Também foi coletado uma porção de cimento CPIII, que foi irradiado na mesma dose que os corpos de prova para que pudesse avaliar a forma como que os grãos de cimento interagem com a radiação antes de estarem hidratados e misturados com agregados.

Para a irradiação das amostras foi utilizado o irradiador *Gammacell* localizado no Laboratório de Instrumentação Nuclear da UFRJ, LIN, com uma fonte de Co^{60} a uma taxa que variou entre 7,73 e 6,82 Gy/min e é apresentado na figura 12.



Figura 12 – Irradiador Gammacell utilizado para irradiar as amostras de concreto.

4.3. Determinação do coeficiente de atenuação

Para a determinação do coeficiente de atenuação é necessária a utilização de uma fonte com um pico energético conhecido. As fontes escolhidas para o trabalho foram de Cs^{137} e Am^{241} . O pico energético para a fonte de cézio é de 661,66 keV e para o amerício de 59,54 keV.

A utilização de colimadores de chumbo na saída da fonte e na entrada do detector e o alinhamento entre a saída da fonte e a entrada do detector após a colocação dos colimadores evitaram que fótons com graus elevados de espalhamento possam ser contabilizados após interagirem com o concreto. A ocorrência desse fenômeno é conhecida como *Build up*.

A fonte foi posicionada a quinze centímetros do detector de forma a estarem alinhados. O detector foi conectado a uma caixa de alimentação, a um contador e a um amplificador, permitindo a realização da contagem pelo software ADMCA. O aparato experimental está na figura 13.



Figura 13 - Aparato experimental montado para a determinação do coeficiente de atenuação para uma energia de 661,66 keV.

Após a determinação do I_0 , que é a atividade da fonte sem a presença de um meio para atenuar os fótons, foi possível a identificação do pico da energia característica do espectro da fonte utilizada. Após a validação do espectro para o I_0 , a amostra foi posicionada entre a fonte e o detector para que o I pudesse ser determinado. O I_0 e o I estão de acordo com a equação 3 apresentada na seção 3.2.1. O espectro determinado para o I deve possuir um pico com uma menor quantidade de contagem que o encontrado para o I_0 .

O I_0 é utilizado na determinação da região de interesse (ROI). Após a determinação do ROI, os valores da região definida são transpostos para o espectro I . Como as fontes possuem energias diferentes, o tipo de detector utilizado, o tempo de contagem e o número de pontos utilizados para a aquisições também foram diferentes. A tabela 9 apresenta a os parâmetros definidos para a aquisição do espectro de transmissão para as fontes utilizadas.

Tabela 9 - Parâmetros de aquisição dos espectros de transmissão

Fonte	Detector	Tempo de contagem (s)	Quantidade de aquisições
Cs^{137}	Iodeto de Sódio (NaI)	300	5
Am^{241}	Telureto de cádmio (CdTe γ /X ray)	600	3

Ressalta-se que a dose absorvida pelas amostras durante os experimentos para a determinação dos coeficientes de atenuação pode ser desconsiderada, pois a atividade da fonte não foi suficiente para que pudesse ser considerada.

4.4. Determinação da porosidade através do processo de MicroCT

A análise de microCT foi realizada com a utilização do equipamento Phoenix Vtomex|m GE. O equipamento possui um tubo de raios X com nanofoco, com tensão máxima de 300 kV e potência máxima de 500 W. O detector é um *flat panel* digital de silício amorfo e tamanho de pixel de 200 μm . A figura 14 apresenta uma foto do equipamento.



Figura 14 – Microtomógrafo de raios X Vtomex|m.

Os parâmetros utilizados para a aquisição foram uma voltagem de 165 kV, uma corrente de 220 μA e um tamanho de pixel efetivo de 60,8 μm . As amostras foram posicionadas perpendicularmente ao feixe de raios X, com uma rotação de 360° ao passo de 0,2°. O tempo de aquisição para cada imagem foi de 500 ms e cada passo foi definido com 3 frames, ou seja, três radiografias por passo angular. Foi definido um intervalo de 1 frame entre as projeções para redução do efeito pós luminescência. Para diminuir o efeito de *beam hardening*, foi utilizado um filtro de 1,0 mm de alumínio no tubo de raios X.

Após a aquisição das imagens, a reconstrução foi realizada com o auxílio do programa *datos x reconstruction* (versão 2.5.0). Foi realizado um tratamento da imagem que corrigiu o desalinhamento, que possa ter surgido durante a aquisição, e o *beam hardening*, com um valor de 7, que é o usual para amostras com características rochosas que sejam heterogêneas.

O programa CTAn (versão 1.18.4.0) foi utilizado para a realização das quantificações e determinação da porosidade.

A binarização consiste em dividir uma imagem de acordo com alguns critérios de uniformidade ou regiões homogêneas que devem representar um ou mais objetos de interesse, dessa forma, a imagem que apresentava diferentes tons de cinzas, passa a apresentar apenas o branco e o preto. Foi utilizado um *thresholding* global, que consiste em definir os mesmos parâmetros para todo o volume de interesse, os valores definidos foram através de uma análise conjunta entre o visual e o histograma. A figura 15 apresenta um exemplo de binarização para uma amostra do grupo IPT com o auxílio visual e do histograma em que a parte branca da imagem representa a matriz de cimento e a parte preta representa os poros.

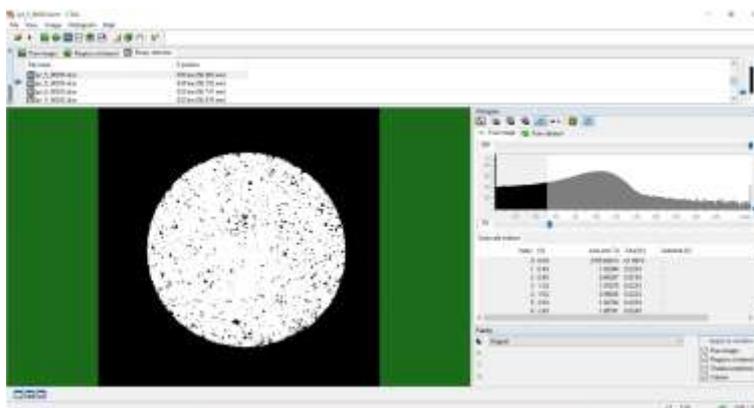


Figura 15 - Realização da binarização com o auxílio visual e com o histograma para uma amostra do grupo IPT no programa CTAn.

A região de interesse, ROI, que é uma área definida pelo usuário para que o programa realize a análise dos dados, foi definida para que o programa realize as quantificações selecionadas. Não é necessário definir o ROI para todos os *slices*, pois o software trabalha com a interpolação entre os ROI's para toda a amostra. O programa gera um volume de

interesse, VOI, utilizando a região definida através do ROI. É através do VOI que as análises em três dimensões serão realizadas pelo CTAn e, apenas, as informações presentes no interior do VOI serão analisadas pelo programa. A região de interesse foi definida através da utilização de um ROI retangular, conforme a figura 16, em que foram delimitadas apenas o *slice* superior e inferior.

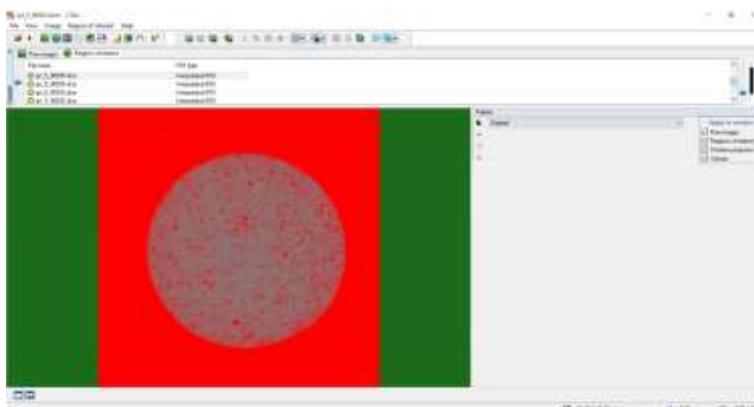


Figura 16 - Determinação do ROI para uma amostra do grupo IPT através do programa CTAn.

Após a determinação do ROI e da binarização, as funções de análise devem ser definidas. Para a realização deste trabalho foram utilizadas as funções *thresholding*, que realiza a binarização da imagem através dos valores previamente definidos, o *ROI shrink-wrap*, que faz com que o ROI se adeque à imagem binarizada, e o *3D analysis*, que calcula através da binarização definida o volume das partes brancas e pretas, além de outros parâmetros. A rotina determinada para realização deste trabalho foi: *thresholding*, *ROI shrink-wrap*, *3D analysis*, *thresholding* e *3D analysis*.

O primeiro *thresholding* foi utilizado para realizar a binarização da imagem conforme definido previamente para o *thresholding* global. A função *Roi shrink-wrap* foi utilizado para que o ROI se adaptasse a imagem e reconhecesse apenas geometrias acima de 60 *pixels* como poros. O primeiro *3D analysis* foi utilizado para calcular o volume da matriz de concreto e a porosidade aberta e fechada apresentada por ela. O segundo *thresholding* foi utilizado para inverter a imagem para que os poros apresentassem a cor branca e a matriz de concreto apresentasse a cor preta. O segundo *3D analysis* foi utilizado para contabilizar a quantidade de poros e formar um histograma dos poros identificados.

O método de cálculo que define o diâmetro de poros para o cálculo do histograma é conhecido como encaixe de esferas. Essa metodologia de cálculo consiste em inserir pequenas esferas com o diâmetro conhecido dentro do poro, de forma que o programa consiga calcular o diâmetro correspondente para aquele poro diminuindo a margem de erro (BRUKER, 2013).

Ressalta-se que a dose absorvida durante a realização da microCT pode ser desconsiderada, pois a dose utilizada para a irradiação encontra-se bem acima da dose absorvida pelas amostras durante a realização do experimento.

4.5. Determinação da massa específica

A determinação da massa específica foi realizada através do empuxo. Foi utilizada água destilada e a densidade foi determinada conforme o detalhada na seção 3.5. Para aferir a densidade do líquido, foi utilizado um cilindro de alumínio com diâmetro de 75,7 mm, altura de 60 mm e peso de 731 g. O cilindro de alumínio foi preso em um fio e colocado dentro de um recipiente, que estava sobre uma balança, e o valor apresentado para a massa do cilindro de alumínio foi de 270 g. Ao aplicar a equação 10, é possível determinar a densidade do fluido, conforme o demonstrado abaixo pela equação 17:

$$\rho_F = \frac{M_{Al\ na\ água}}{V_{Al}} = \frac{0,270}{0,00027} = 999,84\ kg/m^3 \text{ Equação 17}$$

Após a determinação da massa específica do fluido, foi determinada a massa de cada amostra de concreto no ar e depois no fluido. Com esses valores determinados foi aplicada a equação 11, que foi detalhada na seção 3.5, para determinação da massa específica.

Esse procedimento foi realizado para todas as amostras. Após esse processo, as amostras foram colocadas em uma estufa por 72 h a uma temperatura de 60 °C. O aparato experimental pode ser encontrado na figura 17.



Figura 17 - Aparato experimental para a determinação da massa específica das amostras de concreto.

4.6. *Ensaio à compressão*

O ensaio à compressão foi realizado conforme o previsto pela NBR 7215/2019. As amostras não irradiadas permaneceram no laboratório da UGB, enquanto as que foram irradiadas retornaram após o processo. Para a realização do ensaio foi utilizado uma prensa hidráulica da Contenco. O equipamento permite a utilização de amostras com no máximo 145 mm de altura e realiza um carregamento de até 100 toneladas.

Os testes foram realizados em todas as amostras com a idade de 76 dias e seguiu os procedimentos previstos pela NBR 7215/2019 e explicados na seção 3.10. Após a realização do ensaio, foi calculada a resistência média para cada grupo.

4.7. *Determinação dos cristais através da difração*

Após a realização do ensaio a compressão, uma amostra de cada grupo foi levada ao LIN. Foram extraídos fragmentos da região central, onde ocorreu o rompimento, das amostras para serem maceradas até passarem por uma peneira com abertura de 50 μm .

As amostras e o cimento irradiado foram levados ao Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Técnicas Analíticas (LIETA) da Universidade Estadual do Rio de Janeiro para realização do experimento de difração. O equipamento de bancada utilizado foi o D2 PHASER da Bruker que opera na geometria Bragg-Brentano. Ele é equipado com um detector linear (1D) rápido do tipo LYNXEYE, que também pode funcionar no modo cintilador (0D), um tubo de raios X com ânodo de cobre, que possui uma linha de emissão característica de 1,541 Å/8,047 keV (Cu-K α 1), potência máxima de 300 W e varredura com precisão máxima angular de $\pm 0,2^\circ$ no intervalo de -3° a 160° em 2θ . O porta amostra é fixado em um sistema *Spinner*, com velocidade de rotação definida pelo usuário. O programa para coleta de dados é o DIFFRAC.SUITE e o programa utilizado para análise é o DIFFRAC.EVA, ambos da Bruker. O programa de análise permite a identificação das fases da amostra e fornece um gráfico semiquantitativo.

Os parâmetros de aquisição foram de 30 kV e 10 mA. Para identificação dos cristais presentes na amostra foram utilizados um filtro K β de níquel com um tempo de medida de 0,5 segundos e um ângulo inicial de 5° e final de 90° com passo angular de $0,01^\circ$.

Após a aquisição dos dados foi utilizado o programa DIFFRAC.EVA para identificação das fases presentes nas amostras. Para refinar os dados foi eliminado a energia proveniente do cobre. A análise foi realizada através da comparação dos picos presentes no difratograma com os sugeridos pelo software para ocupar aquela faixa. O programa apresenta uma análise semiquantitativa e, dessa forma, não apresenta cálculos estatísticos como desvio padrão e erro associado na medida.

4.8. *Determinação do coeficiente de atenuação através da plataforma WinXCOM*

Após a realização da difração de raios X, foi possível identificar as moléculas com estrutura cristalina bem definida presentes nas amostras e o percentual ocupado por cada uma. Esses resultados puderam ser utilizados na plataforma WinXCOM. Os dados devem ser inseridos como mistura e o percentual deve ser definido para a fórmula de cada composto. Também é possível definir a faixa energética e inserir energias específicas. A figura 18 apresenta a interface para inserção dos dados, a faixa energética e as energias específicas definidas pelo usuário, desde que possua até quatro algarismo significativos, e um exemplo de uma solução de água com cloreto de sódio.

Enter the formulae and relative weights separated by a space for each compound. One compound per line. For example:

```
H2O 0.5
NaCl 0.1
```

Note: Weights not summing to 1 will be normalized.

H2O 0.8
NaCl 0.2

Optional output title: Example

Graph options:

- Total Attenuation with Coherent Scattering
- Total Attenuation without Coherent Scattering
- Coherent Scattering
- Incoherent Scattering
- Photoelectric Absorption
- Pair Production in Nuclear Field
- Pair Production in Electron Field
- None

Additional energies in MeV (optional) (up to 100 allowed)

Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used). One energy per line. Blank lines will be ignored.

0.05954
0.6617

Include the standard grid

Energy Range:

Minimum: 0.001 MeV
Maximum: 10 MeV

Figura 18 - Interface para a inserção de dados na plataforma NIST WinXCOM.

O resultado retorna um gráfico de atenuação considerando o espalhamento Compton coerente, além da fração de massa de cada elemento químico e uma tabela com a energia do fóton e o valor da seção de choque para cada tipo de interação do fóton com a matéria e o coeficiente de atenuação da mistura.

Capítulo V

5. Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados e as discussões.

5.1. Resultado para a massa específica

A massa específica foi aferida de acordo com o empuxo e conforme a seção 4.5. Após a determinação da densidade do fluído (água destilada), foi possível determinar a densidade das amostras desde que a massa para de cada corpo de prova fora da água e dentro da água fosse conhecida. A tabela 10 apresenta a densidade média encontrada para cada corpo de prova após a realização do experimento.

Tabela 10 - Valores encontrados para a massa específica para os corpos de prova.

		Massa Específica (kg/m ³)				
		0 kGy	10 kGy	30 kGy	50 kGy	100 kGy
ART	Média	2.120,40	2.077,52	2.086,71	2.111,08	2.090,82
	Desvio Padrão	61,77	36,08	25,04	20,31	9,45
	CV	2,9%	1,7%	1,2%	1,0%	0,5%
CON	Média	2.059,04	2.027,53	2.035,34	2.061,72	2.046,51
	Desvio Padrão	36,63	39,17	24,70	22,25	14,73
	CV	1,8%	1,9%	1,2%	1,1%	0,7%
IPT	Média	2.075,77	2.038,46	2.053,76	2.077,44	2.054,80
	Desvio Padrão	29,79	12,70	16,30	8,35	14,48
	CV	1,4%	0,6%	0,8%	0,4%	0,7%

O maior desvio encontrado foi para o grupo ART não irradiado, porém o coeficiente de variação (CV) foi de apenas 2,9 %. Enquanto isso, o menor desvio encontrado foi para o grupo IPT irradiado com 50 kGy e com apenas 0,4 % para o coeficiente de variação.

A variação encontrada na massa específica após a irradiação com a dose de 10 kGy foi baixa, sendo que o grupo ART, o qual apresentou a maior variação entre elas, foi de 2,02% e o grupo CON a menor variação (1,53%), demonstrando que a alteração na massa específica não foi significativa.

A variação encontrada na massa específica após a dose absorvida de 30 kGy também foi baixa. Ao comparar os valores entre as doses absorvida de 10 e 30 kGy, é possível perceber que a maior variação ocorreu para o grupo IPT, mas ela foi de apenas 0,75%,

enquanto a menor variação ocorreu para o grupo CON e foi de apenas 0,39%. Esses resultados apresentam uma baixa variação para a massa específica entre as doses absorvidas de 10 e 30 kGy. Ao comparar as massas específicas dos grupos antes de serem irradiadas e após a dose absorvida de 30 kGy, a maior variação encontrada foi para o grupo ART (1,59%) e a menor variação foi encontrada para o grupo IPT (1,06%).

Quando a dose absorvida de 50 kGy foi analisada, os valores determinados para a massa específica apresentaram o mesmo comportamento. A maior variação encontrada entre as doses absorvidas de 30 e 50 kGy é para o grupo CON (1,30%) e a menor é para o grupo IPT (1,15%). Quando os valores da massa específica para dose absorvida de 50 kGy são comparados com as amostras não irradiadas, a maior variação é encontrada no grupo ART (0,44%) e a menor variação é encontrada no grupo IPT (0,08%).

Para a dose absorvida de 100 kGy, a maior variação encontrada após a dose absorvida de 50 kGy foi de 1,09% para a amostra IPT. Quando a variação entre as doses absorvidas de 0 e 100 kGy é analisada, a maior variação que ocorre é no grupo ART (1,39%).

A figura 19 apresenta a variação da massa específica após os grupos serem irradiados.

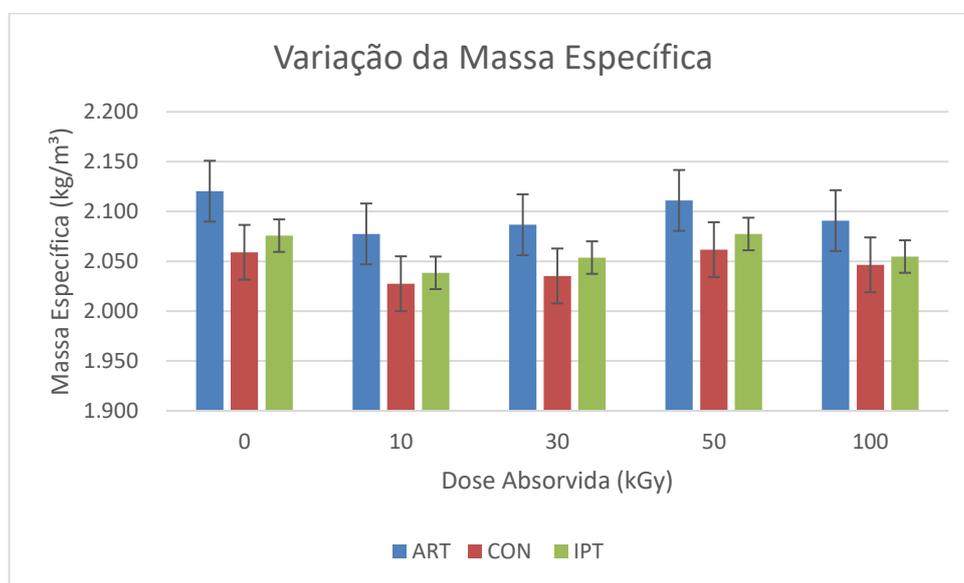


Figura 19 – Evolução da massa específica após a irradiação das amostras.

Dentre os grupos analisados, o grupo ART é o que apresenta o maior valor para a massa específica, seguido do grupo IPT e depois do grupo CON. Também é possível perceber

pela análise visual que as amostras não apresentaram nenhuma modificação significativa para a massa específica, sendo que os novos valores se encontram dentro do desvio padrão para cada grupo analisado.

5.2. Resultado para a transmissão usando a fonte de Cs^{137}

Para iniciar o experimento foi necessário a identificação do pico característico da fonte de Cs^{137} através da contagem de fótons com a energia de 661,66 keV havendo apenas o ar entre a fonte e o detector. Após esse processo, os corpos de prova foram colocados entre a fonte e o detector e a quantidade de fótons contabilizados com e sem a presença do concreto pode ser comparada. Para determinar os valores para a contagem da quantidade de fótons com a energia de 661,66 keV que chegam ao detector foi traçado uma região de interesse coincidente com o início e o fim do pico característico da fonte utilizada. As figuras 20 e 21 apresentam a sobreposição do espectro obtido quando uma amostra do grupo ART se encontra entre a fonte e o detector sobreposto a um espectro em que não há um meio atenuador entre a fonte e o detector.

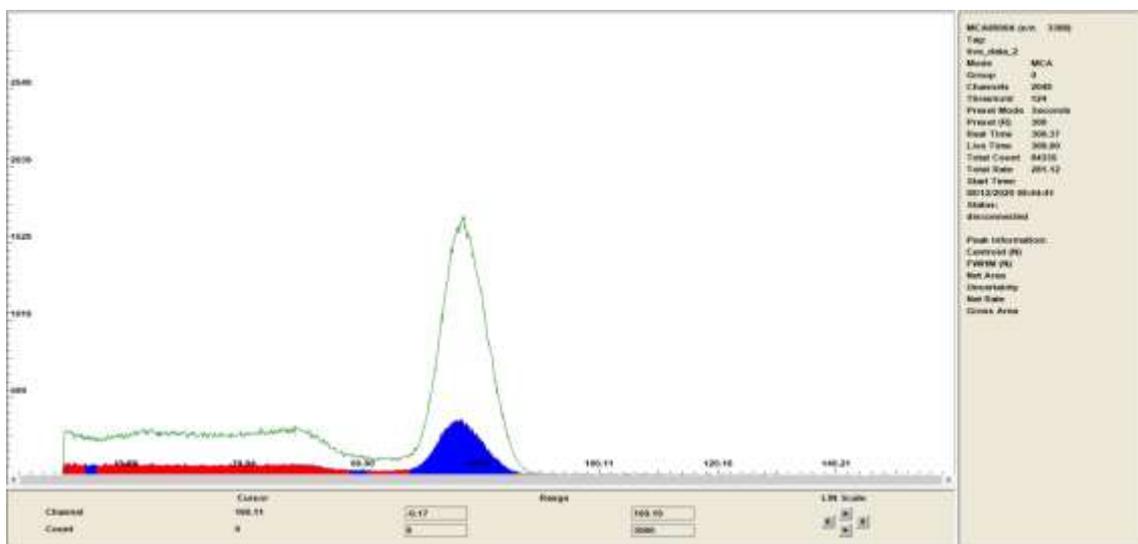


Figura 20 – Espectros com e sem a presença de uma amostra do grupo ART não irradiada entre o detector e a fonte.

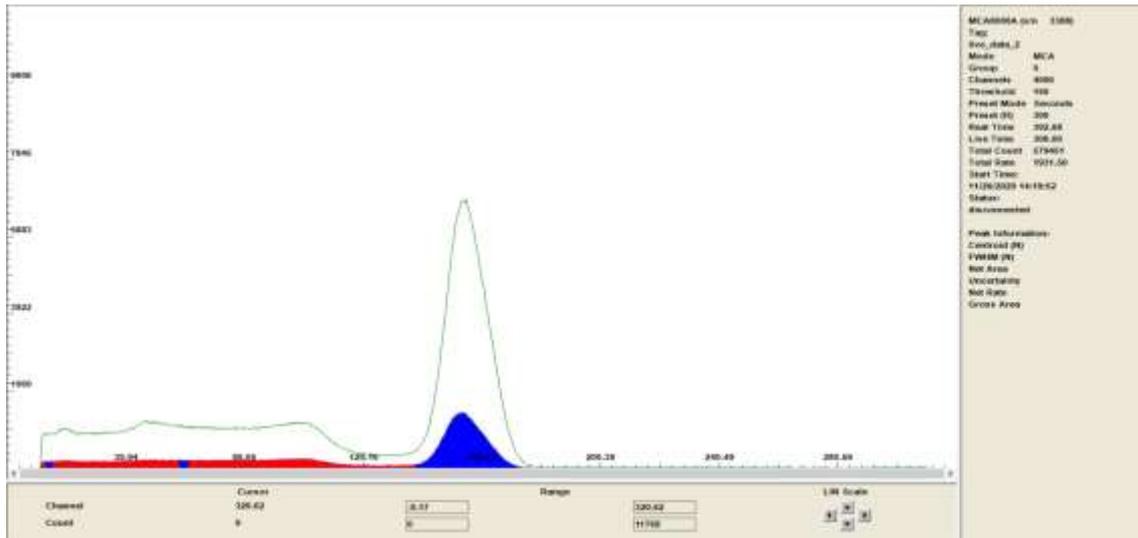


Figura 21 – Espectros com e sem a presença de uma amostra do grupo ART após a dose absorvida de 10 kGy entre o detector e a fonte.

Após a realização do experimento, foi possível adaptar a equação 3, apresentada na seção 3.2.1, para determinar o coeficiente de atenuação. A equação 18 apresenta essa adaptação da equação 3, em que I_0 é o número de fótons que chegam ao detector sem que haja um meio absorvedor entre eles, I é o número de fótons que chegam ao detector após passarem pelo meio absorvedor, que nesse caso é um corpo de prova de argamassa, e h é a altura apresentada por cada corpo de prova.

$$\mu = \frac{\ln(I_0) - \ln(I)}{h} \text{ Equação 18}$$

A equação 18 foi aplicada para todas as amostras e a média do coeficiente de atenuação para a energia de 661,66 keV para cada grupo de amostras pode ser encontrada na tabela 9, que também apresenta o coeficiente de atenuação por massa que é calculado através da divisão do coeficiente de atenuação pela massa específica.

A tabela 11 apresenta os valores para os coeficientes de atenuação e coeficientes de atenuação por massa encontrados para a energia de 661,66 keV.

Tabela 11 – Valores para o coeficiente de atenuação linear e para o coeficiente de atenuação de massa para a energia 661,66 keV.

		μ (cm ⁻¹)					μ/ρ (cm ² /g)				
		0 kGy	10 kGy	30 kGy	50 kGy	100 kGy	0 kGy	10 kGy	30 kGy	50 kGy	100 kGy
ART	Média	0,172	0,163	0,162	0,161	0,163	0,081	0,078	0,078	0,076	0,078
	Desvio Padrão	0,0025	0,0038	0,0025	0,0018	0,0015	0,0024	0,0011	0,0018	0,0012	0,0005
	CV	1,4%	2,3%	1,6%	1,1%	0,9%	3,0%	1,4%	2,3%	1,6%	0,7%
CON	Média	0,166	0,159	0,159	0,159	0,160	0,080	0,079	0,078	0,077	0,078
	Desvio Padrão	0,0042	0,0051	0,0012	0,0015	0,0016	0,0010	0,0021	0,0011	0,0010	0,0011
	CV	2,5%	3,2%	0,8%	0,9%	1,0%	1,2%	2,7%	1,4%	1,3%	1,4%
IPT	Média	0,168	0,161	0,158	0,161	0,161	0,081	0,079	0,077	0,077	0,078
	Desvio Padrão	0,0020	0,0035	0,0032	0,0023	0,0146	0,0017	0,0020	0,0015	0,0014	0,0006
	CV	1,2%	2,2%	2,0%	1,4%	9,1%	2,1%	2,5%	1,9%	1,7%	0,7%

O maior desvio encontrado para o coeficiente de atenuação linear foi para o grupo CON irradiado com a dose absorvida de 10 kGy, porém o coeficiente de variação (CV) foi de apenas 3,2%. Enquanto isso, o menor desvio encontrado foi também para o grupo CON irradiado com 30 kGy e com apenas 0,8% para o coeficiente de variação.

Já para o coeficiente de atenuação de massa, o maior desvio encontrado foi para o grupo ART não irradiado, mas com um coeficiente de variação de apenas 3,0%. O menor desvio encontrado foi para o grupo ART irradiado com 100 kGy e com o coeficiente de variação de 0,7%.

Ao analisar a variação do coeficiente de atenuação após a dose de 10 kGy, é possível notar que a irradiação com uma dose de 10 kGy provocou uma redução de 5,15% para o coeficiente de atenuação para o grupo ART. Uma redução de 4,20% foi encontrada para o coeficiente de atenuação para o grupo CON, enquanto uma redução de 4,44% foi encontrada para o grupo IPT. O mesmo comportamento foi identificado após a dose de 30 e 50 kGy quando comparado com os elementos não irradiados.

Após a dose de 100 kGy, o grupo ART apresentou uma redução total de 5,12% para o coeficiente de atenuação linear em relação ao grupo não irradiado. Enquanto os grupos CON e IPT apresentaram uma redução de 3,23 e 4,27% respectivamente.

Quando os coeficientes de atenuação de massa são analisados, é possível perceber uma redução de 3,43% para o grupo ART, uma redução de 2,21% para o grupo CON e uma redução de 2,80% para o grupo IPT após a irradiação com uma dose absorvida de 10 kGy. O mesmo comportamento de decréscimo apresentado para o coeficiente de atenuação linear também foi encontrado para o coeficiente de atenuação de massa após as doses absorvidas de 30, 50 e 100 kGy. O grupo ART apresentou uma diminuição de 3,84%, enquanto os grupos CON e IPT apresentaram uma redução de 2,63 e 3,31% respectivamente. É importante notar que, assim como para o coeficiente de atenuação, o coeficiente de atenuação por massa apresentou uma redução após a dose absorvida de 10 kGy, mas o valor para as medias seguintes não apresentam uma redução significativa.

A figura 22 apresenta a variação do coeficiente de atenuação após as doses absorvidas de 10, 30, 50 e 100 kGy, enquanto a figura 23 apresenta a variação do coeficiente de atenuação por massa para a energia de 661,66 keV.

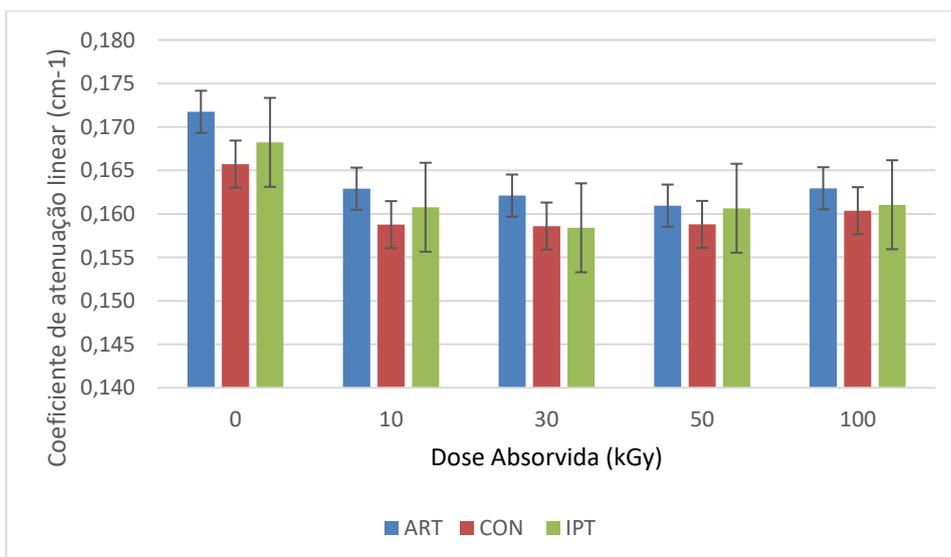


Figura 22 – Variação para coeficiente de atenuação linear.

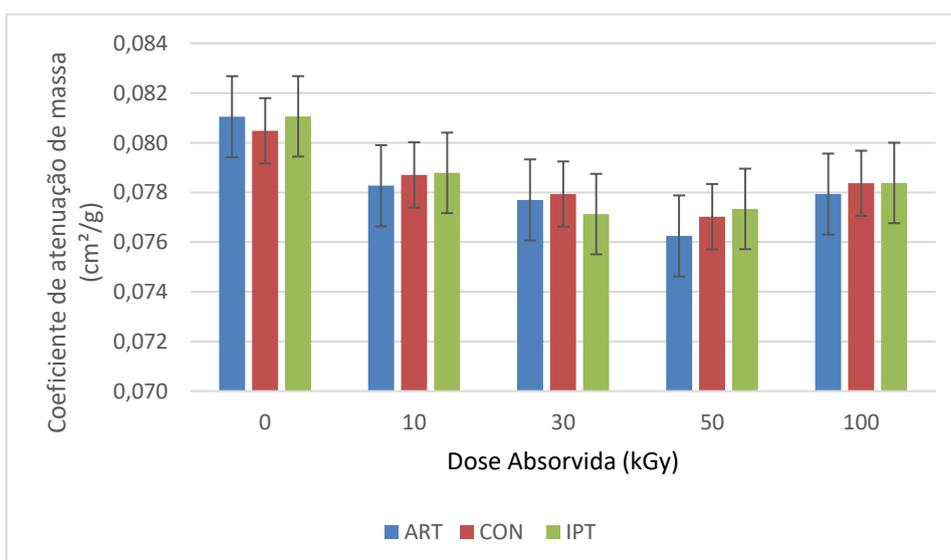


Figura 23 – Variação para o coeficiente de atenuação de massa.

A análise do coeficiente de atenuação de massa permitiu identificar que o grupo ART apresentou o maior valor antes de ser irradiado. Após a dose absorvida de 10 kGy, foi possível identificar uma redução para o coeficiente de atenuação de massa em todos os grupos.

Em relação ao coeficiente de atenuação por massa, os valores também apresentam uma tendência de queda após serem irradiados, mas a variação apresentada encontra-se dentro do desvio padrão.

5.3. Resultado para a transmissão usando a fonte de Am^{241}

Após a identificação do pico característico da fonte de amerício na energia de 59,54 keV sem a presença de um material entre a fonte e o detector, foi possível definir uma região de interesse que correspondesse a energia característica da fonte. Com isso, os corpos de prova foram colocados entre a fonte e o detector e a quantidade de fótons registrados com e sem a presença da amostra puderam ser contabilizadas. As figuras 24 e 25 apresentam a sobreposição do espectro obtido quando uma amostra do grupo ART se encontra entre a fonte e o detector sobreposto a um espectro em que não há um meio atenuador entre a fonte e o detector.



Figura 24 – Espectro com e sem a presença de uma amostra do grupo ART não irradiado entre o detector e a fonte.

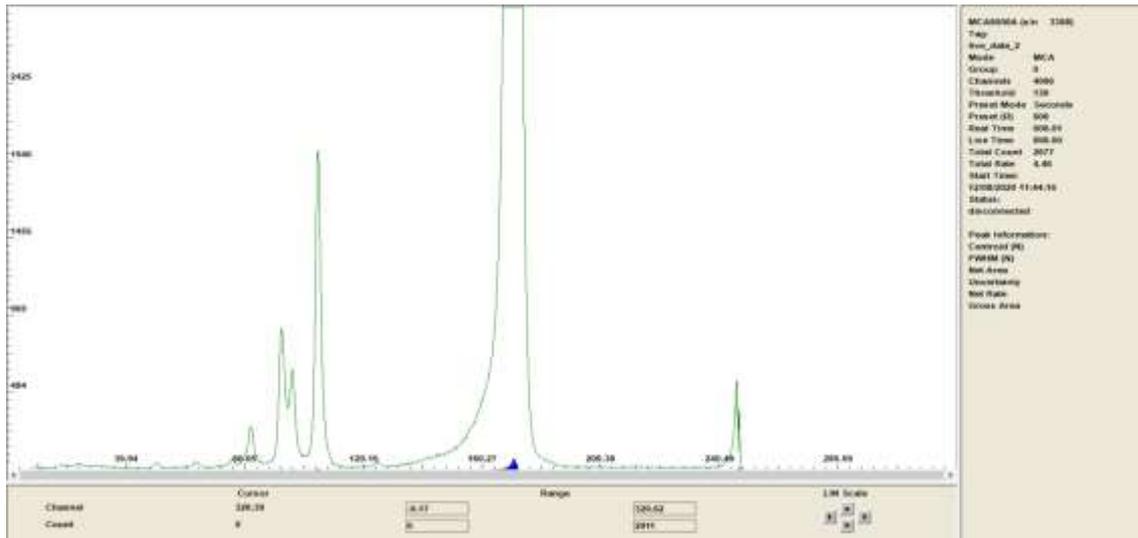


Figura 25 - Espectro com e sem a presença de uma amostra do grupo ART após a dose absorvida de 10 kGy entre o detector e a fonte.

A equação 18, apresentada na seção 5.2, foi utilizada para a determinação do coeficiente de atenuação das amostras de argamassa para a energia de 59,54 keV. A tabela 12 apresenta os coeficientes de atenuação e os coeficientes de atenuação por massa para cada grupo de amostra, o desvio apresentado por cada grupo e o coeficiente de variação para a energia de 59,54 keV.

Tabela 12 - Valores para o coeficiente de atenuação linear e para o coeficiente de atenuação de massa para a energia de 59,54 keV.

		μ (cm ⁻¹)					μ/ρ (cm ² /g)				
		0 kGy	10 kGy	30 kGy	50 kGy	100 kGy	0 kGy	10 kGy	30 kGy	50 kGy	100 kGy
ART	Média	0,698	0,659	0,661	0,676	0,678	0,330	0,319	0,319	0,320	0,324
	Desvio Padrão	0,0066	0,0323	0,0218	0,0052	0,0399	0,0098	0,0128	0,0120	0,0047	0,0194
	CV	0,9%	4,9%	3,3%	0,8%	5,9%	3,0%	4,0%	3,8%	1,5%	6,0%
CON	Média	0,602	0,582	0,581	0,607	0,561	0,293	0,290	0,286	0,294	0,274
	Desvio Padrão	0,0085	0,0381	0,0261	0,0055	0,0127	0,0087	0,0214	0,0137	0,0027	0,0079
	CV	1,4%	6,5%	4,5%	0,9%	2,3%	3,0%	7,4%	4,8%	0,9%	2,9%
IPT	Média	0,619	0,586	0,586	0,607	0,561	0,298	0,287	0,285	0,292	0,273
	Desvio Padrão	0,0067	0,0395	0,0211	0,0074	0,0127	0,0069	0,0184	0,0111	0,0027	0,0063
	CV	1,1%	6,7%	3,6%	1,2%	2,3%	2,3%	6,4%	3,9%	0,9%	2,3%

O maior desvio encontrado para o coeficiente de atenuação linear foi para o grupo ART irradiados com a dose absorvida de 100 kGy, porém o coeficiente de variação (CV) foi de apenas 5,9%. Enquanto isso, o menor desvio encontrado foi para o grupo ART irradiado com 50 kGy e com apenas 0,8% para o coeficiente de variação.

Já para o coeficiente de atenuação de massa, o maior desvio encontrado foi para o grupo CON irradiado com 10 kGy e com um coeficiente de variação de apenas 7,4%. O menor desvio encontrado foi para os grupos CON e IPT irradiados com 50 kGy e com o coeficiente de variação de 0,9%.

Ao analisar a variação do coeficiente de atenuação após cada dose, é possível notar uma tendência a redução na média para todos os grupos, porém os valores determinados encontram-se dentro do desvio padrão. A análise permite determinar que a mistura com a utilização da areia artificial possui o maior coeficiente de atenuação para fótons com até 59,54 keV.

O comportamento para os valores determinados para o coeficiente de atenuação de massa é o mesmo que o encontrado para o coeficiente de atenuação. O grupo ART mostrou ser o que possui o maior valor, sendo que a variação após a irradiação se encontra dentro do desvio padrão. A exposição até uma dose absorvida de 100 kGy não foi suficiente para provocar uma modificação significativa, visto que a variação para o coeficiente de atenuação de massa dos grupos estudados está dentro do desvio padrão.

A figura 26 apresenta a variação do coeficiente de atenuação após a irradiação, enquanto a figura 27 apresenta a variação do coeficiente de atenuação por massa para a energia de 54,59 keV.

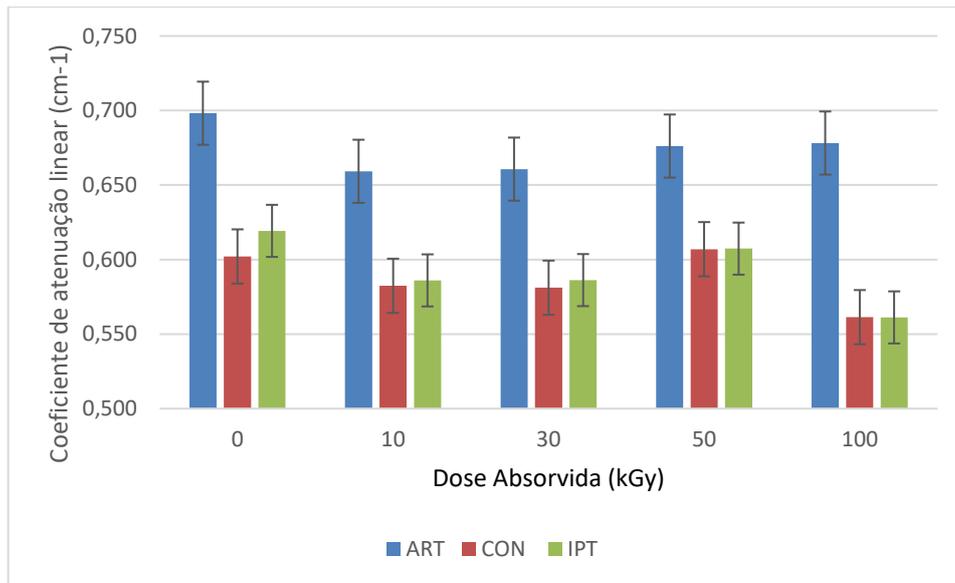


Figura 26 – Variação para o coeficiente de atenuação linear.

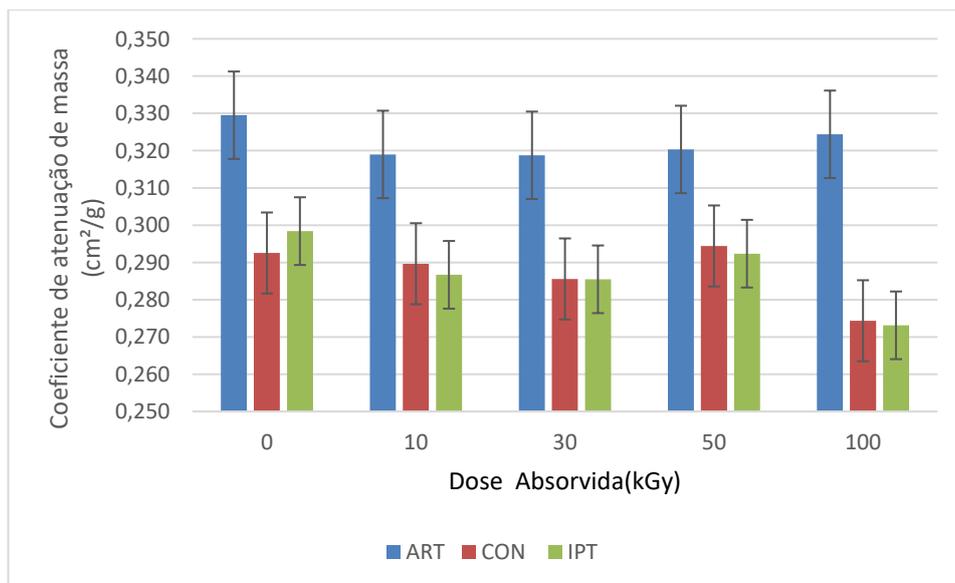


Figura 27 – Variação para o coeficiente de atenuação de massa.

5.4. Resultado para a porosidade

A porosidade foi determinada com o auxílio do equipamento de microtomografia por raios X Vtomex|m.

Uma amostra do grupo CON apresentou uma variação diferente de todas as outras após a dose absorvida de 50 kGy. As amostras no grupo apresentaram uma redução na porosidade que variou entre 0,62 e 24,31%, porém a amostra CON4 apresentou um

acréscimo de 102,89% na porosidade. A figura 28 apresenta uma comparação gráfica entre os valores quando a amostra CON4 é considerada (Média 2) com a porosidade quando a CON4 não é considerada (Média 1).

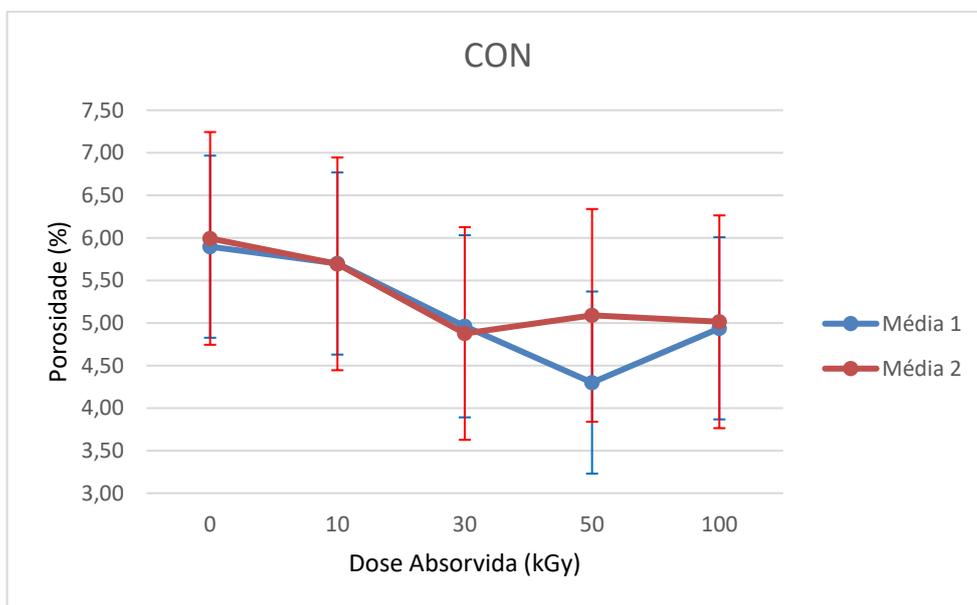


Figura 28 - Comparação dos valores para a porosidade para o grupo CON.

A análise da figura 28 permite verificar que a retirada da amostra CON4 diminuiu o valor da porosidade encontrada para o grupo CON após cada dose absorvida, assim como o desvio padrão apresentado. O valor para a porosidade após a dose absorvida de 50 kGy considerando a amostra CON4 foi de 5,09% e com um desvio padrão de $\pm 2,04\%$, enquanto a média 1, que não considera a amostra CON4, apresentou uma porosidade de 4,30% e um desvio padrão de $\pm 0,74\%$. Apesar da diferença após a dose absorvida de 50 kGy, o mesmo não foi observado para as amostras não irradiadas e com dose absorvida de 10, 30 e 100 kGy. Porém, optou-se pela retirada dos valores encontrados para a amostra CON4. Os valores apresentados na tabela 13 para o grupo CON não estão incluindo os valores encontrados para a CON4. A tabela 13 apresenta os resultados encontrados após o tratamento das imagens para a porosidade total de cada grupo, enquanto a figura 29 apresenta a evolução para a porosidade aberta e fechada após a irradiação de cada grupo.

A tabela 13 apresenta a porosidade total, sendo possível verificar que há uma tendência de diminuição na média da porosidade à medida que há um aumento na dose absorvida

por cada grupo, porém esses valores encontram-se dentro do desvio padrão. Todos os grupos apresentaram a tendência de redução na média até a dose absorvida de 50 kGy. Após a dose absorvida de 100 kGy, houve um aumento na média da porosidade em comparação a dose absorvida de 50 kGy, mas que continua abaixo das amostras não irradiadas.

Tabela 13 - Porosidade total para as amostras de cada grupo antes e após a irradiação.

		0 kGy	10 kGy	30 kGy	50 kGy	100 kGy
ART	Média	3,41	2,94	2,54	2,27	2,37
	Desvio Padrão	0,76	0,85	0,54	0,32	0,75
	CV	22,3%	29,1%	21,4%	14,3%	31,4%
CON	Média	5,90	5,70	4,96	4,30	4,94
	Desvio Padrão	1,20	1,26	0,85	0,74	1,29
	CV	20,4%	22,0%	17,2%	17,1%	26,2%
IPT	Média	6,24	5,47	4,35	4,40	4,57
	Desvio Padrão	1,56	1,48	1,02	0,73	1,28
	CV	25,0%	27,1%	23,4%	16,5%	28,0%

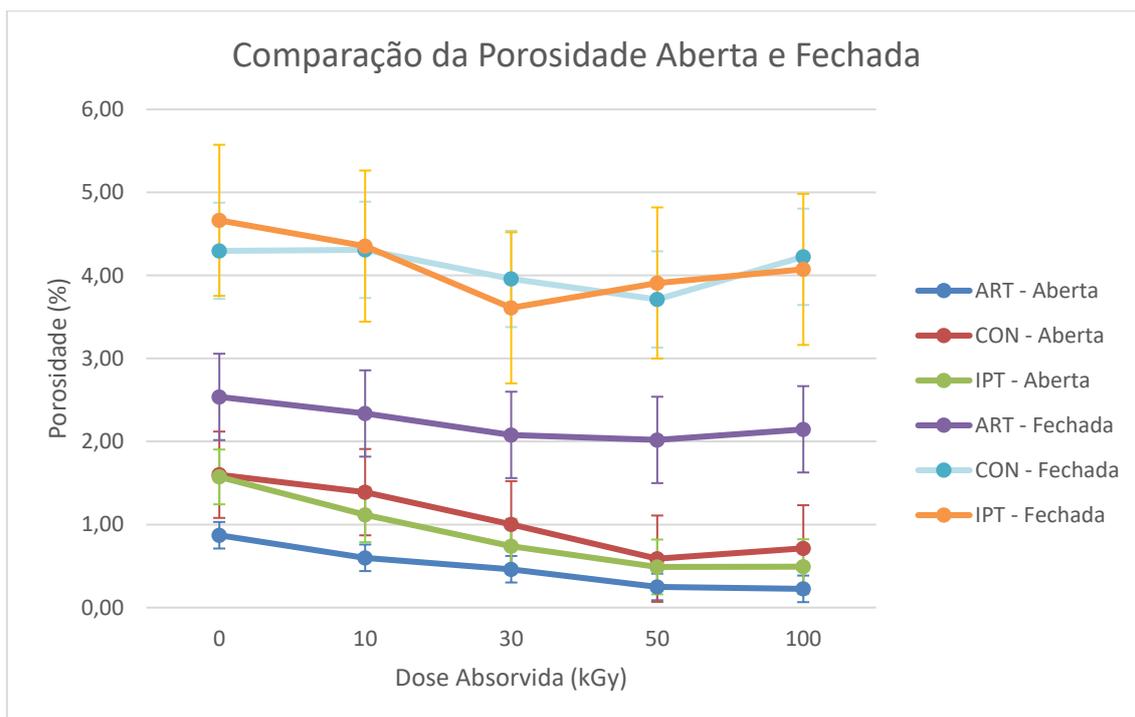


Figura 29 – Variação para as porosidades abertas e fechadas.

A tabela 13 apresentou a tendência de redução da porosidade para todas as grupos de amostras, enquanto a figura 29 apresentou a evolução para a porosidade aberta e fechada de forma complementar, sendo possível perceber a relação entre a tabela e o gráfico. Tanto os poros abertos, que são aqueles com ligação com o meio externo, quanto os poros fechados, que não apresentam ligações com o meio externo, apresentaram uma tendência de redução após a irradiação. A maior variação na média da porosidade para os grupos ART, CON e IPT ocorreu com a dose absorvida de 50 kGy, sendo que o valor determinado para média da porosidade voltou a aumentar após a dose absorvida de 100 kGy, mas continuou menor que a média encontrada para o grupo não irradiado.

A figura 30 apresenta o histograma para as amostras do grupo ART, onde é possível verificar que o intervalo com maior percentual de poros é o de 0,182 e 0,304 mm. Antes da irradiação havia um grande percentual de poros entre os diâmetros de 0,061 e 0,182 mm, porém a quantidade diminuiu após a dose absorvida de 100 kGy, assim como os poros com o diâmetro entre 1,518 e 1,64 mm. Os poros com o diâmetro entre os intervalos de 0,182 à 1,518 apresentaram um aumento no percentual. A diminuição na quantidade de poros com menores diâmetros e aumento nos poros com maiores diâmetros permite

identificar a modificação que ocorre na rede de poros quando há a interação entre a argamassa com a radiação gama.

Apesar de não apresentar variação significativa para o valor da porosidade total, a análise do histograma permite verificar que os menores poros tiveram uma redução na frequência, principalmente os que se encontram entre a faixa de 0,061 e 0,182 mm. É importante notar que o grupo ART apresentou cerca de 90% dos poros presentes nos intervalos que varia de 0,061 à 0,547 mm de diâmetro para todas as doses. Os poros acima desses intervalos são menos representativos nessa mistura de argamassa.

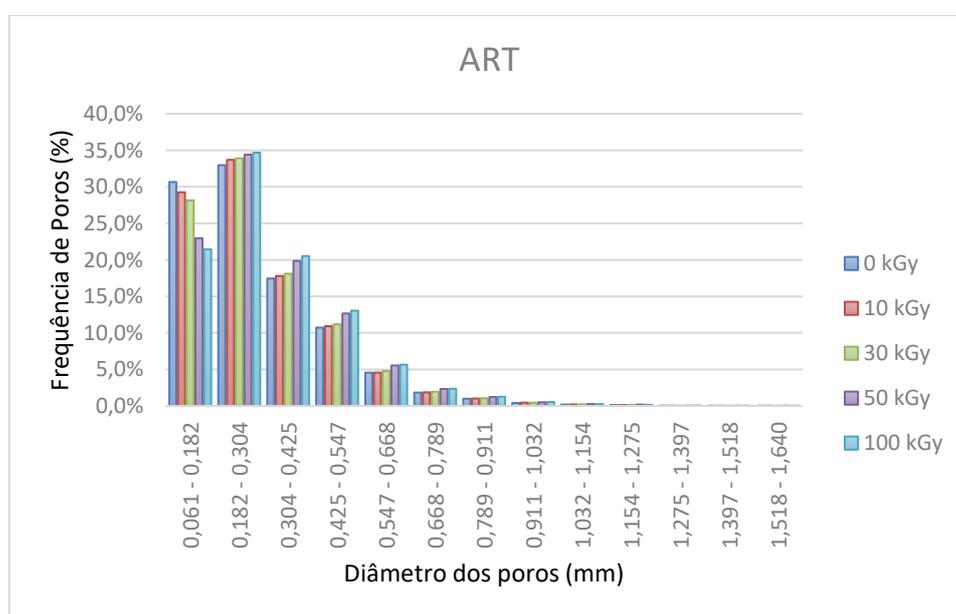


Figura 30 – Variação no histograma de poros para o grupo ART.

A figura 31 apresenta o histograma de poros para o grupo CON. É possível perceber que os poros desse grupo estão divididos em mais intervalos. Enquanto para o grupo ART o intervalo entre 1,518 e 1,640 mm foi o maior registrado, para o grupo CON os poros ocuparam até o intervalo de 2,007 e 2,128 mm. Outra diferença é que o intervalo com maior percentual de poros é o de 0,425 e 0,547 mm e o segundo com maior quantidade de poros é o intervalo entre 0,182 e 0,304 mm antes da irradiação. Após a dose absorvida de 100 kGy, o intervalo com a segunda maior quantidade de poros identificadas é o de 0,547 à 0,668 mm.

Apesar da porosidade total não ter apresentado uma variação significativa, mas apenas uma tendência de queda na média, o histograma apresentado na figura 31 permite verificar que a rede de poros do grupo CON sofreu uma alteração significativa à medida que as amostras eram irradiadas. A faixa de poros com o diâmetro entre 0,061 e 0,182 mm apresentou uma redução de até 50% na frequência, assim como um aumento significativo na frequência de poros entre nas duas faixas entre os diâmetros de 0,425 e 0,668 mm. Assim como o grupo ART, o grupo CON apresentou cerca de 90% dos poros presentes entre os intervalos com os menores diâmetros.

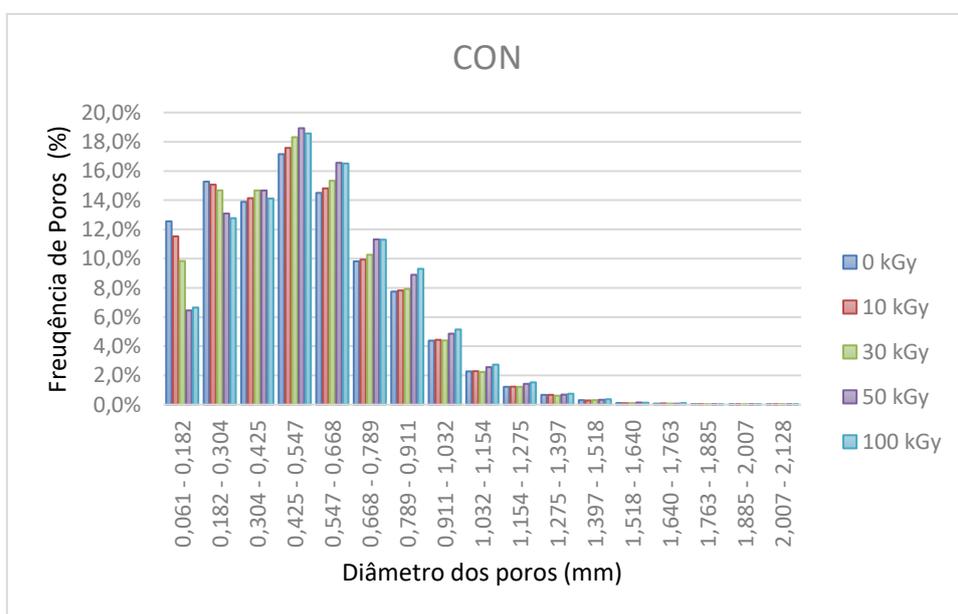


Figura 31 – Variação no histograma de poros para o grupo CON.

A figura 32 apresenta o histograma para o grupo de amostras IPT. Assim como o grupo ART, o maior percentual de poros encontrado está no intervalo entre 0,182 e 0,304 mm, sendo registrada uma redução na frequência após a dose absorvida de 100 kGy. Os poros para o grupo IPT estão distribuídos em uma menor quantidade de intervalos que os demais, sendo que não há uma quantidade de poros significativa com o diâmetro acima de 1,518 mm (0,002%). Após a dose absorvida de 10 kGy, não foi mais observada uma frequência de poros com o diâmetro acima de 1,397 mm. Os intervalos de poros acima de 0,304 mm apresentaram um aumento na frequência de poros, sendo o intervalo entre 0,304 e 0,425 mm o segundo mais significativo.

Assim como os demais grupos, o grupo IPT não apresentou alteração na porosidade total, mas apresentou uma modificação no histograma. É possível perceber que os poros com o diâmetro abaixo de 0,182 mm sofreram uma redução, enquanto os intervalos entre 0,304 e 0,547 apresentaram o maior aumento. Cerca de 90% dos poros para o grupo IPT estão presentes entre os intervalos que varia de 0,061 à 0,547 mm de diâmetro para todas as doses.

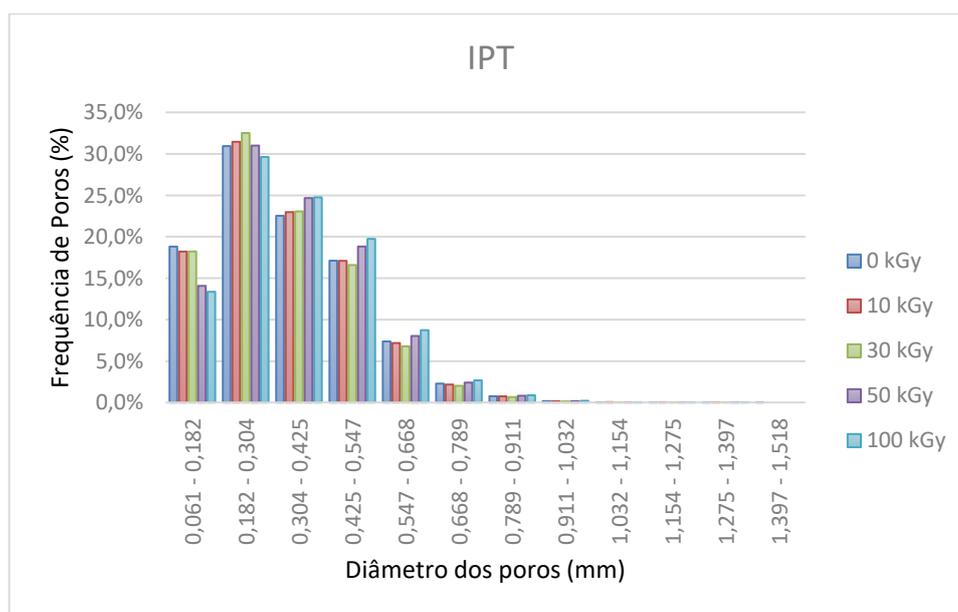


Figura 32 – Variação para o histograma de poros para o grupo IPT.

A análise dos histogramas permitiu identificar que a maior quantidade de poros quando a areia artificial e a areia padronizada são utilizadas encontram-se no intervalo entre 0,182 e 0,304 mm, enquanto uma areia sem controle apresentou uma maior quantidade de poros entre o intervalo de 0,425 e 0,547 mm. Também foi possível notar que a areia padronizada apresentou uma distribuição de poros em um intervalo menor que os dos outros grupos e que a frequência de poros entre a faixa de 0,061 e 0,182 mm é mais significativa para o grupo ART, pois apresentou a segunda maior quantidade de poros. Esse resultado apresenta o impacto na rede de poros quando esses agregados miúdos são utilizados e reforça a importância de haver um rígido controle no material utilizado.

Apesar de não ter sido observado nenhuma alteração no valor da porosidade, mas apenas uma tendência de diminuição na média, os histogramas permitiram verificar as

modificações que ocorrem na rede de poros a medida que há um aumento nas doses absorvidas pelas amostras. A análise do histograma também permite identificar uma redução na quantidade dos maiores e menores poros presentes nas amostras. Essa redução no diâmetro é explicada pela interação da matriz de cimento com a radiação, fazendo com que haja um rearranjo nas molecular e nas estruturas cristalinas. A diminuição na quantidade de poros com menores diâmetros também permite identificar o preenchimento deles com o material proveniente da carbonatação. A figura 33 apresenta a comparação da porosidade total após a irradiação para as amostras estudadas para o desenvolvimento desse trabalho, reforçando que a variação ocorreu dentro do desvio padrão, apesar de que a média apresentou uma tendência de queda.

A figura 33 também permite identificar o grupo ART com o menor valor para a porosidade, com uma alternância no maior valor entre os grupos IPT e CON à medida que há um aumento na dose absorvida.

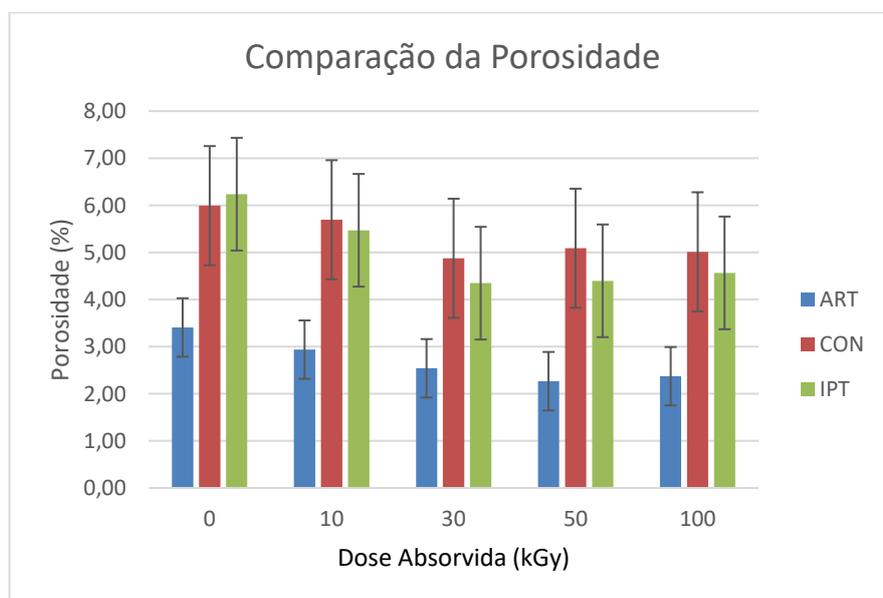


Figura 33- Evolução da porosidade total após a irradiação.

A figura 34 apresenta uma comparação dos resultados determinados para a elaboração dessa tese com resultados encontrados na literatura. As amostras denominadas como 1OPC:2SS:1WS+10%SAE e 1OPC:1SS:2WS+10%SAE são amostras encontradas em (KHATTAB, 2012), em que cada número corresponde a quantidade de massa utilizada em relação a massa de cimento Portland (OPC), sendo que SS é a quantidade de areia

padronizada, WS a quantidade de areia branca e que possui uma grande capacidade de inchamento e SAE é látex de éster acrílico estireno. As amostras de (KHATTAB, 2012) ficaram três dias em cura e foram testadas quando as amostras atingiram a idade de 28 dias.

(VODAK, et al. 2005) utilizaram amostras de concreto. O artigo desenvolvido não deixa claro o tempo em que as amostras permaneceram em cura, mas relata que foram ensaiadas com 90 dias. Enquanto que (KHMUROVSKA, et al. 2021) utilizaram uma mistura de argamassa, a qual permaneceu em cura durante 10 dias e foram ensaiadas quando completaram 369 dias de idade.

As amostras de (KHATTAB, 2012) foram irradiadas até 50 kGy, enquanto a apresentada por (VODAK, et al. 2005) foi irradiada até 425 kGy e (KHMUROVSKA, et al. 2021) até 12.000 kGy. As doses escolhidas por (VODAK, et al. 2005) e (KHMUROVSKA, et al. 2021) foram bem acima das que estão no escopo dessa tese, mas elas foram escolhidas, pois apresentam uma tendência quando corpos cimentícios interagem com a radiação gama. Dentre os métodos para determinação da porosidade, (KHATTAB, 2012) e (VODAK, et al. 2005) utilizaram a técnica de intrusão por mercúrio, enquanto (KHMUROVSKA, et al. 2021) utilizou a microCT.

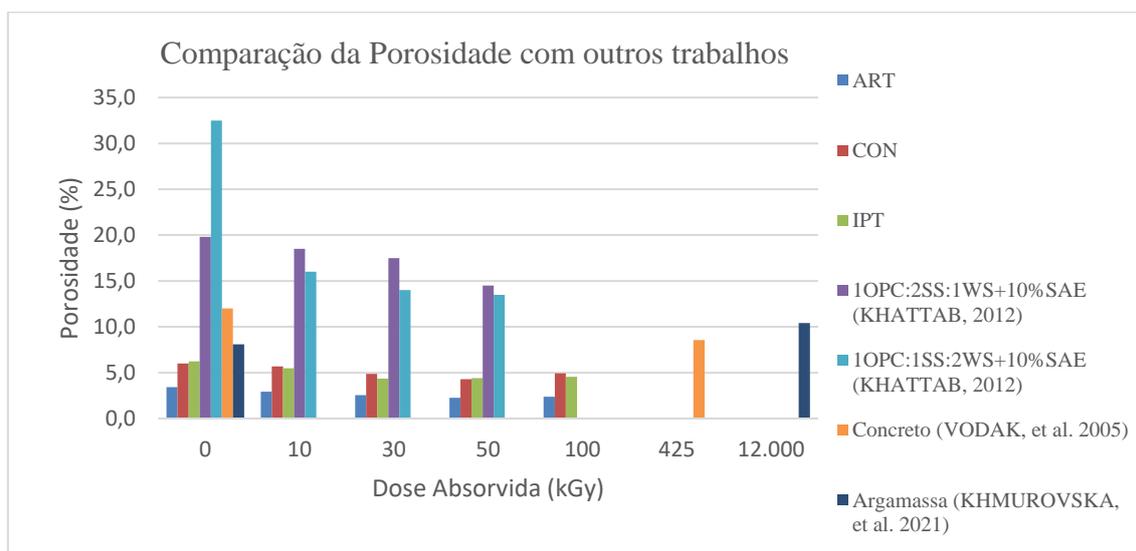


Figura 34 – Comportamento da porosidade.

É possível identificar que as amostras apresentadas nesse trabalho foram as que apresentaram a menor porosidade. Além disso, é possível perceber uma tendência de queda na porosidade quando há um aumento na dose absorvida. Outro ponto a se destacar é que até a dose absorvida de 425 kGy foi identificado uma redução na porosidade (VODAK, et al. 2005), enquanto que a dose absorvida de 12.000 kGy apresentou um aumento na porosidade em relação ao valor inicial (KHMUROVSKA, et al. 2021).

O concreto é um material homogêneo, mas a qualidade apresentada está relacionada diretamente ao tipo de material utilizado. A alta porosidade encontrada por (KHATTAB, 2012) em relação aos demais trabalhos é explicada pela utilização da areia branca, que tem uma grande capacidade de absorção de água, o que retira a água da mistura, fazendo com que não haja interação da água com todo o cimento utilizado na mistura.

Por se tratar de concreto, (VODAK, et al. 2005) utilizaram brita na mistura, o que faz com que haja uma necessidade de o material envolver o agregado graúdo, pois a brita possui propriedades inertes, ou seja, não reage com a mistura de argamassa. Enquanto isso, a argamassa desenvolvida por (KHMUROVSKA, et al. 2021) possui características mais próximas do grupo denominado como IPT, mas apresentou uma porosidade de 8,1%, para as amostras não irradiadas, enquanto o grupo IPT apresentou de 6,24%, essa diferença demonstra como a qualidade dos materiais e como o preparo durante a moldagem influenciam nas propriedades da argamassa.

Após a análise dos resultados determinados para a porosidade desse trabalho e dos encontrados na literatura é possível perceber que a porosidade apresenta uma tendência de queda, ficando bem nítido nas amostras de (KHATTAB, 2012) e (VODAK, et al. 2005). Também foi possível perceber que a irradiação provoca alterações que tendem a elevar o valor da porosidade, como a apresentada por (KHMUROVSKA, et al. 2021). Nesse trabalho não foi possível verificar alteração para o valor da porosidade, pois as médias permaneceram dentro do desvio padrão, no entanto, foi possível perceber uma tendência de diminuição na quantidade de poros quando os histogramas são analisados.

5.5. Resultado para o ensaio mecânico

A resistência à compressão foi determinada através de uma prensa hidráulica da Contenco conforme o descrito na seção 4.6. A tabela 14 apresenta as tensões médias que cada grupo conseguiu suportar durante a realização do ensaio.

Tabela 14 – Resistência média à compressão encontrada para cada grupo.

Corpo de Prova		Resistência à compressão (MPa)				
		0 kGy	10 kGy	30 kGy	50 kGy	100 kGy
ART	Média	33,5	36,0	38,9	42,0	30,2
	Desvio Padrão	5,55	4,41	1,9	5,3	2,9
	CV	16,59%	12,23%	4,9%	12,6%	9,6%
CON	Média	39,3	42,0	50,1	44,8	33,4
	Desvio Padrão	1,01	2,80	1,0	4,2	1,6
	CV	2,56%	6,67%	2,1%	9,3%	4,7%
IPT	Média	63,7	71,3	73,6	67,1	30,7
	Desvio Padrão	3,89	3,91	1,0	3,8	3,9
	CV	6,10%	5,48%	1,4%	5,7%	12,6%

A tabela 14 permite identificar que o traço IPT é o que obteve a maior resistência até a dose absorvida de 50 kGy, seguido pelo CON e pelo ART. Após a dose absorvida de 100 kGy, o grupo CON apresentou a maior resistência, seguido do IPT e do ART. Como o procedimento de confecção para todos os corpos de prova foi igual, o IPT (utilização de areia padronizada), demonstrou ser o com a maior resistência à compressão dentre a variação dos agregados miúdos utilizados até a dose absorvida de 50 kGy, enquanto o grupo ART foi o que apresentou a menor variação após a dose absorvida de 100 kGy.

Também é importante ressaltar que apenas o grupo IPT atingiu a resistência mínima prevista pela (NBR16697, 2018). O grupo ART apresentou um valor bem abaixo do que o previsto pela norma, indicando que, apesar da utilização de um cimento certificado, a mistura não apresentou a qualidade mínima exigida. O grupo CON apresentou um valor próximo do esperado para a utilização de um cimento de classe 40.

A interação do concreto com as doses absorvidas de 10, 30 e 50 kGy provocou um aumento na resistência à compressão em relação ao valor inicial. Os maiores valores registrados foram após a dose absorvida de 50 kGy, sendo de 25,4% para o grupo ART, de 13,9% para o grupo CON e de 5,5% para o grupo IPT. Após a dose absorvida de 100

kGy, todos os grupos apresentaram uma resistência mecânica menor que a inicial. A figura 35 apresenta a variação da capacidade mecânica em relação a dose recebida.

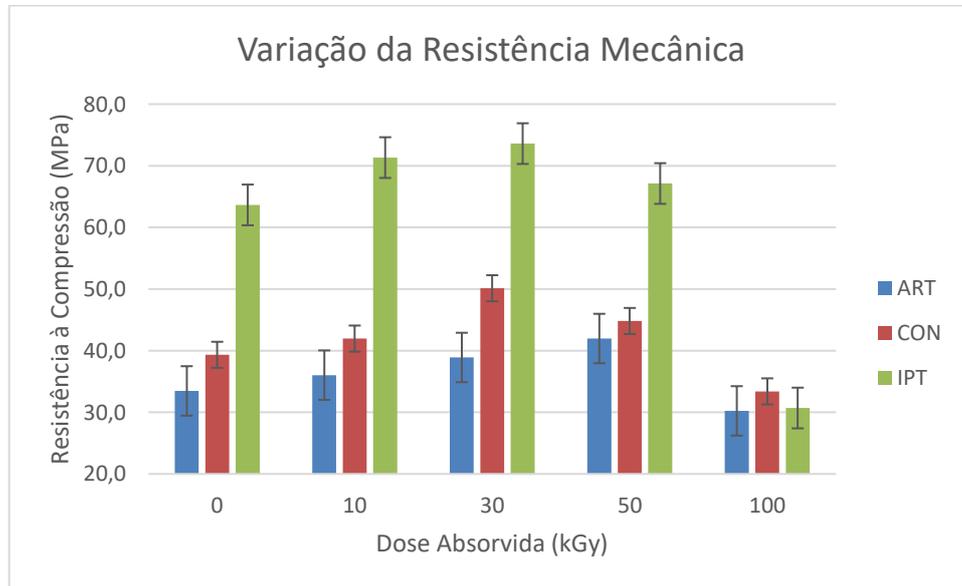


Figura 35 – Variação da resistência à compressão.

Assim como realizado para a porosidade, a figura 36 apresenta o gráfico com os valores determinados para a resistência a compressão nos trabalhos publicados de (KHATTAB, 2012), que realizou os ensaios após as doses absorvidas de 10, 30 e 50 kGy, e (VODAK, et al. 2005), que realizou o ensaio após as doses absorvidas de 300, 425 e 500 MGy. O trabalho de (KHMUROVSKA, et al. 2021) não apresentou a capacidade mecânica dos corpos de prova.

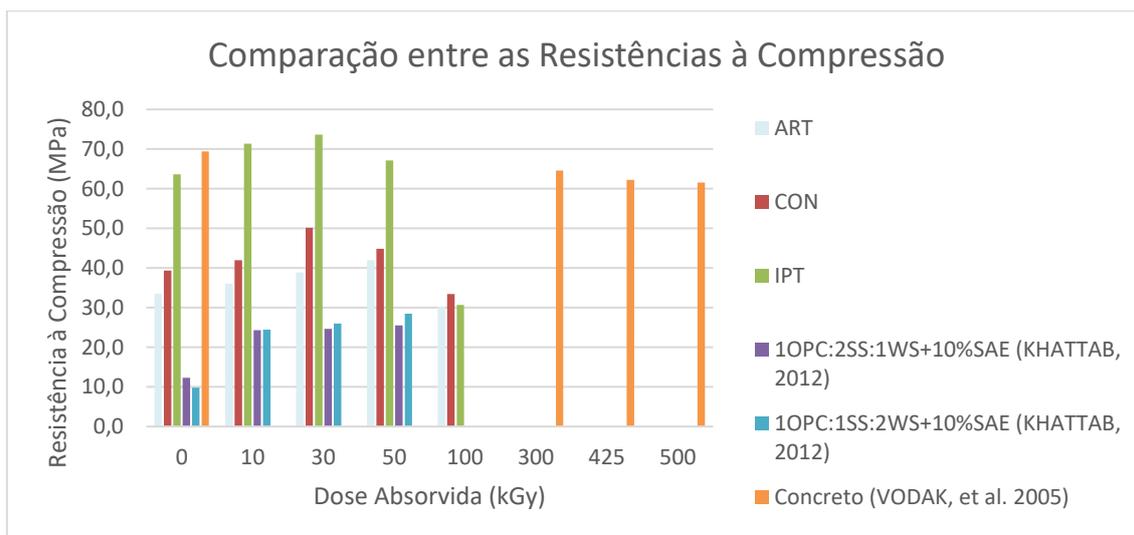


Figura 36 - Comparação da resistência à compressão as encontradas na literatura.

É possível verificar que as amostras desse trabalho apresentaram uma melhor resistência à compressão que a encontrada por (KHATTAB, 2012) e a amostra IPT apresentou uma resistência tão alta quanto a encontrada por (VODAK, et al. 2005), o que demonstra a diferença na utilização de uma areia padronizada para alcançar altos valores de resistência à compressão.

Até a dose absorvida de 50 kGy, é possível perceber que há um aumento na capacidade mecânica de materiais cimentícios, inclusive para as amostras utilizadas por (KHATTAB, 2012), enquanto para valores de dose absorvida acima de 100 kGy há uma queda, que também foi observada no trabalho de (VODAK, et al. 2005). É necessário destacar que após a dose absorvida de 300 kGy, as amostras apresentadas por (VODAK, et al. 2005) tiveram uma variação menor do que as dos grupos estudados. Segundo (SOO e MILIAN, 2001), a taxa de dose influencia o comportamento da matriz de cimento durante a interação.

5.6. Resultado para a difração de raios X

A difração de raios X foi determinada através do difratômetro da Bruker conforme o descrito na seção 4.7, após a realização do ensaio para determinação da resistência à compressão dos corpos de prova. A amostra de cimento CPIII foi coletada direto da embalagem de cimento. A figura 37 apresenta a variação no o percentual de compostos

crystalinos para os grupos ART, CON e IPT e da amostra de cimento CPIII. Ressalta-se que o software utilizado realiza uma análise semiquantitativa e não apresenta desvio padrão para os valores de concentração determinados.

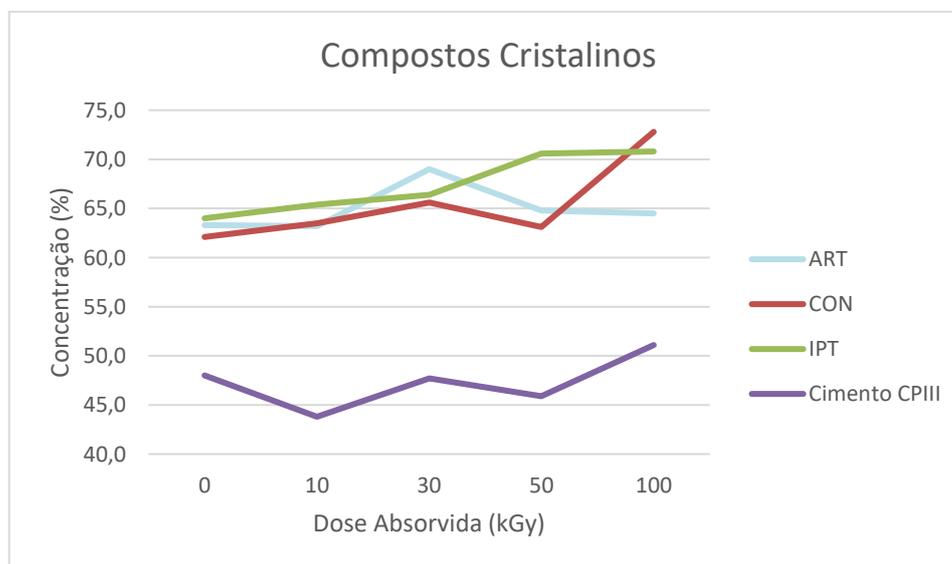


Figura 37 – Variação na quantidade de compostos cristalinos.

É possível perceber pela figura 37 que houve uma modificação na quantidade identificada dos compostos cristalinos. A quantidade identificada após a dose absorvida de 10 kGy apresenta um aumento para o grupo CON e IPT, enquanto o grupo ART e o cimento CPIII apresentaram uma queda. Após a dose absorvida de 30 kGy, todos os grupos apresentaram um aumento na quantidade identificada. Após a dose absorvida de 50 kGy, apenas o grupo IPT apresentou aumento. Após a dose absorvida de 100 kGy, os grupos ART e IPT apresentaram uma estabilização, enquanto o grupo CON e o cimento apresentaram um aumento. O aumento da concentração da estrutura cristalina implica em uma diminuição na concentração da estrutura amorfa, que são basicamente compostos pelo gel CSH (C3S e C2S) (MICHAUX, *et al.* 1990).

Esses resultados demonstram que a radiação gama atua nos compostos cristalinos, de forma a rearranjar as ligações para formarem novos compostos. Os compostos cristalinos são aqueles que apresentam uma ligação mais definida entre as moléculas. Na literatura, é possível encontrar uma diferente forma de interação da argamassa com a radiação. A figura 38 apresenta uma comparação do resultado encontrado para esse trabalho com o

encontrado por (ZATLOUKALOVÁ, et al. 2020). É importante notar que a dose utilizada por (ZATLOUKALOVÁ, et al. 2020) foi maior do que a utilizada nesse trabalho e as amostras tinham como característica a utilização de areia padronizada como agregado miúdo, mas um cimento utilizado continha gesso (CP), enquanto outro não continha gesso (CP/sem gesso).

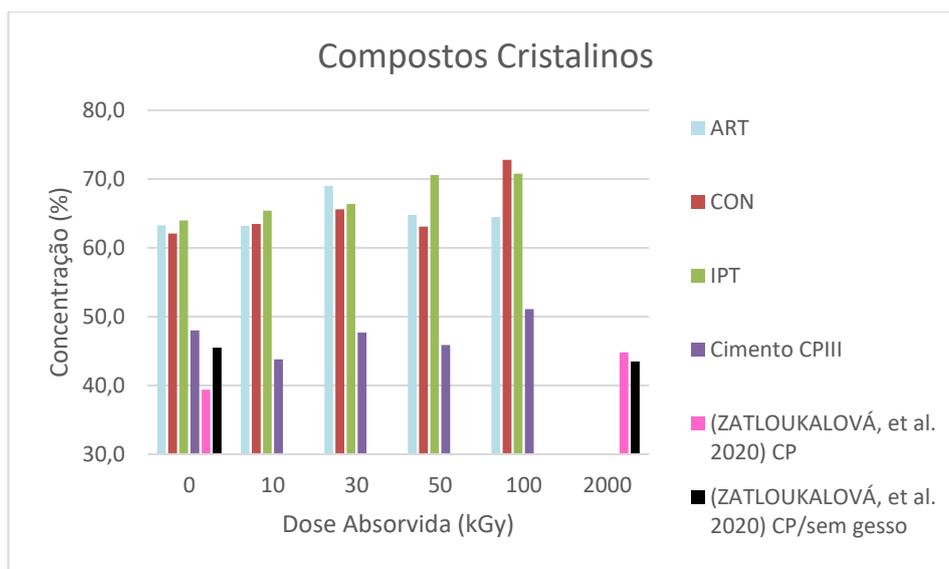


Figura 38 – Comparação da concentração de compostos cristalinos com a literatura.

A concentração de compostos cristalinos identificados nesse trabalho foi maior, apresentando um aumento na concentração, assim como o encontrado por (ZATLOUKALOVÁ, et al. 2020). A análise da figura 38 demonstra que a interação da radiação gama com a matriz de cimento provoca um aumento da estrutura cristalina até a dose de 2.000 kGy.

A tabela 15 apresenta os compostos com estrutura cristalina identificados após a realização da difração. Os grupos ART e IPT foram os que apresentaram a maior quantidade de elementos, 8 cada um, seguido pelo CON, que apresentou 5 elementos, e o cimento, que apresentou apenas 4 elementos. Dentre os compostos identificados, a calcita esteve presente em todas as amostras, sendo o principal produto identificado na carbonatação. Outro produto da carbonatação que pode ser identificada nos grupos ART, CON e IPT foi a vaterita (AUROY, et al. 2018), enquanto a aragonita (AUROY, et al. 2018) só foi identificada para as amostras de cimento.

A portlandita, que é o reagente na reação da carbonatação, só foi identificada para o IPT. A ausência da identificação da portlandita pode ser justificada pela dificuldade de identificação do composto pelo DRX. As figuras 39, 40, 41 e 42 apresentam o comportamento encontrado para as moléculas indicadoras da carbonatação, para os compostos amorfos e para o quartzo nos grupos estudados.

Tabela 15 - Composição química dos corpos de prova.

	ART					CON					IPT					Cimento CPHI				
	0 kGy (%)	10 kGy (%)	30 kGy (%)	50 kGy (%)	100 kGy (%)	0 kGy (%)	10 kGy (%)	30 kGy (%)	50 kGy (%)	100 kGy (%)	0 kGy (%)	10 kGy (%)	30 kGy (%)	50 kGy (%)	100 kGy (%)	0 kGy (%)	10 kGy (%)	30 kGy (%)	50 kGy (%)	100 kGy (%)
Calcita	10,2	5,9	3,4	7,9	15,9	12,7	5,4	4,6	6,1	11,0	5,5	4,5	4,6	7,4	15,5	33,4	34,0	34,8	40,5	40,3
Vaterita	11,9	9,0	6,9	8,3	4,0	12,2	14,2	13,3	17,9	4,1	8,1	10,3	10,2	13,0	3,5	-	-	-	-	-
Quartzo	21,4	25,0	33,3	29,6	20,5	53,9	53,2	67,2	41,7	69,6	57,1	58,8	63,3	54,6	56,2	-	-	-	-	-
Albita	26,6	24,7	25,1	17,0	24,5	-	-	-	-	-	5,0	5,5	3,5	4,8	5,5	-	-	-	-	-
Anite	3,9	3,8	4,0	6,2	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Microcline	22,0	28,3	23,7	27,3	24,6	19,3	25,5	12,0	32,1	13,4	15,4	16,7	14,6	16,3	14,5	-	-	-	-	-
Gesso	1,2	1,1	0,7	1,2	2,3	1,9	1,6	2,9	2,2	1,8	6,2	2,1	2,7	2,5	3,1	3,8	4,9	4,3	5,0	4,9
Richterita	2,9	2,3	2,7	2,5	3,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Portlandita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,2	1,2	0,6	0,6	0,5	-	-	-	-	-
Magnetita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6	0,9	0,6	0,8	1,2	-	-	-	-	-
Aragonita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,3	19,1	18,1	6,6	12,4
Alite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45,4	42,0	42,7	48,0	42,4

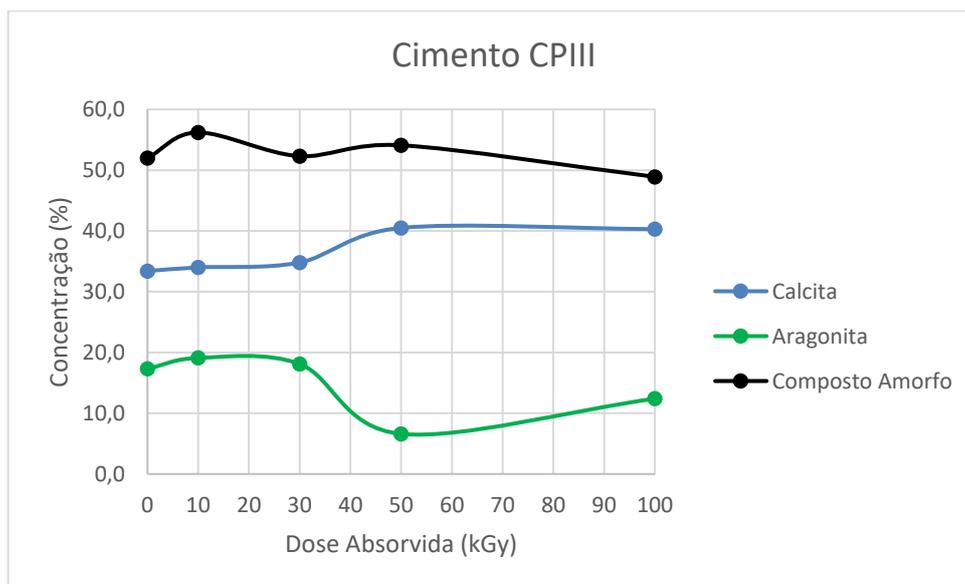


Figura 39 – Concentração para a calcita, para a aragonita e para os compostos amorfos.

A figura 39 apresenta o resultado da interação da radiação com apenas o cimento. A presença da calcita antes da irradiação demonstra a utilização do mineral para a fabricação do cimento. A aragonita é um composto identificado e é associado a ocorrência da carbonatação no cimento (AUROY, *et al.* 2018) e sua presença identificada pela DRX demonstra a sua utilização na fabricação do cimento CPIII. A dose absorvida de 10 kGy fez com que houvesse um aumento para a calcita, a aragonita e os compostos amorfos, porém apenas a calcita apresentou um pequeno aumento após a dose absorvida de 30 kGy. A dose absorvida de 50 kGy foi seguida por um aumento de 5,7% para a calcita, enquanto a aragonita apresentou uma queda de 11,5%. A quantidade de compostos amorfos também apresentou um pequeno aumento de 1,8% após a dose absorvida de 50 kGy. Após a dose absorvida de 100 kGy, a quantidade de calcita se manteve estável, enquanto a aragonita apresentou um aumento de 5,8%, mas com uma quantidade inferior ao apresentado antes da irradiação. A quantidade de compostos amorfos também apresentou uma queda de 5,2%, um valor próximo da alteração apresentada pela a aragonita, indicando que o mineral foi o principal responsável pela variação na quantidade de compostos cristalinos para a dose absorvida de 100 kGy.

O resultado da DRX para o cimento indica como a radiação afeta apenas as partículas do principal material para a fabricação da argamassa e do concreto. Apesar das moléculas não estarem hidratadas, foi possível perceber um aumento na concentração de calcita. O aumento final apresentado pela calcita foi de 6,9%, enquanto os compostos amorfos

apresentaram uma redução de 3,1% e a aragonita uma redução de 4,9%. Dessa forma, é possível afirmar que a incidência da radiação gama provocou alteração nas moléculas de cimento não hidratadas.

As figuras 40, 41 e 42 apresentam a variação para os grupos ART, CON e IPT. Na avaliação desses grupos, o quartzo foi acrescentado, pois é a principal molécula presente na composição dos agregados miúdos. Dessa forma, são apresentadas as análises para a variação da calcita, vaterita, quartzo e compostos amorfos. Na utilização da DRX para o grupo IPT foi possível identificar a portlandita, com isso, a análise para esse grupo também apresenta a portlandita.

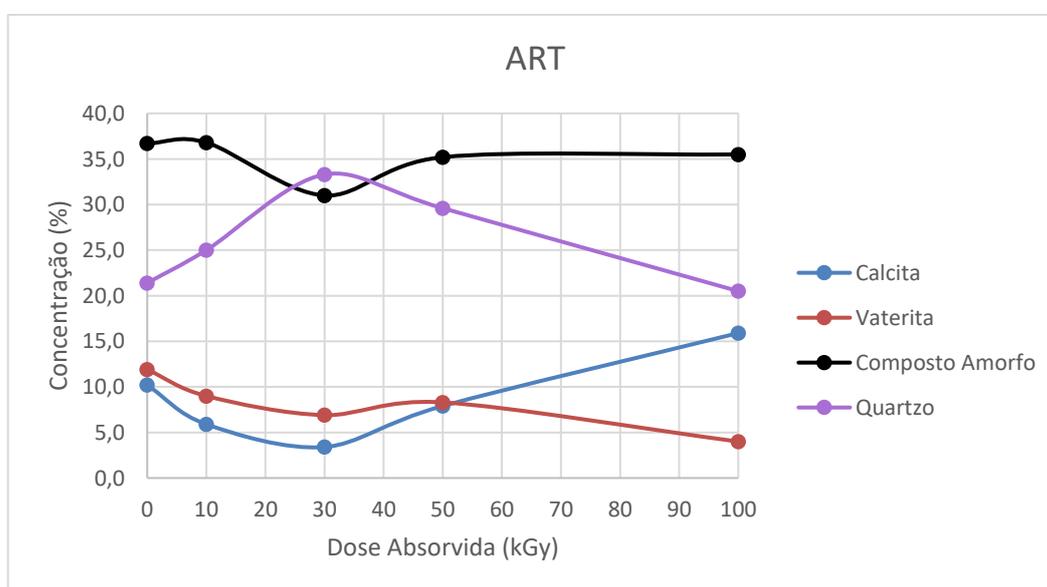


Figura 40 – Concentração para a calcita, para a vaterita, para os compostos amorfos e para o quartzo para o grupo ART.

A presença da calcita e vaterita para a amostra não irradiada do grupo ART demonstra a ocorrência da carbonatação natural, apesar da calcita também ter sido identificada na composição do cimento CPIII. Após a dose absorvida de 10 kGy, a quantidade relativa de calcita e vaterita apresentaram uma queda, enquanto a quantidade de compostos amorfos manteve-se estável e o quartzo apresentou um aumento. Após a dose absorvida de 30 kGy, a quantidade de calcita e vaterita diminuíram, assim como a quantidade de compostos amorfos. É possível perceber que o quartzo foi o elemento que apresentou o maior aumento após a dose absorvida de 30 kGy (8,3%). Após a dose absorvida de 50

kGy, a calcita e a vaterita apresentaram um aumento, assim como a quantidade de compostos amorfos, enquanto o quartzo apresentou uma diminuição na quantidade. O aumento da quantidade de compostos amorfos não está atrelado apenas a uma possível hidratação de grãos de cimento que não foram hidratados durante a mistura, mas também a uma modificação na estrutura molecular dos compostos. Após a dose absorvida de 100 kGy, o quartzo apresentou uma queda de 9,1% e a vaterita de 4,3% em relação aos valores determinados após a dose absorvida de 50 kGy. Os compostos amorfos apresentaram uma estabilidade e a calcita apresentou um aumento de 8,0%.

Ao comparar o resultado determinado para o grupo ART com o determinado para o cimento. A calcita apresentou um aumento significativo apenas após a dose absorvida de 50 kGy em relação a amostra não irradiada para o cimento, enquanto o aumento só foi perceptível após a dose absorvida de 100 kGy para o grupo ART. A variação apresentada pelos compostos amorfos também foi parecida, com uma diminuição após a dose absorvida de 100 kGy.

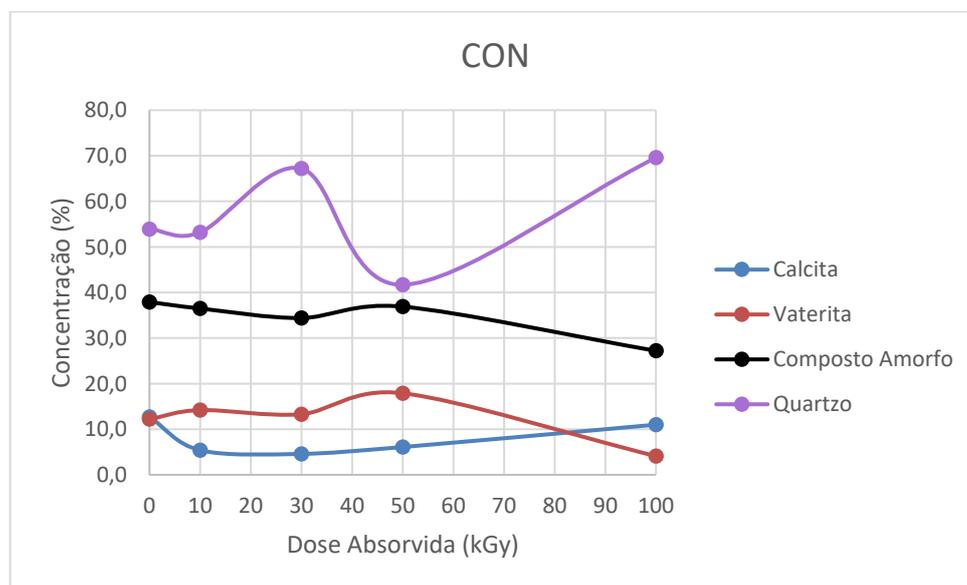


Figura 41 – Concentração para a calcita, para a vaterita, para os compostos amorfos e para o quartzo para o grupo CON.

Na figura 41, após a dose absorvida de 10 kGy, a calcita apresentou uma diminuição, enquanto a vaterita apresentou um aumento. O quartzo e os compostos amorfos apresentaram uma estabilidade. Após a dose absorvida de 30 kGy, a calcita e a vaterita

apresentaram uma estabilidade em relação a dose absorvida de 10 kGy. O quartzo apresentou um aumento de 13,3% e os compostos amorfos uma queda de 2,1% em relação a dose absorvida de 10 kGy. O aumento da quantidade de quartzo pode ser justificado pela redução dos compostos amorfos. Como os compostos amorfos são basicamente C3S e C2S, a sua redução indica a quebra dessas moléculas, seguida de reação entre o silício e o oxigênio, que foi capturado durante a mistura dos materiais e ficou aprisionado nos poros. Os resultados para a dose absorvida de 50 kGy apresentaram um aumento para a calcita, para a vaterita e para os compostos amorfos, enquanto o quartzo apresentou uma queda de 25,5%. Após a dose absorvida de 100 kGy, a vaterita e os compostos amorfos apresentaram uma queda nas quantidades identificadas, enquanto a calcita apresentou um aumento, porém uma quantidade menor que a inicial. O quartzo apresentou um aumento de 27,9% em relação ao encontrado para a dose absorvida de 50 kGy e de 15,7% em relação ao valor para as amostras não irradiadas. O aumento da calcita e do quartzo após a dose absorvida de 100 kGy são justificados pela diminuição apresentada pelos compostos amorfos, pois as moléculas de C3S e C2S foram desfeitas e reagiram com outros compostos para formarem a calcita e o quartzo.

Ao comparar o grupo CON com o cimento, apenas os compostos amorfos apresentam uma correlação. Após a dose absorvida de 100 kGy, a quantidade de compostos amorfos foi inferior ao valor encontrado antes da irradiação. A calcita apresentou uma diminuição para o grupo CON, enquanto para o cimento houve um aumento.

Ao comparar com o grupo ART, o grupo CON apresenta um comportamento parecido apenas em relação à vaterita, que apresentou um valor menor após a dose absorvida de 100 kGy em relação às amostras não irradiadas.

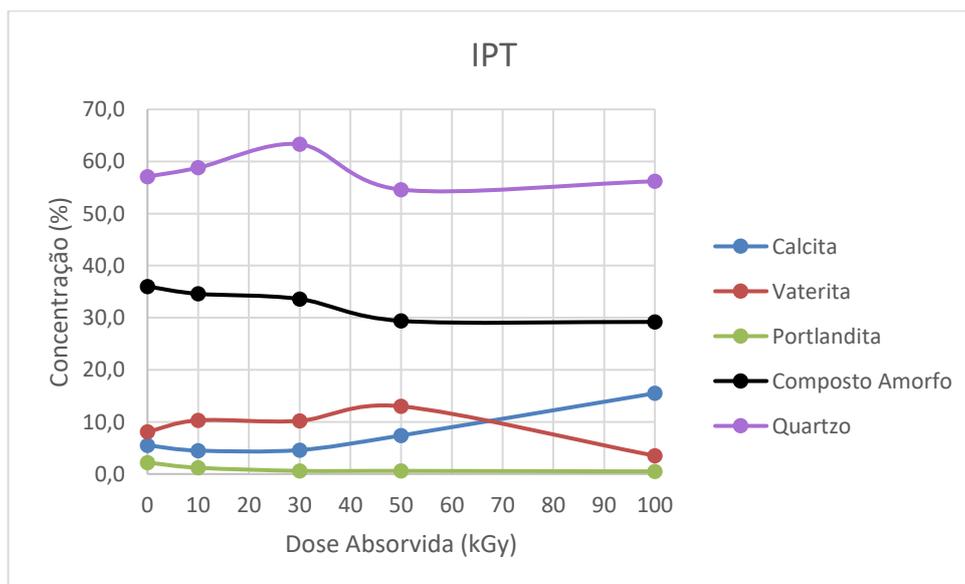


Figura 42 – Concentração para a calcita, para a vaterita, para os compostos amorfos e para o quartzo.

Na figura 42, o grupo IPT foi o único em que foi possível identificar a presença da portlandita. Após a dose absorvida de 10 kGy, a calcita, a portlandita e os compostos amorfos apresentaram uma queda, enquanto o quartzo e a vaterita apresentaram um aumento. Após a dose absorvida de 30 kGy, a calcita, a vaterita e os compostos amorfos mantiveram-se estáveis, enquanto o quartzo apresentou um aumento e a portlandita apresentou mais uma redução. A dose absorvida de 50 kGy apresentou uma estabilidade para a portlandita, uma queda para o quartzo e para os compostos amorfos e um aumento para a calcita e a vaterita. Após a dose absorvida de 100 kGy, a portlandita e os compostos amorfos mantiveram-se estáveis, enquanto a vaterita diminuiu e a calcita e o quartzo aumentaram.

Ao comparar o gráfico do grupo IPT com o grupo do cimento, é possível identificar uma semelhança com a calcita e os compostos amorfos. A calcita apresentou um aumento até a dose absorvida de 50 kGy para o cimento, enquanto o grupo IPT apresentou um crescimento até a dose absorvida de 100 kGy. O valor final para a calcita foi superior ao encontrado para as amostras não irradiadas. Enquanto isso, os compostos amorfos apresentam uma queda para o valor após a dose absorvida de 100 kGy em relação às amostras não irradiadas.

Ao comparar os grupos ART, CON e IPT, é possível perceber a semelhança no comportamento da vaterita entre as amostras, com um valor menor para dose absorvida

de 100 kGy que o inicial. O comportamento para o quartzo também foi parecido entre o ART e o IPT, com o valor após a dose absorvida de 100 kGy apresentando uma pequena variação de 0,9%. Apesar do valor ter sido menor, após a dose absorvida de 50 kGy o valor para o quartzo apresentou o seu maior valor, porém a variação para o grupo ART foi bem maior que a do grupo IPT.

É importante destacar que a DRX foi uma ferramenta que permitiu visualizar as modificações que ocorrem no cimento. A variação na quantidade de compostos amorfos é justificada com o aumento para o quartzo e para a calcita. Assim como a redução da quantidade de vaterita pode ser justificada pelo rearranjo molecular para a formação da calcita.

Por ser um material facilmente modificado e por depender dos minerais presentes na areia e no cimento, é importante comparar os valores encontrados nesse trabalho com os encontrados na literatura. A calcita foi o composto mais encontrado na literatura, por ser o principal produto da carbonatação. Dessa forma, a figura 43 apresenta uma comparação da variação da calcita com o encontrado em outros estudos.

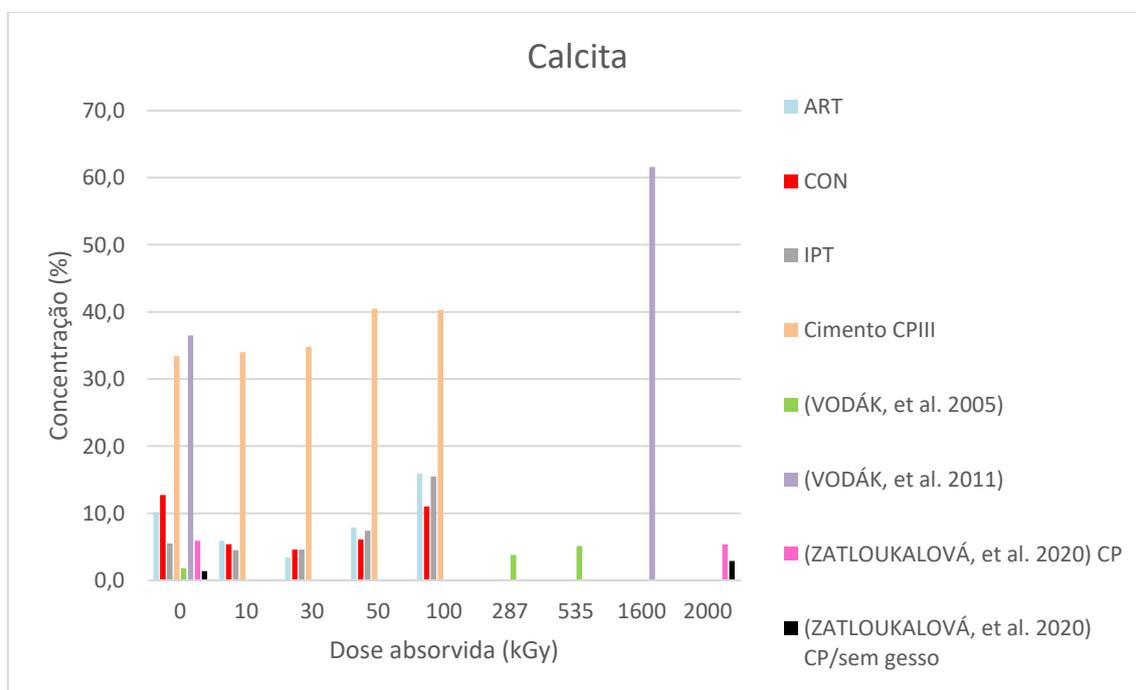


Figura 43 - Comparação da concentração encontrada para a calcita com a literatura.

A figura 43 apresenta apenas trabalhos que irradiaram as amostras com doses acima de 100 kGy, mas é possível perceber que a calcita apresenta um padrão de crescimento à medida que a dose aumenta. Após a dose absorvida de 2,0 MGy, foi possível visualizar uma estabilização no sinal da calcita para o cimento Portland com a utilização de gesso, enquanto o cimento sem gesso apresentou um aumento. Dessa forma, é possível concluir que o comportamento apresentado pela calcita está dentro do esperado.

A figura 44 apresenta uma comparação no valor encontrado para a portlandita. É possível perceber que a portlandita identificada para o grupo IPT apresentou um comportamento similar ao encontrado por outros estudos. Com o aumento da dose, passou a haver uma diminuição na quantidade de portlandita nas amostras. Também é possível perceber que a quantidade identificada para o IPT foi menor do que a encontrada em outros estudos. Dessa forma, é possível relacionar a redução no sinal da portlandita com o aumento da dose absorvida.

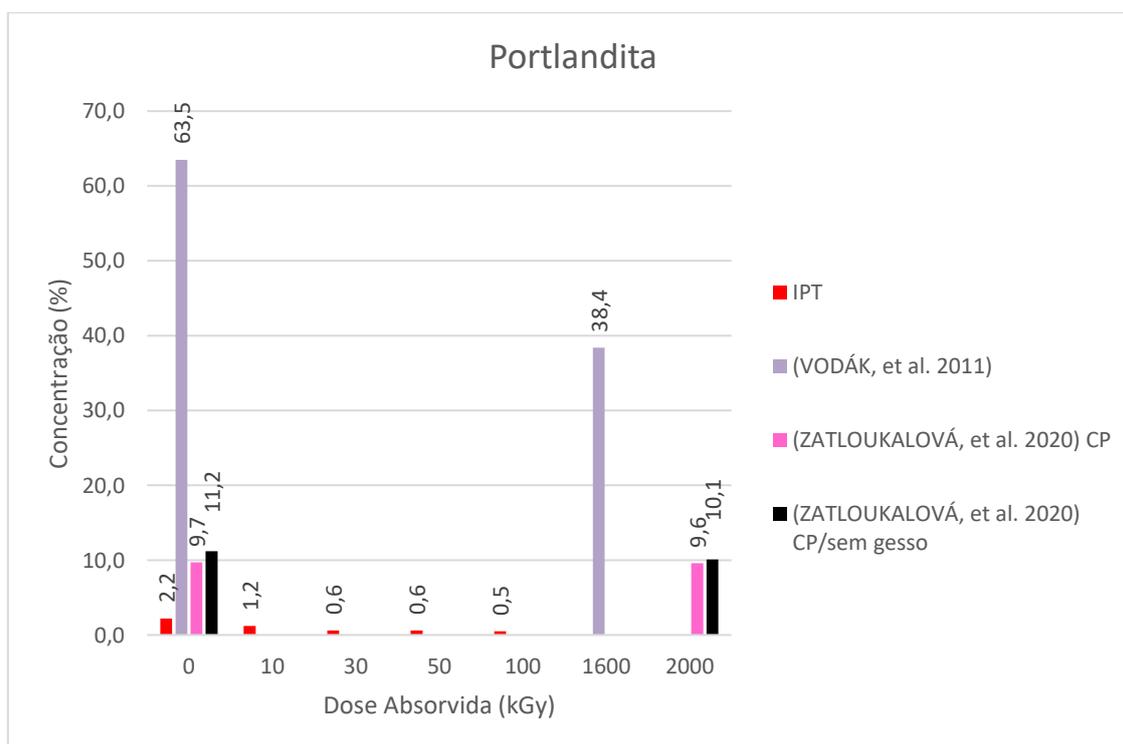


Figura 44 - Comparação da concentração encontrada para a portlandita com a literatura.

A figura 45 apresenta a variação da quantidade de compostos amorfos. A variação encontrada para os compostos amorfos para os grupos ART, CON, IPT e o cimento CPIII

apresentaram uma redução, sendo essa redução mais expressiva para o grupo CON, enquanto a menos expressiva foi encontrada para o grupo ART. A redução encontrada para a quantidade de compostos amorfos está de acordo com o determinado para o cimento Portland em outro estudo, enquanto a utilização de um cimento sem gesso apresentou um aumento na quantidade de moléculas amorfos (ZATLOUKALOVÁ, *et al.* 2020). É possível perceber uma tendência de redução da quantidade de moléculas amorfos à medida que a dose absorvida aumenta, porém esse resultado deve ser entendido apenas para a faixa correspondente entre 10 e 2000 kGy, sendo necessário a avaliação para doses maiores.

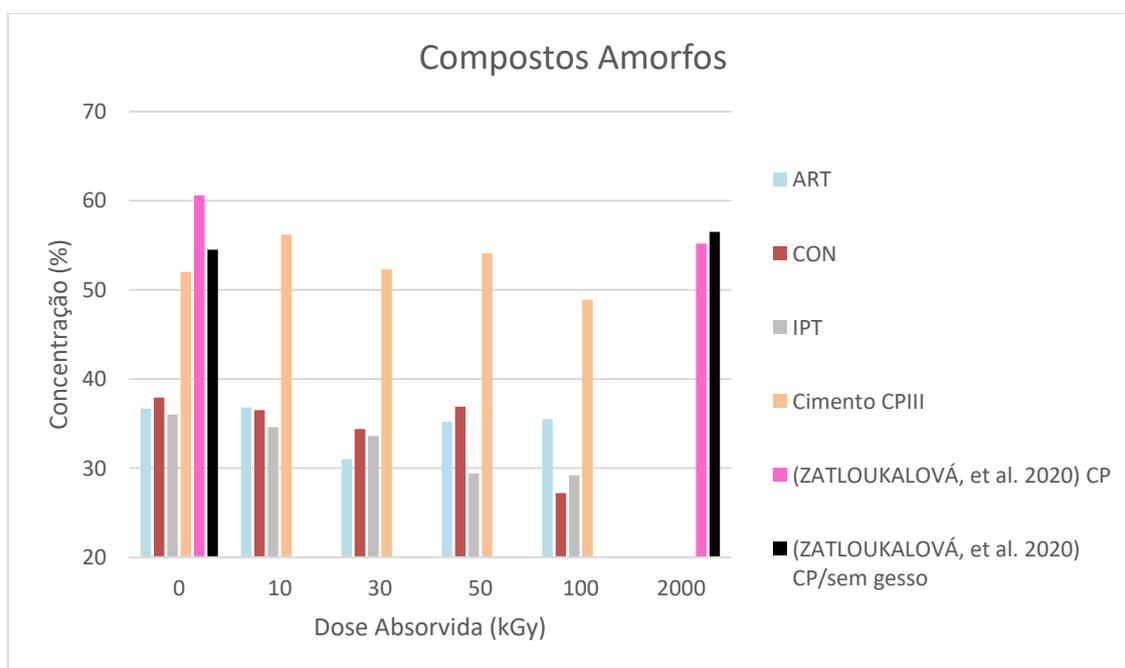


Figura 45 - Comparação da concentração encontrada para a portlandita com a literatura.

A figura 46 apresenta a variação na concentração de quartzo nas misturas de argamassa. Os grupos ART e IPT apresentaram uma pequena redução, apesar de ser identificado um aumento até a dose absorvida de 30 kGy, seguida de uma redução até o valor próximo ao inicial. O comportamento para o grupo CON foi diferente, pois o valor após a dose absorvida de 100 kGy foi maior que o inicial, passando de 53,9% para 69,6%. A menor quantidade de quartzo encontrada para o grupo ART era esperada pela natureza do agregado.

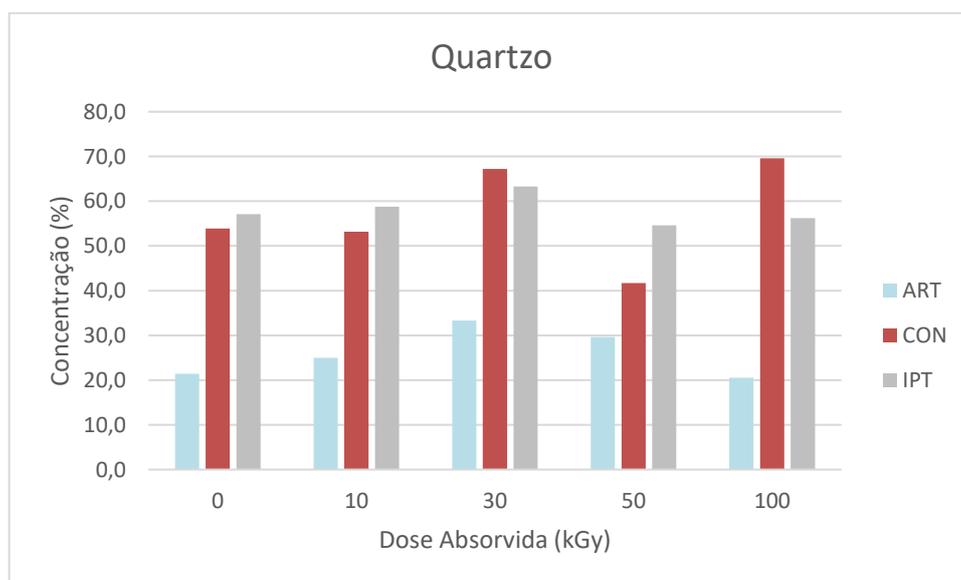


Figura 46 - Comparação da concentração d quartzo para os grupos ART, CON e IPT.

Por ser um produto da carbonatação, a vaterita também merece ser analisada. Não foram encontradas na literatura estudos relativos a vaterita na argamassa e no concreto de acordo com a dose absorvida, mas ela também foi identificada em um estudo em que o concreto foi exposto a uma carbonatação acelerada. Durante o estudo, a carbonatação acerada fez com que a quantidade de vaterita identificada nos traços estudados fosse maior que o triplo da identificada para a carbonatação natural (AUROY, *et al.* 2018). Dessa forma, a figura 47 apresenta a evolução da vaterita para os grupos aqui estudados.

O comportamento da vaterita é o mesmo após a dose absorvida de 100 kGy para os traços estudados, pois o valor encontrado é inferior ao valor inicial. A dose absorvida de 10 kGy apresentou um aumento para a quantidade de vaterita de todos os grupos, enquanto a de 30 kGy apresentou uma redução para os grupos ART e CON e uma estabilização para o grupo IPT. Após a dose absorvida de 50 kGy, os valores identificados voltaram a subir para todos os grupos, porém o ART apresentou um valor menor que o inicial. Dessa forma, é possível identificar uma tendência de redução da vaterita à medida que a dose absorvida aumenta, pois os valores para a dose absorvida de 100 kGy foram menores que os valores identificados para as amostras não irradiadas.

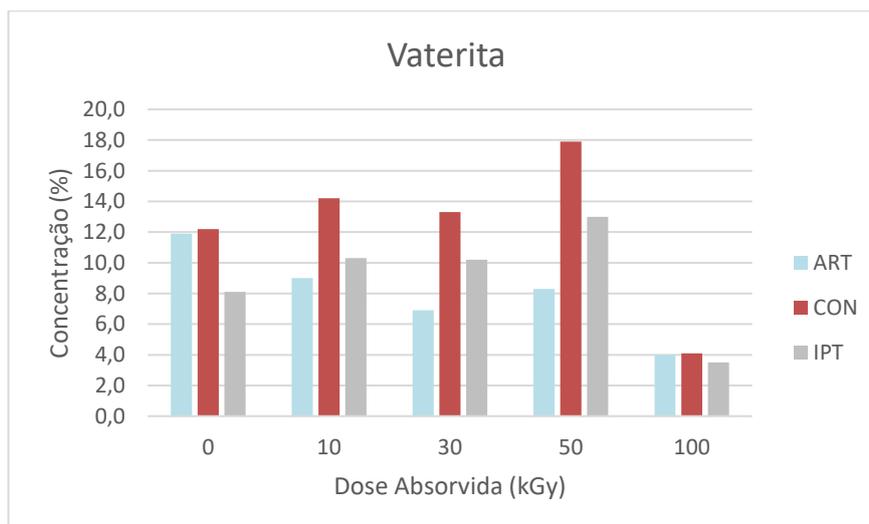


Figura 47 - Comparação da concentração de vaterita para os grupos ART, CON e IPT.

5.7. Resultado para a simulação através da plataforma WinXCOM

Após a realização da difração de raios X, foi possível verificar a composição elementar de cada amostra e o percentual de cada composto entre as estruturas cristalinas. Os dados presentes na tabela 16 são referentes aos compostos identificados pela DRX e os valores foram inseridos na plataforma WinXCOM, sendo possível aferir o valor teórico para as energias de 59,54 e 661,66 keV para os grupos ART, CON e IPT. Também foram utilizados os dados relativos ao cimento CPIII para determinar qual a influência dos agregados utilizados.

Tabela 16 – Fórmula química para os compostos identificados pela DRX.

Composto	Fórmula Química
Calcita	(CaCO ₃)
Vaterita	(CaCO ₃)
Quartzo	(SiO ₂)
Albita	(AlNaO ₈ Si ₃)
Anite	(Al _{2,52} Fe _{2,31} K _{0,92} O ₁₂ Si _{2,28})
Microcline	(AlK _{0,95} Na _{0,05} O ₈ Si ₃)
Gesso	(CaH ₄ SO ₆)
Richterita	(Ca _{1,02} Na _{2,98} Ni ₅ O ₂₄ Si ₈)
Portlandita	(CaH ₂ O ₂)
Magnetita	(Fe ₃ O ₄)
Aragonita	(CaCO ₃)
Alite	(Ca ₃ O ₅ Si)

As figuras 48 e 49 apresentam os gráficos encontrados para a atenuação por massa que foram determinados para cada amostras antes e depois de serem irradiadas para os grupos estudados e para o cimento para as energias de 59,54 keV e 662 keV após a execução da DRX.

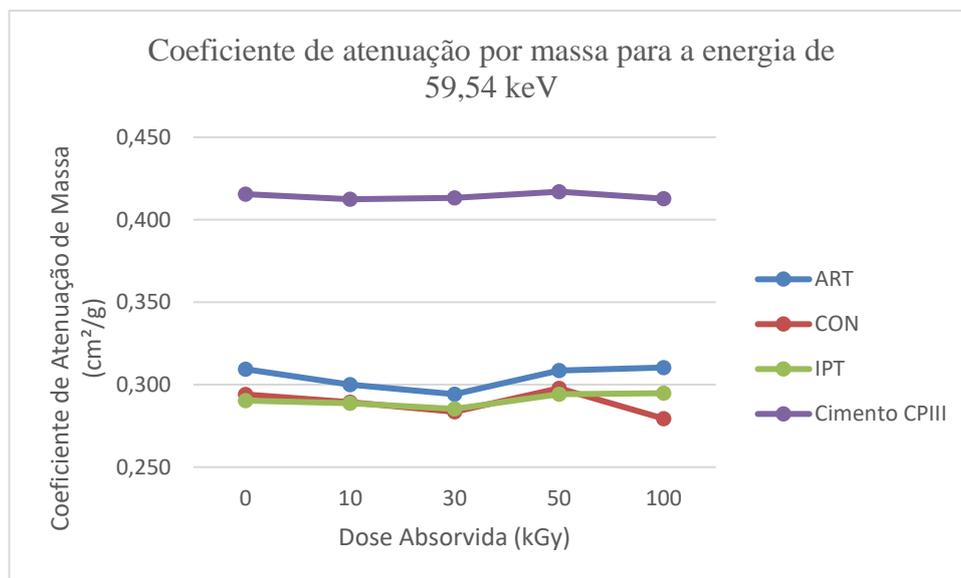


Figura 48 – Coeficiente de atenuação de massa para energia de 59,54 keV determinado através da plataforma WinXCOM.

É possível perceber que o cimento CPIII foi o que apresentou o maior coeficiente de atenuação por massa entre os grupos estudados. Ao analisar os valores para os grupos ART, CON e IPT, é possível identificar o ART com o maior valor para a atenuação de um fóton com energia de 59,54 keV, assim como o definido experimentalmente. A maior diferença encontrada para os grupos estudados foi após a dose absorvida de 100 kGy entre os grupos ART e CON, sendo essa diferença de 0,031 cm²/g, correspondendo a um aumento de 11,1% para o ART em relação ao CON.

Ao comparar os resultados obtidos pelo cimento CPIII com os outros corpos de prova, é possível verificar que a hidratação do cimento e a mistura com agregados miúdos, os quais costumam ser menos densos que o cimento, promovem uma redução no coeficiente de atenuação por massa. Essa redução varia entre 24,8 e 28,8% para o grupo ART, entre 28,6 e 32,3% para o grupo CON e entre 28,6 e 31% para o grupo IPT. Esse comportamento pode ser explicado pela existência de poros na mistura, que são

provenientes da captura de ar durante a mistura e das reações de hidratação que ocorrem no cimento que possui característica exotérmica.

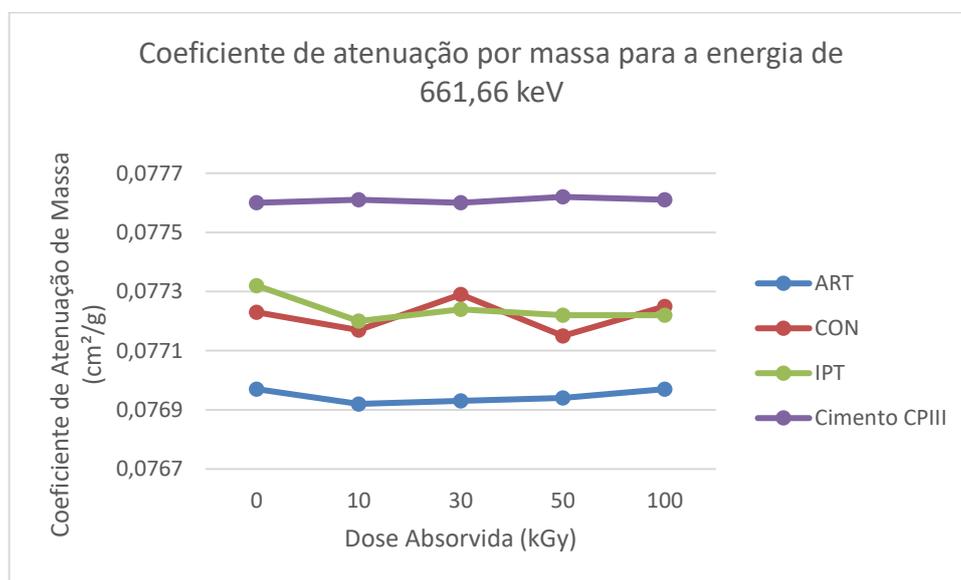


Figura 49 – Coeficiente de atenuação de massa para energia de 661,66 keV determinado através da plataforma WinXCOM.

Assim como para a energia de 59,54 keV, o cimento CPIII foi o que apresentou o maior coeficiente de atenuação por massa para a energia de 661,66 keV. Entre os grupos estudados, o ART obteve o menor valor para o coeficiente de atenuação de massa para a energia de 661,66 keV. Os grupos CON e IPT apresentaram valores próximos. Apesar dos valores encontrados para o ART terem sido menores, a maior diferença do grupo para o CON e o IPT ocorreu na dose absorvida de 30 kGy. A maior diferença encontrada para o grupo ART foi de $3,6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{g}$ em relação ao grupo CON, o que corresponde a uma redução de 0,47%.

A figura 49 também permite identificar a diferença que ocorre ao hidratar o cimento e misturá-lo com agregados miúdos em relação ao coeficiente de atenuação por massa. A redução apresentada por cada traço foi entre 0,81 e 0,89% para o grupo ART, entre 0,40 e 0,61% para o grupo CON e entre 0,36 e 0,53% para o grupo IPT. Uma menor diferença era esperada ao comparar as variações para a energia de 661,66 keV com a energia de 59,54 keV. A menor variação está relacionada ao fato de o fóton possuir uma maior energia e ser necessário que haja elementos mais densos para que possa realizar uma

maior atenuação. Como a densidade entre os grupos estudados é próxima da encontrada para o cimento, tem-se uma pequena variação no coeficiente de atenuação à medida que a energia aumenta.

A figura 50 apresenta uma comparação gráfica para os coeficientes encontrados para energia de 59,54 keV. Para ambas as técnicas o grupo ART foi o que obteve o valor mais elevado para o coeficiente de atenuação de massa. Os valores do WinXCOM mostraram que o IPT foi o que apresentou menor valor, mas experimentalmente os valores para os grupos CON e IPT não apresentaram variações significativas.

Os valores determinados através do WinXCOM para os grupos CON e IPT variaram dentro do desvio padrão determinado para os valores experimentais. Para o grupo ART, os valores determinados através do WinXCOM estiveram dentro do desvio padrão apenas para dose absorvida de 50 kGy.

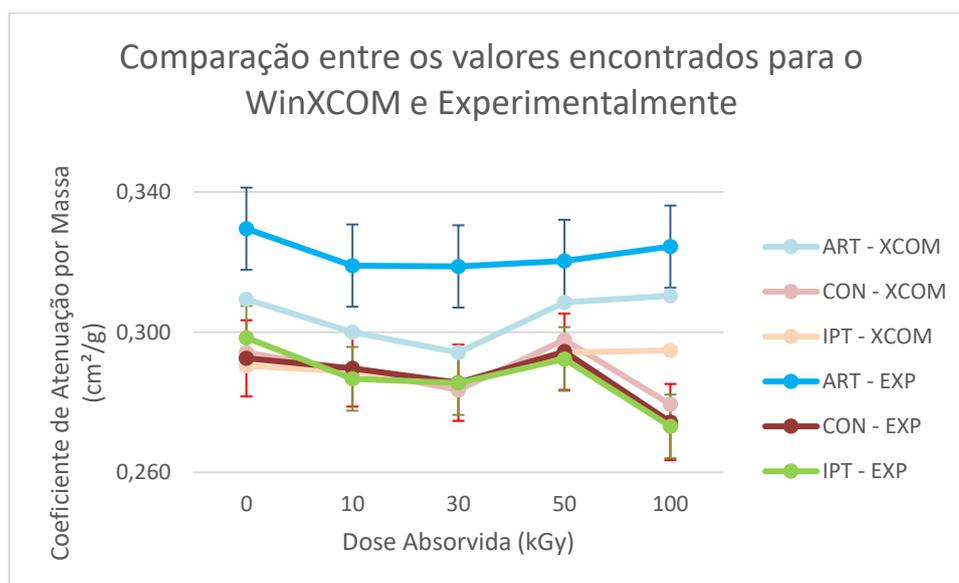


Figura 50 – Comparação entre os coeficientes de atenuação de massa teórico e experimental para a energia de 59,54 keV.

A figura 51 apresenta uma comparação gráfica para os coeficientes encontrados para energia de 662 keV. Para ambas as técnicas o grupo ART foi o que apresentou o menor valor. Os valores do WinXCOM mostraram que os grupos CON e IPT apresentaram comportamento semelhante para todas as doses absorvida, assim como ocorreu experimentalmente. Os valores experimentais foram superiores dos resultados teóricos,

com exceção do IPT após a dose absorvida de 30 kGy e para os grupos ART e CON após a dose absorvida de 50 kGy.

Os valores determinados através da plataforma WinXCOM estiveram dentro do desvio padrão determinado experimentalmente, com exceção das amostras não irradiadas, que apresentaram uma variação de 5,30, 4,21 e 4,84% para os grupos ART, CON e IPT respectivamente.

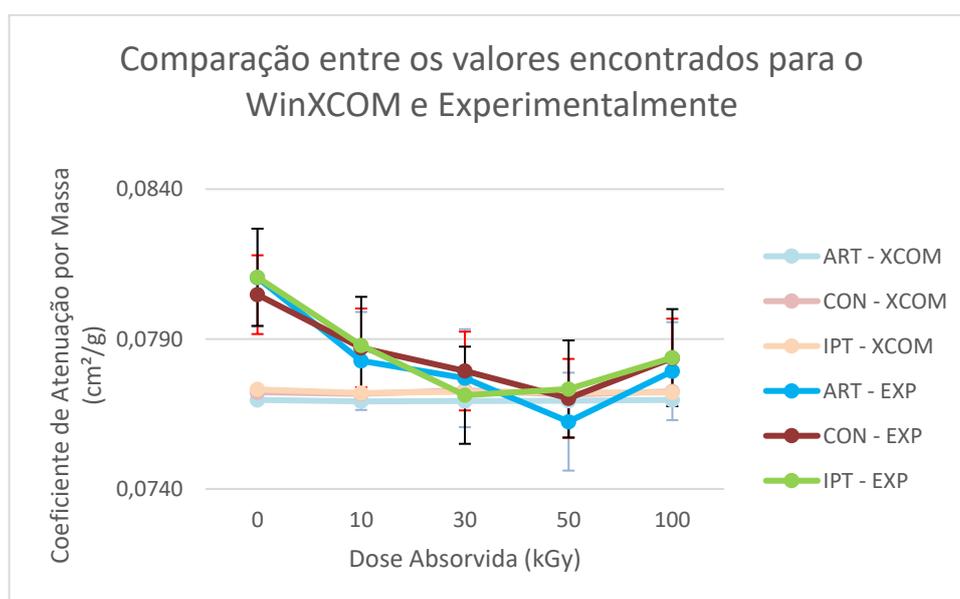


Figura 51 – Coeficiente de atenuação de massa teórico e experimentalmente para a energia de 662 keV.

A tabela 17 apresenta os valores encontrados para os erros relativos para a energia de 59,54 keV, enquanto a tabela 18 apresenta os valores para a energia de 662 keV. Ressalta-se que os valores determinados através da plataforma WinXCOM são considerados como referencial teórico.

A tabela 17 apresenta o maior erro encontrado para a energia de 59,54 keV foi para o grupo ART após a dose absorvida de 30 kGy, sendo um erro relativo de 8,34%. O menor valor encontrado para o erro relativo foi para o grupo IPT também após a dose absorvida de 30 kGy de 0,06%. A análise conjunta da figura 50 e da tabela 17 indicam uma boa convergência entre os dois métodos para a energia de 59,54 keV.

A tabela 18 apresenta os erros para a energia de 662 keV. O maior erro identificado foi para o grupo ART não irradiado, sendo de 5,30% para o erro relativo. O menor erro

relativo encontrado foi de 0,15% para o grupo IPT após a dose absorvida de 50 kGy. Assim como para a energia de 59,54 keV, os resultados da tabela 18 e da figura 51 mostram uma boa convergência entre os métodos utilizados.

Ressaltasse que os valores encontrados dos erros relativos para a energia de 662 keV é menor do que o encontrado por (DAMLA, *et al.* 2012), que variou entre 6 e 8%. A variação do erro relativo encontrada para a energia de 59,54 keV é comparável a encontrada por (DAMLA, *et al.* 2012) na energia de 662 keV.

Tabela 17 – Erro relativo encontrados entre o WinXCOM e o determinado experimentalmente para a energia de 59,54 keV.

	0 kGy	10 kGy	30 kGy	50 kGy	100 kGy
	Relativo (%)				
ART	6,50%	6,33%	8,34%	3,83%	4,50%
CON	0,53%	0,12%	0,73%	1,14%	1,81%
IPT	2,76%	0,70%	0,06%	0,63%	7,35%

Tabela 18 – Erro relativo encontrados entre o WinXCOM e o determinado experimentalmente para a energia de 662 keV.

	0 kGy	10 kGy	30 kGy	50 kGy	100 kGy
	Relativo (%)				
ART	5,30%	1,75%	0,99%	0,90%	1,25%
CON	4,21%	1,99%	0,83%	0,16%	1,44%
IPT	4,84%	2,06%	0,15%	0,15%	1,50%

Por apresentar um baixo erro e uma baixa variação para o coeficiente de atenuação por massa após cada dose absorvida nos grupos estudados, é possível identificar uma energia intermediária entre as energias de 59,54 e 662 keV e definir a equação da curva de atenuação. Para esse cálculo foi escolhido a energia do fóton encontrado para o isótopo Ra²²⁶, com energia de 186,21 keV. A tabela 19 apresenta o valor encontrado através da

plataforma WinXCOM para as energias de 59,54, 186,21 e 662 keV para os grupos estudados. Como a progressão das doses absorvidas não apresentaram modificações significativas para o coeficiente de atenuação de massa, foi realizada uma média aritmética entre os valores determinados para cada dose absorvida. As médias encontradas foram utilizadas para definir as curvas de atenuação e definir a equação para cada traço, as quais estão apresentadas nas figuras 52, 53, 54 e 55.

Tabela 19 – O coeficiente de atenuação de massa determinados através da WinXCOM.

Grupo	59,54 keV (g/cm ²)	186,21 keV (g/cm ²)	662 keV (g/cm ²)
ART	0,305	0,130	0,077
CON	0,289	0,130	0,077
IPT	0,291	0,130	0,077
Cimento CPMIII	0,414	0,135	0,078

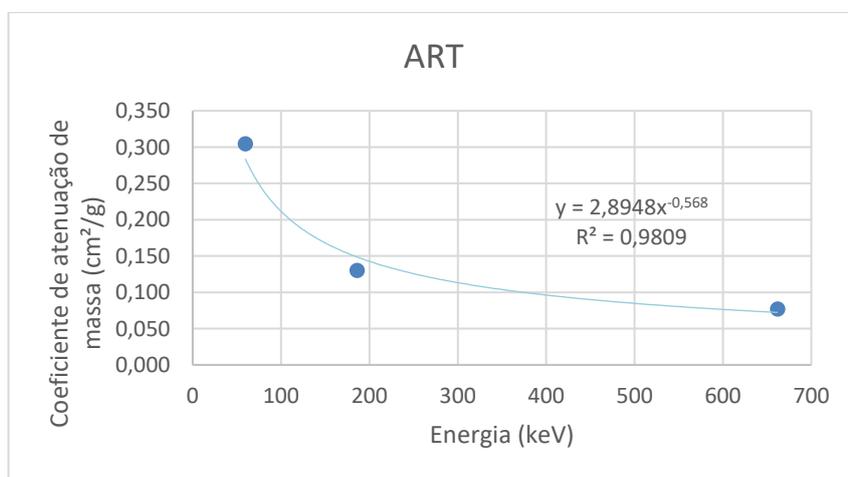


Figura 52 – Equação para o coeficiente de atenuação por massa para o grupo ART.

A figura 52 apresenta a equação determinada para o coeficiente de atenuação por massa para o grupo ART. O valor do R² demonstra uma boa confiabilidade para a curva encontrada para a faixa energética entre 59,54 e 662 keV.

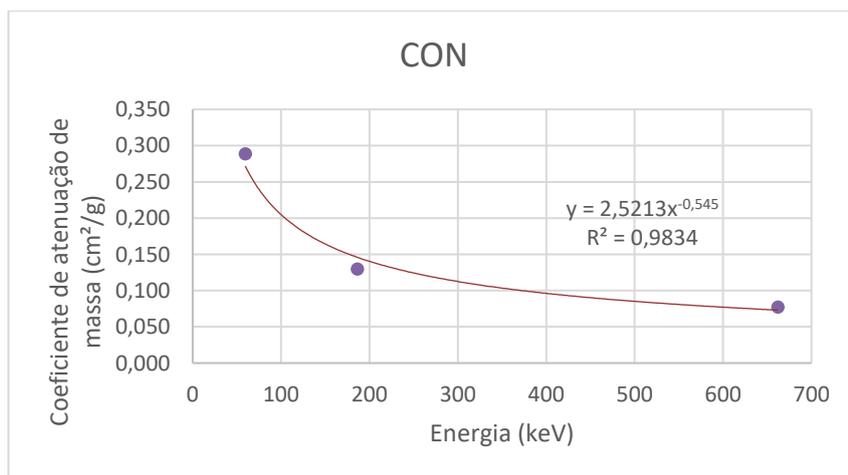


Figura 53 – Equação para o coeficiente de atenuação por massa para o grupo CON.

A figura 53 apresenta a equação determinada para o coeficiente de atenuação por massa para o grupo CON. O valor do R^2 demonstra uma boa confiabilidade para a curva encontrada para a faixa energética entre 59,54 e 662 keV.

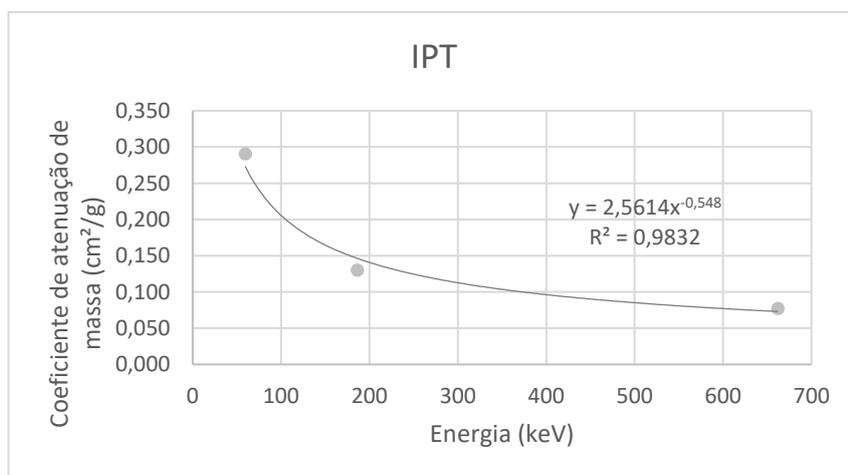


Figura 54 – Equação para o coeficiente de atenuação por massa para o grupo IPT.

A figura 54 apresenta a equação determinada para o coeficiente de atenuação por massa para o grupo IPT. O valor do R^2 também demonstra uma boa confiabilidade para a curva encontrada para a faixa energética entre 59,54 e 662 keV.

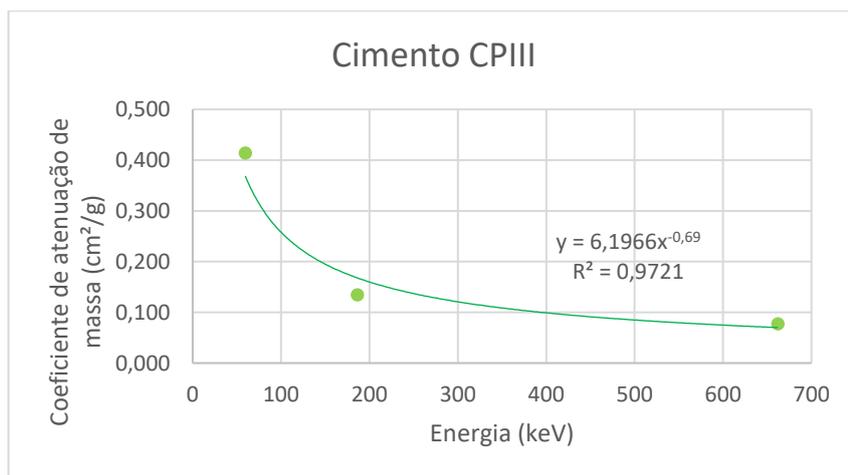


Figura 55 – Equação para o coeficiente de atenuação por massa para o cimento CIII.

A figura 55 apresenta a equação determinada para o coeficiente de atenuação por massa para o cimento CIII. O valor do R^2 demonstra uma boa confiabilidade para a curva encontrada para a faixa energética entre 59,54 e 662 keV, apesar de ter sido o menor valor encontrado para as amostras estudadas.

5.8. Discussão dos Resultados Obtidos

A interação do concreto com as doses absorvidas de 10, 30, 50 e 100 kGy provocaram alterações na estrutura interna do concreto, que puderam ser verificadas ao analisar os histogramas de poros, o aumento e diminuição na resistência à compressão e as modificações nas estruturas cristalinas. A modificação da porosidade resultou em um aumento da resistência à compressão, que pode ser confirmado através da alteração do histograma.

Apesar da determinação dos histogramas de cada grupo, também foi acompanhada a evolução de um poro para cada grupo. Esse acompanhamento foi realizado através da ferramenta *Measure* do programa CTAn, em que é possível medir o comprimento de um objeto através de dois pontos escolhidos pelo usuário. As figuras 56, 57 e 58 apresentam a evolução de um poro à medida que dose absorvida aumentava para os grupos ART, CON e IPT respectivamente. É importante notar que o comprimento aferido através da ferramenta apresentou um valor acima do determinado através do método de encaixe de esferas, que utiliza uma metodologia de cálculo diferente. Ressalta-se que cada medida

apresentada apresenta um erro de 1 pixel, ou seja, 60,8 mm tanto para mais quanto para menos.

A figura 56 apresenta o mesmo *slice* de uma amostra do grupo ART antes e após ser irradiada. Nesta imagem é possível perceber que um poro possuía um diâmetro de 4,29 mm antes de ser irradiado, porém o valor apresentado após a dose absorvida de 10 kGy foi de 4,11 mm, apresentando uma redução no diâmetro corresponde a 2,26%. Após a dose absorvida de 30 kGy, o mesmo poro apresentou o diâmetro de 3,85 mm, uma redução de 10,4% em relação ao diâmetro inicial, e de 3,73 mm, uma redução de 12,9%, após a dose absorvida de 50 kGy. Após a dose absorvida de 100 kGy o mesmo poro passou a apresentar um tamanho de 4,21 mm, o que representa uma redução de 2,03% em relação ao poro inicial, mas um aumento de 12,8% no diâmetro em relação à dose absorvida de 50 kGy.

A variação apresentada por esse poro específico indica um preenchimento do poro com um material após cada dose absorvida. Diante do que foi identificado para a estrutura cristalina, uma modificação na concentração dos agregados miúdos provocou a alteração no diâmetro do poro. Também é possível perceber que apesar o método de preenchimento de esferas, que foi utilizado para a caracterização do histograma, não identificou uma quantidade significativa de poros com esse diâmetro.

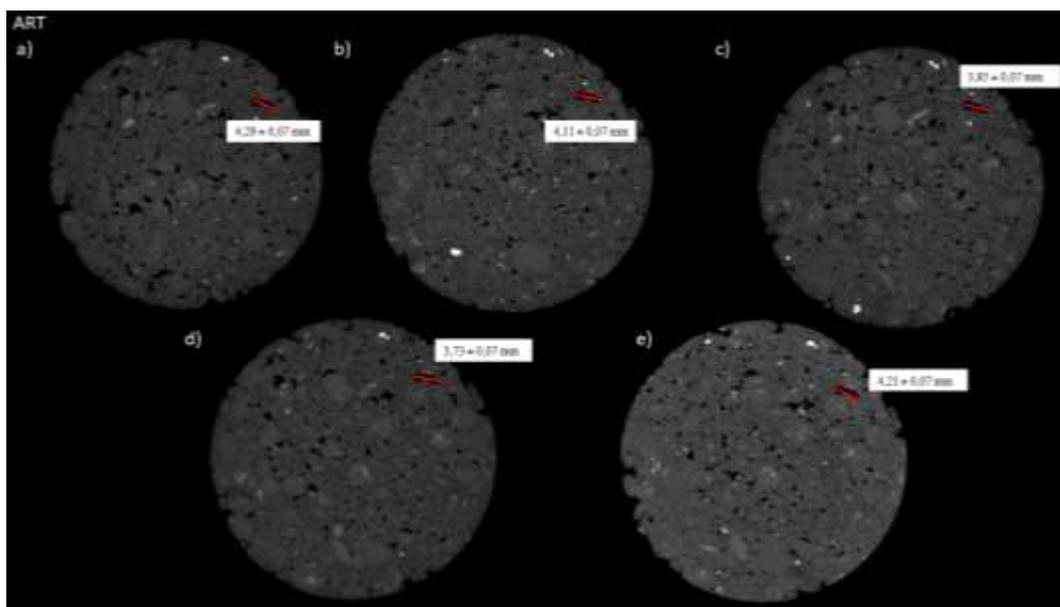


Figura 56 – Comparação de um *slice* de uma amostra do grupo ART, em que a imagem a) representa a amostra não irradiada; b) a amostra irradiada com a dose de 10 kGy; c) a amostra irradiada com a dose de 30 kGy; d) a amostra irradiada com a dose de 50 kGy; e e) a amostra irradiada com a dose de 100 kGy.

A figura 57 apresenta o mesmo *slice* de uma amostra do grupo CON antes e após ser irradiada. Nesta imagem é possível perceber que um poro possuía um diâmetro de 5,22 mm antes de ser irradiado. Após a dose absorvida de 10 kGy, o diâmetro apresentado pelo poro passou a ser de 5,17 mm, o que representa uma redução de 0,98% no diâmetro. O diâmetro variou para 5,10 e 5,05 mm após as doses absorvidas de 30 e 50 kGy, representando uma redução de 2,32 e 3,25% em relação ao diâmetro inicial respectivamente. Após a dose de 100 kGy, o mesmo poro apresentou um diâmetro de 4,87 mm, o que representa uma redução de 6,87% em relação ao diâmetro inicial.

Assim como para o grupo ART, o grupo CON apresentou uma redução no diâmetro do poro escolhido. Essa redução está relacionada a modificação da concentração de compostos cristalinos presentes na amostra. Após a dose de 100 kGy, a amostra do grupo ART apresentou um aumento no diâmetro quando comparado à dose de 50 kGy, porém, para o grupo CON, o mesmo poro continuou reduzindo à medida que a dose absorvida aumentava.

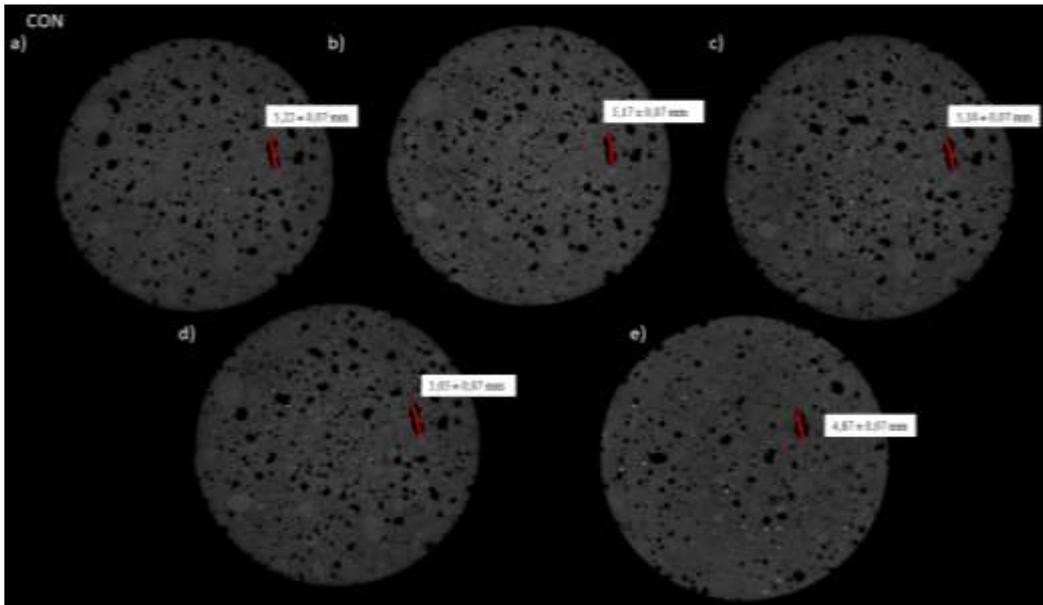


Figura 57 - Comparação de um *slice* de uma amostra do grupo CON, em que a imagem a) representa a amostra não irradiada; b) a amostra irradiada com a dose de 10 kGy; c) a amostra irradiada com a dose de 30 kGy; d) a amostra irradiada com a dose de 50 kGy; e e) a amostra irradiada com a dose de 100 kGy.

A figura 58 apresenta o mesmo *slice* de uma amostra do grupo IPT antes e após ser irradiada. Nesta imagem é possível perceber que um poro possuía um diâmetro de 1,91 mm antes de ser irradiado, porém o valor apresentado foi de 1,74 mm após a dose absorvida de 10 kGy, uma redução no diâmetro correspondente a 9,45%. Após a dose absorvida de 30 kGy, o mesmo poro apresentou o diâmetro de 1,69 mm, enquanto o valor de 1,58 mm foi medido após a dose de 50 kGy, representando uma redução de 12 e 17,8% respectivamente em relação ao diâmetro inicial. Após a dose de 100 kGy, o mesmo poro para a ter um diâmetro de 2,13 mm, um aumento de 11,2% em relação ao diâmetro inicial.

Assim como os outros grupos, o IPT apresentou uma redução à medida que a dose absorvida aumentava, porém foi o único que apresentou um valor acima do inicial após a dose de 100 kGy. Esse comportamento é reflexo da análise do histograma, em que foi possível perceber um aumento na frequência de poros com o diâmetro mais elevado à medida que a dose absorvida aumentava.

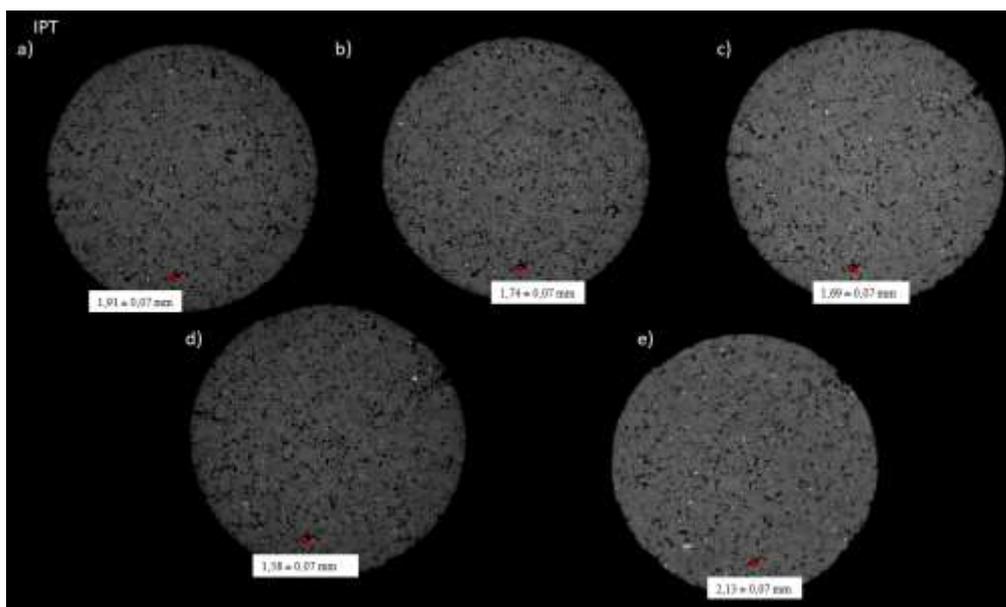


Figura 58 - Comparação de um *slice* de uma amostra do grupo IPT, em que a imagem a) representa a amostra não irradiada; b) a amostra irradiada com a dose de 10 kGy; c) a amostra irradiada com a dose de 30 kGy; d) a amostra irradiada com a dose de 50 kGy; e e) a amostra irradiada com a dose de 100 kGy.

Assim como a redução da porosidade provoca um aumento na resistência aos esforços à compressão, a interação com a radiação provoca uma redução na porosidade. Essa redução ocorre por causa do fenômeno de carbonatação induzido pela radiação, conforme o apontado por (VODÁK, *et al.* 2005), por (VODÁK, *et al.* 2011), por (RAMACHANDRAN, *et al.* 2017) e por (POTTS, *et al.* 2021).

A figura 59 apresenta a relação entre a evolução da porosidade e da resistência à compressão a medida em que a dose absorvida por cada grupo aumenta. Nela é possível verificar de forma gráfica como a tendência de diminuição da porosidade de cada grupo influencia na resistência à compressão. O grupo ART apresentou os menores valores tanto para a porosidade como para a capacidade mecânica. Enquanto o grupo IPT apresentou o maior valor para a resistência à compressão, apesar de apresentar a porosidade mais alta para as doses absorvidas de 0 e 50 kGy. O grupo CON passou a apresentar o maior valor para resistência mecânica e da porosidade para a dose absorvida de 100 kGy, mas uma resistência menor que do mesmo grupo não irradiado. Esses resultados reforçam a importância da utilização de agregados miúdos de qualidade, em que há um controle da granulometria para que haja um melhor preenchimento dos vazios que irão surgir durante a mistura e cura do material. A importância do agregado utilizado pode ser destacada com

os resultados do grupo ART, que foi o que apresentou a menor porosidade, mas também a menor resistência à compressão.

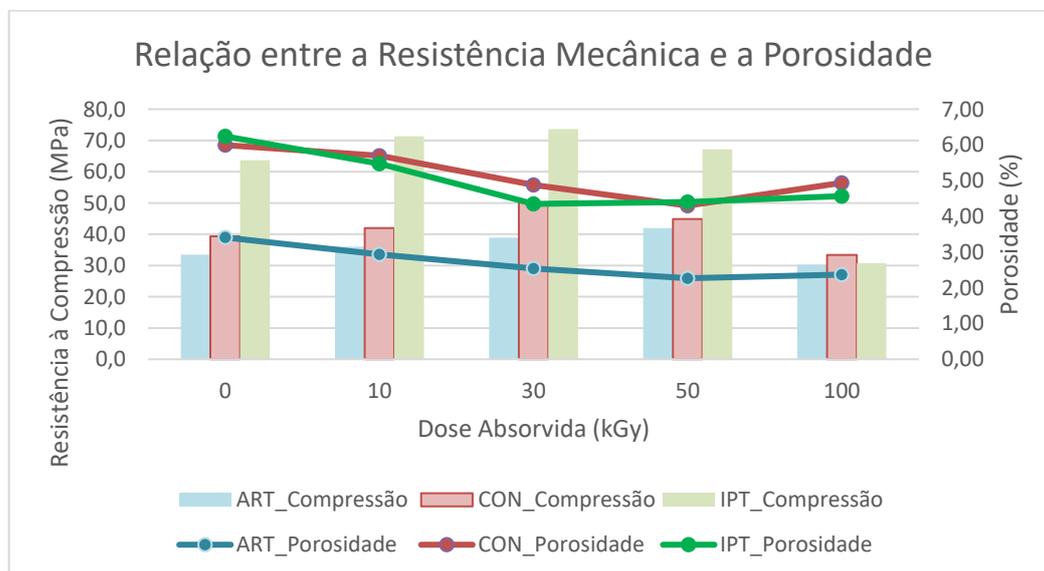


Figura 59 – Relação entre a resistência à compressão e a porosidade.

A carbonatação é identificada através da modificação na quantidade da calcita e da vaterita. A calcita é o principal produto para a carbonatação observado na literatura, dessa forma as figuras 60, 61 e 62 comparam a variação na concentração da calcita, dos compostos amorfos e do quartzo com a média da porosidade, que demonstra uma tendência de queda ao analisar o histograma em conjunto, mas a variação encontra-se dentro do desvio padrão de cada grupo.

Após as doses absorvidas de 10 e 30 kGy para o grupo ART, foi possível perceber uma diminuição para as concentrações de calcita e de compostos amorfos, além de um aumento para o quartzo. Após a dose absorvida de 50 kGy, a calcita e os compostos amorfos aumentaram a intensidade e o quartzo diminuiu. A dose absorvida de 100 kGy apresentou um aumento para a calcita, uma estabilização no percentual dos compostos amorfos e uma diminuição no quartzo. A diminuição na concentração da calcita está relacionada a tendência de redução da porosidade, assim como o aumento da concentração do quartzo e estabilização dos compostos amorfos até a dose absorvida de 50 kGy. É importante ressaltar que a tendência de redução na porosidade é observada com a diminuição de poros com o diâmetro abaixo de 0,182 mm.

Esses resultados indicam que a calcita passou a ser a principal responsável pela diminuição no volume dos poros com o diâmetro abaixo de 0,182 mm apenas após a dose absorvida de 50 kGy. Até a dose absorvida de 30 kGy, a diminuição na quantidade de compostos amorfos e um aumento do quartzo indicam o gel CSH estava se decompondo e como produto houve um aumento na concentração de quartzo. Com o aumento da dose absorvida para 50 kGy, houve uma diminuição na concentração do quartzo, indicando que houve transformação dos cristais em estruturas amorfas, assim como ocorreu para a dose absorvida de 100 kGy. O aumento da calcita indica a transformação do gel CSH, indicando uma carbonatação na matriz de cimento.

Após a dose absorvida de 100 kGy, a diminuição na concentração de quartzo provoca um aumento na quantidade de compostos amorfos, mas que apresentam uma estabilização na concentração. A estabilização é justificada através do aumento da calcita, que surge pela da carbonatação do gel CSH, modificando a concentração das moléculas amorfas. Por possuir uma formação cristalina, a calcita necessita de expandir o volume ocupado, pois a sua ligação possui uma estrutura cristalina hexagonal. A expansão no volume ocupado pode gerar micro fissuras que comprometem a transmissão dos esforços e diminui a resistência mecânica. A ocorrência de micro fissura é possível, visto que já foi observada pelo aumento da pressão causado pelo H^+ nos poros fechados provenientes da radiólise da água (BYKOV, *et al.* 2021). A taxa de dose também prejudica a resistência mecânica, conforme relatado por (SOO e MILIAN, 2001; CRAEYE, *et al.* 2015).

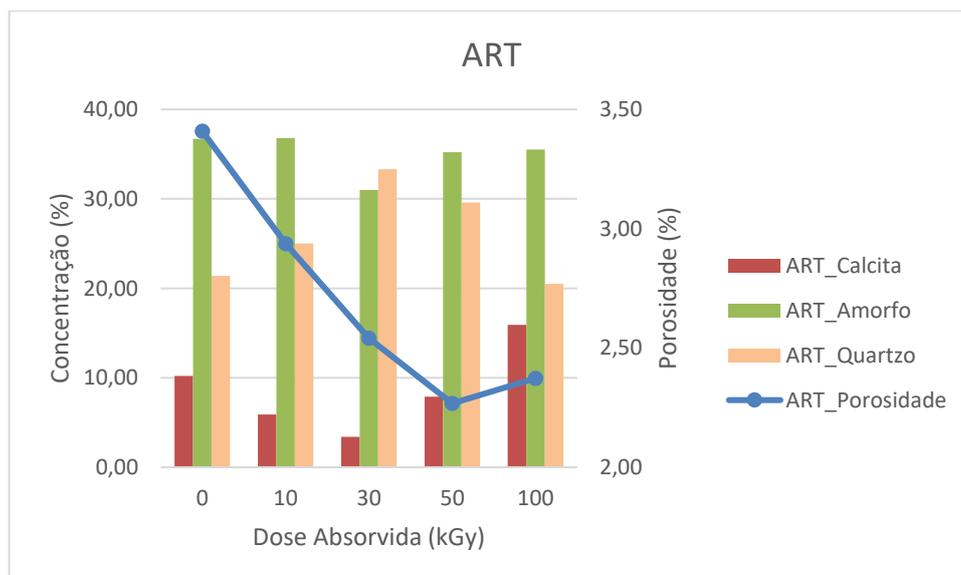


Figura 60 – Relação entre a porosidade com a concentração de calcita, quartzo e compostos amorfos.

O grupo CON apresenta o mesmo comportamento que o grupo ART até a dose absorvida de 30 kGy em que há uma diminuição para a concentração da calcita, dos compostos amorfos e um aumento para o quartzo. A dose absorvida de 50 kGy apresentou um aumento na concentração da calcita e dos compostos amorfos e diminuição na concentração do quartzo. Após a dose absorvida de 100 kGy, há um aumento na concentração de calcita, porém menor que o valor inicial, e na concentração de quartzo e uma diminuição dos compostos amorfos. A mesma hipótese levantada sobre a diminuição do gel CSH, devido a carbonatação, e aumento na concentração da calcita e do quartzo pode ser aplicada no grupo CON, em que a radiação gama provoca radiólise da água, que reage com o CSH, provocando o surgimento da calcita através da reação com o ácido carbônico e do quartzo através da reação do silício com o oxigênio presente nos poros fechados. A formação de quartzo após a dose absorvida de 100 kGy é explicada por uma maior quantidade de oxigênio presente no interior dos poros fechados, já que foi a amostra com a maior porosidade. A porosidade apresentou uma tendência de queda, mas a modificação nos poros é percebida ao analisar o histograma, em que os poros abaixo de 0,304 mm apresentaram uma queda na frequência.

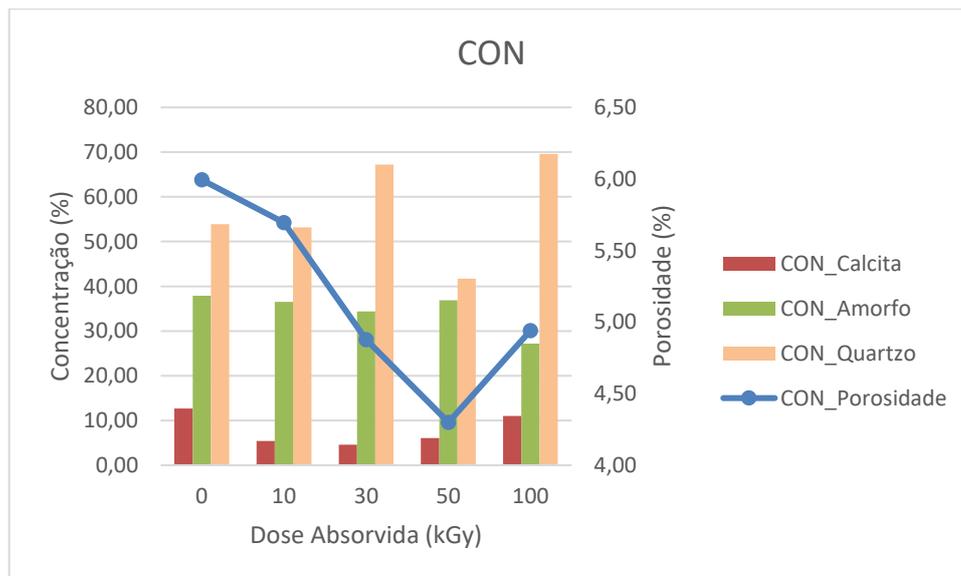


Figura 61 – Relação entre a porosidade com a concentração de calcita, quartzo e compostos amorfos.

Para o grupo IPT, o comportamento é bem parecido com os demais, sendo possível perceber uma diminuição da concentração de calcita e dos compostos amorfos e um aumento do quartzo até a dose absorvida de 30 kGy, seguido de um aumento para a concentração de calcita, estabilização para os compostos orgânicos e diminuição do quartzo para a dose absorvida de 50 kGy. A dose absorvida de 100 kGy apresentou um aumento na concentração da calcita e para o quartzo, enquanto os compostos amorfos permaneceram estáveis. O aumento na concentração da calcita e do quartzo é relacionado as reações que ocorrem no gel CSH durante a carbonatação e que são indicadas com a estabilização na concentração dos compostos amorfos. Assim como os outros grupos a variação na estrutura de poros pode ser observada através do histograma, que apresentou uma diminuição na quantidade de poros abaixo de 0,304 mm.

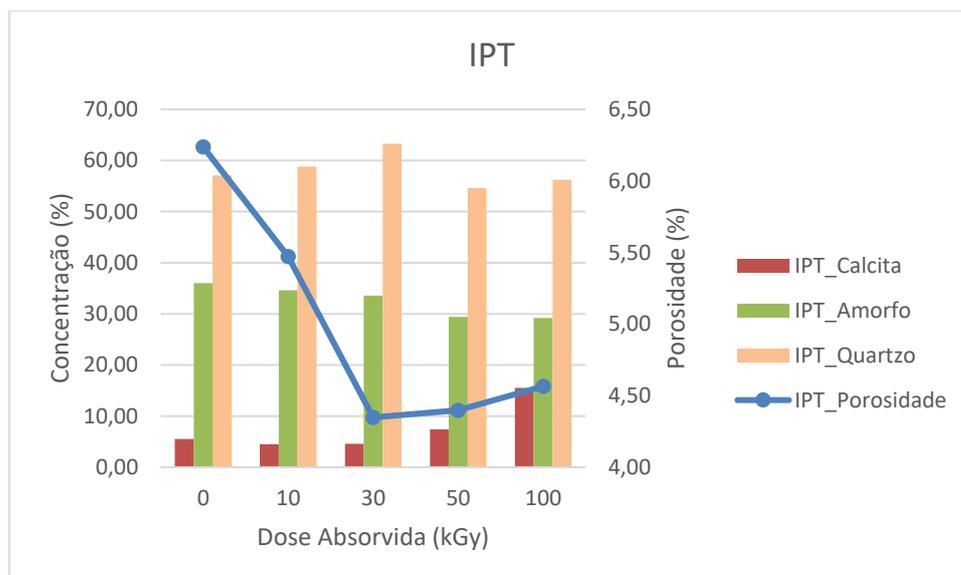


Figura 62 – Relação entre a porosidade com a concentração de calcita, quartzo e compostos amorfos.

A resistência à compressão está diretamente ligada a densidade do material, que por sua vez está diretamente ligada a capacidade de atenuação da radiação gama. Como não foi verificada nenhuma variação significativa para a densidade dos corpos de prova e, conseqüentemente, para a atenuação linear e para a atenuação por massa, é possível dizer que o aumento na resistência à compressão foi causado pela carbonatação induzida pela radiação, como mostra a modificação no histograma de poros de cada grupo.

A convergência dos resultados experimentais para o coeficiente de atenuação por massa com o determinado pela plataforma WinXCOM possibilitou a determinação de uma equação capaz de definir a capacidade de atenuação dos corpos de prova para uma faixa energética entre 59,54 e 662 keV com um elevado grau de confiança.

Capítulo VI

6. Conclusão

O concreto pode interagir com a radiação gama em vários locais, como clínicas de radioterapia, centros de pesquisa e instalações nucleares, dessa forma o estudo de como ocorre a interação entre eles torna-se vital para entender o comportamento da mistura quando exposto à radiação gama e garantir a segurança de quem utiliza o espaço. De acordo com os resultados encontrados nesse trabalho, é possível perceber que doses absorvidas de 10, 30, 50 e 100 kGy provocam alterações significativas na estrutura interna das misturas estudadas através da diminuição da modificação do histograma de poros, do aumento da resistência à compressão e da modificação na estrutura cristalina.

A utilização de uma dose de até 100 kGy não provocou alteração visual na argamassa utilizada, sendo possível identificar uma manutenção para os valores determinados para a massa específica e para o coeficiente de atenuação linear. As modificações que a interação da radiação gama e o cimento pode ser percebida na estrutura cristalina moleculares, refletindo no histograma de poros e na capacidade mecânica.

Também foi possível verificar as modificações que ocorrem no grão de cimento quando hidratado e misturado com agregados miúdos. Após a realização da DRX e utilização da plataforma WinXCOM foi possível perceber a diminuição da capacidade de atenuação para os grãos de cimento após serem hidratados e misturados com agregados miúdos, além de definir uma equação para o coeficiente de atenuação por massa entre as energias de 59,54 e 661,66 keV.

Capítulo VII

7. Sugestões para trabalhos futuros

O trabalho apresentou a forma como ocorre a interação de três traços com baixa dose de radiação gama e que foram irradiados com uma baixa taxa. Por ser um material de fácil acesso e que pode ser misturado com diversos tipos de material, tem-se como sugestão para trabalhos futuros:

- Variar a taxa de dose durante a irradiação;
- Aplicar a metodologia utilizada em traços diferentes para estudar o comportamento do material quando irradiado através da modificação do tipo de cimento e dos agregados miúdos;
- Comparar os resultados encontrados nesse trabalho com o de uma mistura de apenas cimento e água, para um melhor entendimento da influência dos agregados;
- Estudar como a irradiação do concreto afeta a resistência à tração e o módulo de elasticidade;

Capítulo VII

8. Produção Bibliográfica

Artigos Aceitos e publicados:

- X-ray computed microtomography time-dependent analysis of sandwich bread in different storage conditions. X-Ray Spectrometry. <https://doi.org/10.1002/xrs.3334>.
- Evaluation of mass attenuation coefficient of concrete sample for different traits. Brazilian Journal of Radiation Sciences. <https://doi.org/10.15392/2319-0612.2022.1915>.
- Comparison between radiographs, white and fluorescent images in the diagnosis and treatment decisions for occlusal caries: An ex vivo study. Pesquisa Brasileira Em Odontopediatria E Clinica Integrada. <https://doi.org/10.1590/pboci.2023.009>.
- Appreciation of influence of acquisition parameters in analysis of root canal using microCT system. Brazilian Journal of Radiation Sciences. <https://doi.org/10.15392/bjrs.v9i1A.1552>.
- Impact of voxel size on microCT morphometric analysis of the pumpkin toadlet. Brazilian Journal of Radiation Sciences. <https://doi.org/10.15392/bjrs.v9i1A.1548>.
- X-RAY MICROTOMOGRAPHY SYSTEM APPLIED IN CHARACTERIZATION OF LIGHTWEIGHT CONCRETE STRUCTURES. Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems. <https://doi.org/10.1115/1.4048147>.

Publicação de resumos estendidos:

- Effect of gamma radiation in concrete structure determined by X-ray diffraction. European Conference on X-Ray Spectrometry, 2022, Bruges. Book of Abstract, 2022.
- Evaluation of the influence of X-ray spectra in microCT images. European Conference on X-Ray Spectrometry, 2022, Bruges. Book of Abstract, 2022.

- X-ray microCT time-dependent analysis of sandwich bread in different storage conditions. European Conference on X-Ray Spectrometry, 2022, Bruges. Book of Abstract, 2022.
- Methodology for identification of microplastic fragments in aqueous media through computerized microtomography. European Conference on X-Ray Spectrometry, 2022, Bruges. Book of Abstracts, 2022.
- Evaluation of internal structure of concrete after gamma irradiation. In: International Symposium on Radiation Physics, 2021, Kuala Lumpur. Book of Abstract, 2021.
- Effects of Gamma Ray in Concrete After Low Dose. In: International Nuclear Atlantic Conference, 2021, Virtual. Proceedings of INAC 2021, 2021.
- Evaluation of mass attenuation coefficient of concrete sample for different traits. International Nuclear Atlantic Conference, 2021, Virtual. Proceedings of INAC 2021, 2021.
- Methodology for identification of plastic fragments (PET) in aqueous media through computerized microtomography. International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2021, 2021, Virtual. Proceedings of INAC 2021, 2021.
- Performance de métodos digitais para diagnóstico e decisões de tratamento para cárie oclusal: Um estudo observacional. 38ª Reunião Anual da SBPqO, 2021. Brazilian Oral Research, 2021. v. 35. p. 33-33.
- É possível avaliar o cimento dentário utilizando imagens de micro-CT? Estudo piloto. 38ª Reunião Anual da SBPqO, 2021.
- DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE AQUISIÇÃO EM MICROTOMOGRÁFIA COMPUTADORIZADA PARA ANÁLISE DO CIMENTO DENTÁRIO: ESTUDO PILOTO – 37ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Pesquisa Odontológica. (Apresentação Oral).
- Evaluation of the Influence of Acquisition Parameters in the Quantitative MICROCT Analysis of Root Canal. In: International Nuclear Atlantic Conference - INAC, 2019. Proceedings of INAC 2019, 2019.
- DIGITAL ROCK PHYSICS APPLIED IN CARBONATE ROCKS. In: International Nuclear Atlantic Conference - INAC, 2019. Proceedings of INAC 2019, 2019.

- IMPACT OF VOXEL SIZE AND SEGMENTATION METHOD ON THE MORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE PUMPKIN TOADLET BY MICROCT. In: International Nuclear Atlantic Conference - INAC, 2019. Proceedings of INAC 2019, 2019.
- O USO DA MICRO-CT COMO ALTERNATIVA PARA ESTIMATIVA DE IDADE EM INDIVÍDUOS JOVENS PELA QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME E DENSIDADE MINERAL DO CEMENTO – 36ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Pesquisa Odontológica. (Apresentação Oral)
- O USO DA MICRO-CT PARA ESTIMATIVA DE IDADE EM INDIVÍDUOS JOVENS PELA MENSURAÇÃO DO VOLUME E ÁREA DO CEMENTO DENTÁRIO – 10ª Semana de Integração Acadêmica da UFRJ. (Apresentação Oral).

Referências

ABCP, 2023 - Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: <https://abcp.org.br/>, acessado em: 31/01/2023 às 10:00.

AKKURT, I.; AKYILDIRIM, H.; MAVI, B.; KILINCARSLAN, S.; BASYIGIT, C., 2010, "Photon attenuation coefficients of concrete includes barite in different rate", *Annals of Nuclear Energy*, v. 37, pp. 910-914.

AKKURT, I.; BASYIGIT, C.; KILINCARSLAN, S.; MAVI, B., 2005, "The Shielding of γ -rays by Concretes Produced with Barite", *Progress in Nuclear Energy*, v.46(1), pp. 1-11.

AL-HUMAIQANI, M. M.; SHURAIM, A. B.; HUSSAIN, R. R., 2013, "Effect of Compressive Strength on γ -Radiation Attenuation Coefficients for High Performance Concrete", *International Journal of Engineering and Technology*, v.5(5), pp. 566-572

AMBROSE, J, 1973, "Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 2. Clinical Application". *British Journal of Radiology*, v. 46, pp. 1023-1047.

ASTM C125, 2018, "Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

AUROY, M.; POYET, S.; LE BESCOP, P.; TORRENTI, J.; CHARPENTIER, T.; MOSKURA, M.; BOURBON, X., 2018, "Comparison between natural and accelerated carbonation (3% CO₂): Impact on mineralogy, microstructure, water retention and cracking", *Cement and Concrete Research*, v.109, pp. 64-80.

BAR-NES, G.; KATZ, A.; PELED, Y.; ZEIRI, Y., 2008, "The combined effect of radiation and carbonation on the immobilization of Sr and Cs ions in cementitious pastes", *Materials and Structures*, v.41, pp. 1563-1570.

BASTOS, L. F., 2019, *Aplicação da microtomografia de raios x no processo de caracterização das estruturas internas do concreto*. Dissertação de MSc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BASTOS, L. F.; DE ARAUJO, O. M. O.; DOS SANTOS, C. M. S. F. F.; TEIXEIRA, T. P.; FUNCKE, R. P. N.; DE LIMA, J. C. R.; MACHADO, A. S.; OLIVEIRA, D. F.; LOPES, R. T., 2021, "Appreciation of influence of acquisition parameters in

analysis of root canal using microCT system”, *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 9, pp. 1-13.

BASTOS, L. F.; de ARAÚJO, O. M. O.; MACHADO, A. S.; OLIVEIRA, D. F.; LOPES, R. T., 2020, "X-Ray Microtomography System Applied in Characterization of Lightweight Concrete Structures", *ASME Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*, v. 3(4): 041002.

BERGER, M. J.; HUBBELL, J. H., 1987, "*XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer*", Center for Radiation Research, National Bureau of Standards, Washington, DC (USA).

BIER, Th., 1987, "Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement pastes”, *Materials Research Society Symposium*, v. 85, pp. 123-134.

BINICI, H.; AKSOGAN, O.; SEVENC, A. H.; KUCUKONDER, A., 2014, "Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with colemanite, barite, ground basaltic pumice and ground blast furnace slag", *Construction and Building Materials*, v.50, pp. 177-183.

BRUKER, 2013, "Manual for Bruker-microCT CT-Analyser v. 1.13”.

BUSHBERG, J. T.; SEIBERT, J. A.; LEIDHOLDT, E. M.; BOONE, J. M., 2002. *The Essential Physics Medical Imaging*. 2ed. Philadelphia, Lippincott Williams and Wilkins.

BUZUG, T. M., 2008. *Computed Tomography from Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT*. Verlag Berlin Heidelberg, Springer.

BYKOV, G.L.; ABKHALIMOV, E.V.; ERSHOV, V.A.; ERSHOV, B.G., 2021, "Effect of gamma irradiation on Portland cement: Hydrogen evolution and radiation resistance", *Construction and Building Materials*, v. 295, 123644.

BYWALSKI, C.; RAJCZAKOWSKA, M.; SADOWSKI, L., 2015, "Barrage lock concrete porosity evaluation using X-ray microtomography”, *Key Engineering Materials*, v. 662, pp. 161-164.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A., 1999, "Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas”, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/237, São Paulo. ISSN: 0130-9830.

CHAKRADHARA RAO, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V., 2011, "Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete", *Materials and Structures*, v. 44, pp. 205-220.

CHEN, X.; WU, S.; ZHOU, J., 2013, "Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar", *Construction and Building Materials*, v.40, pp 869-874.

CNUUDE, V.; CWIRZEN, A.; MASSCHAELE, B.; JACOBS, P. J. S., 2009, "Porosity and microstructure characterization of building stones and concretes", *Engineering Geology*, v. 103, pp. 76-83.

CORMACK, A. M., 1963, "Representation of a Function by Its Line Integrals, with Some Radiological Applications", *Journal of Applied Physics*, v. 34 (9), pp. 2722-2727.

CORMACK, A. M., 1964, "Representation of a Function by Its Line Integrals, with Some Radiological Applications. II", *Journal of Applied Physics*, v. 35 (10), pp. 2908-2913.

ĆOSIĆ, K.; KORAT, L.; DUCMAN, V.; NETINGER, I., 2015, "Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete", *Construction and Building Materials*, v. 78, pp. 69-76.

CRAEYE, B.; DE SCHUTTER, G.; VUYE, C.; GERARDY, I., 2015, "Cement-waste interactions: Hardening self-compacting mortar exposed to gamma radiation", *Progress in Nuclear Energy*, v. 83, pp. 212-219.

CULITY, B. D.; 1978. *Elements of X-Ray Diffraction*, 2 ed. Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

DAMLA, N.; BALTAS, H.; CELIK, A.; KIRIS, E.; CEVIK, U., 2012, "Calculation of radiation attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities for some building materials", *Radiation Protection Dosimetry*, v. 150 (4), pp. 541-549.

DOS SANTOS, C. S.; ARAUJO, O. O.; ROMBERG JÚNIOR, H. C.; TEIXEIRA, T. P.; BASTOS, L. F.; MACHADO, A. S.; OLIVEIRA, D. F.; DOS REIS, S. F.; LOPES, R. T., 2021, "Impact of voxel size on microCT morphometric analysis of the pumpkin toadlet", *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v.9, pp. 1-13.

FELDKAMP, L. A.; DAVIS, L. C.; KRESS, J. W., 1984, "Practical cone-beam algorithm", *J. Opt. Soc. Am.*, v. 1, pp. 612-619.

GALLUCCI, E.; SCRIVENER, K.; GROSO, A.; et al., 2007, "3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography (μ CT)", *Cement and Concrete Research*, v. 37, pp. 360-368.

GERE, J. M.; GOODNO, B. J., 2010, *Mecânica dos Materiais*, 7 ed., Cengage Learning, tradução Luis Fernando de Castro Paiva, São Paulo.

GERWARD, L.; GUILBERT, N.; BJORN JENSEN, K.; LEVRING, H., 2001, "X-ray absorption in matter. Reengineering XCOM", *Radiation Physics and Chemistry*, v. 60, pp. 23-24.

GILKEY, H. J., 1961, "Water-Cement ratio versus strength – another look", *Journal of the American Concrete Institute*, pp. 1287-1312.

GOKÇE, H. S., 2019, "Experimental and Theoretical (XCOM) Calculation Techniques for Gamma-Ray Attenuation Characteristics of Concrete Shields", *3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies*.

GOKÇE, H. S.; OZTURK, B. C.; ÇAM, N. F.; ANDIÇ-ÇAKIR, O., 2018, "Gamma-ray attenuation coefficients and transmission thickness of high consistency heavyweight concrete containing mineral admixture", *Cement and Concrete Composites*, v. 92, pp. 56:69.

GONZÁLEZ-ORTEGA, M. A.; SEGURA, I.; CAVALARO, S. H. P.; TORALLES-CARBONARI, B.; AGUADO, A.; ANDRELLO, A. C., 2014, "Radiological protection and mechanical properties of concretes with EAF steel slags", *Construction and Building Materials*, v.51, pp. 432-438.

GURLER, O.; AKAR TARIM, U., 2012, "An investigation on determination of attenuation coefficients for gamma-rays by Monte Carlo method", *J Radioanal Nucl Chem*, v. 293, pp. 397-401.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.; *Fundamentos de física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica*. Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi, 10 ed., Rio de Janeiro, LTC, 2016.

HENRY, M.; DARMA, I. S.; SUGIYAMA, T., 2014, "Analysis of the effect of heating and re-curing on the microstructure of high-strength concrete using X-ray CT", *Construction and Building Materials*, v. 67, pp. 37-46.

HOUNSFIELD, G. N., 1973, "Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system", *British Journal of Radiology*, v. 46, pp. 1016-1022.

HU, C.; HAN, Y.; GAO, Y.; ZHANG, Y.; LI, Z., 2014, "Property investigation of calcium-silicate-hydrate (C-S-H) gel in cementitious composites", *Materials Characterization*, v.95, pp. 129-139.

KARTHIK, D.; ARIFULLAH, S. M.; MADHAVI, Y., 2021, "Micro structural examination of low-density light weight concrete based on expanded polypropylene foam", *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.564>

KHATTAB, M. M., 2012, "Effect of gamma irradiation on polymer modified white sand cement mortar composites", *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, v. 5(5), pp 955-972.

KHATTAB, M. M.; ABDEL-RAHMAN, H. A.; YOUNES, M. M., 2011, "Durability of gamma irradiated polymer-impregnated blended cement pastes", *Construction and Building Materials*, v 25, pp 651-657.

KHMUROVSKA, Y.; STEMBERK, P.; SIKORIN, S.; NEMECEK, J.; JOZWIAK-NIEDZWIEDZKA, D.; DOLEZELOVÁ, M.; KALADKEVICH, Y.; PAVALANSKI, E.; FATSEYEU, V., 2021, "Effects of Gamma-Ray Irradiation on Hardened Cement Mortar", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v.15(17).

KIM, K. Y.; YUN, T. S.; PARK, K. P., 2013, "Evaluation of pore structures and cracking in cement paste exposed to elevated temperatures by X-ray computed tomography", *Cement and Concrete Research*, v. 50, pp. 34-40.

KNOLL, G. F., 1999, *Radiation Detection and Measurement*, 3 ed., New York, John Wiley & Sons.

KONTANI, O.; SAWADA, S.; MARUYAMA, I.; TAKIZAWA, M.; SATO, O., 2014, "EVALUATION OF IRRADIATION EFFECTS ON CONCRETE STRUCTURE -GAMMA-RAY IRRADIATION TESTS ON CEMENT PASTE", *Proceedings of the ASME 2013 Power Conference*, v. 2:V002T07A002

KORAT, L.; DUCMAN, V.; LEGAT, A.; MIRTIC, B., 2013, "Characterisation of the pore-forming process in lightweight aggregate based on silica sludge by means of X-ray micro-tomography (micro-CT) and mercury intrusion porosimetry (MIP)", *Ceramics International*, v. 39, pp. 6997-7005.

KWAN, A. K. H.; MORA, C. F., 2001, "Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles", *Magazine of Concrete Research*, v.53(2), pp. 91-100.

LANGE, F.; MORTEL, H.; RUDERT, V., 1997, "DENSE PACKING OF CEMENT PASTES AND RESULTING CONSEQUENCES ON MORTAR PROPERTIES", *Cement and Concrete Research*, v.27(10), pp. 1481-1488

LEE, C.; LEE, Y. H.; LEE, K. J., 2007, "Cracking effect on gamma-ray shielding performance in concrete structure", *Progress in Nuclear Energy*, v. 49, pp. 303-312.

LI, H; ZHANG, H; TANG, Z; HU, G., 2008, "Micro-computed tomography for small animal imaging: technological details", *Progress in Natural Science*, v.18, pp. 513-521.

LIU, J.; LI, C.; LIU, J.; CUI, G. YANG, Z., 2013, "Study on 3D spatial distribution of steels fibers in fiber reinforced cementitious composites through micro-CT technique", *Construction and Building Materials*, v. 48, pp. 656-661.

LORENZONI, R., 2017, *Uso da microtomografia computadorizada para avaliação de danos na microestrutura de pasta de cimento submetida a carregamento cíclico e a temperaturas elevadas*. Dissertação de M.Sc. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LOWINSKA-KLUGE, A.; PISZORA, P., 2008, "Effect of Gamma Irradiation on Cement Composites Observed with XRD and SEM Methods in the Range of Radiation Dose 0–1409 MGy", *ACTA Physica Polonica A*, v.114(2), pp. 399-411.

- LU, H.; PETERSON, K.; CHERNOLOZ, O., 2016, "Measurement of entrained air-void parameters in Portland cement concrete using micro X-ray computed tomography", *International Journal of Pavement Engineering*, v. 19,2, pp. 109-121.
- LYDZBA, D.; RAJCZAKOWSKA, M.; STEFANIUK, D., 2014, "Identification of the carbonation zone in concrete using X-ray microtomography", *Studia Geotechnica et Mechanica*, v. 36(1), pp. 47-54.
- MACHADO, A., 2015, *Caracterização Geológica de Rochas Carbonáticas através da Técnica de Microtomografia Computadorizada de Raios X*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MAHMOUD, K. A.; TASHLYKOV, O. L.; EL WAKIL, A. F., EL AASY, I. E., 2020, "Aggregates grain size and press rate dependence of the shielding parameters for some concretes", *Progress in Nuclear Energy*, v. 118
- MASLEHUDDIN, M.; SHARIF, A. M.; SHAMEEM, M.; IBRAHIM, M.; BARRY, M. S., 2003, "Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes", *Construction and Building Materials*, v.17, pp. 105-112.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M., 2006, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 3 ed., California, McGraw-Hill Companies.
- MICHAUX, M.; NELSON, E.B.; VIDICK, B., 1990, "2 Chemistry and Characterization of Portland Cement", *Developments in Petroleum Science*, v. 28, pp. 2.1-2.17.
- MOSTOFINEJAD, D.; REISI, M.; SHIRANI, A., 2012, "Mix design effective parameters on c-ray attenuation coefficient and strength of normal and heavyweight concrete", *Construction and Building Materials*, v.28, pp.224-229.
- NASCIMENTO DIAS, B.L.; ARAUJO, O.M.O.; MACHADO, A.S.; OLIVEIRA, D.F.; ANJOS, M.J.; LOPES, R.T.; ASSIS, J.T., 2019, "Analysis of two meteorite fragments (lunar and martian) using X-Ray microfluorescence and X-Ray computed microtomography techniques", *Applied Radiation and Isotopes*, v. 152, pp. 156-161.
- NBR 6118, 2014, "Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos", ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas.

NBR 7211, 2009, “Agregados para concreto – Especificação”, ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas.

NBR 7215, 2019, “Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos”, ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas.

NBR 16697, 2018, “Cimento Portland – Requisitos”, ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas.

NEVILLE A. M., 2011, *Properties of Concrete*, 5 ed., Edimburgo, Pearson Education Limited.

OBAID, S. S.; GAIKWAD, D. K.; PAWAR, P. P., 2018, "Determination of gamma ray shielding parameters of rocks and concrete", *Radiation Physics and Chemistry*, v. 144, pp. 356-360.

OLIVEIRA, D.F.; SANTOS, R.S.; MAHADO, A.S.; SILVA, A.S.S.; ANJOS, M.J; LOPES, R.T., 2019, “Characterization of scale deposition in oil pipelines through X-Ray Microfluorescence and X-Ray microtomography”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 151, pp. 247-255.

OUDA, A. S.; ABDELGADER, H. S., 2019, "Assessing the physical, mechanical properties, and γ -ray attenuation of heavy density concrete for radiation shielding purposes", *Geosystem Engineering*, v. 22 (2), pp. 72-80.

PESSÔA, J. R. C., 2011, *Microtomografia com raio-X e processamento de imagens na obtenção da porosidade do concreto*. Tese de D.Sc., Instituto Politécnico/UERJ, Nova Friburgo, RJ, Brasil.

PESSÔA, J. R. C.; DOMINGUEZ, D. S.; ASSIS, J. T.; SANTANA, M. R.; DIAS, L. A., 2018, “Análise volumétrica da porosidade do concreto através de microtomografia computadorizada por transmissão de raio-X e processamento de imagens”, *Revista da Faculdade Cenecista de Rio das Ostras*, v. 3, pp. 13-25.

PESSÔA, J. R. C.; DOMINGUEZ, J. S.; CARVALHO, G.; ASSIS, J. T. et al., 2014, “Obtaining porosity of concrete using X-ray microtomography or digital scanner”, *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, v. 8, pp. 371-377.

POTTS, A.; BUTCHER, E.; CANN, G.; LEAY, L., 2021, "Long term effects of gamma irradiation on in-service concrete structures", *Journal of Nuclear Materials*, v.548.

PROMENTILLA, M. A. B.; SUGIYAMA, T., "Studies on 3D micro-geometry and diffusion tortuosity of cement-based materials using X-ray microtomography", *32nd Conference on Our World in Concrete & Structures*, Singapore, August 2007.

RADON, J., 1917, "Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten", *Berichte der Sachsischen Akadamie der Wissenschaft*, v. 69, pp 262-277. Translation: Radon, J.; Parks, P. C. (translator), "On the determination of functions from their integral values along certain manifolds", *Transactions on Medical Imaging*, v. 5 (4), pp. 170-176.

RAMACHANDRAN, D.; GEOGER, R. P.; VISHWAKARMA, V.; SUDHA, U.; RABEL, M., 2017, "Studies on mechanical and microstructural properties of hematite modified concrete", *International Journal of ChemTech Research*, v. 10(4), pp. 464-472

RATTANASAK, U.; KENDALL, K., 2005, "Pore structure of cement/pozzolan composites by X-ray microtomography", *Cement and Concrete Research*, v. 35, pp. 637-640.

REZAEI OCHBELAGH, D.; AZIMKHANI, S.; GASEMZADEH MOSAVINEJAD, H., 2011, "Effect of gamma and lead as an additive material on the resistance and strength of concrete", *Nuclear Engineering and Design*, v. 241, pp. 2359-2363.

RIQUE, A.M.; MACHADO, A.C.; OLIVEIRA, D.F.; LOPES, R.T.; LIMA, I., 2015, "X-ray imaging inspection of fiberglass reinforced by epoxy composite", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, v. 349, pp. 184–191.

RITMAN, E. L., 2011, "Current Status of Developments and Applications of Micro-CT", *Annual Review of Biomedical Engineering*, v. 13, pp. 531-552.

RONTGEN, W. C., 1896, "A new kind of rays", *Science* 3, v. 59, pp. 227-231.

SALINAS, I.; CONTI, C.; LOPES, R., 2005, "Effective density and mass attenuation coefficient for building material in Brazil", *Applied Radiation and Isotopes*, v 64, pp 13-18.

SAYYED, M. I.; TEKIN, H. O.; KILICOGLU, O.; AGAR, O.; ZAID, M. H. M., 2018, "Shielding features of concrete types containing sepiolite mineral: Comprehensive study on experimental, XCOM and MCNPX results", *Results in Physics*, v. 11, pp. 40-45.

SCHAEFER, C. E.; KUPWASE-PATIL, K.; ORTEGA, M.; SORIANO, C.; BUYUKOZTURK, O.; WHITE, A. E.; SHORT, M. P., 2018, "Irradiated recycled plastic as a concrete additive for improved chemo-mechanical properties and lower carbon footprint", *Waste Management*, v.71, pp. 426-439.

SOO, P.; MILIAN, L. M., 2001, "The effect of gamma radiation on the strength of Portland cement mortars", *Journal of Materials Science Letters*, v 20, pp 1345-1348.

TOPÇU, I. B., 2003, "Properties of heavyweight concrete produced with barite", *Cement and Research*, v.33, pp. 815-822.

VODÁK, F.; TRTÍK, K.; SOPKO, V.; KAPICKOVÁ, O.; DEMO, P., 2005, "Effect of γ -irradiation on strength of concrete for nuclear-safety structures", *Cement and Concrete Research*, v. 35, pp. 1447-1451.

VODÁK, F.; VYDRA, V.; TRTÍK, K., et al., 2011, "Effect of gamma irradiation on properties of hardened cement paste", *Materials and Structures*, v. 44, pp. 101-107.

WANG, Z.; WANG, L.; SU, H.; CUI, Z., 2011, "Optimization of Coarse Aggregate Content based on Efficacy Coefficient Method", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, v. 26 (2), pp. 329:334.

WARD, M. A.; NEVILLE, A. M.; SINGH, S. P., 1969, "Creep of air-entrained concrete", *Magazine of Concrete Research*, v. 21, pp. 205-210.

WILSON, R. E., 2015, *Estudo da porosidade por processamento de imagens aplicado a patologias do concreto*. Tese de D.Sc., Instituto Politécnico/UERJ, Nova Friburgo, RJ, Brasil.

YLMAZ, E.; BALTAS, H.; KIRIS, E.; USTABAS, I.; CEVIK, U.; EL-KHAYATT, A. M., 2011, "Gama ray and neutron shielding properties of some concrete materials", *Annals of Nuclear Energy*, v. 38, pp. 2204-2212.

ZATLOUKALOVÁ, J.; DEWYNTER-MARTY, V.; ZATLOUKAL, J.; KOLÁR, K.; BERNACHY-BARBE, F.; BEZDICKA, P.; KONVALINKA, P., 2020, "Microstructural

and micro-mechanical property changes of cement pastes for ILW immobilization due to irradiation", *Journal of Nuclear Materials*, v. 540, 152346.

ZHOU, Y.; ZHENG, B.; SUI, L.; XING, F.; LI, P.; SUN, H., 2019, "Effects of external confinement on steel reinforcement corrosion products monitored by X-ray microcomputer tomography", *Construction and Building Materials*, v. 222, pp. 531-543.