



Isabel Christina de Almeida Ferreira

**Caracterização microestrutural 2D e 3D
de concreto com agregados reciclados
de construção e demolição.**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio.

Orientador: Sidnei Paciornik

Coorientador: Flávio de Andrade Silva

Rio de Janeiro

Abril de 2022



Isabel Christina de Almeida Ferreira

**Caracterização microestrutural 2D e 3D
de concreto com agregados reciclados
de construção e demolição.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo

Prof. Sidnei Paciornik

Orientador

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Prof. Flávio de Andrade Silva

Coorientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Doutora Renata Lorenzoni

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de abril de 2022.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Isabel Christina de Almeida Ferreira

Graduada em engenharia civil pela Universidade Federal de Juiz e Fora em 2018. Especializando-se nas áreas de: Ciência dos Materiais, Microscopia Digital e Processamento e Análise de Imagens.

Ficha Catalográfica

Ferreira, Isabel Christina de Almeida

Caracterização microestrutural 2D e 3D de concreto com agregados reciclados de construção e demolição/Isabel Christina de Almeida Ferreira; orientador: Sidnei Paciornik; coorientador: Flávio de Andrade Silva. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2022.

v., 107 f: il. color.; 27 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Química – Teses. 2. Engenharia de Materiais -Teses. 3. Durabilidade. 4. Porosidade. 5. Agregados reciclados. 6. Microtomografia Computadorizada. I. Paciornik, Sidnei. II. de Andrade Silva, Flávio. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Química e de Materiais. IV. Título.

*“Quem não faria?
Diz que é loucura, diz que é besteira;
mas eu não vou ligar, não tente
entender.
E o tempo dirá, a sina é sonhar,
Eu pago pra ver, qual é o meu lugar.”*

Agradecimentos

Alguns ciclos parecem, à primeira vista, inexplicáveis. Nem sempre positivos, mas quase sempre de aprendizado. Quando findam ou parecem cruzar uma linha de chegada, passam a fazer total sentido.

Me lembro da primeira vez que pisei na PUC, do momento em que recebi a aprovação, da matrícula no mestrado (que por “algum acaso” foi no dia do meu aniversário), da primeira aula, da primeira conversa com meu orientador.

Assim, começo meus agradecimentos ao Sidnei Paciornik, que, sem nem imaginar, entrou na minha vida para me apresentar a mim mesma, como Pesquisadora de Engenharia de Materiais, título que há muito desejei; renasci. Obrigada sempre.

Sidnei me apresentou a Flávio Silva, a quem também agradeço imensamente por ter aceitado ser meu coorientador. Obrigada por toda paciência, incentivo, confiança e liberdade; cresci.

Aos meus amigos do MicDig: Thalita, Bernardo, Camila, Renata, Karen, Igor, Júlio, Francisco, Layne e Otávio. Existe amor, incentivo, companheirismo e alegria no meio acadêmico. Vocês sem dúvida fizeram minha vida mais feliz e completa.

Ao Marcos Henrique, mestre que me ensinou pacientemente, mais de uma vez, tudo que precisei. Aos amigos do LEM-DEC, pelas trocas e ensinamentos. À Querida Carmem, por ser uma pessoa generosa e sempre pronta a nos ajudar.

Ao Felipe Rodrigues, que topou de cara essa aventura comigo e me ajuda a aprender tanto sobre mim, sobre os encontros e as surpresas da vida. Obrigada por todo caminho trilhado até aqui, pelas incontáveis conversas, alegrias, e pela “calma Bel, vai dar certo” de sempre. Há muito por vir.

Aos meus pais, Carlos e Sônia, que sem qualquer mínima dúvida foram apoio desde sempre. Em especial à minha mãe, uma mulher inacreditavelmente carinhosa, e que me sustentou nos momentos mais obscuros. Conseguimos.

Ao meu irmão Leonardo, pelo amor, parceria, ensinamentos, e por me mostrar o caminho da engenharia. Você é meu maior exemplo de profissional. Te admiro.

Ao Antônio por ser incrivelmente a criança mais amorosa e legal do mundo. Você revolucionou minha vida e como eu entendia o amor. A Aninha, por ter sido generosa quando mais precisei.

À Suzana, amiga que virou irmã e sempre foi abrigo, companheirismo, diversão e qualquer outro sinônimo de amor. Te admiro.

Por fim, aos meus amigos da vida, aqui representados por Luíza, Nanda e Renata, que foram alívio, abrigo, risadas, confidentes, e a certeza de que existe uma infinidade de gente boa por aí. Amo vocês.

Tenho a certeza de que sou um compilado de pessoas e experiências, sou grata a Deus por isso.

Ao Departamento de Engenharia Química e de Materiais, por me proporcionar uma infinidade de conhecimentos e estendo o agradecimento aos mestres que tanto auxiliaram minha caminhada. À PUC Rio por nos proporcionar como alunos e profissionais, as melhores experiências. A PUC é uma infinidade de aprendizados e sou uma profissional melhor por estar com vocês.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Ferreira, Isabel Christina de Almeida; Paciornik, Sidnei. **Caracterização microestrutural 2D e 3D de concreto com agregados reciclados de construção e demolição**. Rio de Janeiro, 2022. 107p. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A Construção Civil é uma das indústrias que mais geram resíduos sólidos no mundo. Os agregados reciclados (RCD), como opção aos agregados obtidos por exploração de jazidas, derivam de materiais reprocessados que foram anteriormente utilizados na construção e demolição. Como o reaproveitamento de RCD vem crescendo em âmbito mundial, mas a qualidade e a padronização do material ainda são um impedimento à utilização em maiores escalas, faz-se necessário uma investigação das propriedades deste material. No presente estudo a microtomografia computadorizada (microCT) foi utilizada a fim de gerar imagens bidimensionais e tridimensionais para observar a estrutura porosa do material e, através de uma rotina computacional, as imagens obtidas foram avaliadas de forma qualitativa e quantitativa. Inicialmente, a rotina de processamento das imagens aconteceu para que fossem reduzidos os efeitos de ruídos provenientes da obtenção das imagens no microtomógrafo, além de uma padronização dos histogramas de todas as camadas. As imagens das amostras foram segmentadas e quantificadas para que a porosidade (poros e canais porosos) pudesse ser identificada e analisada. De forma complementar foram utilizadas também as técnicas de microscopia óptica e a microscopia eletrônica de varredura para análise da porosidade. Os resultados de volume, razões de aspecto e esfericidade dos poros dos concretos com e sem agregados reciclados foram analisados e comparados com as suas respectivas resistências à compressão. Os resultados mostraram, como esperado, uma porosidade maior nos corpos de prova com adição de RCD. Com uma diferença de quase 50% no volume da porosidade, é importante destacar que a resistência à compressão de ambas as amostras foi satisfatória e dentro de uma faixa próxima de valores (31,4MPa para o concreto de referência e 25,73 MPa para o concreto com

adição de RCD). Este resultado pode ser explicado pela necessidade de se eliminar os objetos menores de 1 voxel, o que pode ter causado uma alteração nos valores dos volumes encontrados, ou seja, eliminou-se mais poros menores de 1 voxel nos CP's de referência.

Palavras-chave

Concreto; concreto com agregados reciclados, concreto sustentável; RCD; resíduos da construção e demolição; MicroCT; PNM; processamento e análise de imagens.

Abstract

Ferreira, Isabel Christina de Almeida; Paciornik, Sydney. **2D and 3D microstructural characterization of concrete with recycled construction and demolition aggregates**. Rio de Janeiro, 2022. 107p. Master's Thesis – Department of Chemical and Materials Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

Civil Construction is one of the industries that generate the most solid waste in the world. Recycled aggregates (RCD), as an option to aggregates obtained by mining deposits, derive from reprocessed materials that were previously used in construction and demolition. As the reuse of RCD has been growing worldwide, but the quality and standardization of the material are still an impediment to its use on larger scales, it is necessary to investigate the properties of this material. In the present study, computerized microtomography (microCT) was used in order to generate two-dimensional and three-dimensional images to observe the porous structure of the material and, through a computational routine, the images obtained were evaluated qualitatively and quantitatively. Initially, the image processing routine was carried out to reduce the noise effects resulting from the acquisition of the images in the microtomograph, in addition to a standardization of the histograms of all layers. The images of the samples were segmented and quantified so that the porosity (pores and porous channels) could be identified and analyzed. In a complementary way, optical microscopy and scanning electron microscopy techniques were also used for porosity analysis. The results of volume, aspect ratios and pore sphericity of concretes with and without recycled aggregates were analyzed and compared with their respective compressive strengths. The results showed, as expected, a higher porosity in the specimens with the addition of RCD. With a difference of almost 50% in the porosity volume, it is important to highlight that the compressive strength of both samples was satisfactory and within a range close to values (31.4MPa for the reference concrete and 25.73 MPa for the concrete with the addition of RCD). This result can be explained by the need to eliminate objects smaller than 1 voxel, which may have caused a change in the values of the

volumes found, that is, more pores smaller than 1 voxel were eliminated in the reference CPs.

Keywords

Concrete; concrete with recycled aggregates, sustainable; RCD; construction and demolition waste; MicroCT; PNM; image processing and analysis.

Sumário

1 . Introdução	11
2 . Objetivos do Estudo	16
3 . Revisão Bibliográfica	17
3.1. Concreto tradicional	17
3.2. Agregados naturais	18
3.3. Agregados reciclados da indústria da construção civil	20
3.3.1. Nomenclatura dos agregados reciclados	23
3.3.2. Usinas e formas de obtenção	24
3.3.3. Normas para RCD	29
3.3.4. Concretos com adição de agregados de RCD	30
3.3.5. Porosidade do concreto com agregado de RCD	31
3.3.6. Durabilidade do concreto com agregado fabricado com resíduos	33
3.4. Microtomografia de raios X	38
3.4.1. A importância do estudo da MicroCT em materiais cimentícios	41
4 Materiais e métodos	44
4.1. Materiais	44
4.1.1. Agregados reciclados	44
4.1.2. Agregados naturais	46
4.1.3. Cimento CP II F - 32 – Cimento Portland composto com <i>Filler</i>	46
4.1.4. Aditivo - Master Glenium 51	46
4.2. Confecção dos corpos de prova	46
4.2.1. Microtomografia de raios X	50
4.2.2. Reconstrução de Imagens dos corpos de prova	53
4.3. Processamento e análise de Imagem	53
4.4. Microscopia eletrônica de Varredura – MEV	56

5 Resultados e Discussão	58
5.1. Comportamento Mecânico	58
5.2 Análise de Imagens	59
5.2.1 Pré processamento no ImageJ - Fiji	59
5.2.2 Segmentação e análise no Dragonfly	67
5.2. 5.3 Análise da estrutura e volumes de poros, razão de aspecto e esfericidade dos poros do concreto	72
5.2.1. 5.3.1 Amostras com adição de RCD	72
5.3.2 Amostras do concreto de referência	83
6 Conclusões	94
6.1. Trabalhos futuros	96
7 Bibliografia	97

Lista de Figuras

FIGURA 1-1 - DEPÓSITO EM ATERRO PRÓXIMO DE ÁREA AMBIENTAL EM BELO HORIZONTE	12
FIGURA 1-2: EXPLORAÇÃO DE MINERAIS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	12
FIGURA 3-1: GRANULOMETRIAS DE AGREGADOS. FONTE: PORTAL DA AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – 2020	19
FIGURA 3-2: EXEMPLOS GRANULOMÉTRICOS DE AGREGADOS RECICLADOS.....	23
FIGURA 3-3: MAPA BRASILEIRO DE INSTALAÇÃO DE USINAS DE RECICLAGEM DE RCD - FONTE: PESQUISA SETORIAL ABRECON – 2018	26
FIGURA 3-4: USINA PRIVADA RECICLAX, SÃO PAULO - FONTE: RECICLAX - 2021	27
FIGURA 3-5: USINA DE RECICLAGEM DE RCD - BELO HORIZONTE - MG/2018	28
FIGURA 3-6: A) AREIA RCD CONTAMINADA COM SOLO - B) BRITA 1 RCD – C) BRITA 0 RCD	29
FIGURA 3-7: PILAR DE CONCRETO ARMADO EM PROCESSO DE CARBONATAÇÃO, JÁ COM ARMADURA EXPOSTA E APRESENTANDO CORROSÃO.	34
FIGURA 3-8: CORPO DE PROVA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE RCD EM PROCESSO ACELERADO DE CARBONATAÇÃO.	34
FIGURA 3-9: EXEMPLO DE AGREGADOS HETEROGÊNEOS, CONTAMINADOS, EM USINA DE RECICLAGEM. FONTE: A AUTORA (2018)	35
FIGURA 3-10: CORPO DE PROVA DESFORMADO APÓS SETE DIAS DE CURA ÚMIDA APRESENTANDO SEGREGAÇÃO DE PARTÍCULAS E SENDO ENSAIADO APÓS 28 DIAS	38
FIGURA 3-11: ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PROCESSOS DE AQUISIÇÃO E RECONSTRUÇÃO DE TOMOGRÁFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X.....	39
FIGURA 3-12: EXEMPLO DE SLICES OBTIDOS NA MICROTOMOGRÁFIA	40
FIGURA 3-13: ESQUEMA EMISSÃO DO FEIXE DE RAIOS-X.....	41
FIGURA 4-1: AGREGADO RECÉM-CHEGADO AO LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS E MATERIAIS DA PUC – RIO	44
FIGURA 4-2: LAVAGEM DO AGREGADO RECÉM-CHEGADO AO LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS E MATERIAIS DA PUC-RIO - (FERNANDA SALGADO – 2019)	45
FIGURA 4-3: PESAGEM DOS AGREGADOS PARA PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	48
FIGURA 4-4: MISTURA DO CONCRETO	48
FIGURA 4-5: MOLDAGEM DOS PRISMAS DE CONCRETO.....	49
FIGURA 4-6: AMOSTRAS PRISMÁTICAS E CILÍNDRICAS DE CONCRETO DE REFERÊNCIA E AGREGADOS RECICLADO	50

FIGURA 4-7: CP'S CONFECCIONADOS NO LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS E MATERIAIS DA PUC RIO - TRAÇO ADOTADO: 50% DE AGREGADOS NATURAIS + 50% DE AGREGADOS RECICLADOS	50
FIGURA 4-8: MICROCT - XRADIA 510 VERSA PUC RIO	51
FIGURA 4-9: AMOSTRA DE CONCRETO COM RCD POSICIONADO NO MICROCT.....	52
FIGURA 4-10: FLUOXOGRAMA DO PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS	54
FIGURA 4-11: EFEITO CONE NA FACE SUPERIOR DO EIXO YZ DO CP6.....	55
FIGURA 4-12: EFEITO CONE NA FACE INFERIOR DO EIXO YZ DO CP6.....	55
FIGURA 4-13: MEV DE BANCADA HITACH TM3000	57
FIGURA 5-1: IMAGEM DO CP6, CONCRETO COM ADIÇÃO DE RCD, ANTES DE PASSAR PELO SOFTWARE FIJI - IMAGEJ.....	64
FIGURA 5-2:EXEMPLO DE TESTES DO CP6 (AMOSTRA COM ADIÇÃO DE RCD) PARA APLICAÇÃO DO FILTRO NLN. A) SIGMA = 25 B) SIGMA = 30	65
FIGURA 5-3: MACRO HISTOGRAM MATCHING	66
FIGURA 5-4:PRÉ E PÓS APLICAÇÃO DA MACRO HISTOGRAM MATCHING	66
FIGURA 5-5: AMOSTRA DE CONCRETO ANTES DO CROP CILÍNDRICO.....	67
FIGURA 5-6: A) CP6 ANTES DO THRESHOLD B) CP6 APÓS O THRESHOLD PARA RETIRAR O FUNDO	68
FIGURA 5-7 : THRESHOLD PARA DEFINIR A MASSA CIMENTÍCIA DO CP6 COM ADIÇÃO DE RCD ...	68
FIGURA 5-8: OPERAÇÃO DE SUBTRAÇÃO PARA OBTER A ROI POROS NO CP6 COM ADIÇÃO DE RCD	69
FIGURA 5-9: ROI POROS CORRESPONDENTE AO CP6 COM ADIÇÃO DE RCD	69
FIGURA 5-10: OBTENÇÃO DA MULTI-ROI NO CP6 COM ADIÇÃO DE RCD	70
FIGURA 5-11: ESFERICIDADE DOS POROS DO CP6 COM ADIÇÃO DE RCD.....	71
FIGURA 5-12: VOLUME DOS POROS DA AMOSTRA CP6 DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE RCD.....	71
FIGURA 5-13: CP 6 INTEIRO E SUBVOLUMES ESTUDADOS	72
FIGURA 5-14: APLICAÇÃO DA MULTI-ROI NO CP6. A) VISÃO 2D DA AMOSTRA SEM MULTI-ROI, B) VISÃO 2D DA AMOSTRA COM APLICAÇÃO DA MULTI-ROI E C) VISÃO 3D DA AMOSTRA COM APLICAÇÃO DA MULTI-ROI.....	73
FIGURA 5-15:DISTRIBUIÇÃO DE VOLUME POROSO DO CP6 COM ADICAO DE 50% DE RCD	74
FIGURA 5-16: SEQUENCIA DE CAMADAS DEMONSTRANDO INÍCIO E FIM DO PORO DE MAIOR DIMENSÃO – CAMADAS 2230 A 2653 DE UM TOTAL DE 2993 CAMADAS.	74
FIGURA 5-17: SEQUÊNCIA DE CAMADAS DEMONSTRANDO EXEMPLO DE PORO DE MENOR DIMENSÃO – CAMADAS 1687 A 1704 DE UM TOTAL DE 2993 CAMADAS.	75
FIGURA 5-18: DESTAQUE PARA MICRO POROS SENDO FORMADOS MARGEANDO OS AGREGADOS DO CP6 DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE RCD	75
FIGURA 5-19: DESTAQUE PARA POROS SENDO FORMADOS ENTRE OS AGREGADOS DO CP6 DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE RCD.....	76

FIGURA 5-20: GRÁFICO DE ESFERICIDADE DO CP6 COM ADIÇÃO DE 50% DE RCD	77
FIGURA 5-21: ESFERICIDADE E VOLUME DOS POROS DO CP6	77
FIGURA 5-22: GRÁFICO DE RAZÃO DE ASPECTO DO CP6 COM ADIÇÃO DE 50% DE RCD	78
FIGURA 5-23: COMANDO PNM NO SOFTWARE DRAGONFLY	79
FIGURA 5-24: A) ROI POROS E B) MULTIROI POROS - VOLUME 1	79
FIGURA 5-25: A) ROI POROS E B) MULTIROI POROS - VOLUME 2	79
FIGURA 5-26: A) ROI POROS E B) MULTIROI POROS – VOLUME 3	80
FIGURA 5-27: GRÁFICO COMPARATIVO DO VOLUME DE POROS NAS AMOSTRAS DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE RCD.....	81
FIGURA 5-28: PNM CP6 A) RESULTADOS DE PNM DO VOLUME 1 PARA POROS NÃO CONECTADOS, B) RESULTADO DE PNM DO VOLUME 1 PARA POROS CONECTADOS.....	82
FIGURA 5-29: PNM CP6 A) RESULTADOS DE PNM DO VOLUME 2 PARA POROS NÃO CONECTADOS, B) RESULTADO DE PNM DO VOLUME 2 PARA POROS CONECTADOS.....	82
FIGURA 5-30: APLICAÇÃO DA MULTIROI NO CP2. A) VISÃO 2D DA AMOSTRA SEM MULTIROI, B) VISÃO 2D DA AMOSTRA COM APLICAÇÃO DA MULTIROI.....	84
FIGURA 5-31: DISTRIBUIÇÃO DE VOLUME POROSO DO CP2 DE CONCRETO DE REFERÊNCIA	85
FIGURA 5-32: SEQUÊNCIA DEMONSTRATIVA DE POROS TORNANDO-SE UM DE MAIOR DIMENSÃO NO CONCRETO DE REFERÊNCIA. CAMADA 491/1081 A 628/1081 DO CP2	86
FIGURA 5-33: SEQUÊNCIA DE FORMAÇÃO DE PORO MARGEANDO OS AGREGADOS. CAMADA 498 A CAMADA 785 DO CP2	87
FIGURA 5-34: GRÁFICO DA ESFERICIDADE A AMOSTRA DE CONCRETO DE REFERÊNCIA CP2	87
FIGURA 5-35: ESFERICIDADE A AMOSTRA DE CONCRETO DE REFERÊNCIA CP2	88
FIGURA 5-36: RAZÃO DE ASPECTO DO CP2 DE CONCRETO DE REFERÊNCIA.....	89
FIGURA 5-37: GRÁFICO COMPARATIVO DO VOLUME DE POROS NAS AMOSTRAS DE CONCRETO DE REFERÊNCIA	90
FIGURA 5-38: PNM CP2 REF A) RESULTADOS DE PNM DO VOLUME 1 PARA POROS CONECTADOS, B) RESULTADO DE PNM DO VOLUME 2 PARA POROS NÃO CONECTADOS.....	90
FIGURA 5-39: PNM CP2 REF A) RESULTADOS DE PNM DO VOLUME 2 PARA POROS CONECTADOS, B) RESULTADO DE PNM DO VOLUME 2 PARA POROS NÃO CONECTADOS.....	91
FIGURA 5-40: PNM CP2 REF A) RESULTADOS DE PNM DO VOLUME 3 PARA POROS CONECTADOS, B) RESULTADO DE PNM DO VOLUME 3 PARA POROS NÃO CONECTADOS.....	91
FIGURA 5-41: GRÁFICO COMPARATIVO DO TOTAL DE POROS ENTRE AS AMOSTRAS DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE RCD E CONCRETO DE REFERÊNCIA.....	93
FIGURA 5-42: GRÁFICOS COMPARATIVOS DO A) TOTAL DE POROS CONECTADOS E B) NÃO CONECTADOS ENTRE AS AMOSTRAS DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE RCD E CONCRETO DE REFERÊNCIA	93
FIGURA 5-43: ZONA DE TRANSIÇÃO INTERFACIAL ENTRE AGREGADO E PASTA CIMENTÍCIA EM AMOSTRA COM ADIÇÃO DE RCD	60

FIGURA 5-44: GRÃOS DE AREIA, PARTÍCULAS E FORMAÇÃO DE CANAIS POROSOS EM AMOSTRA COM ADIÇÃO DE RCD VISTOS NO MEV.....	61
FIGURA 5-45: SEQUÊNCIA COMPARATIVA DE MAGNIFICAÇÃO DO MEV EM PORO DE AMOSTRA COM ADIÇÃO DE RCD.....	62
FIGURA 5-46: PORO ARREDONDADO NA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE RCD	63

Lista de Tabelas

TABELA 3-1: GRANULOMETRIA DAS PEDRAS BRITADAS, SEGUINDO NORMA DA ABNT - 2022	19
TABELA 3-2: NOMENCLATURA DOS RCD'S - FONTE: ABRECON - 2019	23
TABELA 5-1: VALORES OBTIDOS EM ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	58
TABELA 5-2: DISTRIBUIÇÃO DE POROS DO CP6 COM ADIÇÃO DE 50%DE RCD	80
TABELA 5-3:DISTRIBUIÇÃO DE POROS DO CP5 COM ADIÇÃO DE 50%DE RCD	80
TABELA 5-4: DISTRIBUIÇÃO DE POROS DO CP4 COM ADIÇÃO DE 50%DE RCD	81
TABELA 5-5: VOLUME TOTAL DE POROS DO CP6 COM ADIÇÃO 50% DE RCD E MÉDIA DE POROS CONECTADOS E NÃO CONECTADOS	83
TABELA 5-6: VOLUME TOTAL DE POROS DO CP5 COM ADIÇÃO 50% DE RCD E MÉDIA DE POROS CONECTADOS E NÃO CONECTADOS	83
TABELA 5-7: VOLUME TOTAL DE POROS DO CP4 COM ADIÇÃO 50% DE RCD E MÉDIA DE POROS CONECTADOS E NÃO CONECTADOS	83
TABELA 5-8:DISTRIBUIÇÃO DE POROS NOS SUBVOLUMES DO CP2 DE CONCRETO DE REFERÊNCIA	84
TABELA 5-9: DISTRIBUIÇÃO DE POROS DO CP1 DE CONCRETO DE REFERÊNCIA	89
TABELA 5-10: DISTRIBUIÇÃO DE POROS DO CP3 DE CONCRETO DE REFERÊNCIA	89
TABELA 5-11: VOLUME TOTAL DE POROS DO CP2 DO CONCRETO DE REFERÊNCIA E MÉDIA DE POROS CONECTADOS E NÃO CONECTADOS	91
TABELA 5-12: VOLUME TOTAL DE POROS DO CP1 DO CONCRETO DE REFERÊNCIA E MÉDIA DE POROS CONECTADOS E NÃO CONECTADOS	91
TABELA 5-13: VOLUME TOTAL DE POROS DO CP3 DO CONCRETO DE REFERÊNCIA E MÉDIA DE POROS CONECTADOS E NÃO CONECTADOS	92

1. Introdução

Atualmente, a sociedade impõe ao indivíduo necessidades de consumo cujos resíduos de produção e usos passam a ser um problema (NAGALI, 2011). A partir de movimentos como a Revolução Industrial, o aumento da produção de bens de consumo e, conseqüentemente, a exploração de matérias primas naturais trazem à tona diversas questões em torno da sustentabilidade.

Antes da Conferência de Estocolmo, realizada pelas Nações Unidas no ano de 1972, pouco se falava sobre alternativas para frear as ações prejudiciais e melhorar as condições ambientais que se apresentavam até então. Naquele momento, passa-se a tratar o meio ambiente como um direito do ser humano, e estas questões ganham relevância em âmbito mundial.

Após a Conferência de Estocolmo, inclusive o Brasil que já iniciara anteriormente algumas pequenas discussões governamentais sobre meio ambiente, institui na Constituição Federal de 1988, no capítulo IV – artigo 225 (CONGRESSO NACIONAL DO BRASIL, 2015), que trata sobre as questões ambientais, o seguinte trecho:

“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.”

Também influenciada por este processo, a indústria da construção civil passa a dar destaque às questões relacionadas à qualidade, reanalisando e modificando suas tecnologias e seus métodos de produção e gerenciamento (ZORDAN, 1997).

Segundo o arquiteto Tarcísio de Paula Pinto, pioneiro em resíduos da construção civil no Brasil, a perda financeira no processo construtivo no país chega a pelo menos 10% do custo total da obra. Ou seja, a cada dez pavimentos construídos, um é desperdiçado (JOVCHELEVICH, 1994).

Em grande parte da história da construção civil, os resíduos originados dessa indústria foram considerados lixo, sendo inclusive depositados em aterros sanitários

comuns, como pode ser visto na Figura 1-1. Além do desperdício financeiro, grandes problemas ambientais como assoreamento de nascentes, entupimento de vias pluviais e enchentes são registrados todos os anos. Deve-se registrar ainda as doenças causadas por diversos vetores como dengue, leishmaniose, doença de Chagas, entre outras.



Figura 1-1 - Depósito em aterro próximo de área ambiental em Belo Horizonte

Os agregados obtidos por exploração, como na Figura 1.1, são ainda os mais comumente utilizados. Podem ser obtidos por extração de pedreiras (Figura 1-2) e por extração de areia e cascalho em rios e córregos.



Figura 1-2: Exploração de minerais para construção civil

Os agregados reciclados, como opção aos agregados obtidos por exploração de jazidas, derivam de materiais reprocessados que foram anteriormente utilizados na construção, incluindo resíduos de construção e demolição (UEPG, AGGREGATES, 2018).

São considerados resíduos recicláveis as cerâmicas, concreto sem a presença de aço ou qualquer material inerte e peças cimentícias. Segundo diretrizes da (ABNT, 2004), apenas 10% de contaminantes são permitidos. Como exemplo de materiais contaminantes podem ser citados o gesso, espumas, materiais orgânicos e restos de rejeitos em geral.

Sendo um dos contaminantes mais prejudiciais devido às suas propriedades expansivas, o gesso presente em maior quantidade influencia diretamente na qualidade de agregado. Além disso, quanto maior a quantidade de finos, menor a resistência do material.

Outro ponto importante está relacionado à mineração ilegal de areia. Inúmeros movimentos de extração acontecem em meio à crescente questão da clandestinidade, o que prejudica de muitas formas as reservas naturais existentes (DAVID CROSTWAITE, 2012).

Além da indústria e do potencial financeiro no reaproveitamento do rejeito, o perfil dos clientes muda com o passar das décadas. Um consumidor alinhado e sensibilizado por movimentos sustentáveis passa a exigir o cumprimento de normas e diretrizes, a favor de um consumo consciente.

Ao mesmo tempo que surge esse movimento em prol da sustentabilidade, disparam as áreas de despejo irregular, denominadas bota-foras. Isso ocorre devido ao alto custo de despejo em aterros sanitários específicos. Segundo pesquisas realizadas pela autora, cada caçamba, com volume aproximado de 7 m³, pode ultrapassar R\$300,00 para a empresa construtora.

Felizmente, as pesquisas voltadas ao reaproveitamento oferecem um melhor entendimento do comportamento deste material e os agregados ganham uma oportunidade de se tornarem visíveis, permitindo sua utilização em maior escala.

Como será apresentado no próximo capítulo, países como China e Suíça avançam rapidamente tanto em pesquisas quanto em desenvolvimento de construções de alta tecnologia envolvendo os RCD's.

Enquanto isso, algumas das alternativas possíveis no Brasil, atualmente, são blocos de concreto sem fim estrutural, preenchimento de muros de contenção, argamassa fina, areia reciclada, britas e sub-base para pavimentação de estradas.

Quanto maior o conhecimento das características dos RCD's, maior a possibilidade de utilização em larga escala. O conhecimento prévio destas características, como estrutura interna, porosidade, superfície da amostra, ITZ (zona de transição interfacial), fraturas, entre outras, é fundamental para o melhor desempenho do concreto com adição de agregados reciclados.

A maioria dos ensaios e testes disponíveis é destrutiva, ou seja, para fornecerem resultados, submetem os corpos de prova a esforços ou ambientes agressivos e/ou exigem algum tipo de preparação que implica em destruição parcial da amostra. Estes ensaios podem modificar o comportamento interno das partículas, não permitindo que o pesquisador entenda como o agregado trabalha sem estar submetido a esforços externos.

Dentre as técnicas existentes para a caracterização, a microtomografia de raios-X destaca-se por possibilitar a visualização da estrutura interna do material de forma não destrutiva. Aqui, neste estudo, é importante a observação da formação dos poros e canais porosos em ambos os tipos de amostras. Além da microtomografia, as amostras também foram submetidas à técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com EDS, com o intuito de se observar a formação dos poros, trincas e elementos presentes nos agregados.

Os concretos com adição de RCD ainda são minimamente utilizados no Brasil devido à facilidade de acesso aos agregados naturais, e à falta de agregados reciclados de boa qualidade disponíveis. Os agregados reciclados produzidos nas usinas nacionais, possuem, em sua maioria, uma grande quantidade de impurezas, o que gera uma porosidade acima da média, quando comparados com agregados naturais. Consequentemente, os concretos produzidos com este material, tornam-se mais frágeis, com uma menor resistência à compressão, por exemplo. Sendo assim, esta pesquisa trata do estudo, análise microestrutural e possibilidade de utilização dos RCD de boa qualidade, para substituição do concreto com agregados naturais.

Este trabalho foi dividido em revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussão e conclusões. A revisão bibliográfica apresenta um breve histórico do concreto, agregados naturais e reciclados, formas de obtenção e durabilidade, além da apresentação das técnicas utilizadas para caracterização dos

materiais. Já no capítulo de materiais e métodos, apresenta-se as características dos materiais, confecção das amostras e explicação para análise e processamento das imagens. No capítulo seguinte, é possível entender os resultados obtidos. Por fim, as conclusões e discussões obtidas no capítulo anterior.

2. Objetivos do Estudo

Esta dissertação tem como objetivo fundamental, o desenvolvimento de uma metodologia para aquisição e análise de imagens 3D dos corpos de prova de concreto com agregados reciclados da construção e demolição (RCD), seguida por uma análise da porosidade presente nestas amostras.

Espera-se que estes resultados viabilizem uma posterior identificação e quantificação dos poros e canais porosos presentes neste tipo de material, possibilitando sua utilização em maior escala do que a existente atualmente.

Diante disso, os objetivos específicos são:

- Desenvolver uma metodologia de aquisição de imagens de microCT de amostras de concreto com RCD;
- Estabelecer uma rotina de processamento e análise de imagens, que permita discriminar e quantificar, de forma automática, a distribuição de tamanho e forma dos poros.
- Utilizar a técnica de Pore Network Modeling para simular a formação dos poros e canais porosos existentes nas amostras de concreto.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Concreto tradicional

Construções possuem uma heterogeneidade específica de cada cultura e referente a cada período em que estão inseridas. As antigas estruturas no Japão, eram construídas apenas em madeira, sem qualquer vestígio de ligas metálicas ou minerais. A montagem era realizada apenas por entalhes na madeira.

Na famosa Muralha da China, com construção datada entre 220 e 206 A.C., foi utilizado, dentre outros, um método construtivo conhecido como terra compactada de solo-cimento, parecido com o que era encontrado no interior do Brasil no século XVIII, onde os construtores utilizavam uma mistura composta de solo, minerais, água e uma liga natural, que podia ser urina, gordura, pelos ou sangue animal, leite e fibras vegetais.

Algumas das nações mais antigas do mundo, como os sírios e babilônios utilizavam argila para dar liga aos elementos construtivos. Egípcios já manipulavam cal e cimento, como pôde ser descoberto mais tarde, nos estudos dos métodos construtivos das pirâmides egípcias.

Utilizado em períodos históricos importantes como Roma e Grécia, o concreto era uma massa composta por cascalho, areia grossa, cal e como já foi citado, até mesmo sangue animal para atingir a consistência desejada. Há vestígios de crina de cavalo e pelos de animal para melhora da retração, que acontecia mais frequentemente em regiões com clima muito seco. Além disso, cinzas vulcânicas também já foram hidratadas para serem utilizadas como material cimentício em construções.

Já o concreto moderno, de forma simples, é composto por água, cimento e agregados. A partir desta mistura, a depender da utilização planejada, podem ocorrer incorporações de aditivos e materiais, a fim de obter uma melhora em sua eficiência.

Segundo NEVILLE (2016), os agregados representam certa de $\frac{3}{4}$ do volume da massa de concreto, ou seja, a qualidade deste material é de suma importância

para que seja obtida uma boa resistência da mistura final. Além de conferir resistência ao concreto, os agregados oferecem uma maior economia à mistura (CARVALHO, FILHO, 2017). Isto ocorre pois, como o cimento possui o maior valor dentre os materiais que compõem o concreto, a adição de agregados de boa qualidade torna possível uma redução de custos da mistura.

3.2. Agregados naturais

O Ministério de Minas e Energia (2009) define como brita ou pedra britada, com fins para construção civil, o produto proveniente do processo de cominuição de matrizes rochosas. Sendo assim, todas as partículas de agregados são provenientes de uma matriz mineral maior, denominada rocha mãe.

Já segundo Ribeiro, Pinto e Starling (2006), agregado é a denominação genérica dada aos materiais que são acrescentados à mistura pastosa de cimento e água, a fim de se obter argamassas e concretos.

Para Metha e Monteiro (2008), algumas das características mais importantes a serem determinadas nos agregados minerais são a granulometria, textura, módulo de elasticidade, abrasão, resistência à compressão, absorção de água, forma, massas específica e unitária.

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

Esta matriz pode ser composta por diversos minerais como por exemplo, basalto (de origem magmática, constituído por silicatos de magnésio e ferro, com pequena parcela de sílica), granito (também de origem magmática, basicamente composto por quartzo, mica e feldspato) e o calcário (tipo de rocha sedimentar estratificada em camadas, proveniente da fragmentação e composta por cerca de 50% de carbonato de sódio).

A norma estadunidense ASTM C 294-0, classifica os minerais ideais para serem utilizados como brita conforme listado a seguir:

Minerais de sílica, Feldspato, minerais ferromagnesianos, minerais micáceos, minerais argilosos, zeólitos, minerais carbonáticos, minerais sulfáticos, minerais de sulfeto de ferro e minerais de óxidos de ferro (A.M. NEVILLE, 2016).

Como pode ser observado a seguir na Figura 3-1 e na Tabela 3-1, os agregados ou britas, ainda conforme o documento do Ministério de Minas e Energia, podem ser classificados em rachão, gabião, brita graduada, brita corrida, rocha (ou brita) 1, rocha (ou brita) 2, rocha 18 (ou brita) 3 e rocha (ou brita) 4, rocha (ou brita) 5, pedrisco ou brita 0, pó de rocha e areia de brita.



Figura 3-1: Granulometrias de agregados. Fonte: Portal da Agência Nacional de Mineração – 2020

Tabela 3-1: granulometria das pedras britadas, seguindo norma da ABNT - 2022

Pedra britada numerada	(NBR-7211/NBR-7225)		Comercial	
	Tamanho nominal			
	Malha da peneira (mm)			
Número	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
brita 0			4,8	9,5
brita 1	4,8	12,5	9,5	19,0
brita 2	12,5	25,0	19,0	38,0
brita 3	25,0	50,0	38,0	50,0
brita 4	50,0	76,0	50,0	76,0
brita 5	76,0	100,0		
Obs: para efeito de dosagem pode-se utilizar $d_{max}=25$ mm para uma mistura de brita1+brita2			> 76 mm → pedra de mão	

Segundo (A.M. NEVILLE, 2016), granulometria é a distribuição de partículas, divididas em categorias de acordo com dimensões apresentadas. São apresentadas em porcentagens unitárias ou acumuladas, a partir de um conjunto de peneiras seguindo normas da ABNT (ABNT, 2005).

O formato e a textura dos agregados são características importantes quanto à análise de qualidade do material. Partículas mais arredondadas demonstram

desgaste pela ação da água e partículas lamelares demonstram fragilidade e maior facilidade de ruptura. A análise destes fatores é de suma importância quando pretende-se estudar a aderência entre os agregados e a massa cimentícia.

A rocha matriz deve apresentar uma baixa porosidade e não possuir fragmentações múltiplas devido ao intemperismo, reduzindo assim, a chance de originar materiais frágeis (A.M. NEVILLE, 2016).

Diretamente ligada à resistência à flexão do concreto, a aderência costuma acontecer devido à rugosidade das partículas dos agregados a partir de seu intertravamento mecânico com a pasta de cimento. É importante que as partículas possuam uma superfície mais rugosa e sejam mineralogicamente mais heterogêneas para uma melhor aderência (ALMEIDA; LUZ, 2009). É relevante destacar que para um melhor desempenho deste intertravamento, as superfícies dos agregados precisam estar livres de micropartículas, geralmente provenientes do processo de britagem. Estas partículas conhecidas como finos, podem afetar severamente as características do concreto (A.M. NEVILLE, 2016).

3.3.Agregados reciclados da indústria da construção civil

Os agregados são de fato o material de construção central em todas as construções, sejam elas casas, edifícios ou infraestrutura (UEPG, AGGREGATES, 2018). Pode-se citar como exemplo a construção de uma nova escola que requer cerca de 3.000 toneladas de agregados, ou um novo estádio esportivo que pode exigir até 300.000 toneladas. Já um quilômetro de estrada pode demandar até 30.000 toneladas de agregados (UEPG, AGGREGATES, 2018).

Sendo uma das indústrias mais poluentes do mundo, a construção civil é responsável por cerca de 290.556 toneladas de RCD (resíduos da construção civil) depositados diariamente em aterros ou locais denominados bota-fora por todo Brasil, muitos destes irregulares (ABRECON, 2018). Essa quantidade de resíduos equivale a quase 1.050 aviões Airbus A380, o modelo de aeronave comercial mais pesado do mundo (ABRECON, 2018).

A produção dos resíduos de construção e demolição engloba desde pequenas reformas até grandes construções, como estádios. Para citar um exemplo simples, a própria instalação de tubos e conduítes pode gerar uma grande quantidade de entulho.

O agregado de concreto reciclado pode ser obtido através da separação, trituração e peneiramento dos resíduos da construção e demolição. Estes processos são necessários para obtenção das granulometrias exigidas por normas e regulamentações.

Países que possuem dificuldade de obtenção e até mesmo de margem territorial para depósito de grandes volumes, viram no reaproveitamento de resíduos de construção e demolição (RCD) uma possibilidade de mercado. A partir deste contexto, associado a uma acelerada urbanização nas últimas décadas, como por exemplo a que acontece na China, o que se percebe é um enorme aumento das demolições, mesmo que as edificações sejam consideradas relativamente jovens. Tais demolições, bem como as novas construções, levaram a uma grande quantidade de resíduos.

Atualmente, a quantidade de RCD na China atinge cerca de 30% a 40% de todos os resíduos sólidos das cidades. A produção anual de resíduos de concreto na China chega a 100 milhões de toneladas e é responsável por cerca de 1/3 do total mundial de resíduos de RCD (LI, 2008). Em contrapartida, segundo (TEH; WIEDMANN; MOORE, 2018), cerca de 5 bilhões de toneladas de agregados naturais foram esgotados na China apenas no ano de 2018.

Ainda assim, em seus estudos mais recentes, (GUO et al., 2021) fornecem dados que mostram que a China recicla na construção civil, apenas 5% dos seus resíduos provenientes da construção e demolição.

Além do mais, pesquisas apontam um progressivo aumento na carga ambiental, tanto em termos de uso de recursos quanto em emissões ambientais da indústria de concreto no país (GUO et al., 2020). Nos últimos anos, pesquisas intensivas sobre o uso do RCD foram realizadas na China e várias aplicações foram bem-sucedidas.

Já nos Estados Unidos, de acordo com dados da United States Geological Survey (LANGER, 2011), cerca de 75% dos bens minerais consumidos são destinados à construção civil. Mesmo que exista uma grande oferta de exploração de agregados no país, muitas dessas fontes não conseguem atender efetivamente todas as regiões.

Não apenas a distância entre a jazida e a construção, como acontece no caso de rodovias, são fatores determinantes para a escolha pelos agregados reciclados. Muitas vezes, o agregado natural disponível não atende os requisitos necessários

quanto às propriedades físicas, tais como dureza, resistência e porosidade. Além disso, alguns contaminantes podem estar presentes, inviabilizando sua utilização.

Segundo (BHUSAL; LI; WEN, 2011), 200 milhões de toneladas de resíduos da construção são gerados todos os anos nos EUA. Deste volume, aproximadamente 100 milhões de toneladas são de material cinza, ou seja, se originam de minerais e concreto, parcela esta que é altamente reaproveitável na indústria do RCD.

Lidando com as mesmas questões, Alemanha, França, Inglaterra e Itália, lideram o ranking de geração de RCD em território europeu. Segundo dados atualizados, o conjunto de países da União Europeia, produziram cerca de 850 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (VILLORIA SÁEZ; OSMANI, 2019).

De acordo com (NASIER, 2021), cerca de 85% da composição dos resíduos da construção civil na UE, é formada por concreto, cerâmica e alvenaria. Estes valores podem sofrer variação de acordo com a localização, devido aos métodos construtivos e à utilização de dry-wall.

Com o desejo de diminuir as áreas destinadas a aterros sanitários, a Europa vem investindo em tecnologias que beneficiam o setor de resíduos sólidos em geral, não somente os provenientes da construção civil. Uma iniciativa que vem chamando atenção é a transformação de resíduos sólidos comuns em cinza volante, utilizadas para incorporação em cimentos (GLOBAL; MANAGEMENT, 2015).

Agregados reciclados se mostram bastante competitivos quando comparamos seu preço de comercialização com os agregados naturais (DAVID CROSTWAITE, 2012). Em pesquisas realizadas pela autora no ano de 2018, o metro cúbico de agregados reciclados custava em média R\$ 17,00. Em contrapartida os agregados naturais tinham seu valor entre R\$ 71,00 e R\$83,00. Porém, é necessário um grande investimento financeiro inicial para que o RCD possa efetivamente passar a competir com os agregados naturais no Brasil.

Este reaproveitamento, além de diminuir áreas de depósito, reduz consideravelmente a extração de matéria-prima, as emissões de CO₂ e a energia gasta em todos os processos que antecedem a utilização de agregados (ABRECON, 2018).

3.3.1. Nomenclatura dos agregados reciclados

Os agregados reciclados (Figura 3-2) utilizam a nomenclatura já adotada para agregados naturais, ou seja, uma nomenclatura previamente estabelecida pela ABNT para melhor aplicabilidade e padronização, como pode ser visto Figura 3-2

É importante ressaltar que mesmo que a ABNT permita a utilização desta nomenclatura, os agregados reciclados ainda não possuem validação para serem utilizados em todas as peças de concreto como veremos mais adiante.



Figura 3-2: Exemplos granulométricos de agregados reciclados

Tabela 3-2: Nomenclatura dos RCD's - Fonte: Abrecon - 2019

Agregado	Definição	Faixa Granulométrica
Areia Fina Reciclada	Agregado miúdo com aspecto de areia resultante da classificação e britagem de resíduos de construção e demolição pertencente a Classe A, conforme Resolução CONAMA nº 307.	150 μ m < d \leq 300 μ m
Areia Média Reciclada	Agregado miúdo com aspecto de areia resultante da classificação e britagem de resíduos de construção e demolição pertencente a Classe A, conforme Resolução CONAMA nº 307.	300 μ m < d \leq 600 μ m
Areia Grossa Reciclada	Agregado miúdo com aspecto de areia resultante da classificação e britagem de resíduos de construção e demolição pertencente a Classe A, conforme Resolução CONAMA nº 307.	600 μ m < d \leq 4,75 mm
Pedrisco Reciclado	Agregado graúdo com aspecto de pedregulho e/ou brita resultante da classificação e britagem de resíduos de construção e demolição pertencente a Classe A, conforme Resolução CONAMA nº 307.	150 μ m < d \leq 12,5 mm
Brita 1 Reciclada	Agregado graúdo com aspecto de pedregulho e/ou brita resultante da classificação e britagem de resíduos de construção e demolição pertencente a Classe A, conforme Resolução CONAMA nº 307.	9,5 mm < d \leq 25 mm
Brita 2 Reciclada	Agregado graúdo com aspecto de pedregulho e/ou brita resultante da classificação e britagem de resíduos de construção e demolição pertencente a Classe A, conforme Resolução CONAMA nº 307.	19 mm < d \leq 37,5 mm
Bica Reciclada Graduada Simples	Granulometria contínua obtida em usina, a partir da mistura, em proporções adequadas, de produtos de classificação e britagem de resíduos de construção e demolição pertencente a Classe A, conforme Resolução CONAMA nº 307.	150 μ m < d \leq 25 mm
Rachão Reciclado	Granulometria contínua obtida em usina, a partir da mistura, em proporções adequadas, de produtos de classificação e britagem de resíduos de construção e demolição pertencente a Classe A, conforme Resolução CONAMA nº 307.	50 mm < d \leq 75 mm

Os processos de britagem e moagem do RCD diferem quanto às dimensões que se deseja obter, assim como os agregados naturais. Grãos de maiores dimensões, considerados agregados graúdos (passantes na peneira com abertura de malha #152mm e retidos na malha #4,75 mm), passam pelo processo de britagem. Já os grãos menores, classificados como agregados miúdos (passam pelas peneiras com aberturas de malha #4,75 mm e ficam retidos nas malhas #0,75 mm), são obtidos pelo processo de moagem (ABNT, 2005).

3.3.2. Usinas e formas de obtenção

Usinas de Reciclagem de Resíduos de Construção Civil são locais equipados para receber e tratar resíduos de construção e demolição. No Brasil, a primeira

instalação registrada foi a usina de Estoril, em 1991, localizada na parte oeste da cidade de Belo Horizonte.

Por ter sido a primeira cidade brasileira a apresentar uma usina de reciclagem para os materiais de construção civil, Belo Horizonte, por muito tempo, tornou-se referência na área de reaproveitamento deste resíduo. O pioneirismo e a experiência da cidade a tornaram referência para a elaboração da resolução CONAMA 307, no ano de 2002. Este documento estabelece as diretrizes que as cidades de todo país devem aplicar para uma melhor disposição dos seus resíduos sólidos, não somente os RCD.

Estoril foi apenas foi a primeira das 3 usinas que o município montou. A partir do crescimento deste projeto e boa aceitação da população, a Usina da Pampulha foi inaugurada em 1996, na parte mais central da cidade, tornando possível atender uma maior parcela da população.

Atualmente, apenas as unidades Pampulha e BR 040 estão em funcionamento. A usina de Estoril foi desativada pela SLU no ano de 2013. Segundo informações do órgão, a usina já não apresentava uma entrada de material significativa, que justificasse a manutenção daquele local. Ao recolher dados, percebeu-se que a população do entorno começou a se sentir incomodada com a excessiva entrada de caminhões na usina, além da quantidade de poeira que o depósito gerava.

Outro estado referência em usinas de reciclagem é o estado de São Paulo, como podemos observar na Figura 3-3. O maior número dessas instalações vem do setor privado, diferente do que acontece no caso de Minas Gerais onde as usinas citadas são administradas pelo governo municipal.

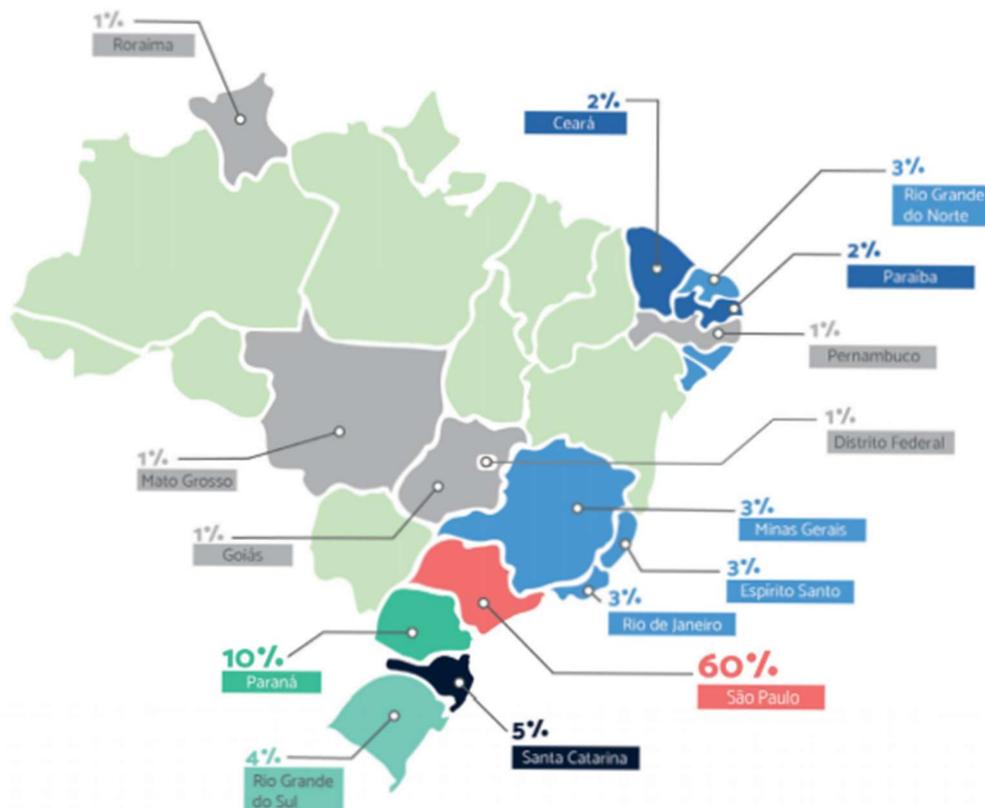


Figura 3-3: Mapa brasileiro de instalação de usinas de reciclagem de RCD - Fonte: Pesquisa setorial ABRECON – 2018

A implementação de uma usina de reciclagem de resíduos requer um amplo estudo de adequação que deve levar em conta a capacidade operacional do equipamento a ser utilizado, a disponibilidade de área construtiva, volume de resíduos a ser processado e um completo estudo ambiental para evitar qualquer agressão ao meio em que estará inserida, seja ele uma comunidade ou uma área de reserva ambiental etc.

Além destes fatores, deve-se levar em consideração a viabilidade de transporte e distância dos centros urbanos em que a planta estará localizada. Para que seja atrativo aos construtores e demolidores, é necessário que os locais de instalação sejam de fácil acesso e, em um cenário ideal, uma rota conhecida pelas empresas de transporte deste material. A seguir, na Figura 3-4, é apresentada a Usina Reciclax, fornecedora dos agregados reciclados utilizados nesta pesquisa.



Figura 3-4: Usina privada Reciclax, São Paulo - Fonte: Reciclax - 2021

Caso isto seja inviável, visto que o cenário urbano atual é composto por pouquíssimo planejamento, uma alternativa possível é a instalação de pontos de coleta regularizados, espalhados pela cidade, com coletas programadas.

A obtenção destes agregados é realizada de forma mecânica e segue fases de seleção de carga, despejo, transporte para o maquinário, trituração e empilhamento.

Os tipos de britadores utilizados nas usinas de reciclagem podem ser do tipo britadores de impacto, britador de mandíbula, moinhos de martelo, cones de britagem, moinhos e argamassadeira.

Vemos a seguir, na Figura 3-5 um britador de impacto com esteiras, maquinário mais comum em grandes usinas. Cada esteira recebe a produção de uma dimensão de RCD específica e o empilhamento do material deve ser feito com cautela evitando que outros tipos de brita se misturem.



Figura 3-5: Usina de reciclagem de RCD - Belo Horizonte - MG/2018

Um dos maiores problemas enfrentados pelas usinas é a contaminação, tanto de material orgânico como de solo. É proibido pela Resolução CONAMA nº 307 de 05/07/2002, o despejo de solo proveniente de terraplanagem em aterros sanitários, e o valor cobrado em aterro para construção civil costuma ser considerado alto.

Sendo assim, em uma tentativa de burlar estas restrições, muitos responsáveis pelo transporte de resíduos adotam a prática de misturar solo ao RCD. A presença de solo como pode apresentado na Figura 3-6, principalmente argila, enfraquece de forma significativa o material, impossibilitando o seu uso.



Figura 3-6: a) Areia RCD contaminada com solo - b) Brita 1 RCD – c) Brita 0 RCD

Os custos de montagem de uma usina de reciclagem ainda são dificilmente calculáveis pois dependem diretamente de fatores como processamento de resíduos, controle de qualidade, tipo de construção local a ser demolida, custo de transportes etc. (MAKUL, 2020).

3.3.3. Normas para RCD

Hoje no Brasil existem, pela ABNT, sete normas disponíveis para a regularização do RCD, são elas:

1. *ABNT NBR 15112:2004 - Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação;*
2. *ABNT NBR 15113:2004- Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação;*
3. *ABNT NBR 15114:2004- Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação;*
4. *ABNT NBR 15115:2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;*

5. *ABNT NBR 15116:2004- Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos;*
6. *ABNT NBR 15849:2010- Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento;*
7. *ABNT NBR 8419:1996 (versão corrigida de 1996) - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – Procedimento;*

Como é possível notar, a legislação possui um número restrito de normas e possibilidades de utilização deste material. As alternativas permitidas não englobam peças estruturais e sim pavimentação.

Além destas normas, uma boa diretriz para quem estuda este resíduo é a PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos e Logística Reversa de 2010.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2007), a publicação orienta órgãos governamentais quanto à fiscalização, desde a geração até a reciclagem dos resíduos de construção civil. Orientações sobre como proceder em caso de novas áreas de transbordo e deposição se fazem de extrema importância devido às altas irregularidades neste âmbito, principalmente quando estão localizadas próximas a nascentes e reservas ambientais.

3.3.4. Concretos com adição de agregados de RCD

Nesta seção serão descritas as principais características dos concretos produzidos com agregados provenientes da indústria da construção e da demolição.

O concreto com RCD, também conhecido popularmente como concreto reciclado, é aquele composto por resíduos da construção civil sob a forma de agregados. Pode ser de substituição completa ou parcial.

De acordo com (LEITE, 2001), os primeiros indícios de reaproveitamento de resíduos da construção civil surgem, efetivamente, a partir do término da segunda guerra mundial, devido à grande quantidade de escombros e materiais que ficavam expostos e precisavam de uma destinação para a reconstrução das cidades. Estima-se que o volume de entulhos nas cidades alemãs chegava a uma média de 500 milhões de metros cúbicos.

A NBR 15575, que entrou em vigor em julho de 2013, trata do conforto, durabilidade, habitabilidade, segurança e sustentabilidade das edificações e habitações no Brasil. Dentre os requisitos para que suas determinações sejam cumpridas, está a qualidade dos materiais utilizados durante a execução da obra.

Independente da técnica construtiva escolhida pelo construtor, a norma determina que a VUP (vida útil de projeto), para peças de concreto, seja de no mínimo 50 anos (ABNT, 2013). Tal exigência reflete diretamente na necessidade de uma padronização dos materiais, sejam eles os habitualmente utilizados ou as novas tecnologias empregadas.

Uma das grandes dificuldades em se padronizar e conseqüentemente utilizar o concreto reciclado, está em uma propriedade conhecida como trabalhabilidade. A trabalhabilidade é a propriedade que determina a facilidade com que o concreto, em seu estado fresco, será misturado, lançado, vibrado, adensado e finalizado, de acordo com as normas vigentes (A.M. NEVILLE, 2016).

O concreto de RCD tende a ter uma trabalhabilidade pior do que o concreto tradicional. Isto ocorre devido à presença de uma quantidade maior de finos nos agregados, provenientes do excesso de britagem das cerâmicas, ou mesmo de cimento antigo, presentes na parte cinza do resíduo processado. Este valor pode chegar a 30 % do volume do agregado (LI, 2008). As partículas de finos podem se apresentar sob a forma de camadas na superfície dos agregados, tornando-os rugosos e ásperos, ou ainda, em forma de grãos e partículas dispersas, entre o material.

Esta característica faz com que os agregados possuam um maior índice de absorção de água, fazendo-se necessário uma alteração no traço de concreto. Tal alteração pode se dar através do acréscimo de aditivos plastificantes ou mesmo um aumento do fator água-cimento.

Outro fator que influencia diretamente na trabalhabilidade do concreto fresco é a irregularidade que os agregados reciclados apresentam. Devido à sua forma mais angular, estas amostras, quando em movimento, provocam um atrito maior, o que ocasiona uma mistura mais densa.

3.3.5. Porosidade do concreto com agregado de RCD

A ITZ (Interfacial Transition Zone), ou zona de transição interfacial, segundo (HOSAN et al., 2021), é uma fina camada existente em torno dos agregados e que

os separa da matriz ou massa cimentícia de concreto. A existência de uma ITZ em torno de areia e partículas de agregado grosso no concreto tem sido um dos princípios aceitos da tecnologia do concreto por muitos anos (DIAMOND; HUANG, 2001).

Segundo (A.M. NEVILLE, 2016), quando a mistura ainda está fresca, grãos de cimento secos acabam por não conseguir se acomodar de maneira adensada entre os agregados graúdos, ou partículas consideradas relativamente maiores. Assim, ao ocorrer a hidratação, estas partículas não entram em reação, como se estivessem escondidas, o que o autor define como “efeito parede”. Isto explica a maior porosidade existente na ITZ do que em regiões de pasta, mais afastadas dos agregados.

Além das informações dadas por Neville, REN et al., 2022 mostra que, conforme acontece a vibração do concreto, no momento da sua execução, os agregados graúdos acabam sendo envolvidos por uma fina película de água, fazendo com que a relação água /cimento na ITZ seja maior do que a da argamassa. Esta característica resulta em uma maior porosidade, promovendo o crescimento orientado do hidróxido de cálcio, levando a uma degradação maior nesta região.

Ainda de acordo com (HOSAN et al., 2021), quando se trata de qualidade, a zona de transição interfacial é uma variável de primeira ordem, visto que ela está diretamente ligada às características mecânicas do concreto. Além disso, será um aspecto relevante ligado à porosidade. Quanto maior for a porosidade de uma amostra, menor será sua resistência a compressão.

Em seus estudos, (RANGEL, 2019) define que, diferentemente dos concretos convencionais, que possuem apenas uma zona de transição interfacial (ITZ), entre a pasta de cimento e o agregado, os concretos de RCD possuem duas zonas de interface: uma entre a nova pasta de cimento e o agregado de RCD e uma segunda, entre o RCD e a massa de cimento antiga. Esta característica pode influenciar diretamente na qualidade do concreto com RCD, já que é passível de um aumento considerável na porosidade nesta zona de interface.

Como cita (KIM et al., 2019), principalmente em agregados graúdos de RCD, a camada mais antiga de argamassa forma uma barreira que impede que a mistura fresca consiga a aderência necessária para a fixação do agregado. Isso faz com que ocorra um “afrouxamento” no concreto endurecido, impedindo assim

alcançar altas resistências à compressão, como é necessário nos casos de concretos de alta resistência.

Em sua pesquisa sobre a porosidade no concreto ocasionada pelas camadas de argamassa colada nos agregados reciclados, (KIM et al., 2019) enfatiza que o agregado graúdo possui quase 30% a mais de argamassa colada em sua área de superfície do que o agregado fino. Os autores sugerem como alternativa, uma preparação do agregado, uma lavagem prévia, mas alertam que em grande escala esta alternativa acaba por inviabilizar o processo devido ao alto custo associado.

Uma outra influência importante desta interface de massa de cimento antiga ocorre nas propriedades mecânicas do concreto, como será apresentado a seguir.

3.3.6. Durabilidade do concreto com agregado fabricado com resíduos

A durabilidade pode ser definida como a capacidade que o concreto apresenta de passar pelas ações e reações, sejam elas físicas ou químicas, e manter as características definidas em projeto (STEVEN; BEATRIX.K; WILLIAM, 2002).

Assim como no concreto tradicional, destacam-se dois processos de degradação; os impactos mecânicos e o trânsito de fluidos que ocorrem através da porosidade (RANGEL, 2019). O gás carbônico, muito presente em ambientes com grande trânsito de veículos, como por exemplo as garagens, é um dos maiores responsáveis pelas ocorrências relacionadas à durabilidade, como pode ser visto a seguir. A Figura 3-7 mostra um pilar de concreto tradicional em fase de carbonatação, enquanto a Figura 3-8 apresenta um concreto com adição de RCD, também em processo intenso de carbonatação.



Figura 3-7: Pilar de concreto armado em processo de carbonatação, já com armadura exposta e apresentando corrosão.

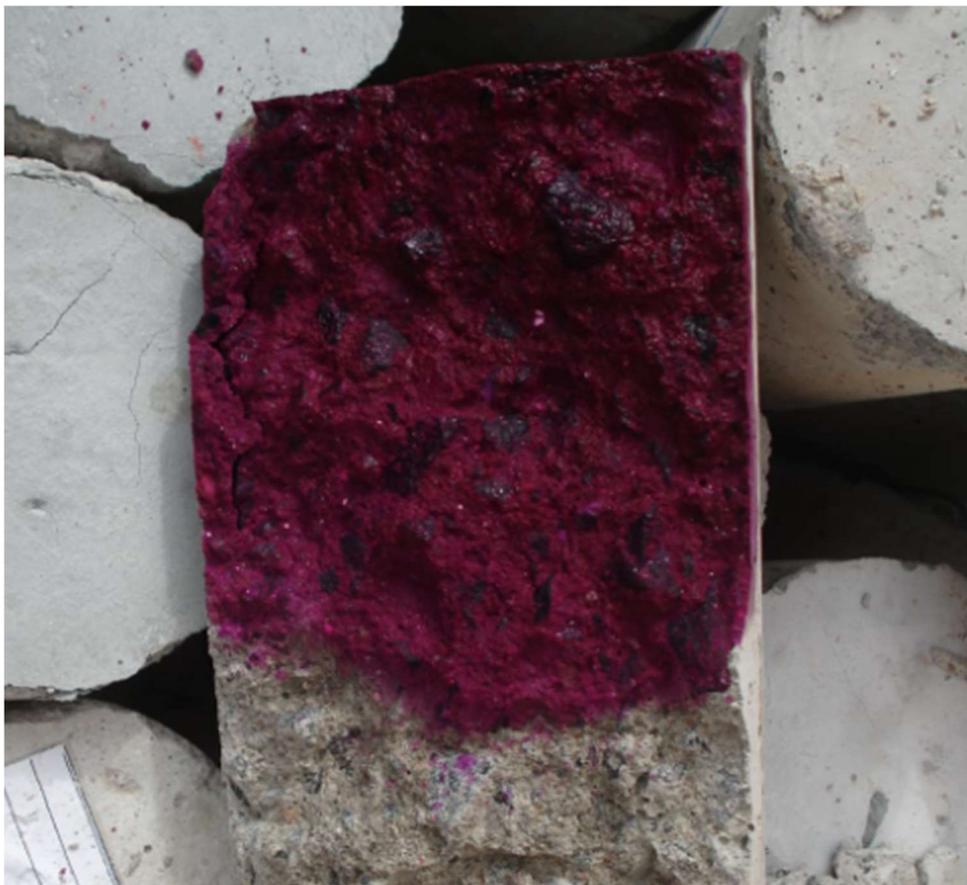


Figura 3-8: Corpo de prova de concreto com adição de RCD em processo acelerado de carbonatação.

Segundo dados do Rilem Technical Committee, diversos métodos para prever a durabilidade de estruturas de concreto estão disponíveis atualmente e se utilizam, em sua maioria, de processos de deterioração como carbonatação ou penetração de cloreto. Estes ensaios podem ser de envelhecimento natural ou acelerado.

Em recentes estudos, Silva, Cimadon et al (2022), utilizaram substituição do agregado natural por RCD's, ambos graúdos, com porcentagens equivalentes de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Além disso, foram testados fatores água/cimento de 0,40, 0,50 e 0,60. De acordo com os resultados, tanto as propriedades mecânicas quanto a durabilidade em relação à difusão do CO₂ diminuíram com o aumento do teor de substituição do agregado natural pelo reciclado.

Em pesquisas com concretos de RCD é importante ressaltar que podem ser analisados tanto o concreto como os materiais de forma individual, visto que todos os componentes influenciam de forma significativa na durabilidade. Isto ocorre devido à heterogeneidade dos agregados reciclados (Figura 3-9), que são compostos por resíduos de concreto e resíduos de alvenaria.



Figura 3-9: Exemplo de agregados heterogêneos, contaminados, em usina de reciclagem.
Fonte: a autora (2018)

Conforme já apresentado, os agregados RCD possuem cimento proveniente do concreto antigo depositado em sua superfície. De acordo com (LEVY, 2001),

um consumo de cimento acima de 500 kg/m^3 , necessita de uma cura específica do concreto, devido à altas taxas de retração e fissuramento.

Pesquisas como as de (ROBALO et al., 2021), buscam aproveitar da presença de cimento nos agregados reciclados e estudam a adição de RCD em concretos para diminuir a emissão de CO_2 na produção de cimento Portland. Segundo o autor, 80% das emissões de CO_2 na indústria da construção civil, são originadas pela produção de cimento.

Ainda segundo (ROBALO et al., 2021), em seu estudo denominado “concreto com baixo teor de cimento e agregado reciclado”, obtém-se um concreto com resistência menor do que os convencionais. Portanto, conforme aumenta-se a substituição dos agregados naturais pelos reciclados, somada a uma diminuição da adição de cimento, a durabilidade deste material é claramente afetada.

Pode-se observar a partir deste estudo que, mesmo que os agregados de RCD possuam partículas de cimento em suas superfícies, muitas vezes estas já foram hidratadas anteriormente. Isto impede a aderência do novo cimento, formando uma ITZ frágil.

Sendo assim, um dos pontos mais importantes no estudo do RCD é justamente a qualidade e padronização dos agregados (A.M.Neville, 2016), além do equilíbrio dos traços a serem elaborados.

A natureza do concreto é frágil pois sua ruptura sob cargas estáticas ocorre com uma deformação razoavelmente pequena (MEHTA; MONTEIRO, 2005). A resistência é a tensão necessária para levar o material a seu ponto de escoamento ou à sua ruptura. A forma de ruptura do concreto é dada de maneira frágil, ou seja, a ruptura ocorre de forma intragranular.

Materiais frágeis resistem consideravelmente menos a tensões de tração do que de compressão, e isso ocorre devido à heterogeneidade e falhas internas que causam concentrações de tensão em determinados pontos do corpo de prova, ao serem submetidos a ensaios mecânicos.

Ao citar as hipóteses de Griffith, (A.M. NEVILLE, 2016) pontua que os efeitos de uma ruptura microscópica, no local de uma falha, seja ela provocada pela porosidade ou por outras descontinuidades internas, serão os efeitos considerados em todo o corpo de prova. A falha mais fraca determinará a resistência do material pois o defeito, mesmo que microscópico, se propagará e será identificado como o evento que acontece no corpo como um todo.

Para os concretos fabricados com RCD, a literatura ainda não alcançou um padrão de resultados que possa ser seguido como orientação base para a utilização deste agregado de forma regular.

Como já foi visto anteriormente, a qualidade de origem, obtenção, armazenamento e transporte dos agregados influencia diretamente nos resultados do concreto produzido.

Trabalhos realizados pela autora, em momentos distintos, mostram a influência direta de agregados na fabricação de concretos com RCD.

O concreto da Figura 3-10, produzido com agregados reciclados provenientes da Usina pública BR – 040, gerenciada pela Prefeitura da cidade de Belo Horizonte, apresentou as primeiras falhas já no processo de produção. Os finos, ou seja, a areia e o cimento utilizados, foram completamente separados ainda dentro da betoneira, não se tornando uma pasta fluida, como era o esperado.

A mistura obtida foi descartada e um novo traço foi calculado, acrescentando-se um aditivo plastificante. Após uma melhora na consistência da pasta, o concreto foi colocado em fôrmas cilíndricas seguindo as normas da ABNT.

Após 7 dias de cura úmida, o corpo de prova foi desformado e apresentava segregação de partículas, indicando que a pasta de cimento não aderiu às partículas.

Passados 28 dias os corpos de prova foram submetidos a ensaio de compressão e o máximo valor de tensão obtida foi 3,5 MPa, sendo que seria necessário ter alcançado no mínimo, um valor aproximado de 30MPa. A ruptura foi rápida e em 45°, como demonstrado na Figura 3-10a seguir.



Figura 3-10: Corpo de prova deformado após sete dias de cura úmida apresentando segregação de partículas e sendo ensaiado após 28 dias

Na pesquisa realizada no laboratório de estruturas e materiais da PUC-Rio, utilizou-se agregados da usina particular Reciclax, separados manualmente em parcelas cinza (agregados e partes cimentícias) e vermelha (cerâmicas). O concreto foi produzido segundo traço citado no capítulo 4.

Outros tratamentos como por exemplo, dissolução de ácido nítrico, congelamento-descongelamento, expansão térmica e pré-imersão podem ser utilizados para melhorar o desempenho dos agregados reciclados quanto a resistência (PANDURANGAN; DAYANITHY; OM PRAKASH, 2016).

3.4. Microtomografia de raios X

A microtomografia de raios X (MicroCT) é uma técnica não destrutiva que permite a caracterização de materiais através da visualização das estruturas interna e externa do objeto estudado. O resultado é apresentado em três dimensões, a uma resolução espacial da ordem de micron (LANDIS; KEANE, 2010). Ainda segundo (LANDIS; KEANE, 2010), as tomografias computadorizadas combinam informações de uma série de imagens 2D, resultado da absorção de raios X, que vão

sendo registradas conforme o objeto gira em torno de um único eixo, como pode ser visto na Figura 3-11.

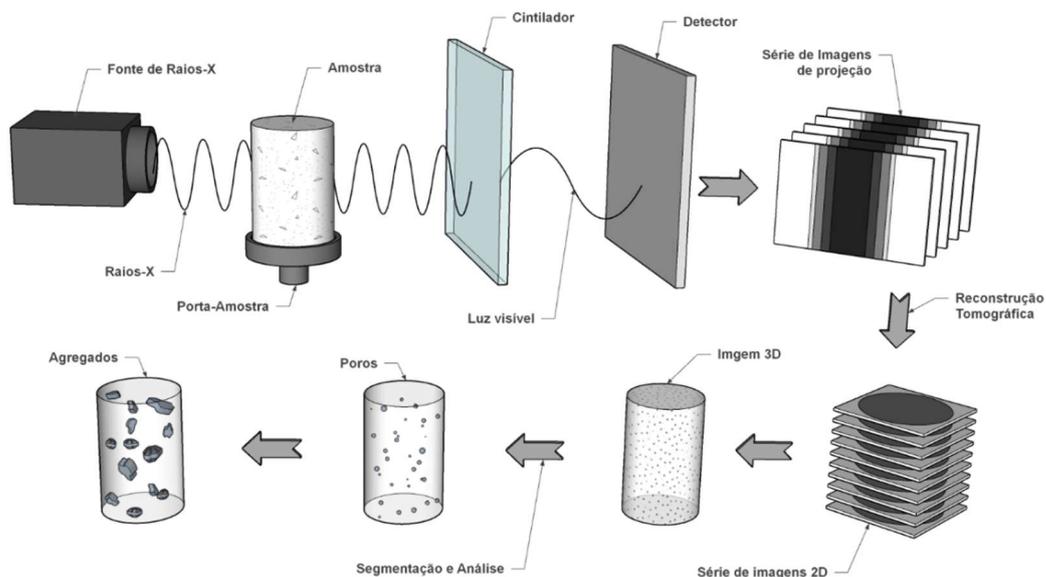


Figura 3-11: Ilustração esquemática dos processos de aquisição e reconstrução de tomografia computadorizada de raios X.

O princípio da MicroCT consiste na emissão de ondas de raios X através de uma fonte. Raios X são ondas eletromagnéticas que possuem comprimento de onda variando na faixa de 0,001 a 1 nm. Podem interagir com a matéria sob a forma de absorção fotoelétrica, espalhamento Compton e produção de pares.

Ao atingirem a amostra, objeto de estudo, os raios-x sofrem uma atenuação, sendo que os raios não absorvidos pelo corpo de prova são imediatamente absorvidos por um detector.

Abaixo (Figura 3-12), um exemplo da série de imagens 2D, conhecidas como slices, que se formam no processo de obtenção de imagens na microtomografia. Neste estudo, foram obtidas, em média, 1604 *slices* (fatias).

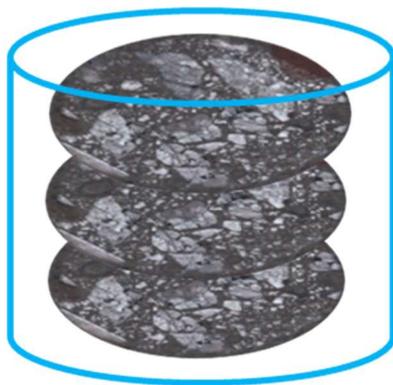


Figura 3-12: Exemplo de slices obtidos na microtomografia

A intensidade da radiação é medida pelo detector e armazenada digitalmente como uma projeção 2D. Essa projeção é magnificada em duas etapas: primeiramente em uma magnificação geométrica e em seguida um cintilador converte os raios X em luz visível que pode então ser ampliada opticamente.

Cada fase da amostra será diferenciada através do coeficiente de atenuação dos raios-x, ou seja, da absorção das ondas emitidas pela fonte na amostra. Este coeficiente é proporcional ao número atômico e à densidade de massa dos elementos que compõem o material estudado. Os elementos que possuem número atômico (Z) menor, irão absorver menos raios-X do que os elementos que apresentam maior Z . No caso de amostras heterogêneas, os componentes com maior densidade e maior número atômico irão aparecer mais claros nas imagens reconstruídas e conseqüentemente, as fases menos densas e com menor Z aparecem com tonalidades de cinza mais escuras.

Um fator importante para o entendimento do funcionamento da microtomografia é observar as distâncias fonte-amostra e detector-amostra (Figura 3-13). Essas distâncias são dois parâmetros importantes na determinação da resolução da imagem, como descrito na equação Equação 3-1.

Equação 3-1: Equação para obtenção da resolução espacial

$$R = \frac{k}{M} \text{ e } M = \frac{A + B}{A}$$

Onde R = resolução espacial

k = tamanho do pixel no detector

M = fator de magnificação

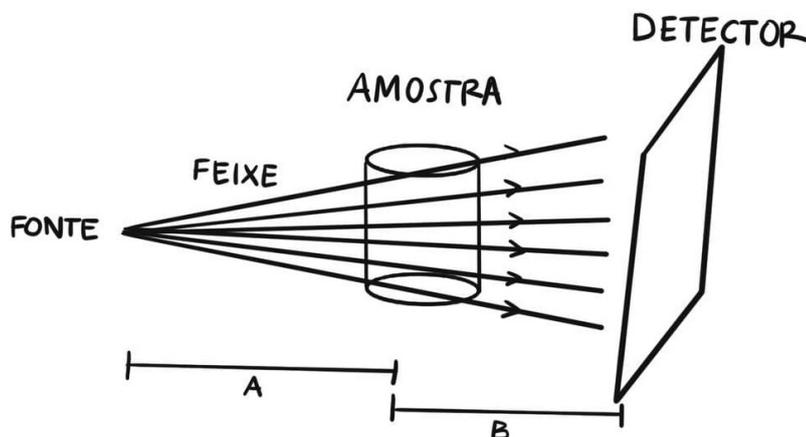


Figura 3-13: Esquema emissão do feixe de raios-X

Como mostrado na equação Equação 3-1, resolução e magnificação são inversamente proporcionais. Logo, pode-se dizer que ao se aproximar a fonte da amostra enquanto afasta-se o detector, aumenta-se a resolução das imagens obtidas. É importante destacar que este processo diminui consideravelmente o campo de visão que abrange o corpo de prova.

O parâmetro *binning* refere-se à combinação de matrizes de pixel para criar um pixel maior. Essa combinação aumenta o nível do sinal medido, levando a mais contraste e menos ruído. No entanto, a resolução das imagens também será menor, pois seria como se o pixel e, portanto, os tamanhos do voxel fossem maiores. Uma vez que o *binning* de pixels reduz a quantidade de informação a ser transferida para o computador, o tempo de aquisição pode ser ligeiramente diminuído quando tal parâmetro é alterado (FRIEDRICHSDORF et al., 2019).

3.4.1.A importância do estudo da MicroCT em materiais cimentícios

A MicroCT é uma técnica de aplicação crescente no campo da mecânica experimental por sua capacidade de fazer medições 3D não destrutivas e precisas da morfologia do material.

Por ser uma avaliação não destrutiva, a MicroCT permite a observação do progresso de um dano em uma mesma amostra com a evolução do tempo, como ocorre por exemplo em casos de ataque de sulfato. A técnica tem sido amplamente

utilizada para análises provocadas na microestrutura do material cimentício, ocasionadas por diferentes tipos de carregamento impostos (mecânicos, químicos ou térmicos) (Lorenzoni et al., 2022). Essa capacidade de quantificar os danos conforme eles acontecem, auxilia na previsão da vida útil da peça de concreto (NAIK et al., 2004).

Além dos ataques de sulfato, concretos que possam vir a sofrer com altas temperaturas, como por exemplo, estruturas e revestimentos de túneis subterrâneos se beneficiam com os estudos de MicroCT. Estes estudos são importantes para que os engenheiros e pesquisadores possam se antecipar aos prejuízos, já que nestes ambientes é extremamente difícil o controle de incêndios e por consequência, o estudo do comportamento dos materiais submetidos a estas ocorrências. Mudanças no concreto sujeito ao fogo, segundo (KIM; YUN; PARK, 2013), incluem perda de resistência à compressão e velocidade de onda elástica, descoloração, alterações morfológicas, rachaduras e fragmentação, dependendo da temperatura e do tempo de exposição ao fogo.

Os danos causados pelo fogo no concreto submetido a altas temperaturas, como no caso de incêndios, tem relação direta com a porosidade das estruturas. Ainda de acordo com (KIM; YUN; PARK, 2013), a estrutura interna de hidratos de cimento varia quando exposto a altas temperaturas e os principais produtos da reação de hidratação da pasta de cimento são 60% – 70% C-S-H gel e 20% – 30% portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Estes estudos mostram que, a evaporação da água livre, perda de água a partir da decomposição de C-S-H, hidratação de carboaluminato, desidroxilação de portlandita e desidratação de hidratos de cimento causa mudanças na estrutura dos poros, produzindo mudanças significativas nas propriedades físicas da pasta de cimento endurecida, especialmente mudanças na estrutura interna e a criação de fissuras induzidas pelas altas temperaturas do fogo.

Após submeterem as amostras a exposições térmicas artificiais de 1000 °C, intervaladas com temperaturas de 100° C, os pesquisadores observaram as estruturas 3D de poros e das fraturas induzidas por este processo. Foi possível também uma investigação dos danos de curta duração na estrutura à base de cimento pelo fogo. Na temperatura máxima de 1000 ° C, uma membrana se formou no interior da estrutura após o derretimento, causada pela decomposição dos produtos da hidratação, derretimento de minerais e agregados. Sabe-se que corpos de prova

expostos ao fogo são mais afetados pela temperatura máxima inicial do que pelo aumento gradual da temperatura (KIM; YUN; PARK, 2013).

Além de entender o comportamento de ataques e questões relacionadas à durabilidade, a microestrutura tem sido amplamente estudada através da MicroCT para entender e melhorar as propriedades dos materiais cimentícios. Uma das tecnologias mais importantes tem sido a utilização de fibras para aprimorar as características mecânicas das peças de concreto como resistência à tração, absorção das energias de carga de impacto e melhora da resistência à abrasão, além de diminuir a formação de fissuras e trincas.

A forma como as fibras se dispõem dentro das peças de concreto é determinante para a definição de sua eficiência. Vários estudos têm demonstrado que a presença de fibras pode afetar a estrutura interna da matriz e sua porosidade (RÍOS et al., 2019).

Em seu estudo sobre distribuição espacial de fibras sintéticas em concreto, (BORDELON; ROESLER, 2014) debate, entre outros tópicos, sobre os modelos ideais, onde as fibras assumem uma distribuição uniforme e os modelos reais, onde a dispersão geralmente acontece de maneira aleatória.

As amostras de concreto reforçadas com fibras, quando endurecidos (CRF), são frequentemente cortados em fatias ou seções para que seu comportamento possa ser estudado, logo, além de danos causados na própria matriz cimentícia pela vibração destes cortes, as fibras também sofrem danos que influenciam o comportamento final do corpo de prova. Um dos principais desafios da MicroCT em concreto reforçados com fibras poliméricas, como no caso do estudo de (BORDELON; ROESLER, 2014), é a incapacidade da maioria dos softwares de processamento de imagens em distinguir as fibras dos vazios de ar, ou poros; isto ocorre devido à intensidade da escala de cores obtidas ser semelhante para ambos os casos.

4 Materiais e métodos

4.1. Materiais

4.1.1. Agregados reciclados

O agregado reciclado (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), foi gentilmente cedido pelo Grupo Reciclax (Ribeirão Preto – SP) à PUC-Rio, que forneceu uma parcela deste material para que fossem moldados os corpos de prova no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC–Rio. Os departamentos de Engenharia Civil e Ambiental e Engenharia Química e de Materiais estão obtendo resultados em parceria neste estudo.



Figura 4-1: Agregado recém-chegado ao Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC – Rio

O agregado reciclado possui originalmente uma quantidade maior de finos quando comparado ao natural. Isto ocorre, devido à presença de solo e gesso, materiais ditos contaminantes, que são geralmente incorporados durante as demolições e transportes.

Sendo assim, um processo importante para obtenção de um concreto de melhor qualidade é a lavagem do material em laboratório, conforme mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Vale ressaltar que esta lavagem se torna inviável em campo, uma das justificativas para a pouca utilização dos agregados reciclados na fabricação de peças de concreto.



Figura 4-2: Lavagem do agregado recém-chegado ao Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio - (Fernanda Salgado – 2019)

Após a lavagem faz-se necessário a secagem dos agregados em temperatura ambiente para evitar que o excesso de água possa influenciar no traço do concreto confeccionado.

Os agregados foram manualmente separados de modo que todo o material cinza (concreto antigo e brita) fosse separado da parte cerâmica, além de contaminantes como isopor e plástico. Esta fase proporcionou melhores frações de cada material para preparação do concreto.

4.1.2. Agregados naturais

Foi utilizada brita zero (dimensões de 4,8 a 9,5 mm) proveniente de jazidas de granito branco rosado, localizadas em Estrada dos Bandeirantes, 13840, Vargem Pequena, Rio de Janeiro. Segundo dados fornecidos pela empresa, o módulo de finura do agregado natural é de 7,07.

4.1.3. Cimento CP II F - 32 – Cimento Portland composto com *Filler*

Cimento Portland é constituído essencialmente por silicatos hidráulicos de cálcio, sulfato de cálcio natural e adição de clínquer em quantidades determinadas de acordo com as normativas vigentes. Pode conter eventuais substâncias que facilitam e direcionam sua utilização (BAUER, 2005).

O cimento utilizado foi o CPII – F32, da Holcim. Este é um dos cimentos mais comuns no Brasil e é utilizado em peças de concreto que necessitam de um desprendimento de calor moderado ou lento, ou ainda quando a presença de sulfatos pode ocasionar ataques à estrutura. O teor de *filler* calcário presente no CP II F-32 está entre 6 e 10%.

4.1.4. Aditivo - Master Glenium 51

De acordo com a fabricante, é um aditivo livre de cloretos e composto por policarboxilatos. Atua como dispersante do material aglomerante propiciando elevada redução na quantidade de água. É utilizado na indústria de pré-moldados e concretos protendidos, onde se requer altas resistências iniciais, maior durabilidade, maior tempo de trabalho para a aplicação e desempenho sem alteração do tempo de pega do concreto.

4.2. Confecção dos corpos de prova

O traço utilizado no presente trabalho foi determinado a partir de estudos prévios no laboratório de Estruturas e Materiais na PUC–Rio (Tabela 4-1). O concreto de referência utilizou apenas agregados naturais e o concreto com agregados reciclados utilizou uma substituição de 50% de agregados misto.

Tabela 4-1: Dosagem para 1 m³ de concreto com adição de RCD

Traço					
Cimento CII-F32	360	kg		ρ_{nat} (kg/m ³)	2624
Areia	727	kg	40%	V total (m ³)	0,416
Agreg. Graúdo Total	1091	kg	60%	taxa substituição	50%
Brita Natural	544	kg	30%	V reciclado (m ³)	0,208
Agreg. Reciclado Misto	547	kg	30%	ρ reciclado (kg/m ³)	2632
Água	180	l		M reciclado (kg)	547
fator a/c	0,50				
total agregado	1818	kg			

Segundo a NBR 12655:2015, que trata sobre preparo, controle e recebimento de concreto de cimento Portland, o fator água cimento é a relação em massa entre o conteúdo efetivo de água e o conteúdo de cimento Portland e outros materiais cimentícios.

O fator água–cimento é inversamente proporcional à resistência do concreto, ou seja, a forma como o concreto vai se comportar no estado endurecido depende diretamente da quantidade de água a que ele foi submetido e seus valores máximo e mínimo devem estar entre 0,65 e 0,45. Nesta pesquisa, o valor escolhido para este fator foi de 0,5. A escolha por prismas de concreto se deu para que não existisse o risco de uma compactação irregular. Como o tomógrafo de raios-X possui uma limitação quanto ao tamanho da amostra, um corpo de prova compactado em fôrma cilíndrica menor, poderia apresentar irregularidades que interfeririam nos resultados. Todas as amostras foram moldadas de acordo com a NBR 5739 (2018).

A mistura do concreto iniciou-se com a separação e pesagem dos materiais (Figura 4.3). Após separadas as quantidades dos materiais, foram colocadas na betoneira primeiramente os materiais secos (cimento, areia, agregados), como visto na Figura 4.4



Figura 4-3: Pesagem dos agregados para produção do concreto



Figura 4-4: Mistura do concreto

Realizada a mistura dos materiais secos na betoneira, adicionou-se primeiramente metade da água calculada no traço e, após uma mistura mais rápida, adicionou-se o restante. Por último foi acrescentado o aditivo. Como mostrado na Figura 4.5, os prismas foram moldados logo após a retirada do concreto da betoneira. As amostras foram levadas à cura úmida.



Figura 4-5: Moldagem dos prismas de concreto

A cura do concreto, segundo (A.M. NEVILLE, 2016), é um processo de hidratação do cimento e consiste no controle da temperatura e da entrada e saída de água do concreto. Caso a cura não ocorra da maneira correta, ou seja, em ambiente de umidade controlada, podem ocorrer fissuras, devido à retração do concreto, que prejudicariam os resultados dos estudos aqui propostos.

Para isso, os corpos de prova prismáticos foram submetidos à cura em câmara úmida, com temperaturas e umidades controladas, no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio. Após três dias em câmara com temperatura e umidade controladas, os CP's foram desformados e retornaram à cura úmida até completar a idade de 28 dias, para que pudessem ser levados a ensaio de compressão, como indicado em norma.

Os prismas moldados possuíam dimensões de 150 x 150 x 550 mm, tanto para traço de referência como para traço com substituição de agregado reciclado. Dos prismas moldados inicialmente foram retirados 6 corpos de prova cilíndricos de dimensões 38 x 150 mm (Figura 4.6).

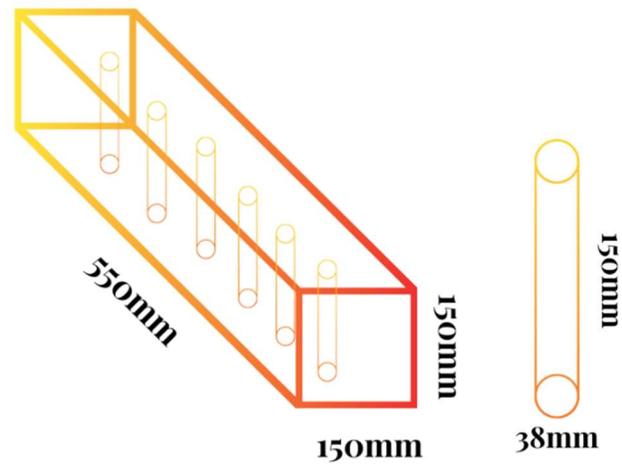


Figura 4-6: amostras prismáticas e cilíndricas de concreto de referência e agregados reciclado

A extração dos corpos de prova cilíndricos ocorreu após a cura de 28 dias das amostras prismáticas, utilizando-se a técnica de broqueamento (Figura 4.7).

Os resultados apresentados nesta pesquisa referem-se corpos de prova 1,2 3 do concreto convencional e 4, 5 e 6 do concreto com adição de RCD.



Figura 4-7: CP's confeccionados no laboratório de estruturas e materiais da PUC Rio - Traço adotado: 50% de agregados naturais + 50% de agregados reciclados.

4.2.1. Microtomografia de raios X

Com o processo de obtenção da amostra terminado, pôde-se dar início ao processo de análise do material.

Foi utilizado o Laboratório de microtomografia da PUC-Rio e o microtomógrafo ZEISS XRadia 510 Versa que possui uma resolução espacial mínima de $0,7 \mu\text{m}$ e uma altura máxima de amostras de 300 mm (Figura 4.7).



Figura 4-8: MicroCT - XRadia 510 Versa PUC Rio

O primeiro passo foi o posicionamento do corpo de prova em uma porta amostra e acoplá-lo dentro do MicroCT conforme a figura 4.8. É importante que a amostra fique o mais vertical possível para que os feixes de raios X fiquem sempre perpendiculares ao eixo cilíndrico do suporte (PEREIRA et al., [s.d.]).

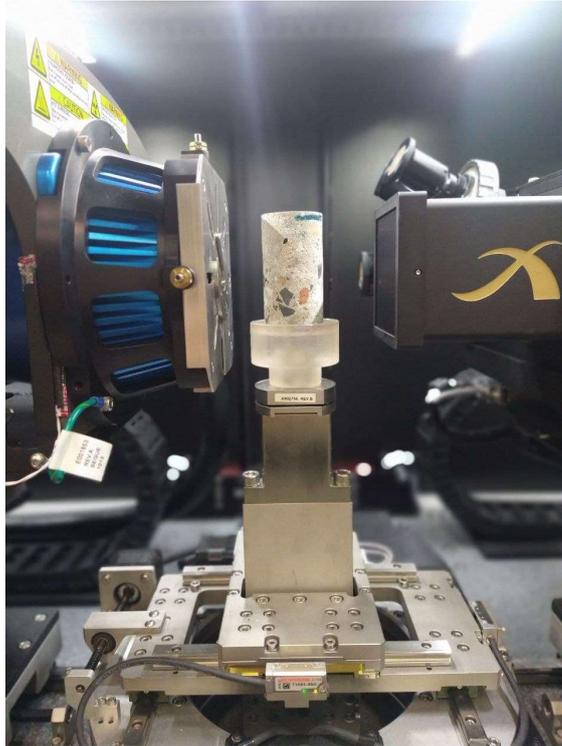


Figura 4-9: Amostra de concreto com RCD posicionado no MicroCT

Devido às dimensões dos corpos de prova, optou-se por dividir digitalmente a amostra em 3 volumes no momento da execução da tomografia.

Como cada material possui características próprias, faz-se necessário um conhecimento prévio de elementos que o constituem para que assim, sejam definidos seus parâmetros.

Após os procedimentos iniciais, as amostras de concreto foram colocadas no porta amostra e expostas a raios X com energia de 140 keV. A lente de magnificação óptica utilizada, seguindo as indicações do Software Scout and Scan Control System, foi de 0,4X e o tempo de varredura da amostra variou em média de 3 a 4 horas.

Após análise prévia, quando comparado a estudos anteriores, como os de (LORENZONI, 2017) e (LU; LANDIS; KEANE, 2006), percebeu-se que as imagens atingiram um tamanho de pixel de 35 μm , o que não se considerou suficientemente para que os poros fossem observados com qualidade. A título de simples explicação, pode-se dizer que a resolução alcançada não foi satisfatória.

Sendo assim, as amostras foram expostas novamente aos raios X, desta vez com 160 keV. O tempo de varredura foi elevado para 8 – 9 horas, o que permitiu um pixel médio de 14 μm .

4.2.2. Reconstrução de Imagens dos corpos de prova

O processo de Micro CT gera um conjunto de imagens das projeções de toda a amostra, ao longo do seu eixo de rotação. Esse conjunto de projeções passa pelo Software *Reconstructor Scout and Scan* para que se obtenha um conjunto de imagens reconstruídas da amostra, onde agora, cada imagem corresponde a uma camada do corpo de prova. Essa amostra pode ser visualizada em 3D se utilizando dessas imagens reconstruídas em um software de renderização.

Os parâmetros mais importantes no processo de reconstrução de imagens são o *Beam Hardening* e o *Center Shift* (LORENZONI, 2017). *Center Shift* trata-se de uma correção para pequenas variações na posição do eixo de rotação, que ocorrem devido a movimentos indevidos do sistema durante a varredura. Já o *Beam Hardening* é um efeito de endurecimento do feixe de raios X que acontece principalmente em materiais mais densos. Ocorre devido a absorção de raios X de mais baixa energia pelo próprio material que está sendo analisado, ocasionando defeitos nas partes mais próximas da superfície, deixando-as com uma tonalidade diferente da parte central da amostra analisada. Estes parâmetros foram escolhidos automaticamente, no modo default do software.

4.3. Processamento e análise de Imagem

Neste tópico será apresentado o processo de análise das imagens obtidas em microtomografia de raios X, conforme a Figura 4-10.

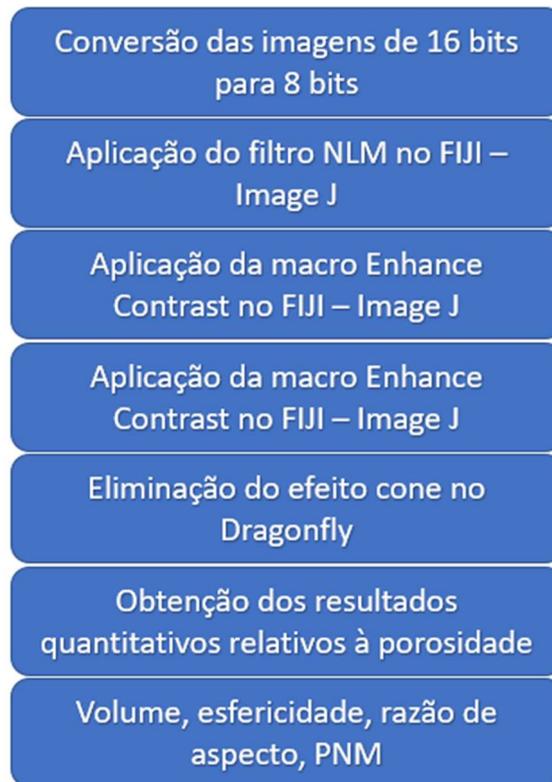


Figura 4-10: Fluoxograma do processamento e análise de imagens

A primeira operação realizada nas imagens, foi transformá-las para 8 Bits pois, os arquivos extraídos provenientes da Micro CT possuem 16 Bits.

Nesta pesquisa, utilizou-se o software para diminuição de ruídos antes da realização da segmentação. Através do plugin Non-local Means, foi possível reduzir o ruído das imagens preservando a nitidez das bordas dos objetos, o que contribuiu para diferenciar de forma mais clara as partículas de agregados.

Após a aplicação do NLM, todas as imagens dos corpos de prova foram submetidas ao processo de *Enhance contrast*. Esta macro faz com que todas as camadas fiquem com histograma bem largo, ocupando toda a faixa tonal. Além disso, o contraste fica razoavelmente similar em todas as camadas, já que é comum acontecerem variações durante a tomografia.

A partir dos valores ajustados, utilizou-se a macro histogram-matching. O histogram-matching é um processo que busca forçar o histograma de uma imagem, para que ele fique parecido com o histograma de uma imagem de referência. Normalmente, é utilizado para se igualar imagens 3D diferentes, ou seja, utiliza-se uma camada bem-comportada de uma imagem de uma determinada amostra e impõe-se seu histograma às camadas de outra amostra.

Após analisar os processos realizados no FIJI, deu-se início ao processamento das imagens no Dragonfly e a obtenção dos parâmetros escolhidos.

Dragonfly Pro da Object Research Systems (ORS) é uma solução de software de análise avançada para dados 2D/3D adquiridos por uma variedade de tecnologias de imagem, incluindo microscopia de raios X. Ao abrirmos as imagens no Dragonfly 2021, percebemos um efeito conhecido como “efeito cone”, que ocorre durante a captura de imagens no Micro CT (Figura 4-11 e Figura 4-12). Este efeito precisa ser eliminado, antes de ser iniciada a obtenção dos parâmetros escolhidos.

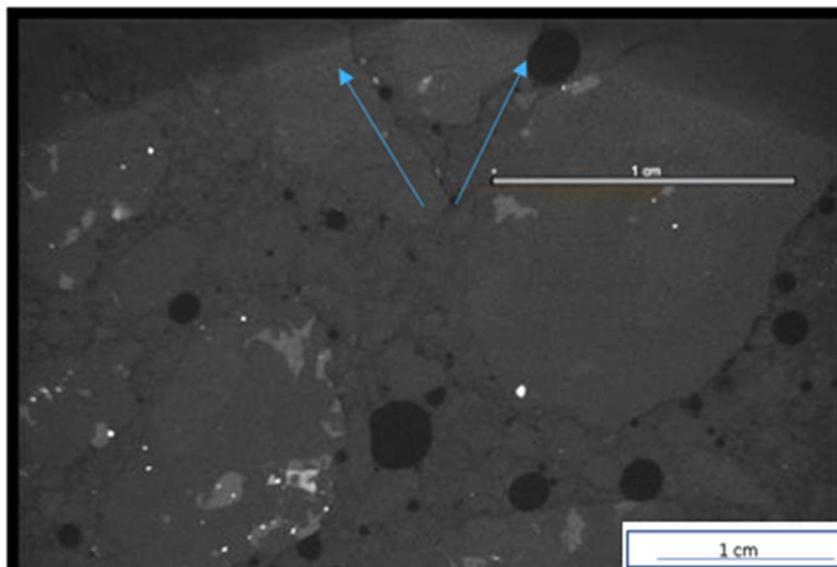


Figura 4-11: Efeito cone na face superior do eixo YZ do cp6

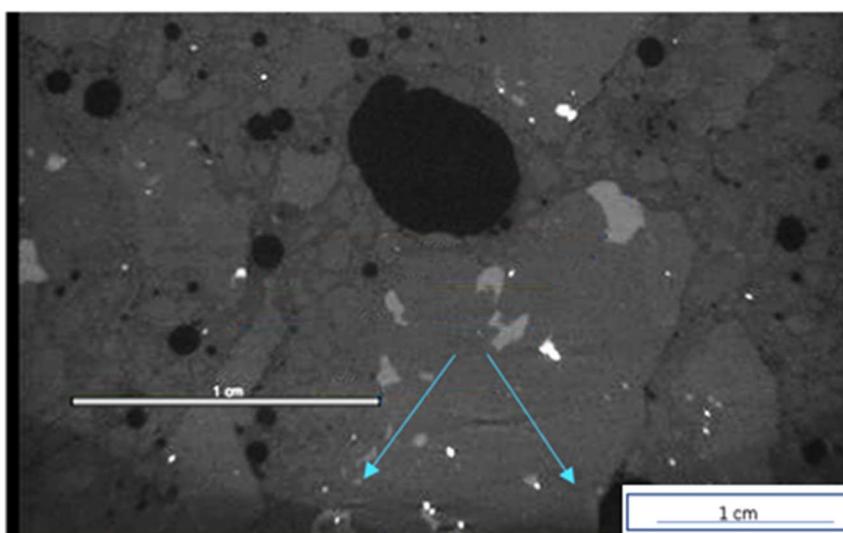


Figura 4-12: Efeito cone na face inferior do eixo YZ do cp6

É importante ressaltar que após o recorte da imagem, retirando-se o efeito cone, o volume analisado será menor do que o tamanho da amostra submetida à Micro CT (Figura 4-12e Após o recorte para a retirada do efeito cone, foi realizado um crop, que consiste em um recorte cilíndrico para que o excesso de ruídos nas bordas das imagens fosse retirado.).

Após o recorte para a retirada do efeito cone, foi realizado um crop, que consiste em um recorte cilíndrico para que o excesso de ruídos nas bordas das imagens fosse retirado.

A segmentação se deu conforme apresentado no capítulo de resultados e discussões (Capítulo 5) e foram analisados parâmetros relacionados à porosidade tais como, volume, esfericidade dos poros e razão de aspecto.

Também no *software Dragonfly*, aplicou-se a técnica PNM (*Pore Network Modeling*), que consiste em uma abordagem bem estabelecida e de longa data para simular o transporte em materiais porosos. A PNM trabalha na construção de uma estrutura topologicamente equivalente ao sistema poroso da imagem, de modo a preservar as conectividades entre os poros, porém com uma geometria simplificada (Junior & José, 2020). Ainda segundo (Junior & José, 2020), a técnica PNM é voltada para cálculos de percolação, simulando processos de invasão de fluidos realistas com facilidade computacional.

4.4. Microscopia eletrônica de Varredura – MEV

A fim de compreender o comportamento das microestruturas, defeitos e canais porosos superficiais do concreto, objeto de estudo desta pesquisa, utilizou-se também a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS.

O aparelho utilizado nesta pesquisa foi o MEV de bancada Hitachi TM 3000, equipada com espectroscopia de dispersão de energia, EDS - (Figura 4-13) do laboratório de Caracterização de Nano materiais da PUC Rio.



Figura 4-13: MEV de bancada Hitach TM3000

5 Resultados e Discussão

5.1. Comportamento Mecânico

Como primeiro passo para obter respostas sobre a eficiência e possibilidade de utilização dos concretos com agregados reciclados, optou-se por realizar ensaios de compressão com o traço escolhido.

O concreto com a incorporação de agregados naturais apresentou resistência média à compressão aos 28 dias, de 31,4 MPa. Já para as amostras com adição de RCD, os resultados ficaram entre 23 e 28 MPa (média de 25,73 MPa), o que demonstra uma boa resistência quando comparado aos concretos com agregados de má qualidade, como foi visto no tópico 3.3.6.

Tabela 5-1: Valores obtidos em ensaio de resistência à compressão

CP de referência	Resistência à compressão
CP 1	30,0
CP 2	29,0
CP 3	35,3
CP com adição de RCD	Resistência à compressão
CP 1	23,0
CP 2	26,2
CP 3	28,0

O módulo de elasticidade do concreto com adição de RCD, com 50% de substituição foi de 26,3 GPa.

5.2 Análise de Imagens

5.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

A fim de analisar as estruturas internas presentes nas superfícies dos corpos de prova, como por exemplo a ITZ, optou-se por executar a Microscopia Eletrônica de Varredura. Para que as amostras pudessem ser analisadas no MEV de bancada, utilizou-se as amostras preparadas para a microscopia óptica.

É possível a visualização na Figura 5-1, da zona de transição interfacial entre uma partícula de agregado e a matriz cimentícia de uma amostra com adição de 50% de agregados reciclados (seta de número 1). A resolução atingida nesta imagem é de 30 microns e é importante ressaltar que a zona de transição interfacial é visível em uma faixa que varia entre 20 e 70 microns. A zona de transição interfacial é conhecidamente uma região de alta porosidade e através da análise do MEV pôde-se perceber muitas destas estruturas presentes.

Ainda na Figura 5-1 e representada pela seta de número 2, pode-se notar trincas na partícula em destaque, provenientes, possivelmente, de trituração na usina de reciclagem do material advindo de construção e demolição. Estas características do material, naturalmente o proporcionam uma menor resistência, quando comparados com agregados naturais, provenientes de pedreiras naturais.

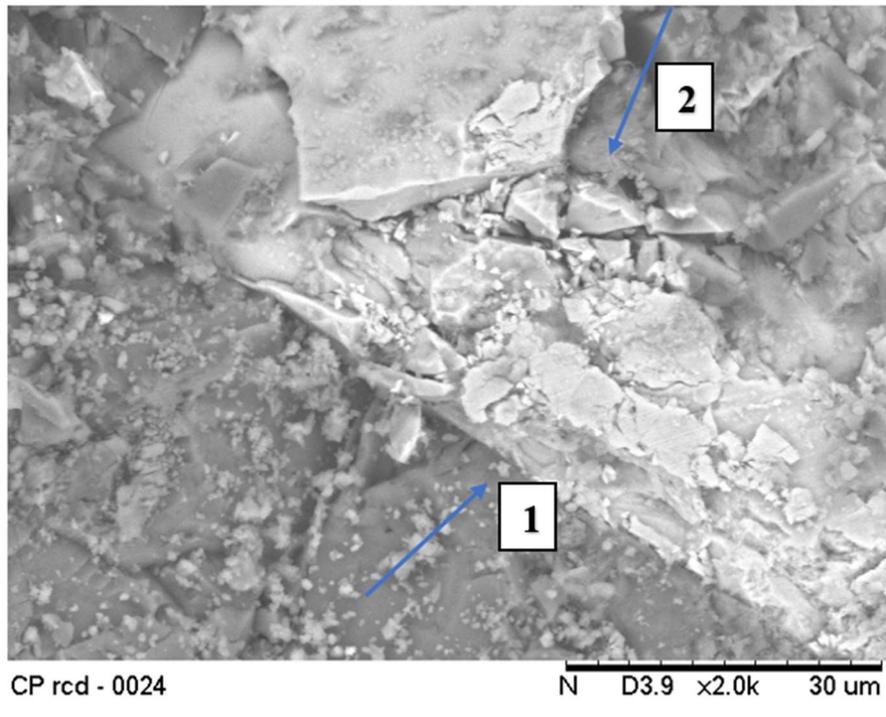


Figura 5-1: Zona de Transição Interfacial entre agregado e pasta cimentícia em amostra com adição de RCD

Na Figura 5-2, pode-se visualizar grãos de areia e as partículas com suas estruturas internas, algumas, recobertas com pasta cimentícias e com poros aparentes. Além disso, a aparência morfológica visualizada apresenta, no mínimo, dois tipos de elementos predominantes na amostra devido a diferença de contraste aparente (pontos mais claros em relação a pontos mais escuros).

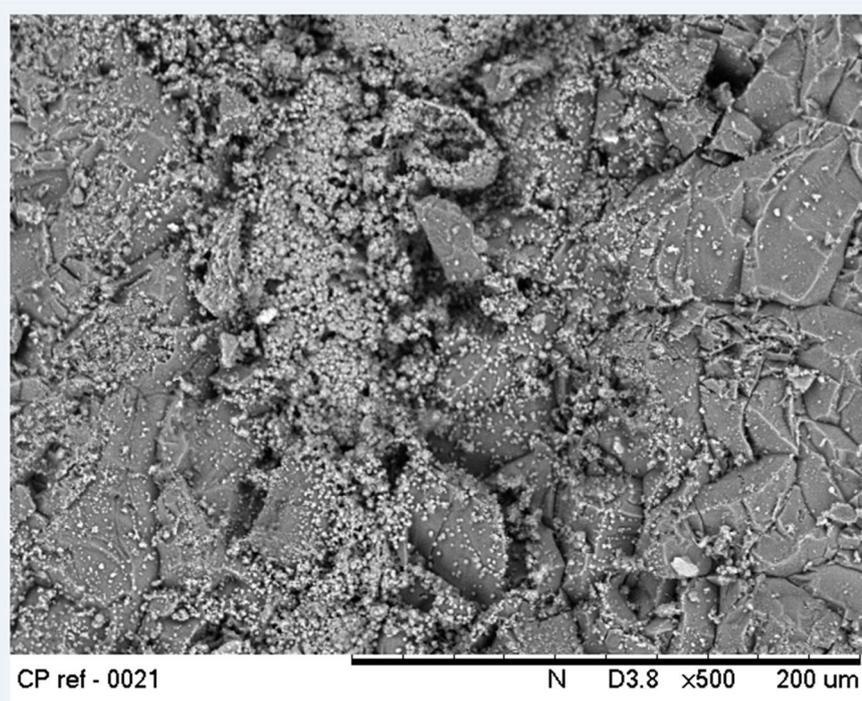


Figura 5-2: Grãos de areia, partículas e formação de canais porosos em amostra com adição de RCD vistos no MEV

Foram utilizadas diversas ampliações, que variaram de 50 a 2000 vezes. Algumas estruturas, como determinados poros, foram ampliadas para observação e entendimento de sua formação, como pode ser visto na Figura 5-3, em sequência comparativa. A aceleração do feixe aplicada foi de 15 kV.

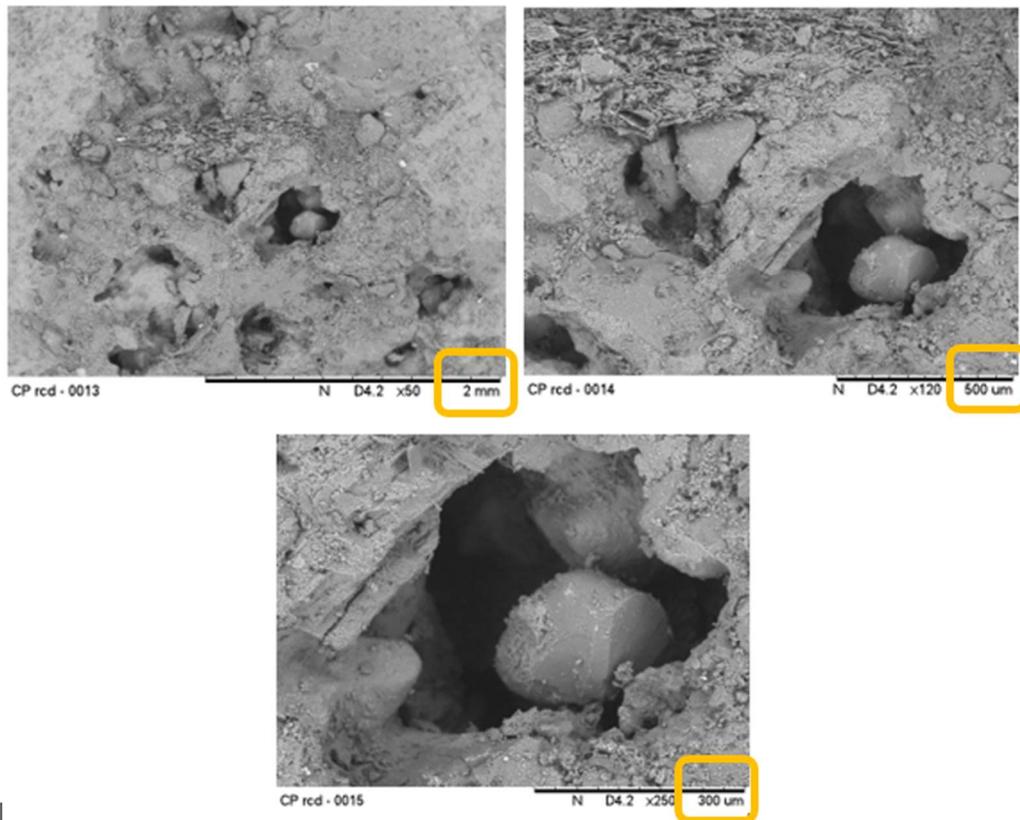


Figura 5-3: Sequência comparativa de magnificação do MEV em poro de amostra com adição de RCD

É possível a visualização (Figura 5-4) de um poro, ampliado com uma magnificação de 150 vezes. Pela estrutura do objeto, supõe-se que o poro foi formado durante a compactação das amostras, com o concreto ainda fresco. Como as amostras analisadas foram tratadas anteriormente para a microscopia óptica, estes poros podem ser considerados internos do corpo de prova prismático, que originou as amostras cilíndricas.

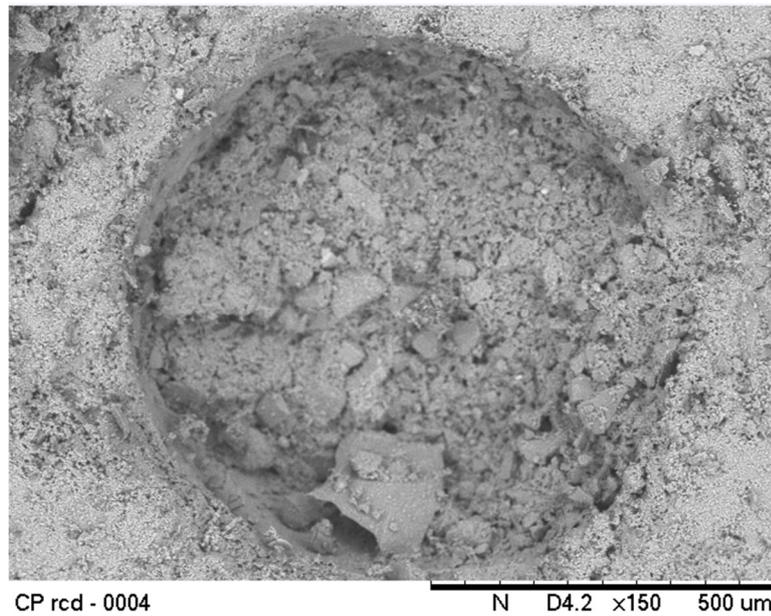


Figura 5-4: Poro arredondado na superfície da amostra de concreto com adição de RCD

5.1.1. Pré processamento no ImageJ - Fiji

Ao serem abertas no *software Dragonfly*, logo após a obtenção das imagens, notou-se que elas possuíam ruídos que poderiam interferir nas análises (Figura 5-5). Assim, optou-se por submeter os arquivos ao FIJI – ImageJ.

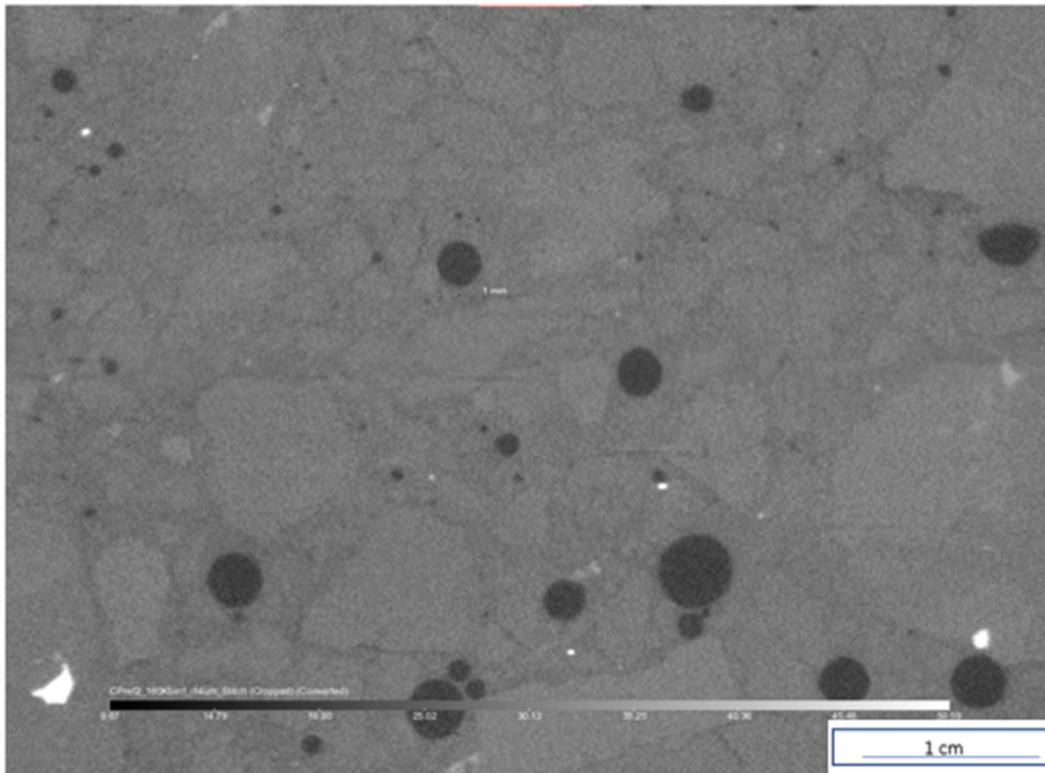


Figura 5-5: Imagem do CP6, concreto com adição de RCD, antes de passar pelo Software FIJI - ImageJ

Após alguns testes com os valores de NLM (Non Local Means) variando, e uma análise visual com os resultados obtidos (Figura 5-3a), optou-se pelo modo automático (Figura 5-3b), calculado pelo próprio software – $\sigma = 20$.

O Filtro Non-Local Means reduz o ruído da imagem mantendo detalhes e estrutura, substituindo cada pixel pela média das intensidades dos seus vizinhos mais semelhantes, dentro da variação admitida no parâmetro Sigma.

O tamanho do parâmetro Sigma modifica automaticamente a quantidade de vizinhos considerados para o cálculo desta média.

Diferentemente dos filtros anteriores que usam um valor médio de um grupo de pixels para suavizar a imagem, o Non Local leva em consideração a média de todos os pixels da imagem, ponderada pela similaridade desses pixels com o pixel alvo. Isso resulta em uma filtragem com maior clareza e menor perda de detalhes, pois a técnica além de reduzir o ruído preserva as bordas da imagem.

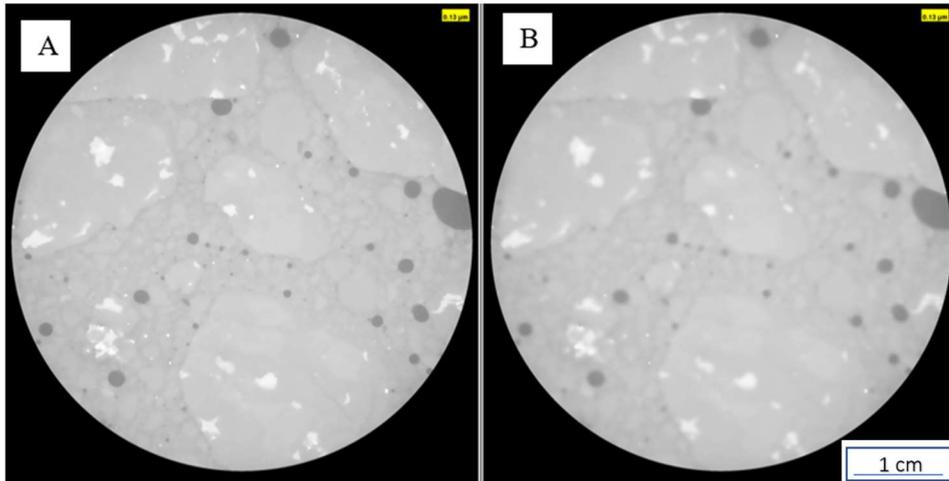


Figura 5-6:Exemplo de testes do CP6 (amostra com adição de RCD) para aplicação do filtro NLM. a) sigma = 25 b) sigma = 30

Notou-se também que algumas fatias possuíam um histograma com faixa tonal diferente de outros do mesmo arquivo. A fim de se descobrir um histograma com uma faixa tonal mais adequada ao arquivo, optou-se por usar a macro *Enhance Contrast*. Esta macro permite uma análise dos histogramas disponíveis nos arquivos analisados e, a partir desta análise, escolhe um melhor valor de correção individual para ser aplicado nas camadas.

Para que o melhor histograma encontrado fosse aplicado em todas as camadas das amostras, utilizou-se a macro denominada *Histogram Matching* (Figura 5-4). Como pode ser visto na Figura 5-5, os histogramas diferenciam-se bastante nas situações pré e pós aplicação deste recurso. O *Histogram Matching* é um método de equalização de histogramas, onde o melhor histograma será, segundo (Shapira, Avidan, & Hel-or, 2013), distribuído de forma uniforme em todas as camadas do arquivo de imagens. Ainda segundo (Shapira et al., 2013), as imagens, mesmo que adquiridas com os mesmos parâmetros e iluminação, podem sofrer alterações devido à interação do feixe com a amostra.

```

(Fiji Is Just) ImageJ
File Edit Image Process Analyze Plugins Window Help BAR Quase
Macro - Histogram_Matching.bsh
Edit Language Templates Run Tools Tabs Options
Macro - Histogram_Matching.bsh
1 // @ImagePlus(Label="Stack of images to normalize") imp
2 // @Integer(Label="Reference slice",value=1) referenceSlice
3 // @OUTPUT ImagePlus result
4
5 import ij.IJ;
6 import ij.ImageStack;
7 import ij.ImagePlus;
8 import histogram2.HistogramMatcher;
9
10 if( referenceSlice < 1 || referenceSlice > imp.getImageStackSize() )
11 {
12     IJ.error( "Error: wrong selection of reference slice" );
13     return;
14 }
15 // Create result stack
16 resStack = new ImageStack( imp.getWidth(), imp.getHeight() );
17 // Create a histogram matcher for all slices
18 matcher = new HistogramMatcher();
19 // Read reference slice histogram
20 ip2 = imp.getStack().getProcessor( referenceSlice );
21 hist2 = ip2.getHistogram();
22 // Match the histogram of each slice to the reference one
23 for( slice=1; slice <= imp.getImageStackSize(); slice++ )
24 {
25     ip1 = imp.getStack().getProcessor( slice );
26     if( slice != referenceSlice )
27     {
28         hist1 = ip1.getHistogram();
29         newHist = matcher.matchHistograms(hist1, hist2);
30         ip1.applyTable(newHist);
31     }
32     resStack.addSlice(imp.getStack().getSliceLabel( slice ), ip1 );
33 }
34 // Create result ImagePlus
35 result = new ImagePlus("Histogram-matched-" + imp.getTitle(), resStack );
36 result.setCalibration( imp.getCalibration() );

```

Figura 5-7: Macro Histogram Matching

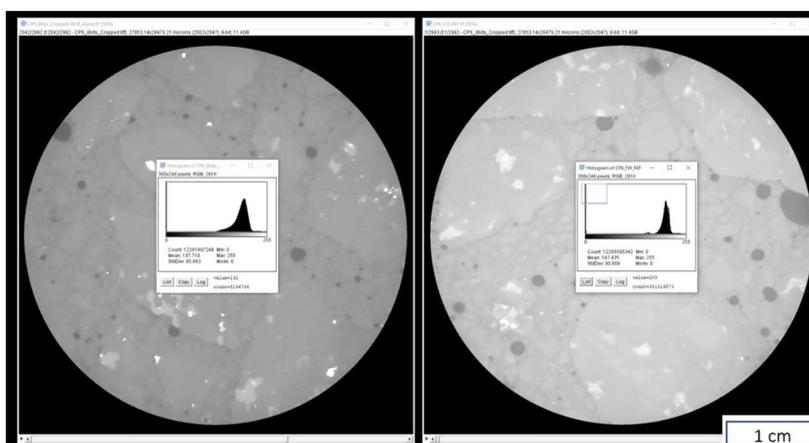


Figura 5-8:Pré e pós aplicação da Macro Histogram Matching

Com a padronização de todos os arquivos, iniciou-se os processamentos das imagens no software *Dragonfly*.

5.2.2 Segmentação e análise no Dragonfly

Ao serem carregados no *Dragonfly*, os arquivos já com os histogramas padronizados, passaram pelo processo de *crop* cilíndrico, para que alguns defeitos gerados na captura de imagem, fossem descartados. Logo depois foram submetidos ao *threshold*.

Como visualizado na imagem 3D da Figura 5-6, muitos defeitos originários da captura das imagens, poderiam ser considerados poros, devido aos tons do histograma. Assim, optou-se por fazer um *crop* cilíndrico nas amostras.

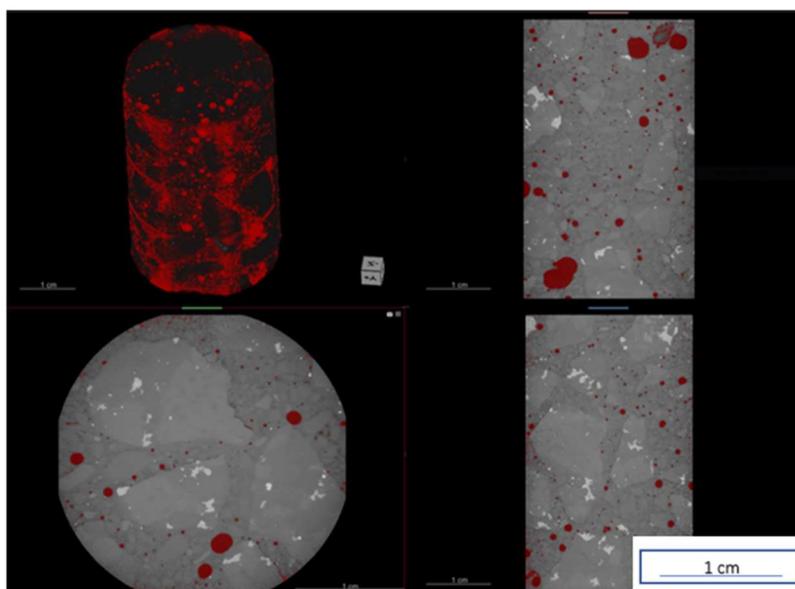


Figura 5-9: Amostra de concreto antes do *crop* cilíndrico

No *threshold*, optou-se por escolher um tom do histograma que irá representar primeiramente a a matriz cimentícia com os poros (aqui denominada de “tudo”), ou seja, retirou-se todo o fundo (*pixels* representantes dos tons mais escuros) das imagens (Figura 5-7).

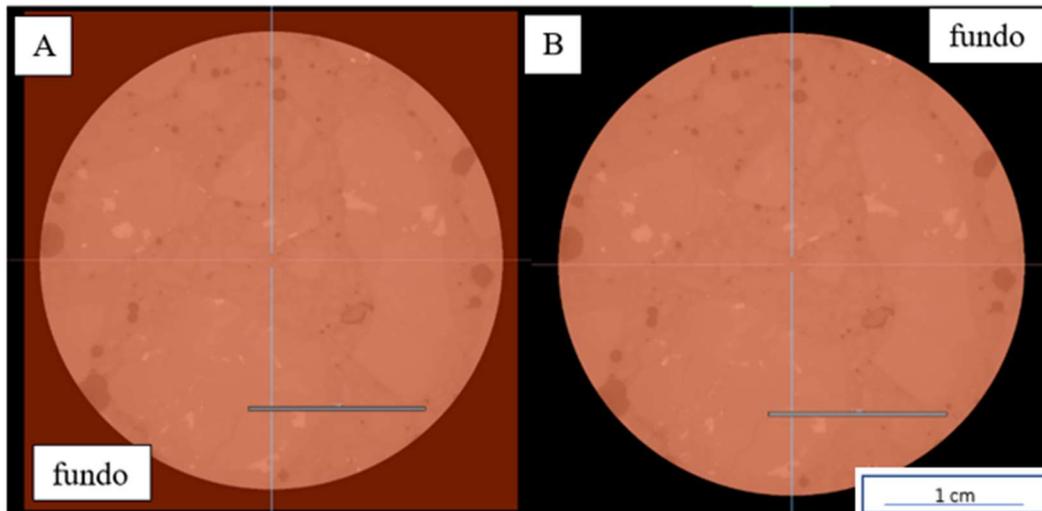


Figura 5-10: a) CP6 antes do Threshold b) CP6 após o Threshold para retirar o fundo

Após esta segmentação, um novo tom foi escolhido, desta vez selecionando-se apenas a matriz cimentícia, como mostra a Figura 5-8. Esta etapa pode ser realizada tanto manualmente (como aconteceu nesta pesquisa), como de forma automática, utilizando-se o comando "*fill inner areas*".

O processo manual foi necessário pois, ao tentar segmentar apenas os poros automaticamente, notou-se que uma faixa de objetos, não era integrada ao arquivo.

A Figura 5-11 mostra no histograma os valores limites (máximos e mínimos) para o caso em que apenas a matriz cimentícia está selecionada. O valor mínimo do *threshold* para este caso é 186,27 e todos os valores acima deste são considerados matriz cimentícia.



Figura 5-11 : Threshold para definir a massa cimentícia do CP6 com adição de RCD

Ao obter as duas segmentações, um processo de subtração é realizado, como mostra a Figura 5-12. Selecionou-se primeiramente a ROI denominada “tudo” (matriz + poros) e em seguida selecionou-se a ROI “matriz”.

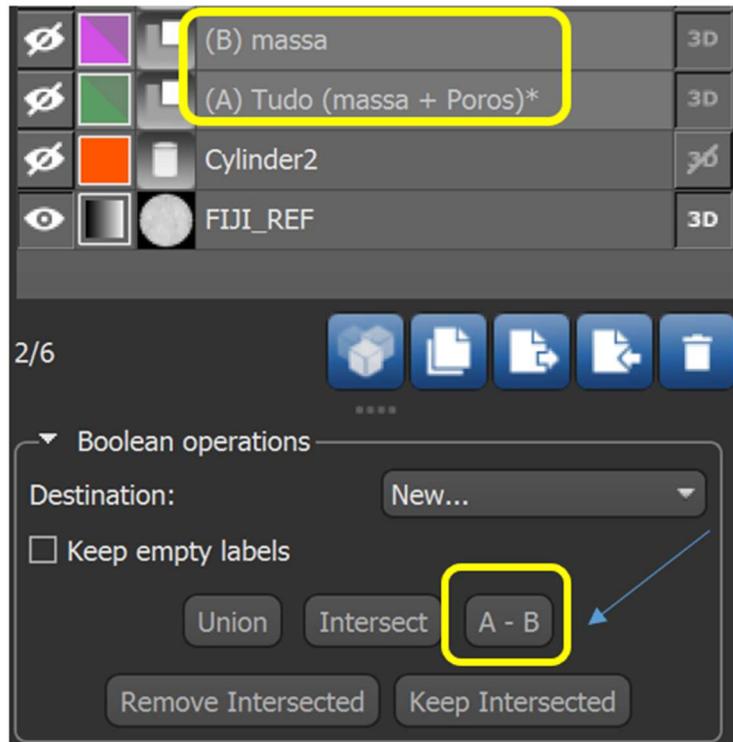


Figura 5-12: Operação de subtração para obter a ROI poros no CP6 com adição de RCD

Ao realizar esta subtração, foi possível obter a ROI “poros”. Como pode ser visto na Figura 5-10, a figura A representa o CP6 em sua vista XY, onde a parte roxa (mais escura) representa a matriz cimentícia e a parte azul (mais clara) representa os poros obtidos através da subtração.

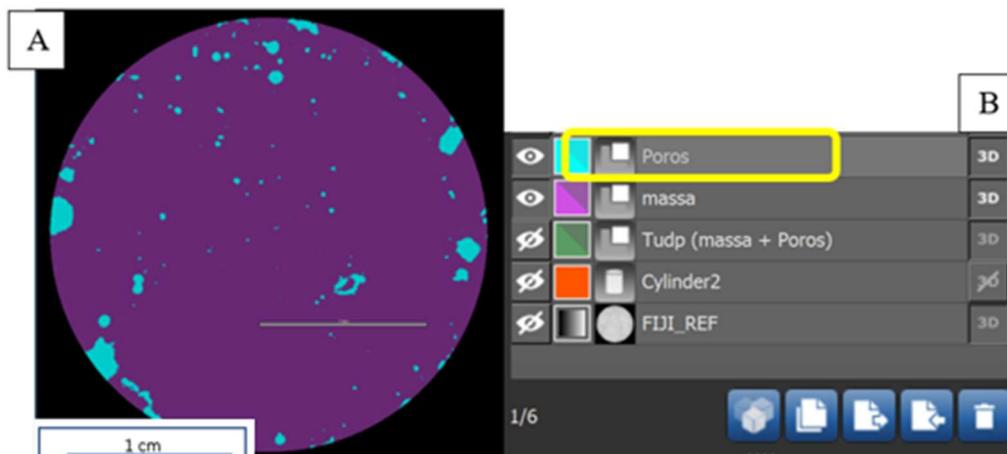


Figura 5-13: ROI poros correspondente ao CP6 com adição de RCD

Todos estes processos foram realizados em todos os corpos de prova, sendo que apenas o CP6 foi utilizado para demonstração das etapas neste capítulo.

Após estes estágios, deu-se início à etapa de obtenção da Multi-ROI que possibilitou a aquisição dos parâmetros desejados (Figura 5-11).

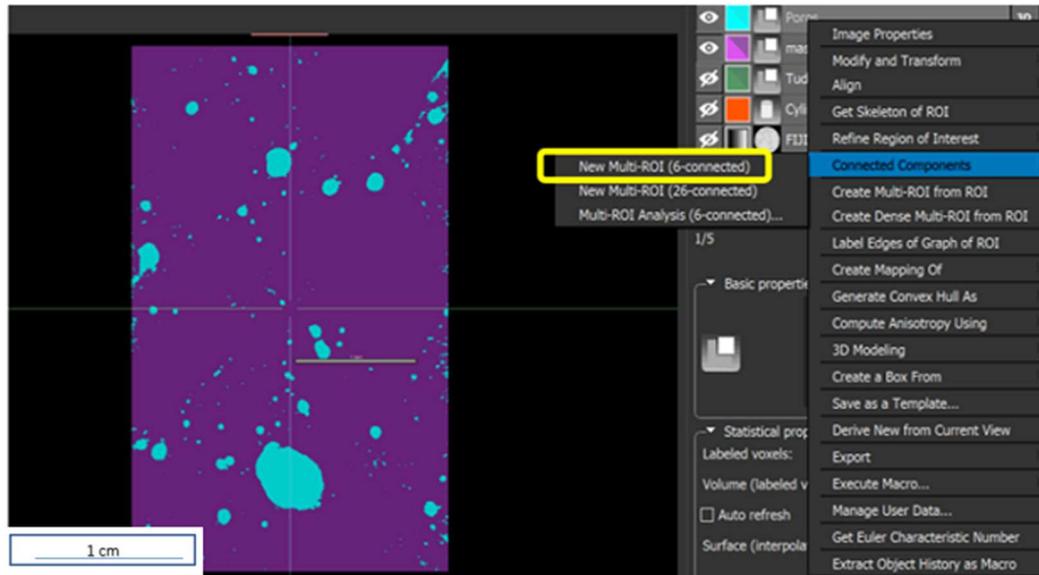


Figura 5-14: Obtenção da Multi-ROI no CP6 com adição de RCD

A partir da seleção dos parâmetros desejados (esfericidade, razão de aspecto e volume) e análises realizadas, foi necessário a redução de objetos encontrados, já que muitos eram formados por apenas 1 *voxel*, podendo ser prejudiciais aos resultados por serem, muitas vezes, ruídos gerados durante o processo de obtenção das imagens.

Um dos primeiros parâmetros analisados foi a esfericidade. Esta propriedade trata sobre a forma com que os poros são formados dentro das amostras. Estes vazios internos podem ser mais alongados, por exemplo no caso de trincas ou mais arredondados, no caso dos poros formados na moldagem dos corpos de prova.

A esfericidade é calculada através de uma equação, onde são relacionados o volume do objeto e sua área de superfície. Quanto mais próximo do valor 1, mais o vazio se aproximará de uma esfera Figura 5-13.

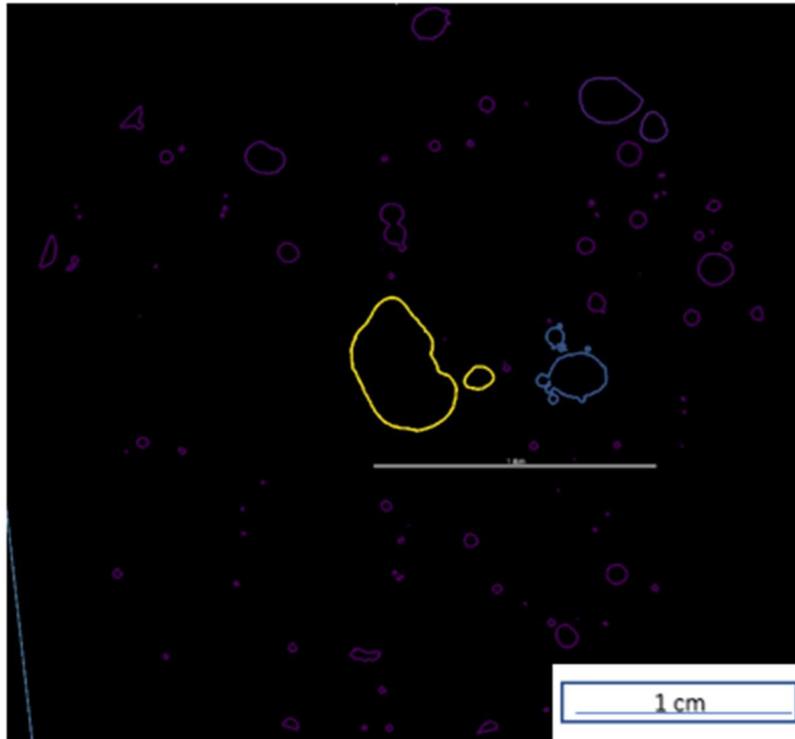


Figura 5-15: Esfericidade dos poros do CP6 com adição de RCD

Estes dados são importantes para que se possa entender a relação entre os poros existentes, a durabilidade e as propriedades mecânicas do concreto com RCD.

O segundo parâmetro solicitado ao software foi o volume, que é sem dúvida o parâmetro mais relevante a ser analisado. O volume de vazios (Figura 5-14) mostra, a porosidade existente nos corpos de prova de concreto e este parâmetro quantitativo está diretamente ligado à qualidade do concreto. Ou seja, quanto maior o volume de poros, menor a resistência da amostra.

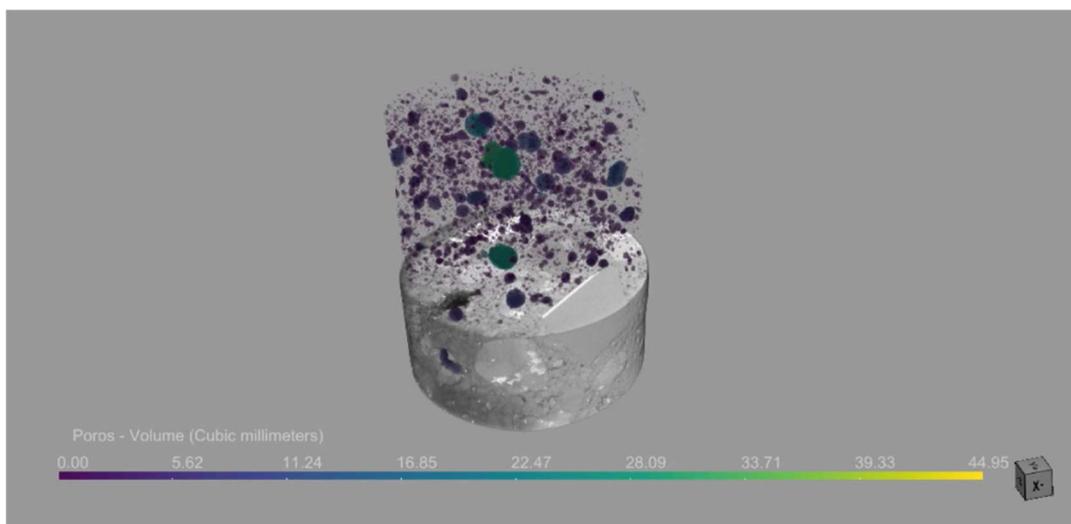


Figura 5-16: Volume dos poros da amostra CP6 de concreto com adição de RCD

O terceiro parâmetro analisado no Software *Dragonfly* foi a razão de aspectos. Segundo (JALINI; FALAHAT, 2021), a razão de aspectos é a razão entre os eixos mínimo e máximo de um poro elipsoidal.

Os poros formados no momento da compactação, tendem a um formato mais arredondado, assim, ao analisar sua razão de aspectos, pode-se dimensionar e entender o quanto esse processo interfere na qualidade do concreto com RCD.

5.2. 5.3 Análise da estrutura e volumes de poros, razão de aspecto e esfericidade dos poros do concreto

5.2.1.5.3.1 Amostras com adição de RCD

Os corpos de prova foram, inicialmente, divididos digitalmente em três subvolumes (Figura 5-15). Isto foi necessário devido ao excessivo tempo de análise (média de 50 horas) e tamanho dos arquivos dos resultados gerados, que chegaram a 70 Gb. Os CP's inteiros possuem em média altura de 7,38 cm e foram divididos em três partes de volumes com média 2,46 cm. Os arquivos passaram a ter, em média 25 Gb.

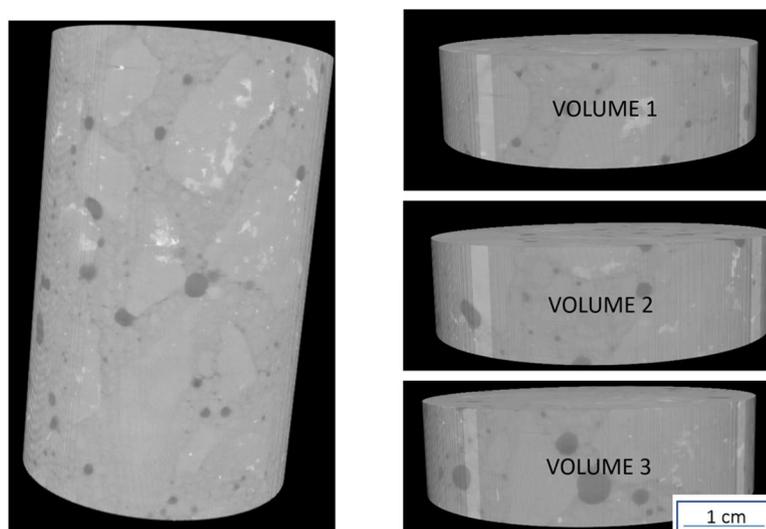


Figura 5-17: CP 6 inteiro e subvolumes estudados

Na Figura 5-16, visualiza-se a amostra CP6 submetida ao processo de multi-ROI, onde é possível observar os poros classificados de acordo com as dimensões. Os tons mais escuros (variação de azul/roxo) representando os poros de menor dimensão, e os poros mais claros (variação de verde e amarelo) representando os poros de maior dimensão.

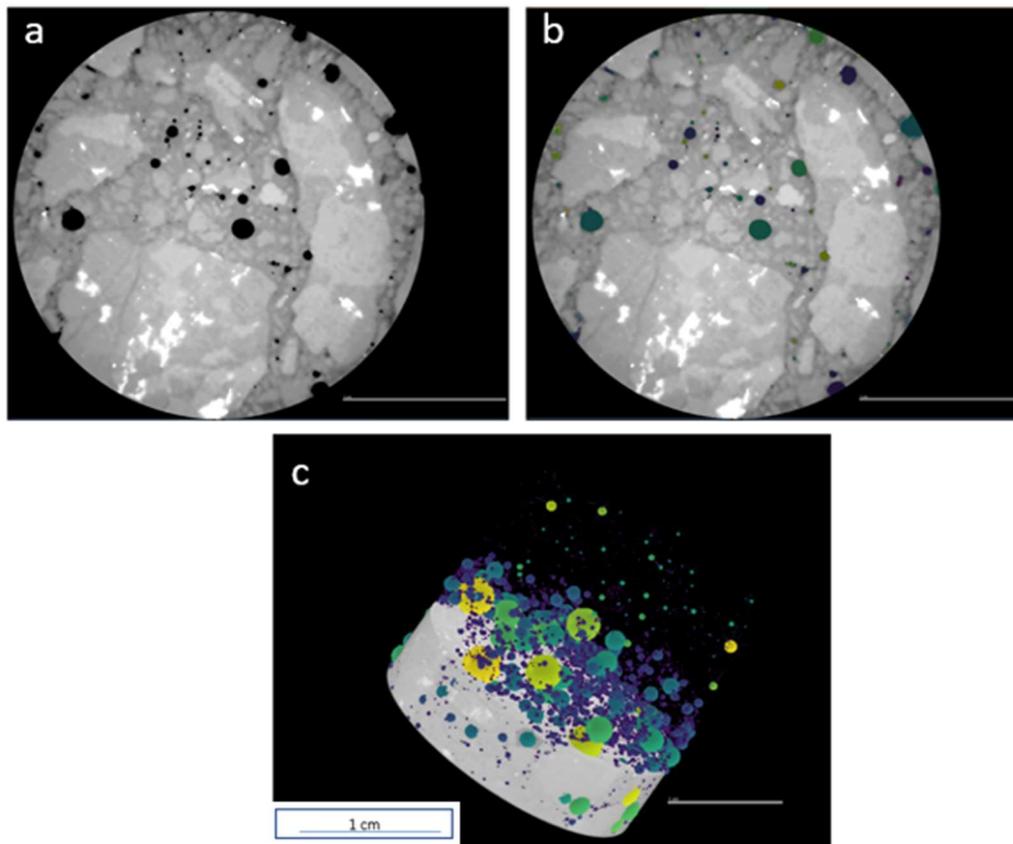


Figura 5-18: Aplicação da Multi-Roi no CP6. a) visão 2D da amostra sem Multi-Roi, b) visão 2D da amostra com aplicação da Multi-Roi e c) visão 3D da amostra com aplicação da Multi-Roi

A maior frequência dos poros se encontra em faixas menores, que estão entre $1e+01$ a $1e+07$. Os poros nas faixas medianas ($2e+07$ a $3e+07$) estão presentes em menor quantidade e observa-se um grande poro localizado centralmente na amostra, como pode ser visto na Figura 5-17. Este poro em destaque começa a ser formado a partir da camada 2230 e segue presente até a camada 2653 (Figura 5-18).

A título de comparação, ao observar um poro de dimensões na faixa de $3.1e+01$, percebe-se que ele inicia sua formação na camada 1687 e vai até a camada 1704 (Figura 5-19).

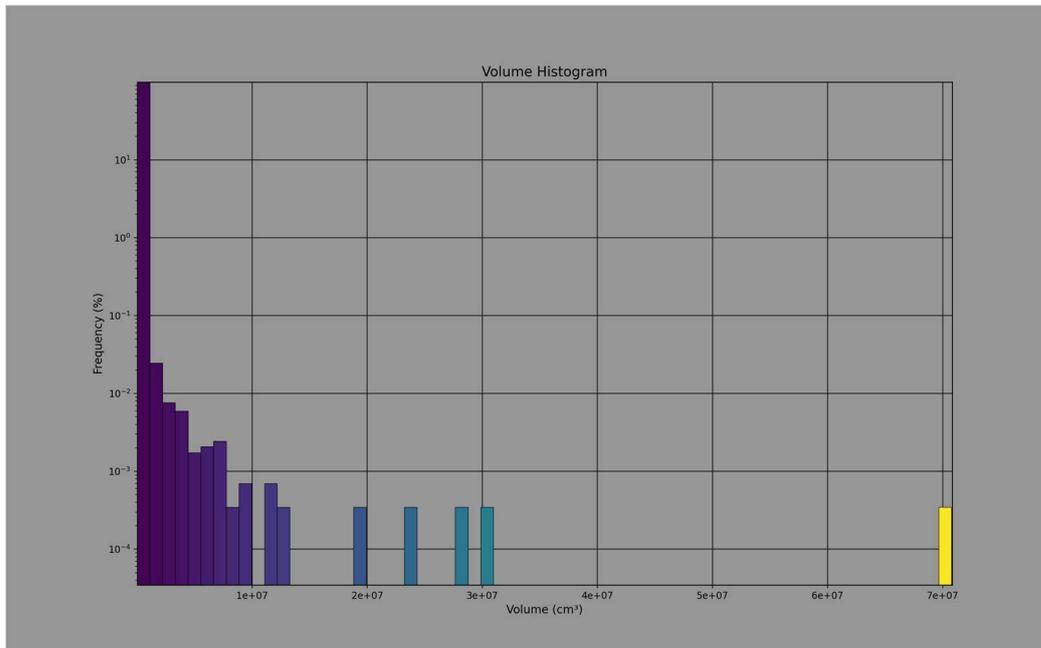


Figura 5-19: Distribuição de volume poroso do CP6 com adição de 50% de RCD

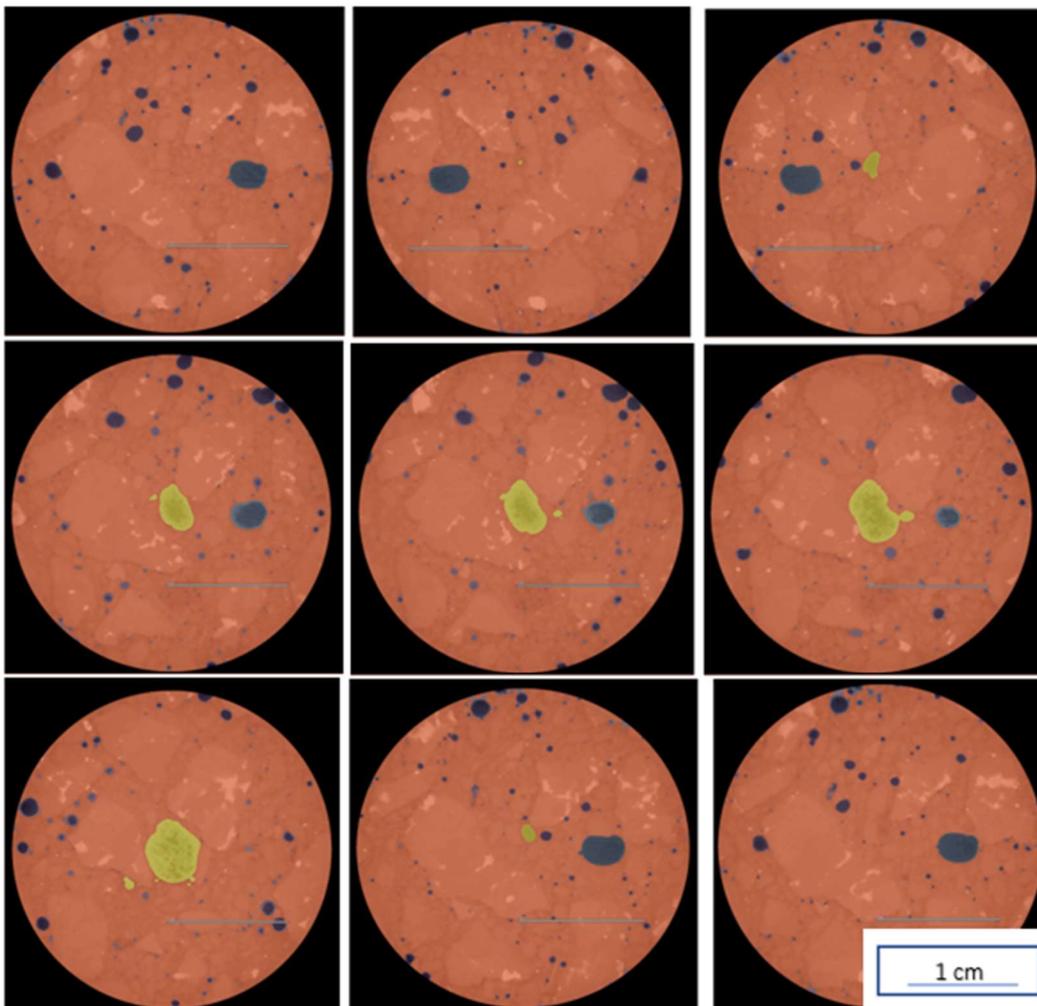


Figura 5-20: Sequencia de camadas demonstrando início e fim do poro de maior dimensão – camadas 2230 a 2653 de um total de 2993 camadas.

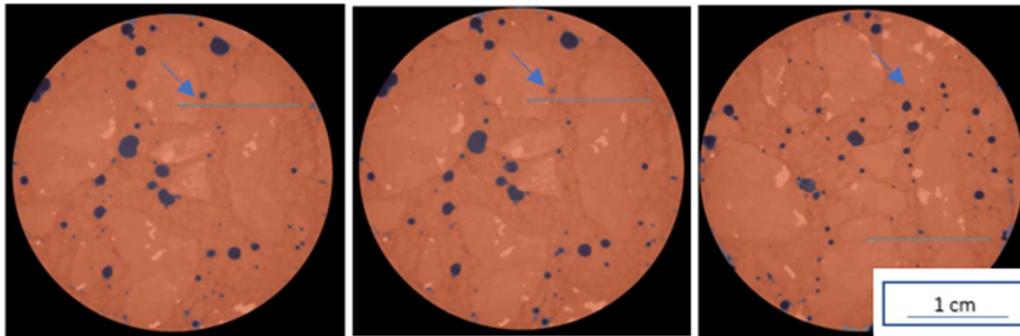


Figura 5-21: Sequência de camadas demonstrando exemplo de poro de menor dimensão – camadas 1687 a 1704 de um total de 2993 camadas.

Em análise visual, observou-se que a maior parte dos micro poros formam-se margeando os agregados como mostra a Figura 5-20. Este fato pode explicado devido ao acúmulo de matriz cimentícia antiga nos agregados reciclados, fazendo com que no novo concreto, a nova matriz cimentícia não consiga ser aderida.

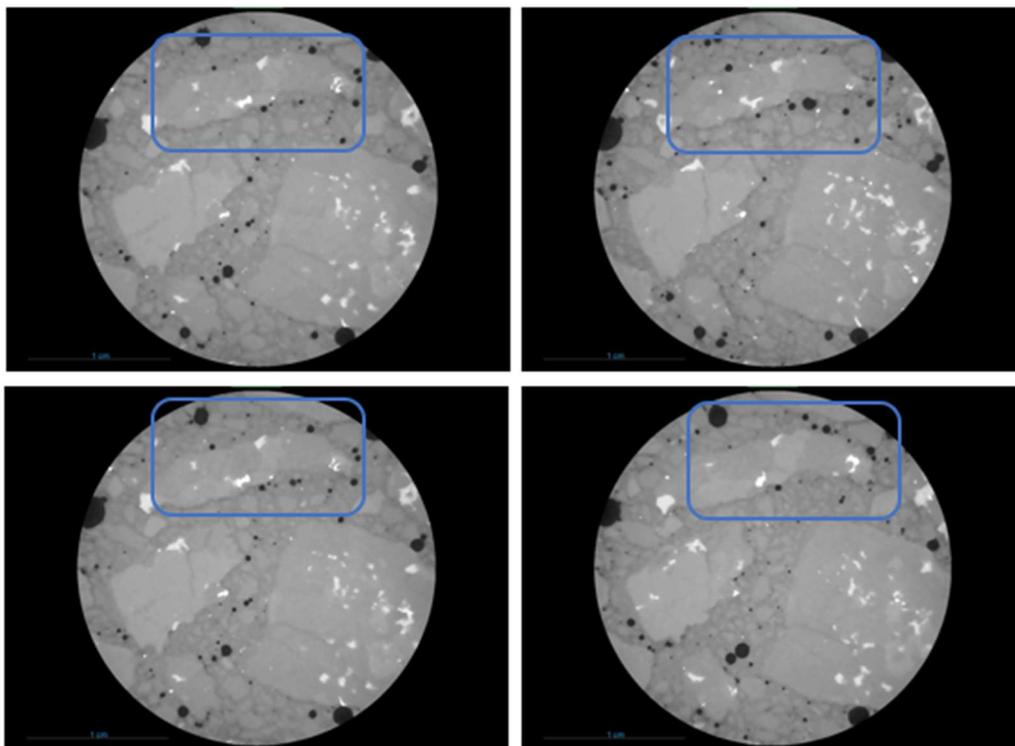


Figura 5-22: Destaque para micro poros sendo formados margeando os agregados do CP6 de concreto com adição de RCD

Ainda no CP6, amostra de concreto com adição de RCD, observou-se (Figura 5-21) os poros de maiores dimensões formam-se arredondados e, em sua maioria, entre os agregados de maior tamanho.

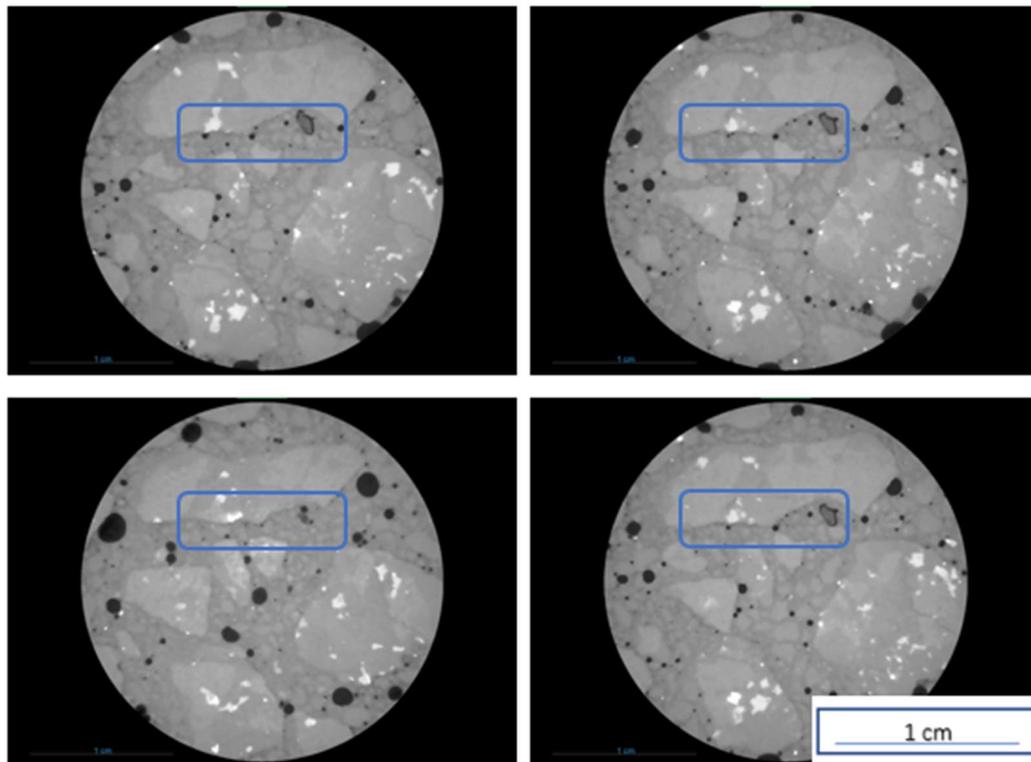


Figura 5-23: Destaque para poros sendo formados entre os agregados do CP6 de concreto com adição de RCD

O poro de maior dimensão, chama atenção por ser também o poro com maior esfericidade, como mostra a Figura 5-22. A esfericidade refere-se a forma dos poros dentro das amostras e a variação deste parâmetro na amostra ocorre nos valores de 0.1 a 0.8, sendo a maior o mais próximo de uma esfera. A maior frequência de poros possui esfericidade entre 0.4 e 0.6 e uma menor frequência entre 0.1 e 0.3, o que pode ser visto como microfissuras internas.

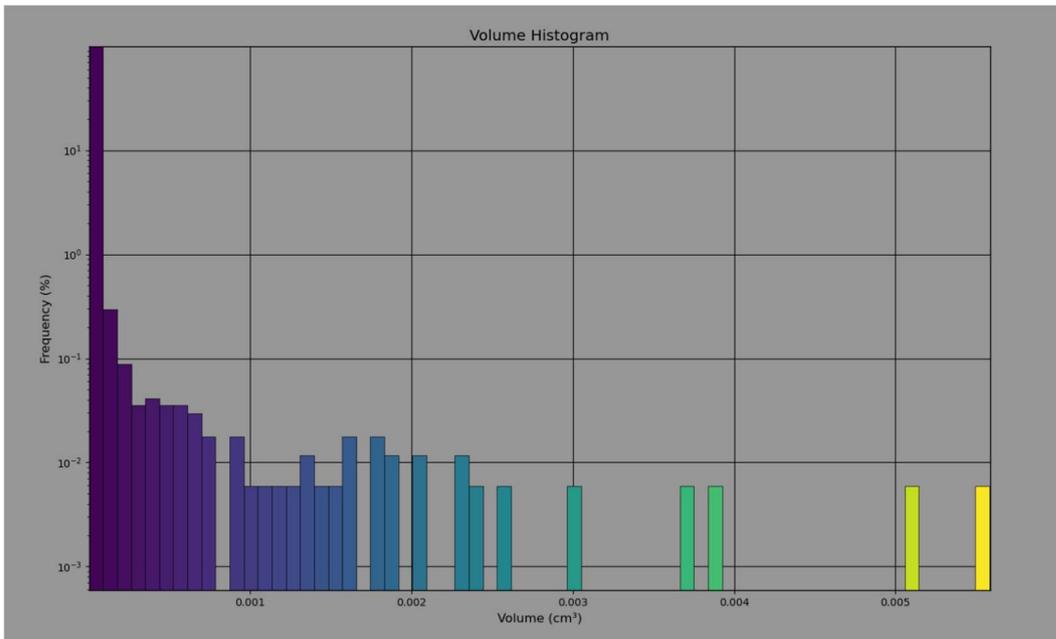


Figura 5-24: Gráfico de esfericidade do CP6 com adição de 50% de RCD

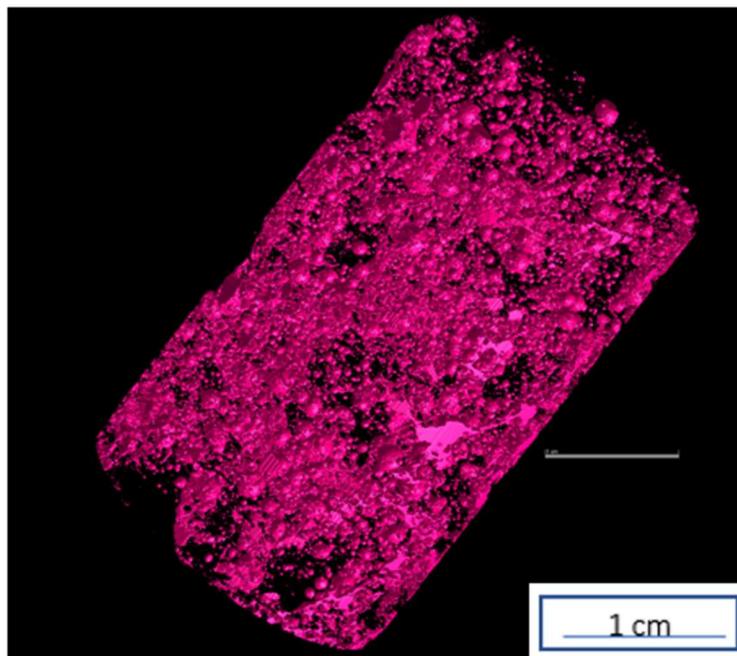


Figura 5-25: Esfericidade e volume dos poros do CP6

Na figura 5-24 é possível observar que as medidas de razão de aspecto da amostra CP6 são amplamente homogêneas entre 0 e 1, sendo os valores extremos menos frequentes.

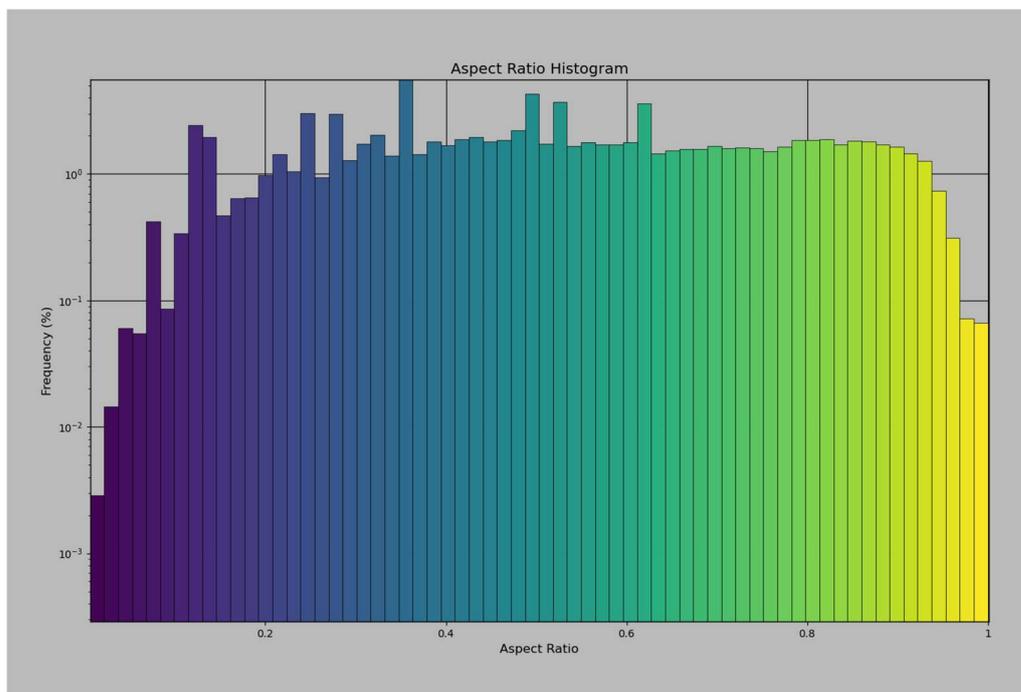


Figura 5-26: Gráfico de razão de aspecto do CP6 com adição de 50% de RCD

A Figura 5-25 mostra o comando PNM (“Pore Network Modeling”) no software Dragonfly. Este é um método utilizado para simular o transporte em materiais porosos, além de possibilitar a representação da formação dos poros e canais porosos existentes nas amostras. Após a segmentação dos poros dos corpos de prova ou de seus sub-volumes e a criação das respectivas Multi Roi’s, deu-se início à obtenção das imagens.

O objetivo inicial ao aplicar a técnica de PNM nos corpos de prova, era conseguir definir em imagens 3D, a formação dos poros e canais porosos existentes nas amostras. De acordo com ((Junior & José, 2020), tanto os poros quanto os canais porosos, possuem sessões transversais constantes, o que possibilita a aplicação de fatores de forma, responsáveis por representar as estruturas reais, contidas nas amostras.

Por serem arquivos extensos, onde cada conjunto de imagens pode chegar ao tamanho de 30 GB, encontrou-se muita dificuldade para realizar as análises das imagens por inteiro. Além disso, como as amostras de concreto são muito densas, por mais que possuam micro poros em seu interior, nem sempre a capilaridade é interligada e contínua por toda extensão dos CP’s, o que diminuiu a capacidade de análise do software.

Como já foi dito, para que fosse possível obter resultados satisfatórios, foram analisados os três sub-volumes selecionados anteriormente e executou-se uma Multi Roi para cada um deles (Figura 5-26, Figura 5-27, Figura 5-28). A quantidade de poros distribuídos e quantificados após a retirada dos ruídos está descrita na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

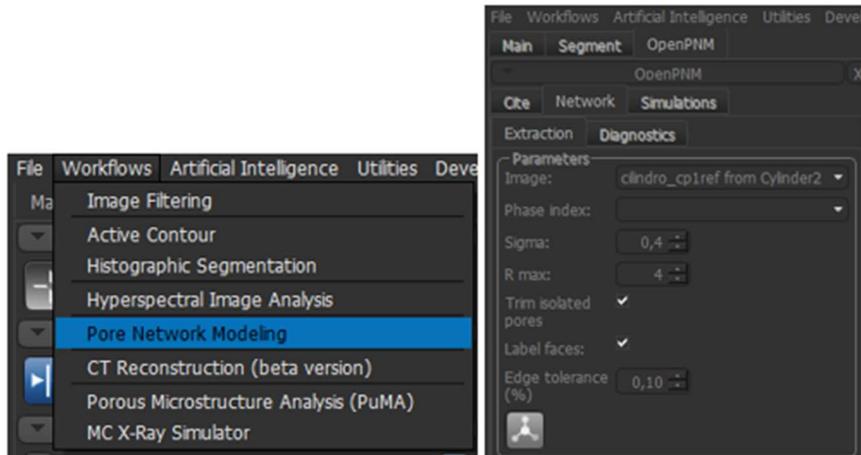


Figura 5-27: Comando PNM no software Dragonfly

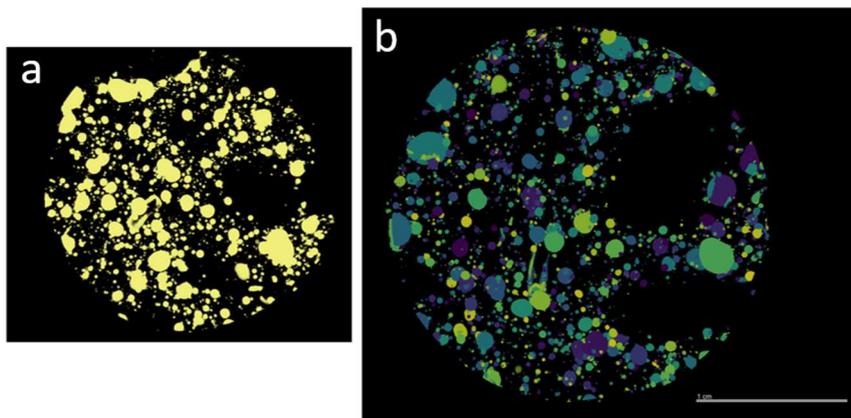


Figura 5-28: a) Roi poros e b) MultiRoi poros - volume 1

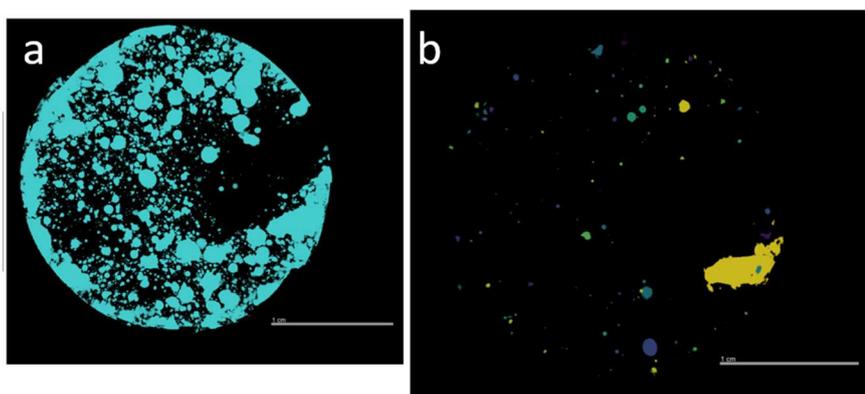


Figura 5-29: a) Roi poros e b) MultiRoi poros - volume 2

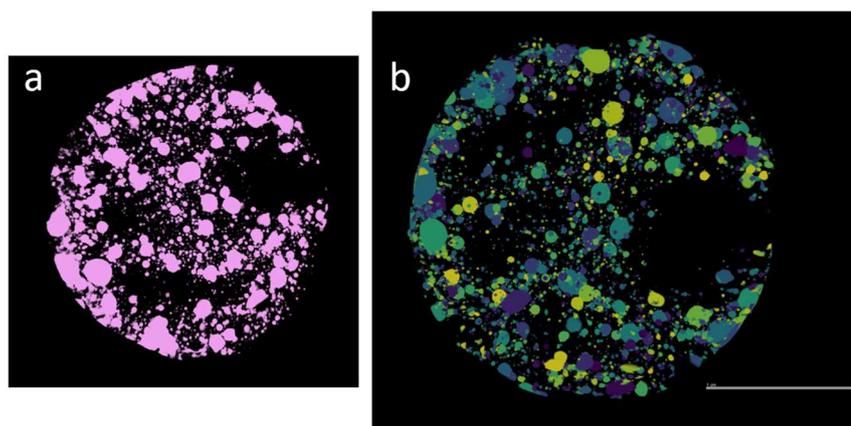


Figura 5-30: a) Roi poros e b) MultiRoi poros – volume 3

Tabela 5-2: Distribuição de poros do CP6 com adição de 50%de RCD

CP6	altura e largura da amostra digitalmente analisada (cm)	total de poros
vol 1	2,520	213,440
vol 2	2,520	163,870
vol 3	2,520	202,520
total	7,560	579,830

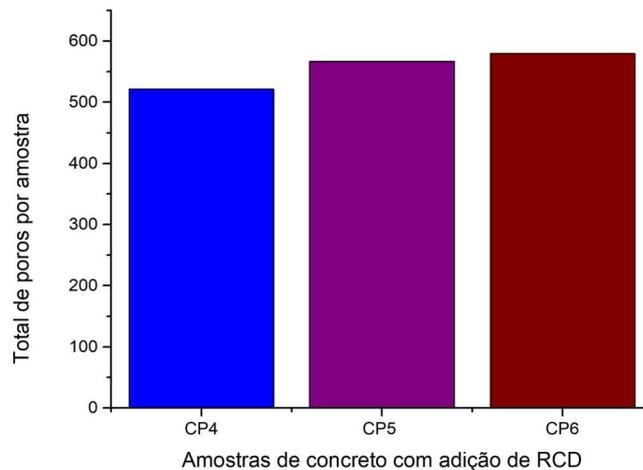
As outras amostras de concreto com adição de agregados reciclados apresentaram dados coerentes com a amostra CP6, como pode ser visualizado nas Tabelas 4 e 5 e na Figura 5-29. Deve-se observar que, como dito anteriormente, esses dados foram obtidos após a análise e retirada de objetos que pudessem ser ruídos das imagens.

Tabela 5-3: Distribuição de poros do CP5 com adição de 50%de RCD

CP5	altura e largura da amostra digitalmente analisada (cm)	total de poros
vol 1	2,530	170,020
vol 2	2,490	213,873
vol 3	2,488	183,027
total	7,508	566,920

Tabela 5-4: Distribuição de poros do CP4 com adição de 50% de RCD

CP4	altura e largura da amostra digitalmente analisada (cm)	total de poros
vol 1	2,520	130,532
vol 2	2,529	203,879
vol 3	2,412	187,263
total	7,461	521,674

**Figura 5-31: Gráfico comparativo do volume de poros nas amostras de concreto com adição de RCD**

No PNM, foi possível obter, para todos os sub-volumes da amostra CP6 (Figura 5-30, Figura 5-31, Figura 5-32) os valores de poros conectados e não conectados. É importante ressaltar que, quanto maior a conexão entre os poros de uma amostra de concreto, maior é a percolação de gases e líquidos, ou seja, ocorre uma maior degradação do material.

Através das imagens obtidas fica bastante claro o fato de que os poros não conectados das amostras estão presentes em número muito maior do que os poros conectados. Ou como mostra a Tabela 5-5, apenas 2,74% dos poros estão interligados dentro do CP6.

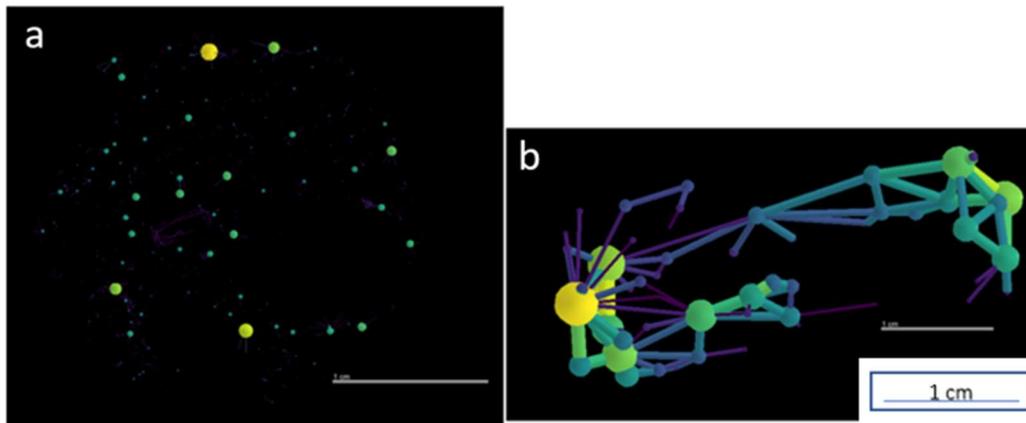


Figura 5-32: PNM CP6 a) Resultados de PNM do volume 1 para poros não conectados, b) resultado de PNM do volume 1 para poros conectados

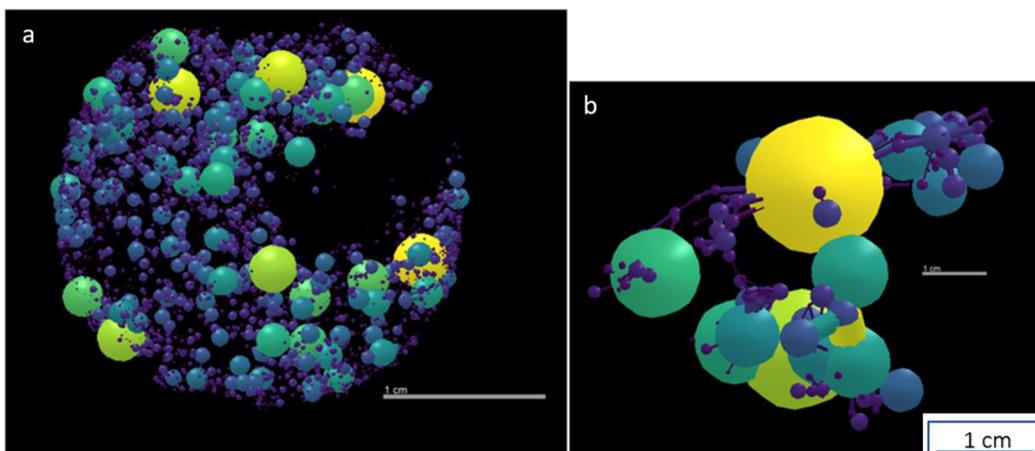


Figura 5-33: PNM CP6 a) Resultados de PNM do volume 2 para poros não conectados, b) resultado de PNM do volume 2 para poros conectados

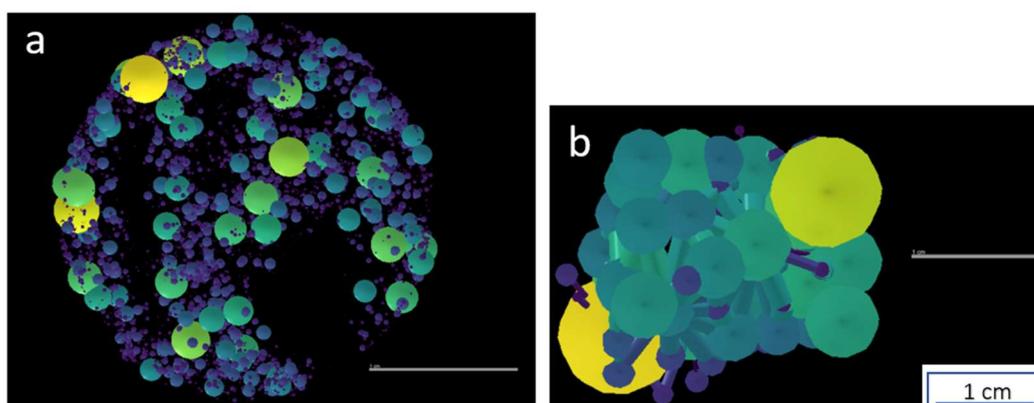


Figura 5-55: PNM CP6 a) Resultados de PNM do volume 3 para poros não conectados, b) resultado de PNM do volume 3 para poros conectados

Como mostra a Tabela 5-5, os poros conectados estão em uma proporção bastante inferior ao total poros não conectados, o que ajuda a manter a integridade do material, mesmo que ele possua uma proporção considerável de porosidade.

Tabela 5-5: Volume total de poros do CP6 com adição 50% de RCD e média de poros conectados e não conectados

volume total de poros (%)	volume de massa (%)	média de poros conectados (%)	poros não conectados (%)
4,40%	95,40%	2,74	97,26

Para os outros corpos de prova com adição de 50% de RCD foram encontrados os seguintes valores (Tabela 5-6 e Tabela 5-7):

Tabela 5-6: Volume total de poros do CP5 com adição 50% de RCD e média de poros conectados e não conectados

volume total de poros (%)	volume de massa (%)	média de poros conectados (%)	poros não conectados (%)
3,77%	96,23%	4,93	95,07

Tabela 5-7: Volume total de poros do CP4 com adição 50% de RCD e média de poros conectados e não conectados

volume total de poros (%)	volume de massa (%)	média de poros conectados (%)	poros não conectados (%)
4,97%	95,03%	3,00	97,00

5.3.2 Amostras do concreto de referência

Os corpos de prova de concreto de referência passaram pelos mesmos processos apresentados na seção 5.3.1. Logo após a separação dos sub-volumes, foram observados, primeiramente, os poros classificados de acordo com as suas dimensões, através da MultiRoi (Figura 5-32).

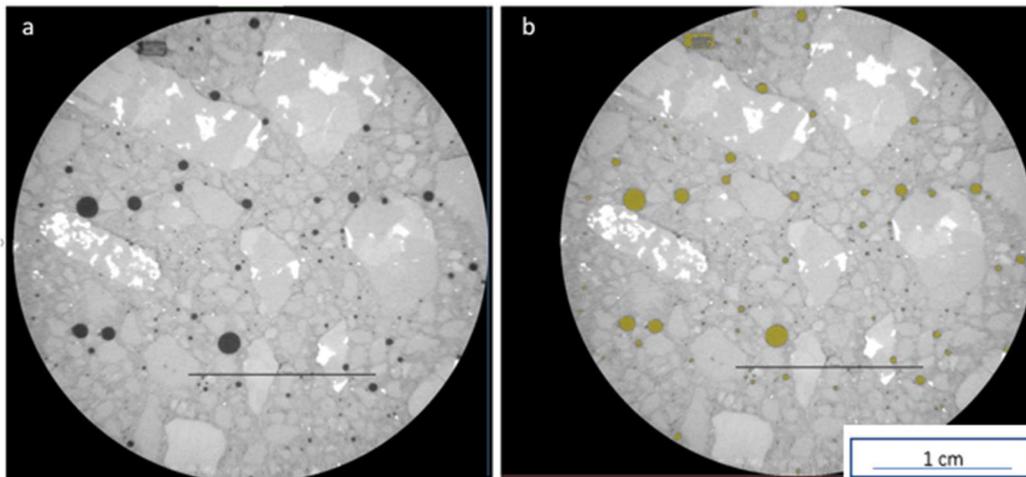


Figura 5-34: Aplicação da MultiRoi no CP2. a) visão 2D da amostra sem MultiRoi, b) visão 2D da amostra com aplicação da MultiRoi

O resultado obtido após a eliminação dos objetos menores de 1 voxel está apresentado abaixo, na Tabela 5-8. Nota-se uma expressiva diferença entre a quantidade total de poros do concreto com agregado reciclado e o agregado com adição de RCD.

O gráfico da figura 5-33, representa a distribuição de volume na amostra de concreto de referência. Assim como nas amostras de concreto com adição de RCD, a faixa de micro poros é superior às outras, sendo que a frequência entre 0,007 e 0,012 é inexistente.

Tabela 5-8: Distribuição de poros nos subvolumes do CP2 de concreto de referência

CP2	altura e largura da amostra digitalmente analisada	total de poros
vol 1	2,313	39,063
vol 2	2,423	90,337
vol 3	2,507	113,674
total	7,243	243,074

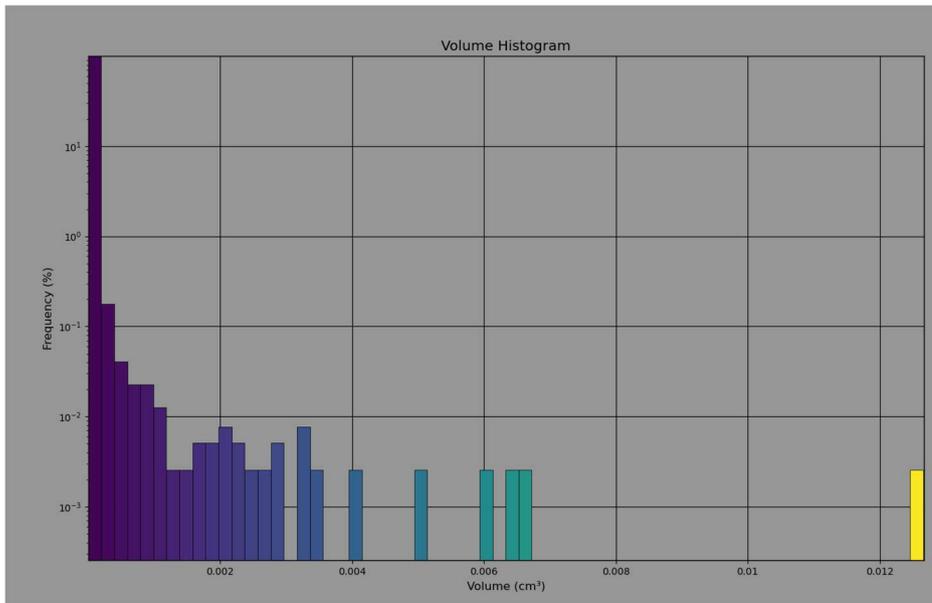


Figura 5-35: Distribuição de volume poroso do CP2 de concreto de referência

A Figura 5-34 mostra uma sequência de formação de poros que, por estarem muito próximos em determinadas camadas, juntam-se, formando poros de maior dimensão, como pode ser visto no gráfico da Figura 5-36. Este objeto inicia sua formação na camada 491 e termina em 628.

Na Figura 5-35 observa-se alguns poros se formando a partir da margem dos agregados, ou seja, poros sendo formados na ITZ. Estes poros, quando formados na região de zona de transição interfacial, tendem a diminuir a resistência do material e principalmente em concretos convencionais, costumam ser formados na moldagem dos corpos de prova.

Ainda na Figura 5-35 é possível visualizar os poros tendendo a uma esfericidade maior, ou seja, formaram-se poros arredondados, conforme mostra o gráfico da Figura 5-36.

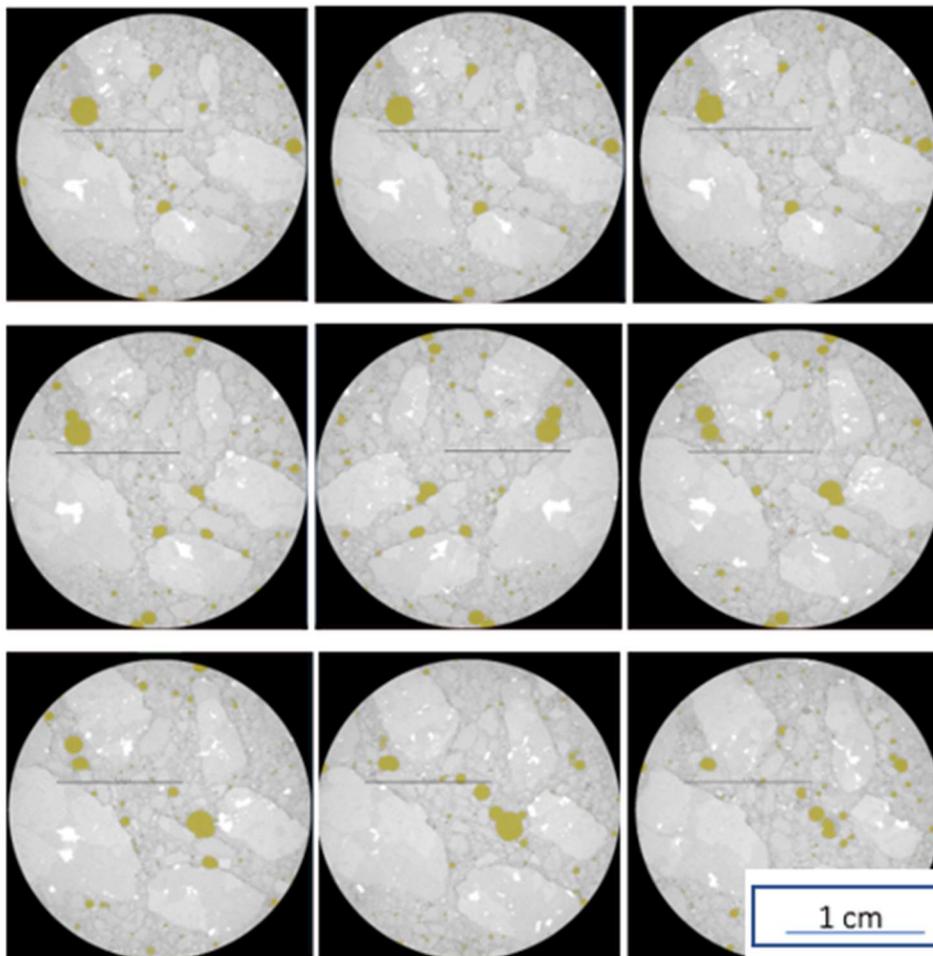


Figura 5-36: Sequência demonstrativa de poros tornando-se um de maior dimensão no concreto de referência. Camada 491/1081 a 628/1081 do CP2

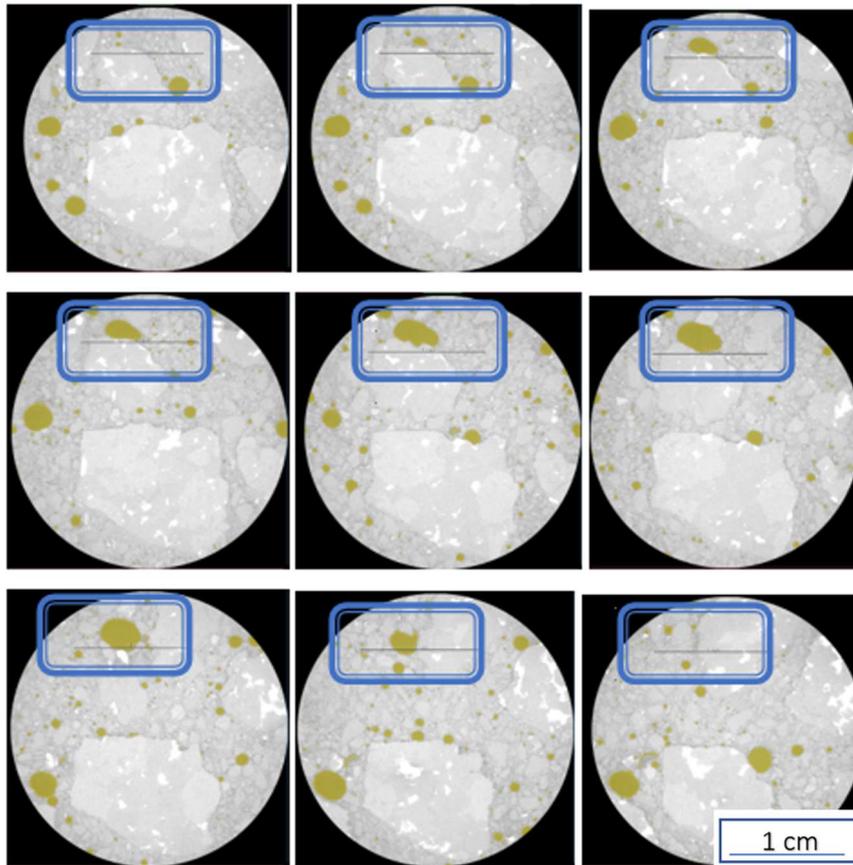


Figura 5-37: Sequência de formação de poro margeando os agregados. Camada 498 a camada 785 do CP2

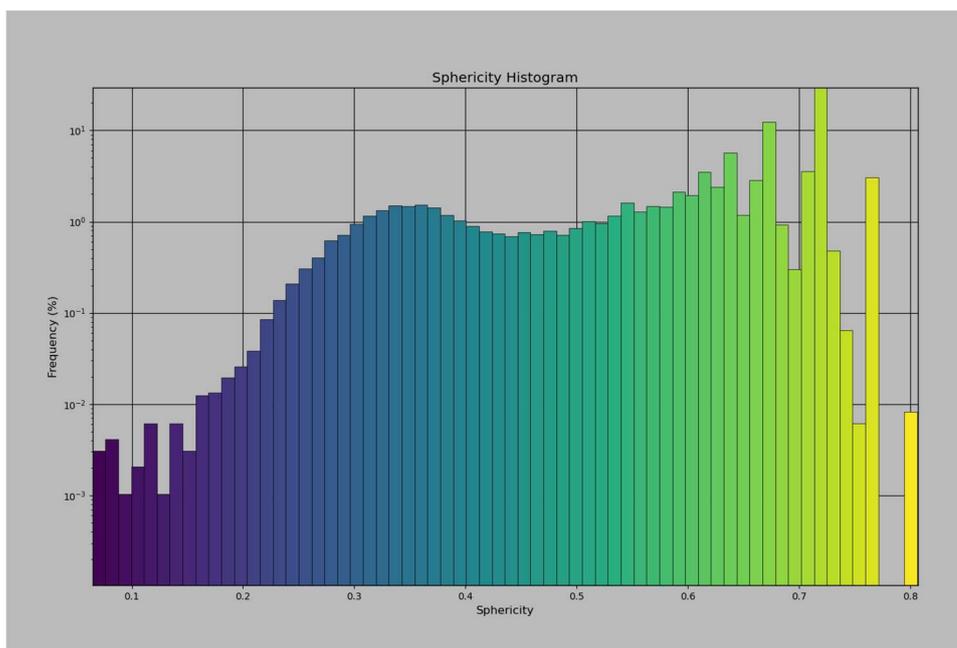


Figura 5-38: Gráfico da esfericidade a amostra de concreto de referência CP2

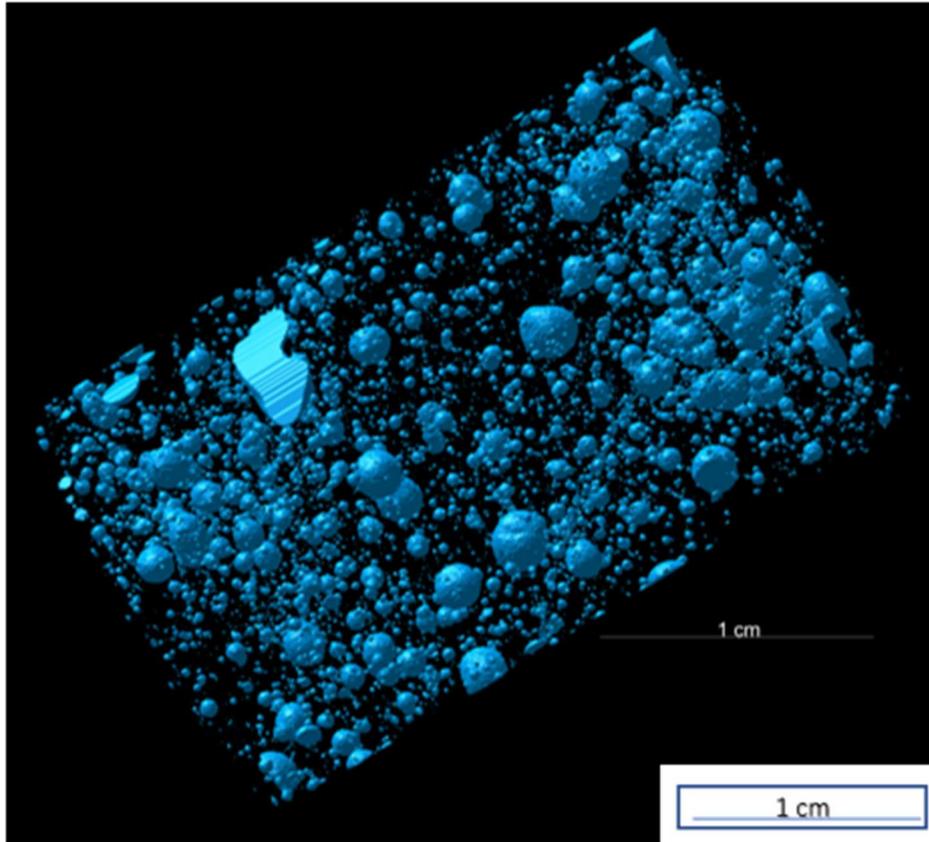


Figura 5-39: esfericidade a amostra de concreto de referência CP2

Na figura 5-38 é possível observar que as medidas de razão de aspecto da amostra CP2, assim como nas amostras de concreto com agregado reciclado, são amplamente homogêneas entre 0 e 1, possuindo alguns picos na região entre 0,2 e 0,6.

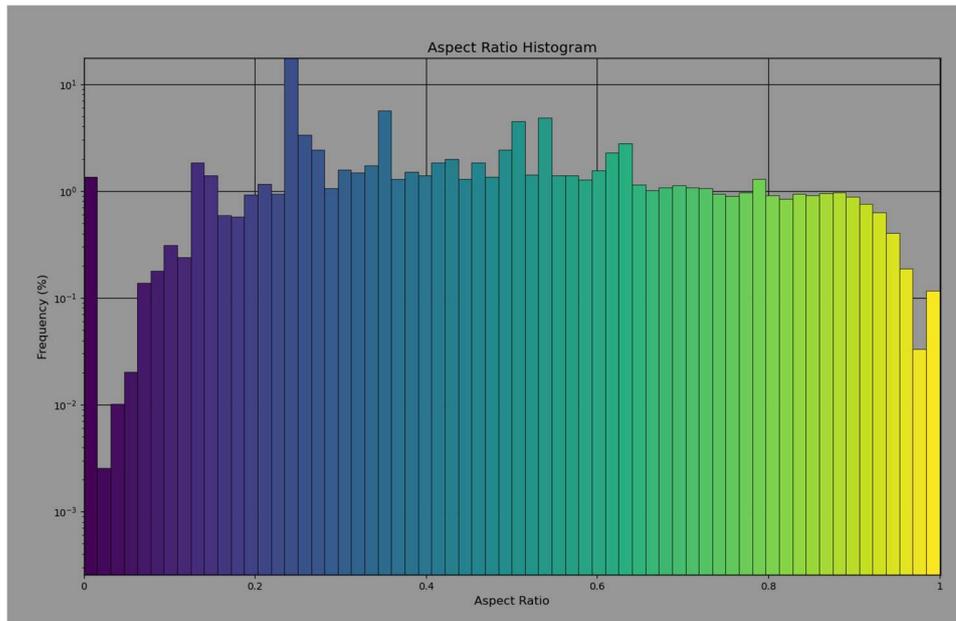


Figura 5-40: Razão de aspecto do CP2 de concreto de referência

Nas Tabelas 5-9 e 5-10 tem-se o comportamento da distribuição de poros nos outros corpos de prova de concreto de referência analisados.

Tabela 5-9: Distribuição de poros do CP1 de concreto de referência

CP1	altura e largura da amostra digitalmente analisada (cm)	total de poros
vol 1	2,419	55,769
vol 2	2,380	76,998
vol 3	2,399	72,744
total	7,198	205,511

Tabela 5-10: Distribuição de poros do CP3 de concreto de referência

CP3	altura e largura da amostra digitalmente analisada (cm)	total de poros
vol 1	2,389	89,128
vol 2	2,423	107,401
vol 3	2,471	73,010
total	7,283	269,539

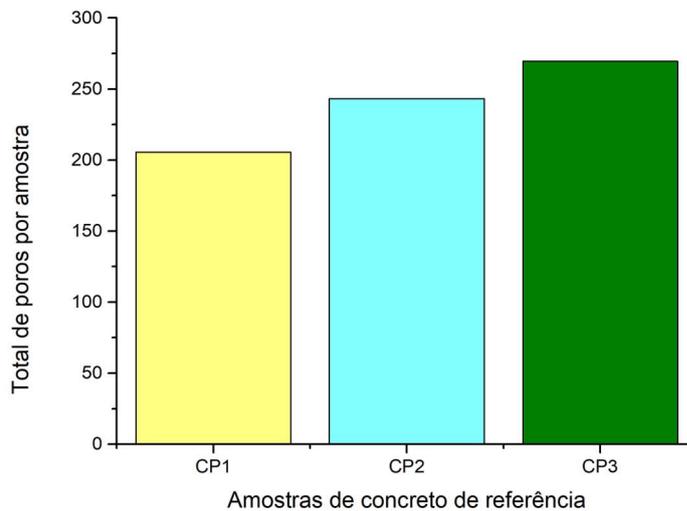


Figura 5-41: Gráfico comparativo do volume de poros nas amostras de concreto de referência

Para o PNM, as amostras também foram analisadas para se entender a formação dos poros e canais porosos (Figura 5-40, Figura 5-41 e Figura 5-42), obtendo-se como resultados os seguintes valores para o CP2 de referência (Tabela 5-11).

As imagens de PNM foram geradas por dois comandos, sendo um para apresentar os poros conectados, e outro para os poros não conectados. Assim, como nos corpos de prova com adição de RCD, é possível notar uma maior quantidade de poros não interligados, o que também é interessante pelo aspecto de análise do trânsito de fluidos dentro das peças de concreto.

Nota-se nas imagens abaixo que, como esperado, os canais tubulares aparecem apenas nos resultados interligados.

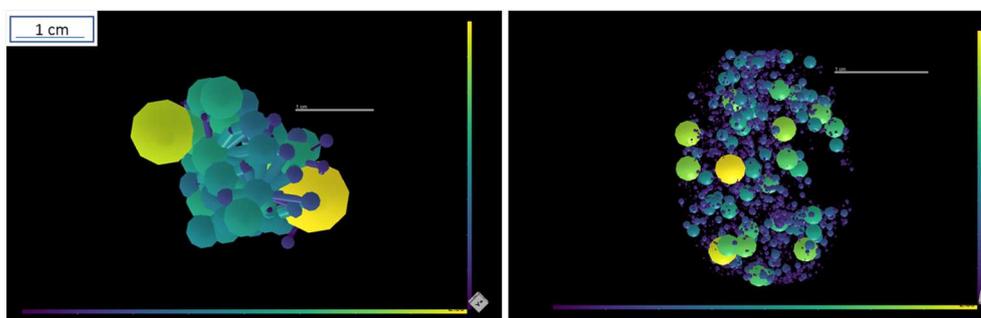


Figura 5-42: PNM CP2 REF a) Resultados de PNM do volume 1 para poros conectados, b) resultado de PNM do volume 2 para poros não conectados

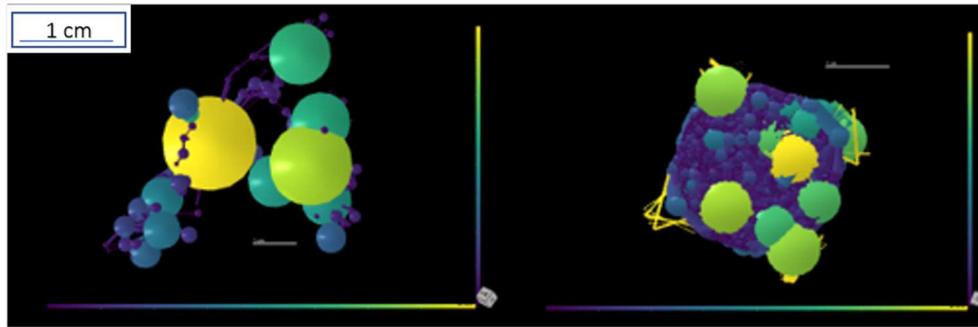


Figura 5-43: PNM CP2 REF a) Resultados de PNM do volume 2 para poros conectados, b) resultado de PNM do volume 2 para poros não conectados

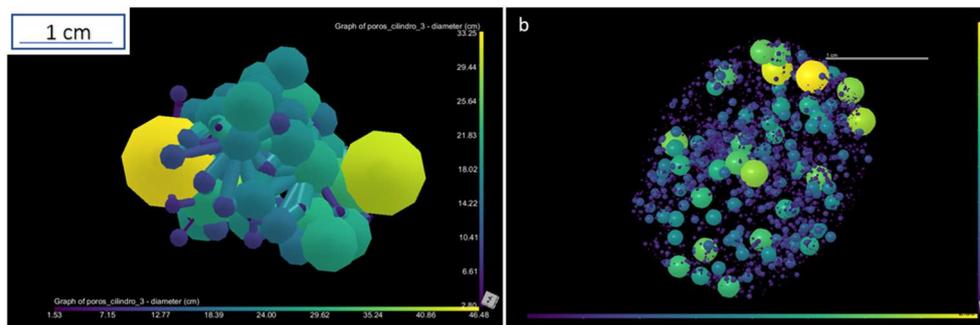


Figura 5-44: PNM CP2 REF a) Resultados de PNM do volume 3 para poros conectados, b) resultado de PNM do volume 3 para poros não conectados

Tabela 5-11: Volume total de poros do CP2 do concreto de referência e média de poros conectados e não conectados

volume total de poros (%)	volume de massa (%)	média de poros conectados (%)	poros não conectados (%)
3,09%	96,91%	1,01	98,99

Para os outros corpos de prova analisados encontrou-se os seguintes valores, mostrados nas tabelas Tabela 5-12 e Tabela 5-13.

Tabela 5-12: Volume total de poros do CP1 do concreto de referência e média de poros conectados e não conectados

volume total de poros (%)	volume de massa (%)	média de poros conectados (%)	poros não conectados (%)
2,43%	97,57%	2,09	97,91

Tabela 5-13: Volume total de poros do CP3 do concreto de referência e média de poros conectados e não conectados

volume total de poros (%)	volume de massa (%)	média de poros conectados (%)	poros não conectados (%)
2,94%	97,06%	2,31	97,69

Sabe-se que a porosidade, principalmente o volume poroso de um material cimentício, é uma variável de primeira ordem que interfere diretamente nas propriedades mecânicas das peças de concreto; ou seja, quanto maior a for o volume poroso das amostras, menor será a resistência à compressão obtida.

Ao se comparar os resultados de todas as amostras analisadas, pode-se dizer que os corpos de prova de concreto com adição de RCD possuem, como o esperado, um maior volume de porosidade, como pode ser visto na Figura 5-45. Fato justificado, principalmente, pela presença de massa cimentícia antiga nos agregados reciclados.

É importante ressaltar que, além da massa cimentícia pré-existente nos agregados reciclados, as porções mistas são compostas por partes cinzas e partes vermelhas, ou seja, materiais cerâmicos, naturalmente mais porosos. Estes agregados, mesmo que com alto controle de qualidade e fracionados de maneira correta, acarretam um aumento de porosidade e conseqüentemente, queda na resistência.

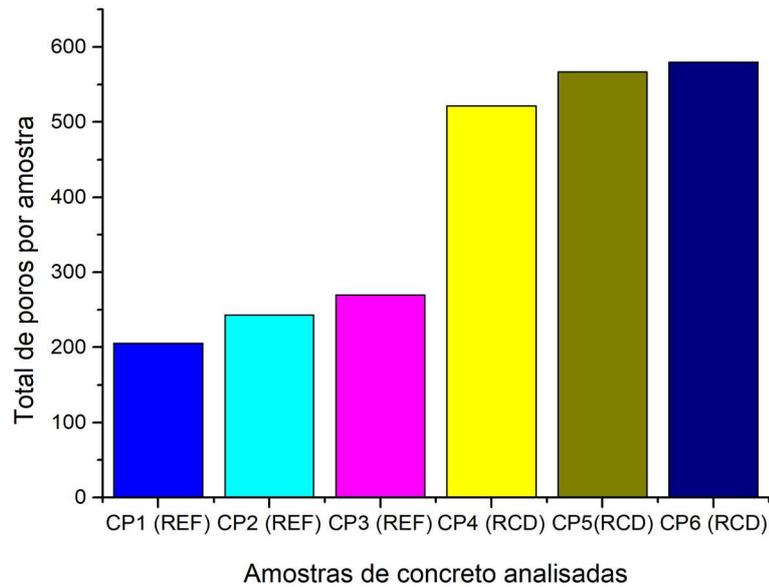


Figura 5-45: Gráfico comparativo do total de poros entre as amostras de concreto com adição de RCD e concreto de referência

A amostra CP5 (concreto com adição de RCD) apresentou valores maiores de poros interligados, ficando em destaque, como pode ser visto no gráfico da Figura 5-46a. Este efeito pode ser explicado tanto por alguma variação de concretagem na região do prisma de onde foi retirada a amostra, quanto por alterações na obtenção das imagens, durante a execução da microtomografia.

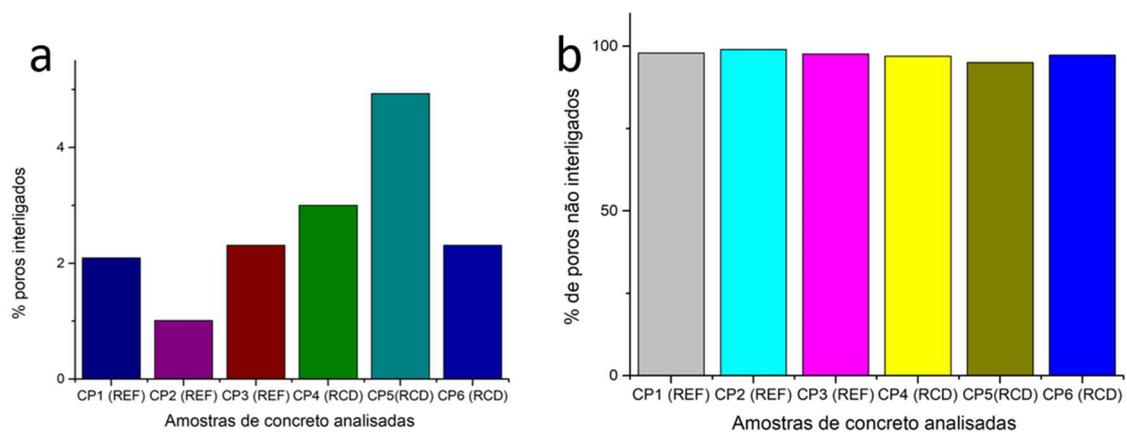


Figura 5-46: Gráficos comparativos do a) total de poros conectados e b) não conectados entre as amostras de concreto com adição de RCD e concreto de referência

6 Conclusões

A rotina computacional e de análise de imagens utilizada nesta pesquisa foi bastante eficiente para o entendimento da formação de poros e canais porosos no concreto com adição de RCD. Além de possibilitar a visualização em 3D destas estruturas e suas ligações, foi possível analisar qualitativa e quantitativamente os objetos.

Por serem amostras muito densas, encontrou-se bastante dificuldade no processamento das imagens obtidas. As primeiras tomografias foram descartadas devido ao tamanho de pixels (35 μm) não se mostrar eficiente para análises mais precisas. Assim, ao optar-se por alterar o tamanho dos pixels para 14 μm , obteve-se uma resolução capaz de gerar melhores resultados.

Ambos os traços se mostraram eficientes quanto aos valores de compressão. É sabido que, geralmente, os concretos com adição de RCD possuem uma tendência a menores valores de resistência devido à falta de padronização e qualidade dos agregados. Portanto, ao se encontrar valores próximos ao de concreto de referência, conclui-se que os agregados, mesmo que provenientes de construção e demolição, podem garantir materiais eficientes.

Mesmo que os resultados para ensaios de compressão tenham se mostrado promissores, a quantidade de poros encontrada nas amostras de concreto de referência foi cerca de 42% menor do que a encontrada nos concretos com adição de RCD. Este comportamento já era esperado pois, sabe-se que os agregados de origem reciclada possuem tendência a acumular pasta cimentícia antiga em sua superfície. Esta característica faz com que o cimento acumulado na superfície e não hidratado anteriormente, passe por um novo processo de hidratação além de, impedir que a nova matriz cimentícia consiga se aderir ao agregado, fragilizando-o e criando poros.

Além disso, uma justificativa para que os valores de resistência à compressão fossem parecidos entre amostras de concreto de referência e concreto com adição de RCD, mesmo com uma diferença de quase 50% entre o volume de poros, é a necessidade de se eliminar os objetos menores no momento da segmentação das imagens.

Como foi dito anteriormente, eliminou-se objetos de até 1 voxel, o que pode ter gerado a retirada de objetos de interesse, devido à similaridade com objetos espúrios. Tal eliminação pode não ter sido bem-sucedida, o que justificaria os resultados encontrados nesta pesquisa.

Uma eliminação em excesso de pores menores, poderia alterar de forma significativa os resultados encontrados entre os dois tipos de amostras. Tal fato pode gerar incertezas nas análises das imagens obtidas em MicroCT, que devem ser levadas em consideração em trabalhos futuros.

Observou-se que os objetos de maior dimensão tendem a se formar entre os agregados, tanto para o concreto de referência quanto para as amostras com adição de RCD. Este fato sugere que, como mostram alguns estudos, melhores resultados são obtidos quando se utiliza vibração mecânica das amostras em substituição à vibração manual.

Os objetos menores encontram-se em todas as amostras de maneira espalhada, tendo uma tendência a pequenos acúmulos margeando os agregados, tanto naturais quanto reciclados.

Outra característica importante analisada foi a porcentagem de poros e canais porosos interligados nas amostras através da técnica de PNM, já que quanto maior a ligação entre os objetos, maior é a percolação de fluidos que são prejudiciais ao material.

O PNM ainda é uma técnica bastante nova quando se trata da aplicação para materiais cimentícios. Assim, ainda existem muitos pontos a serem explorados neste campo de pesquisa. Para que fosse utilizada, a técnica exigiu cerca de 50 horas de processamento por amostra, sendo que, muitas das análises foram interrompidas por sobrecarga do software ou questões de memória disponível das máquinas utilizadas.

No MEV foi possível visualizar o comportamento dos poros nas áreas de superfície das amostras. O comportamento esférico dos poros, compatível com os dados obtidos por tomografia, permitiram uma comparação de dados, e um maior

entendimento da formação dos objetos. Observou-se também que, na zona de transição interfacial, temos o acúmulo de poros ao longo de sua formação, e que nos concretos com agregado reciclado, esta característica se sobressai, já que este tipo de amostra possui material cimentício de concretagens anteriores.

Discute-se a utilização dos agregados reciclados como substituição aos agregados naturais, principalmente por possuírem diferentes origens e materiais contaminantes. Esta pesquisa mostra a possibilidade de utilização deste material, de maneira eficaz a partir de usinas com controle de entrada do material e uma boa separação das partes cinzas e vermelhas. Quando equilibradas as partes, os resultados tendem a ser muito próximos dos resultados do concreto convencional, fazendo com que exista uma opção mais barata e menos agressiva ambientalmente, para a indústria da construção civil.

6.1. Trabalhos futuros

Pretende-se, para trabalhos futuros, elaborar através de linguagens de programação Python e ensaios de MicroCT maneiras de se entender parâmetros como capilaridade, percolação, entre outras, principalmente no momento da obtenção de imagens. Por ser uma técnica ainda pouco utilizada em materiais cimentícios, tem-se a intenção de explorar o PNM para entender melhor o comportamento relacionado à porosidade do material.

Como existem questões com a eliminação de objetos menores de 1 voxel, pretende-se estudar formas de se identificar e distinguir os histogramas para que uma diferenciação entre ruídos e poros seja mais eficiente, evitando resultados mascarados.

Quanto às amostras, sugere-se um estudo que possibilite a utilização de outros resíduos somados ao RCD, como por exemplo fibras naturais, para que um reforço possa ser adicionado às estruturas.

7 Bibliografia

ABNT, A. B. DE N. T.-. NBR 15113: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. **Apresentação**, v. 1, p. 1–12, 2004.

ABNT, A. B. DE N. T.-. NBR 7211: Agregados para concreto-Especificação
Aggregates for concrete-Specification. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–15, 2005.

ABNT, A. B. DE N. T.-. Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2013.

ABRECON. **Relatório Pesquisa Setorial 2017 - 2018**. [s.l: s.n.].

ALMEIDA, S. L. M. DE; LUZ, A. B. DA. **Manual of aggregates for the construction industry**, 2009. (Nota técnica).

A.M. NEVILLE. **Propriedades do Concreto**. [s.l: s.n.].

BHUSAL, S.; LI, X.; WEN, H. Evaluation of effects of recycled concrete aggregate on volumetrics of hot-mix asphalt. **Transportation Research Record**, n. 2205, p. 36–39, 2011.

BORDELON, A. C.; ROESLER, J. R. Spatial distribution of synthetic fibers in concrete with X-ray computed tomography. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 35–43, 2014.

CONGRESSO NACIONAL DO BRASIL. Atividade Legislativa. p. 1–19, 2015.

DAVID CROSTWAITE. World Construction Aggregates. **The Freedonia Group**, n. March 2016, p. 6, 2012.

DIAMOND, S.; HUANG, J. The ITZ in concrete - A different view based on image analysis and SEM observations. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 2–3, p. 179–188, 2001.

FRIEDRICHSDORF, S. P. et al. Effect of the software binning and averaging data during microcomputed tomography image acquisition. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–8, 2019.

GLOBAL, T.; MANAGEMENT, W. Waste management – still a global challenge in the 21st century: An evidence-based call for action. n. September, p. 2015–2017, 2015.

GUO, Y. et al. Pore structure characteristics and performance of construction waste composite powder-modified concrete. **Construction and Building Materials**, v. 269, 1 fev. 2021.

GUO, Z. et al. Life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates—A case study in China. **Advances in Construction and Demolition Waste Recycling**, p. 515–535, 2020.

HOSAN, A. et al. Nano- and micro-scale characterisation of interfacial transition zone (ITZ) of high volume slag and slag-fly ash blended concretes containing nano SiO₂ and nano CaCO₃. **Construction and Building Materials**, v. 269, p. 121311, 2021.

JALINI, S.; FALAHAT, R. A novel algorithm to estimate mineral elastic properties and pore aspect ratio in the carbonate reservoirs. **Journal of Applied Geophysics**, v. 184, p. 104253, 2021.

JOVCHELEVICH, R. Estudo revela desperdício na construção. **Folha de S. Paulo**, p. 2–3, 1994.

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

KIM, Y. et al. Influence of bonded mortar of recycled concrete aggregates on interfacial characteristics – Porosity assessment based on pore segmentation from backscattered electron image analysis. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 149–163, 2019.

LANDIS, E. N.; KEANE, D. T. X-ray microtomography. **Materials Characterization**, v. 61, n. 12, p. 1305–1316, 2010.

LANGER, W. H. Aggregate Resource Availability in the Conterminous United States, Including Suggestions for Addressing Shortages, Quality, and Environmental Concerns. **U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1287**, 2011.

LEITE, M. B. **AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**. [s.l: s.n.].

LEVY, S. L. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** [s.l: s.n.].

LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 1–2, p. 36–44, 2008.

LOEFFLER, C. M. et al. Detection and segmentation of mechanical damage in concrete with X-Ray microtomography. **Materials Characterization**, v. 142, n. March, p. 515–522, 2018.

LORENZONI, R. **Uso da microtomografia computadorizada para avaliação de danos na microestrutura de pasta de cimento submetida a carregamento cíclico e a temperaturas elevadas.** [s.l: s.n.].

LU, S.; LANDIS, E. N.; KEANE, D. T. X-ray microtomographic studies of pore structure and permeability in Portland cement concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 39, n. 6, p. 611–620, 2006.

MAKUL, N. Cost-benefit analysis of the production of ready-mixed high-performance concrete made with recycled concrete aggregate: A case study in Thailand. **Heliyon**, v. 6, n. 6, p. e04135, 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.** [s.l: s.n.].

NAGALI, A. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil.** 1^a ed. São Paulo: [s.n.].

NAIK, N. N. et al. Sulfate deterioration of cement-based materials examined by x-ray microtomography. **Developments in X-Ray Tomography IV**, v. 5535, n. October 2004, p. 442, 2004.

NASIER, S. Materials Today : Proceedings Utilization of recycled form of concrete , E-wastes , glass , quarry rock dust and waste marble powder as reliable construction materials. **Materials Today: Proceedings**, n. xxxx, 2021.

PANDURANGAN, K.; DAYANITHY, A.; OM PRAKASH, S. Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 212–221, 2016.

PEREIRA, A. et al. EXPERIÊNCIAS NA ENGENHARIA DA UFF COM MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS-X. [s.d.].

RANGEL, C. S. **DESEMPENHO MECÂNICO, ESTRUTURAL E DURABILIDADE DE CONCRETOS DE RESISTÊNCIA NORMAL E ALTA**

RESISTÊNCIA PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE DIFERENTES ORIGENS. [s.l: s.n.].

RATTANASAK, U.; KENDALL, K. Pore structure of cement/pozzolan composites by X-ray microtomography. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 637–640, 2005.

REN, J. et al. Pore characteristics of different phase in nano-modified concrete and their influences on the compressive strength. **Journal of Building Engineering**, v. 46, p. 103784, 1 abr. 2022.

RÍOS, J. D. et al. Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography. **Materials and Design**, v. 165, p. 107582, 2019.

ROBALO, K. et al. Experimental development of low cement content and recycled construction and demolition waste aggregates concrete. **Construction and Building Materials**, v. 273, 1 mar. 2021.