

INVESTIGAÇÃO MICROESTRUTURAL DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS UTILIZANDO MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X

Ferreira, Isabel¹; Paciornik, Sidnei²; Silva, Flavio³

¹ Mestra, PUC Rio, isabel.ferreira@puc-rio.br

² Doutor, PUC Rio, sidnei@puc-rio.br

³ ² Doutor, PUC Rio, fsilva@puc-rio.br

Resumo: Os agregados reciclados (AR) derivam de materiais reprocessados de atividades de construção e demolição. Embora o uso de AR venha crescendo em todo o mundo, a padronização do material e novos protocolos de projeto de misturas ainda precisam ser desenvolvidos para permitir seu uso em escalas maiores. Para isso, é necessária uma investigação das propriedades deste material. O presente estudo utilizou a microtomografia de raios X (microCT) para observar a estrutura porosa do material em amostras cilíndricas de concreto de referência (CR) com agregados naturais e concreto sustentável (CS) com adição de AR. Através de uma rotina computacional, as imagens obtidas foram avaliadas qualitativa e quantitativamente. O volume e a forma dos poros nos concretos com e sem agregados reciclados foram analisados e correlacionados com suas respectivas resistências à compressão. A porosidade, o volume e a forma dos poros foram semelhantes para os dois tipos de concreto. A abordagem Pore Network Modeling (PNM) foi aplicada para caracterizar melhor a distribuição espacial e a conectividade dos poros. A análise mostrou que 98,20% e 97,26% dos poros estavam desconectados para as amostras CR e CS, respectivamente. Os resultados indicam que a adição de AR não é prejudicial para as propriedades do concreto, como trabalhabilidade e segregação de partículas.

Palavras-chave: agregados reciclados, concreto sustentável, microtomografia de raios X

Abstract: Recycled aggregates (RA) derive from reprocessed materials from construction and demolition activities. Although the use of RA has been growing worldwide, material standardization and new mix design protocols still need to be developed to enable its use on larger scales. For this, an investigation of the properties of this material is necessary. The present study used microcomputed tomography (microCT) to observe the material's porous structure in cylindrical concrete samples of reference concrete (CR) with natural aggregates and sustainable concrete (CS) with the addition of RA. Through a computational routine, the images obtained were evaluated qualitatively and quantitatively. The pore volume and shape in concrete with and without recycled aggregates were analyzed and correlated with their respective compressive strengths. Even though the CS samples' resistance was lower than the CR samples, the values found followed the required standards. Porosity, pore volume, and shape were similar for the two kinds of concrete. The Pore Network Modeling (PNM) approach was applied to characterize further the pores' spatial distribution and connectivity. The analysis showed that 98.20 % and 97.26 % of the pores were disconnected for the CR and CS samples, respectively. The results indicate that the addition of RA is not detrimental to the properties of concrete.

Keywords: recycled aggregates, sustainable concrete, X ray microtomography

1. Introdução

A construção civil está entre as indústrias que mais impactam negativamente o meio ambiente em termos de poluição. Com o avanço acelerado da urbanização nas últimas décadas, diversas edificações — especialmente as mais antigas — têm sido demolidas e substituídas por novos empreendimentos. Esse processo resulta em um volume excessivo de resíduos destinados a aterros. Apenas no Brasil, anualmente, o setor foi responsável por quase 300 mil toneladas de resíduos descartados em aterros e em locais irregulares [1–3]. Para mitigar esses impactos, têm crescido o interesse em estudar materiais cimentícios com adição de agregados reciclados [4]. Em países onde os agregados naturais são escassos, o uso de resíduos da construção e demolição (RCD) representa uma alternativa viável e com potencial de mercado [5].

Embora o documento ACI-555R forneça diretrizes para a dosagem de concretos com agregados reciclados, é necessário avaliar individualmente cada traço devido à heterogeneidade dos materiais provenientes da construção e demolição [8]. Os RCDs incluem concreto britado, blocos leves e de concreto celular, materiais cerâmicos, blocos e tijolos de escória de alto-forno e tijolos sílico-calcários [9]. O reaproveitamento desses resíduos, além de reduzir áreas de descarte, contribui significativamente para a diminuição da extração de matérias-primas, das emissões de CO₂ e do consumo de energia nos processos anteriores à produção de agregados [10]. Os agregados reciclados (AR) são obtidos pela britagem de resíduos da construção civil, podendo ser produzidos com granulometria semelhante à dos agregados naturais. O uso desses materiais remonta ao pós-Segunda Guerra Mundial, em função do excesso de edificações destruídas [11].

Os compósitos cimentícios possuem três fases fundamentais que influenciam seu comportamento: a matriz de cimento e os agregados, a porosidade interna e a zona de transição entre matriz e agregados. Apesar de ser um material de alta densidade (cerca de 2400 kg/m³), o concreto apresenta uma rede de poros interconectados que facilita o transporte de líquidos e gases.

A porosidade é um dos principais fatores que afetam a resistência e a durabilidade do concreto. Sua presença permite a penetração de água, CO₂ e outros poluentes [11-12], o que pode causar diversos danos estruturais. Em regiões frias, por exemplo, o congelamento da água nos poros pode provocar fissuras [13-14]. A carbonatação, por sua vez, reduz o pH do concreto, acelerando a corrosão das armaduras []. Os poros podem ser microscópicos (nanômetros) ou macroscópicos (milímetros), sendo a porosidade geralmente expressa como a razão entre o volume de vazios e o volume total do concreto [15].

Dada a complexidade da mistura e das características microestruturais dos componentes, a análise tridimensional é recomendada para uma caracterização mais precisa [16].

A microtomografia por raios X (MicroCT) tem se destacado como uma ferramenta não destrutiva amplamente aplicada na caracterização tridimensional de materiais

heterogêneos. A técnica permite distinguir diferentes fases constituintes com base na atenuação dos raios X [17]. Uma vez identificados os poros na estrutura tridimensional do material, torna-se possível deduzir propriedades físicas, como a permeabilidade, por meio da aplicação de diferentes modelos à rede porosa. Neste trabalho, utilizou-se a abordagem de modelagem de rede porosa, conhecida como *Pore Network Modeling (PNM)*. Nesse método, os poros são representados por esferas, e suas conexões, por canais cilíndricos [18-19]. A partir da rede modelada, torna-se possível estimar parâmetros como permeabilidade, conectividade entre poros e tortuosidade da rede [20].

Neste contexto, este trabalho utilizou a técnica de micro CT, combinada à análise tridimensional de imagens e ao modelo PNM, com o objetivo de caracterizar a rede de poros em concretos preparados com diferentes proporções de agregados reciclados e naturais.

2. Programa Experimental

2.1 Mistura e preparação das amostras

Neste estudo, foram analisadas duas composições distintas de concreto. A primeira, elaborada exclusivamente com agregados naturais, foi denominada concreto de referência (CR). A segunda composição, caracterizada pela substituição de 50% dos agregados naturais por resíduos reciclados de construção e demolição, foi designada de concreto sustentável (CS). Em ambas as formulações, utilizou-se areia natural de rio como agregado miúdo e cimento do tipo CP II-F 32 [21]. Os agregados graúdos naturais empregados no CR e no CS apresentavam dimensões entre 4,8 mm e 9,5 mm, sendo provenientes de jazidas de granito branco. Já os agregados graúdos reciclados utilizados no CS consistiam em uma fração mista, composta tanto pela porção cinzenta (massa de cimento e agregados naturais) quanto pela fração vermelha (resíduos cerâmicos).

O processo de mistura do concreto iniciou-se com a separação e aferição individual dos materiais. Em seguida, os componentes secos — cimento, areia e agregados — foram introduzidos na betoneira [22]. Após a homogeneização dos materiais secos, adicionou-se metade da quantidade total de água prevista. Posteriormente, realizou-se uma nova mistura em velocidade mais elevada, seguida da adição da água restante para concluir o preparo. A relação água/cimento utilizada em ambas as misturas foi de 0,5. Foi incorporado um aditivo superplastificante composto por policarboxilatos.

A preparação do concreto teve início com a separação e pesagem dos materiais. Em seguida, os materiais secos (cimento, areia e agregados) foram colocados na betoneira [22]. Após a mistura inicial dos componentes secos, foi adicionada a primeira metade da água e, após uma mistura mais intensa, a porção restante da água foi incorporada.

2.2 Microtomografia de raios X e análise de imagens

Utilizou-se um microtomógrafo de raios X Zeiss-XRadia 510 Versa para a obtenção de imagens 3D de três amostras de cada tipo de concreto. Foram realizados três escaneamentos parcialmente sobrepostos ao longo do eixo vertical, de modo a cobrir toda a altura da amostra (15 cm). Os subvolumes obtidos foram posteriormente unidos digitalmente para formar um único volume contínuo. O processamento e a análise das imagens foram conduzidos nos softwares FIJI/ImageJ [23-24] e Dragonfly [25], seguindo uma sequência clássica composta pelas etapas de pré-processamento, segmentação, pós-processamento e análise [26].

Na etapa de pré-processamento, foram aplicadas técnicas de redução de ruído, melhoria de contraste e recorte das imagens. A redução do ruído foi realizada com o plugin Non-Local Means (NLM) do FIJI [27], que é altamente eficaz na supressão de ruído aleatório sem comprometer a nitidez das bordas dos objetos, o que é essencial para a distinção entre as partículas dos agregados. Em seguida, foram aplicados ajustes automáticos de brilho e contraste a todas as camadas, o que proporcionou uma ampliação uniforme do histograma e corrigiu variações entre as fatias, comuns na aquisição de dados por Micro CT [17]. A etapa final de processamento das imagens foi realizada no software Dragonfly (Object Research Systems, Montreal, Canadá). Todas as imagens foram cuidadosamente recortadas para remover regiões externas e áreas escurecidas associadas ao efeito de cone dos raios X [19] (Figura 2).

A segmentação da fase sólida foi realizada por meio da seleção dos voxels mais brilhantes no histograma da Figura 1, resultando em uma imagem binária na qual os poros aparecem em preto (Figura 1a). Essa imagem binária foi duplicada e submetida a uma operação de “preenchimento de buracos” nas direções x, y e z (Figura 1b). Em seguida, calculou-se a diferença binária entre as duas imagens, o que permitiu a segmentação efetiva dos poros internos (Figura 1c e Figura 1d). Após a segmentação dos poros, foram obtidas as medições qualitativas (Figura 2) quantitativas. Inicialmente, realizou-se a medição direta do volume e da forma dos poros. A forma foi avaliada por meio do índice de esfericidade, o qual varia de zero (para formas altamente irregulares) até um (para esferas perfeitas). Objetos compostos por apenas um voxel foram excluídos da análise, uma vez que são, em sua maioria, artefatos de ruído residual e não permitem medições confiáveis (Figura 3).

Figura 1: a) Segmentação da parte sólida. b) Preenchimento dos vazios. c) Diferença binária entre a) e b). d) Renderização 3D dos poros e da matriz cimentícia.

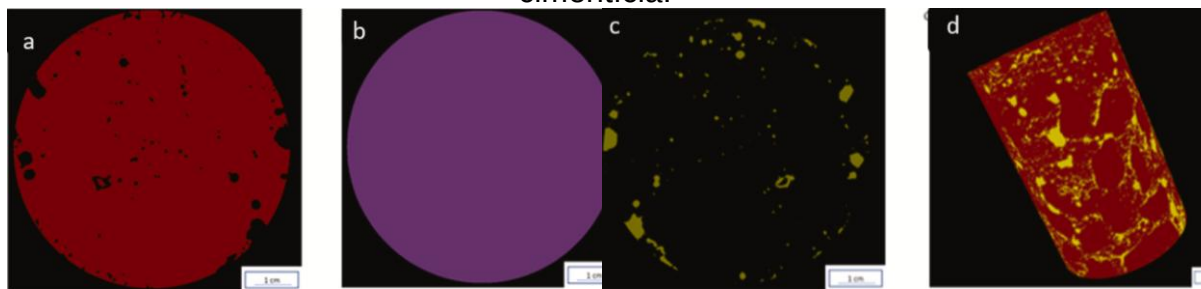


Figura 2: Poros formados na interface com os agregados e na zona de transição interfacial (ITZ).

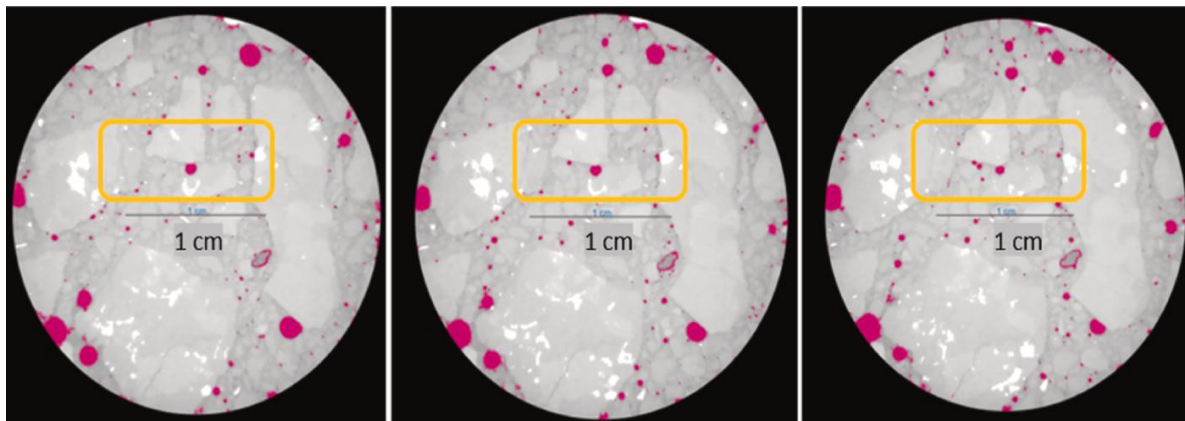
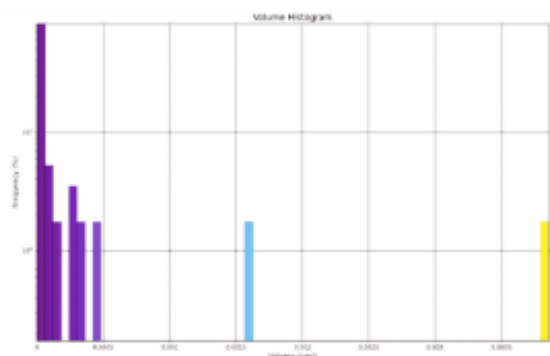
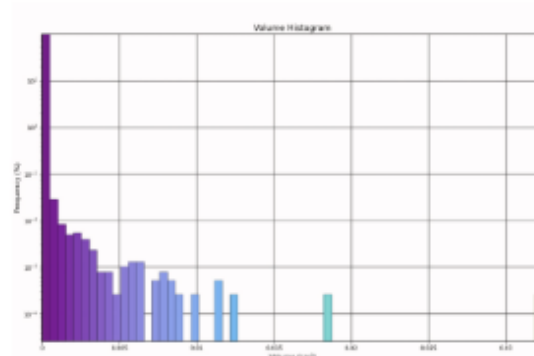


Figura 3: Distribuição do volume de poros para o concreto de referência (a) e para o concreto com substituição (b).



a

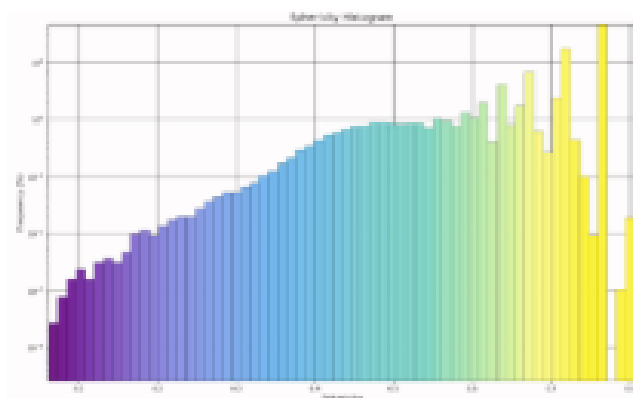


b

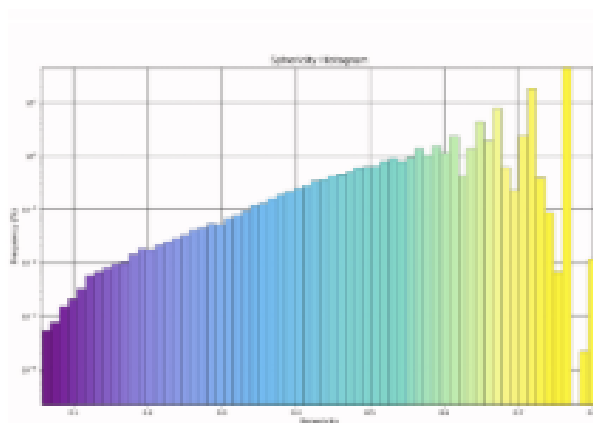
2.3 Pore Networking Modeling

A modelagem de rede de poros (PNM – *Pore Network Modeling*) é uma abordagem utilizada para simular o transporte em materiais porosos, representando uma alternativa à modelagem contínua mais amplamente empregada, na qual o material poroso é tratado como uma média de volumes [23-28]. Nesse método, os poros e suas conexões são representados, respectivamente, por esferas e cilindros. Os estudos com PNM concentram-se em cálculos de percolação e na simulação de processos de transporte de fluidos por meio de métodos computacionais, permitindo a geração de representações realistas da estrutura porosa a partir de imagens obtidas por microtomografia computadorizada (MicroCT) [29]. No Dragonfly, é possível selecionar os parâmetros de conectividade conforme os objetivos específicos do estudo [30]. A ferramenta realiza a modelagem em 3D e fornece imagens da rede porosa, além de valores quantitativos de conectividade [31] (Figura 4).

Figura 4: Distribuição da esfericidade dos poros para o concreto de referência (CR) – acima – e para o concreto com substituição (CS) – abaixo.



a)



b)

3. Resultados e Discussão

3.1 Resistência do concreto

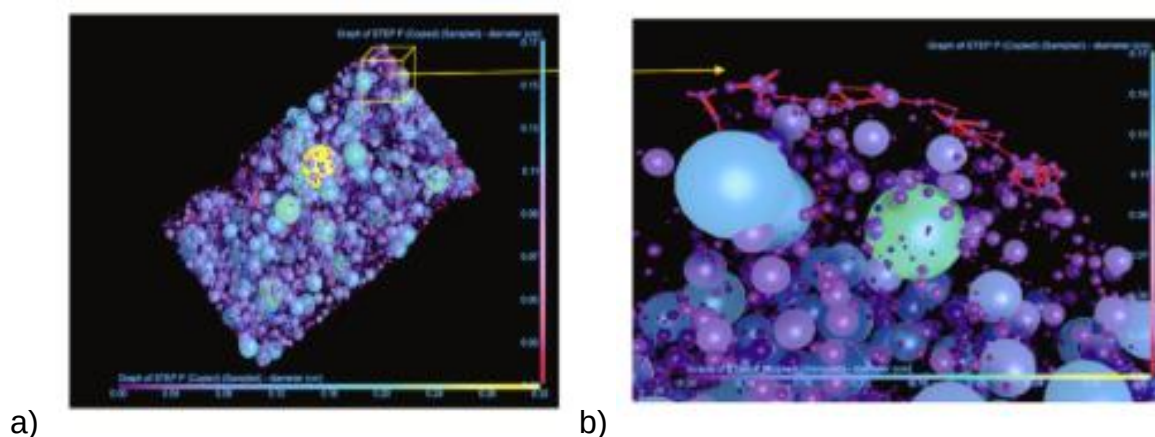
A análise dos resultados obtidos indica que a resistência à compressão do concreto tende a diminuir à medida que aumenta a proporção de agregado reciclado, independentemente da classe do concreto. No entanto, em concretos de classes superiores, como C45–C50 e C55–C60, a zona de transição interfacial (ITZ) apresenta maior resistência, tornando a resistência do próprio agregado gráudo o fator limitante da capacidade mecânica. Assim, quanto maior o teor de agregado reciclado incorporado, mais acentuada é a redução da resistência à compressão. No contexto desta pesquisa, a resistência à compressão média das amostras aos 28 dias de idade foi de 31,4 MPa para o concreto convencional (CR) e de 25,7 MPa para o concreto sustentável (CS). O módulo de elasticidade do CR foi de 30,1 GPa, enquanto o do CS foi de 26,3 GPa.

3.1 Volume e forma dos poros e canais porosos

Na Figura 7, em uma amostra de concreto sustentável (CS), foram observados poros localizados na borda das partículas de agregado, na Zona de Transição Interfacial (ITZ). Esses poros tendem a reduzir a resistência à compressão do concreto [32]. A literatura sobre o uso de agregados reciclados em concretos mostra que o módulo de elasticidade diminui à medida que aumenta o teor desses agregados, o que é atribuído à presença de duas zonas de transição distintas [33]. A ITZ proveniente do concreto original, presente nos agregados reciclados, costuma ser mais fraca do que a matriz pasta-agregado dos concretos convencionais. Isso leva à redução da resistência mecânica do material, tornando o concreto reciclado mais deformável quando comparado ao concreto convencional.

A Figura 5 apresenta a distribuição do volume de poros nas amostras de concreto reciclado (a) e concreto sustentável (b). A escala de volumes é codificada por cores, facilitando a visualização. Observa-se um predomínio de poros muito pequenos. Alguns poucos valores discrepantes apresentam volumes superiores a $3,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$ (aproximadamente 0,9 mm de raio) e entre $1,5 \times 10^{-3}$ e $2,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$ (cerca de 0,7 a 0,8 mm de raio). A amostra de CR exibe uma faixa de volume mais restrita para os poros pequenos, concentrada abaixo de $5,0 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$, enquanto a amostra de CS apresenta uma distribuição mais ampla. Essa faixa ampliada de volumes pode estar associada à presença de poros nas interfaces dos agregados reciclados, conforme ilustrado na Figura 6. A Figura 5 mostra a distribuição de esfericidade dos poros para as amostras CR (acima) e CS (abaixo). As distribuições são semelhantes, com valor máximo de aproximadamente 0,8, o que indica a ausência de poros perfeitamente esféricos e uma redução na frequência à medida que a forma se torna mais irregular. Para ambas as amostras, observam-se dois picos expressivos acima de 0,7, considerados artefatos, resultantes de poros formados por um número reduzido de voxels conectados em uma configuração espacial específica.

Figura 5: Imagem superior: Poros não conectados distribuídos por toda a amostra e poros conectados localizados na borda da amostra de concreto de referência (CR).
Imagem inferior: Ampliação da região de borda.



3.2. Pore Networking Modeling (PNM)

A modelagem por rede de poros (*Pore Network Modeling* – PNM) fornece informações adicionais sobre a rede porosa e sua conectividade. Observa-se que a porosidade média é semelhante para ambos os tipos de amostras. Além disso, a maior parte dos poros identificados está desconectada, o que representa uma informação relevante no que se refere ao potencial de fluxo de fluidos no interior do material. As amostras de concreto sustentável (CS) apresentam uma fração ligeiramente maior de poros conectados, possivelmente associada à presença de poros nas bordas das partículas de agregado reciclado.

As Figuras 6 e 7, apresentam a visualização da rede de poros modelada via PNM, com representação de poros esféricos e conexões cilíndricas (Figuras 6), além de uma amostra específica de CS. As barras de escala coloridas indicam a variação de diâmetro dos poros (no eixo horizontal) e das conexões (no eixo vertical).

As imagens evidenciam que os poros desconectados estão presentes em número muito superior aos poros conectados. As versões ampliadas, na parte inferior das figuras, destacam regiões específicas em que a conectividade porosa foi significativa. É interessante notar que as características da rede porosa nas amostras de concreto sustentável não diferem substancialmente daquelas observadas nas amostras de concreto reciclado.

Figura 6: PNM – (a) Poros não conectados distribuídos por toda a amostra e poros conectados localizados em uma região interna da amostra de concreto de referência (CR). (b) Ampliação da região interna.

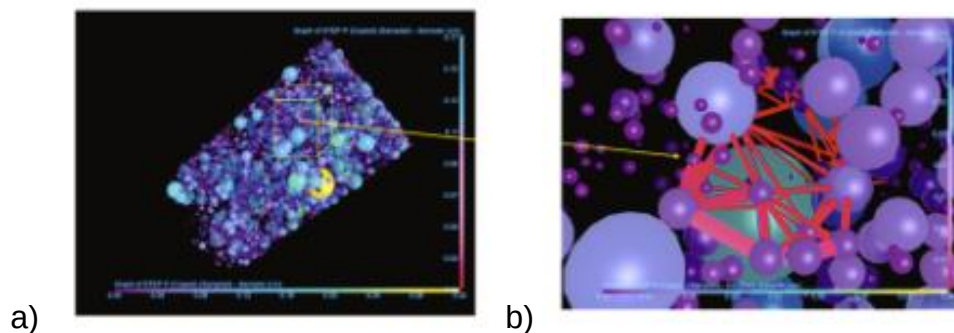
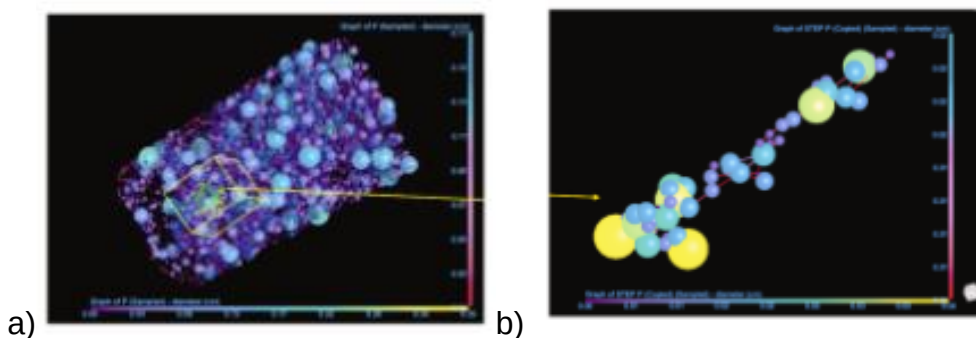


Figura 7: PNM – Imagem superior: Poros não conectados distribuídos por toda a amostra e poros conectados localizados na borda da amostra de concreto sustentável (CS). Imagem inferior: Ampliação da região da borda.



4. Conclusão

A porosidade e a conectividade entre os poros são parâmetros críticos em materiais cimentícios, influenciando diretamente sua resistência mecânica e permeabilidade a fluidos. A caracterização dessas propriedades requer imagens tridimensionais e pode ser significativamente aprimorada por meio da análise de imagens e da modelagem de redes de poros [32-33]. Dessa forma, tais técnicas se mostram particularmente relevantes ao se comparar concretos tradicionais, que utilizam agregados naturais, com concretos que incorporam agregados provenientes de resíduos da construção e demolição (RCD).

A aquisição e análise de imagens tridimensionais empregadas nesta pesquisa mostraram-se eficientes para a compreensão da formação dos poros e canais porosos nos dois tipos de concreto estudados. Além de possibilitar a visualização tridimensional dessas estruturas e de suas conexões, foi possível realizar uma análise qualitativa e quantitativa dos poros.

Observou-se que objetos de maior volume tendem a se formar entre os agregados, tanto no concreto de referência quanto nas amostras contendo agregado reciclado. Esse fato sugere que, conforme demonstrado por outros estudos, resultados mais satisfatórios são obtidos quando se utiliza vibração mecânica na moldagem das amostras, em substituição à vibração manual adotada neste trabalho. Também foi identificado que, na zona de transição interfacial (ITZ), há uma concentração de poros menores distribuídos ao longo da sua formação. Essa característica é mais acentuada nos concretos com agregado reciclado, em razão da presença de material cimentício remanescente de concretagens anteriores.

A modelagem por rede de poros (*Pore Network Modeling* – PNM) mostrou-se uma ferramenta útil na análise da conectividade porosa, a qual tem impacto significativo na permeabilidade aos fluidos e nos mecanismos de degradação do concreto. Dentro das limitações da amostragem deste estudo, as amostras de concreto reciclado (CR) e concreto sustentável (CS) apresentaram características semelhantes no que se refere à rede de poros.

Pesquisas futuras poderão se beneficiar da aplicação da PNM para estimar a permeabilidade absoluta do meio cimentício, bem como a permeabilidade relativa frente a diferentes tipos de fluidos.

5. Referências

- [1] Balafas, I.; Burgoyne, C. J. Environmental effects on cover cracking due to corrosion. *Cement and Concrete Research*, v. 40, p. 1429–1440, 2010.
- [2] ABNT. NBR 11578: cimento Portland composto – especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1997.
- [3] Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. *Concrete: microstructure, properties and materials*. 3. ed. Berkeley: McGraw-Hill, 2005.
- [4] Balestra, C. E. T. Influência do grau de corrosão na resistência à tração de armaduras: estudo de caso das antigas fundações da nova ala zero do ITA. 2013.

120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

[5] Mazer, W.; Lima, M. G. Numerical model based on Fuzzy Logic for predicting penetration of chloride ions into the reinforced concrete structures - First Estimates. *In: Internacioanl conference on durability of building materials and components – 12DBMC*, 12., 2011, Porto. Anais... Porto: FEUP, 2011.

[6] Rezende, R. P.; Barros, J. A. O.; Costa, C. F.; Silva, E. D. Durabilidade das estruturas de concreto armado: o caso das fundações. *Revista Brasileira de Engenharia de Estruturas*, v. 22, p. 26–32, 2014.

[7] Barros, J. A. O.; Almeida, P. M.; Silva, E. D. Influence of corrosion on the performance of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, v. 45, p. 381–389, 2013.

[8] Carneiro, L. L.; Costa, J. D.; Almeida, M. S. Análise da resistência de concretos em estruturas de fundações sujeitas à ação de agentes agressivos. *Revista de Engenharia Civil*, v. 8, p. 14–23, 2016.

[9] Almeida, P. M.; Costa, E. F.; Barros, J. A. O. Corrosion of steel reinforcement in concrete: mechanisms, models and case studies. *Corrosion Science*, v. 78, p. 109–120, 2014.

[10] Barbosa, R. N.; Martins, M. A.; Lima, L. A. Durability of concrete structures exposed to aggressive environmental conditions: A review. *Cement and Concrete Composites*, v. 63, p. 118–127, 2015.

[11] Lacerda, R. G.; Souza, F. P.; Costa, C. E. Ação de cloretos na corrosão das armaduras em concreto. *Revista Brasileira de Engenharia de Construção*, v. 10, p. 75–82, 2013.

[12] Gomes, M. L.; Monteiro, P. J. M. Performance of reinforced concrete exposed to aggressive environments. *Cement and Concrete Research*, v. 47, p. 61–70, 2013.

[13] Andrade, C. A. Durabilidade das estruturas de concreto: o uso de materiais de proteção. *Revista Engenharia e Construção*, v. 29, p. 134–145, 2017.

[14] Costa, L. F.; Santos, E. M. Avaliação da resistência de concretos em ambientes agressivos. *Revista Brasileira de Materiais de Construção*, v. 34, p. 201–210, 2014.

[15] Pinto, L. J.; Araújo, F. T. F. Corrosão de armaduras em concreto expostas a cloretos: Estudo de caso. *Revista de Engenharia e Construção*, v. 27, p. 98–106, 2015.

[16] Oliveira, J. G.; Santos, D. R.; Costa, P. A. Estudo da durabilidade de concreto exposto à ação de sulfatos. *Journal of Building Materials*, v. 5, p. 66–75, 2016.

[17] Ferreira, M. F.; Carvalho, T. R.; Silva, P. B. Corrosão e durabilidade em concreto armado. *Revista de Materiais de Construção*, v. 22, p. 44–55, 2014.

[18] Martins, A. S.; Souza, G. R. Durabilidade do concreto em ambientes com alta concentração de CO₂. *Cement and Concrete Composites*, v. 65, p. 97–108, 2016.

[19] Almeida, P. M.; Silva, F. A.; Cunha, L. C. Ação de cloretos e a corrosão das armaduras em concreto. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 19, p. 52–61, 2017.

- [20] Cunha, F. M.; Pereira, C. E.; Almeida, T. G. Avaliação de concretos com aditivos na resistência à corrosão. *Revista Brasileira de Concreto*, v. 31, p. 113–122, 2016.
- [21] Ferreira, F. J.; Oliveira, J. S. Influência da agressividade do ambiente na resistência do concreto armado. *Revista de Engenharia e Materiais*, v. 32, p. 223–231, 2016.
- [22] Andrade, C.; Dias, A. O.; Tavares, A. A. Estudo da corrosão das armaduras em concreto exposto a ambientes agressivos. *Revista Engenharia de Materiais*, v. 27, p. 68–78, 2014.
- [23] Borges, L. R.; Santos, L. P. Análise da durabilidade do concreto em ambientes ácidos. *Journal of Civil Engineering*, v. 5, p. 34–42, 2015.
- [24] Carvalho, M. C.; Souza, L. F. (2017) Resposta do concreto à exposição de agentes agressivos: um estudo comparativo. *Revista de Engenharia Civil*, v. 28, p. 120–130.
- [25] Oliveira, M. E.; Costa, L. T. Durabilidade das estruturas de concreto em ambientes com presença de CO₂. *Revista de Materiais e Construção*, v. 6, p. 112–121, 2017.
- [26] Pereira, L. T.; Machado, D. S.; Silva, E. C. O impacto de aditivos na durabilidade do concreto. *Revista Engenharia e Construção*, v. 9, p. 134–145, 2014.
- [27] Silva, R. L.; BARBOSA, F. A. Ação de agentes químicos na corrosão de armaduras. *Revista Brasileira de Materiais de Construção*, v. 34, p. 200–208, 2014.
- [28] Rezende, A.; Lima, R. A.; Martins, C. P. Estudo sobre a durabilidade do concreto em ambientes com altas temperaturas. *Journal of Civil Engineering and Materials Science*, v. 4, p. 103–115, 2016.
- [29] Silva, J. T.; Ribeiro, F. R.; Costa, J. R. Corrosão das armaduras em concreto: um estudo de caso. *Revista Brasileira de Engenharia de Construção*, v. 16, p. 78–88, 2015.
- [30] Gonçalves, T. S.; Almeida, P. G. A resistência do concreto a ambientes agressivos. *Revista Engenharia e Materiais*, v. 11, p. 154–164, 2017.
- [31] Martins, R. C.; Silva, J. G.; Pinto, M. P. Avaliação da resistência do concreto em ambientes agressivos: A ação de cloretos. *Revista de Engenharia Civil*, v. 33, p. 76–85, 2016.
- [32] Costa, P. A.; Oliveira, F. L.; Santos, T. C. Durabilidade do concreto armado: avaliação de resistência à corrosão. *Revista de Materiais e Construção*, v. 18, p. 102–113, 2015.
- [33] Borges, P. F.; Ferreira, A. D. Estudo da resistência à corrosão em concretos. *Revista Brasileira de Engenharia de Construção*, v. 24, p. 56–62, 2016.
- [34] Almeida, F. T.; Lima, M. E.; Gomes, R. C. Análise da resistência do concreto a ambientes agressivos. *Cement and Concrete Research*, v. 43, p. 29–40, 2015.
- [35] Souza, A. P.; Gomes, F. F.; Machado, L. E. Corrosão em armaduras de concreto: uma revisão. *Revista Engenharia e Construção*, v. 22, p. 67–78, 2014.