

Segmentação de imagens microtomográficas tridimensionais de concretos leves usando técnicas de limiarização automática para cálculo de porosidade aparente

Tridimensional microtomographic image segmentation of lightweight concretes using automatic thresholding techniques for apparent porosity calculation

Thiago Santos de Oliveira¹, Susana Marrero Iglesias², Paulo Eduardo Ambrósio³

RESUMO

A indústria da construção implanta processos sustentáveis e a adição de agregados leves apresenta-se como uma boa solução para obter misturas de concretos, absorvendo rejeitos de outros processos. É o caso do Etileno-Acetato de Vinila (EVA), material da indústria calçadista. Apesar do apelo sustentável na reciclagem do EVA ou outros agregados leves em misturas de concreto, pode ocorrer uma perda de resistência mecânica. Esta perda pode ser prevenida utilizando de fibras na composição, a exemplo da piaçava, fibra natural nativa do Sul da Bahia. Visando a ampla utilização destes novos materiais, é preciso conhecer suas características. Na ciência dos materiais, as técnicas de ensaios não destrutivos se destacam por manter a integridade do material examinado, gerando economia e sustentabilidade. Neste trabalho, foram analisadas imagens de amostras de diferentes composições de concretos leves obtidas através de microtomografia computadorizada de raios-X. Foram empregadas técnicas de processamento de imagens, como Otsu e k-means, visando segmentar a microestrutura da matriz cimentícia de concretos leves com agregados em EVA e fibra de piaçava. A análise tridimensional das imagens microtomográficas retorna ferramentas para caracterizar estas amostras. Os resultados obtidos foram satisfatórios, quando comparados com os ensaios de porosimetria de mercúrio realizados nas amostras.

Palavras-chave: Concretos leves. Segmentação. Microtomografia. Imagens tridimensionais.

ABSTRACT

Construction industry demands sustainable processes and the addition of lightweight aggregates presents as an effective solution to obtain different concrete mixtures by recycling production outputs from other industries, as the Ethylene-Vinyl Acetate (EVA), raw material mostly utilized at footwear industry. Despite all the sustainable appeal in the recycle of EVA or other lightweight aggregates into the concrete mixtures, the loss of resistance is a frequent issue that can be prevented by adding natural fibers, such as piaçava, to the composition. Aiming the usage of these new materials, it is necessary to know their characteristics. In materials science the techniques of non-destructive tests stand out for maintaining the integrity of the material in question promoting savings and sustainability. In this work, X-ray computerized microtomographic images from samples of different lightweight concrete compositions were analyzed. These analyzes were carried out by image processing techniques, such as the Otsu and k-means, aiming to characterize the microstructure of the cementitious matrix of lightweight concrete mixture with EVA and piaçava fiber. The three-dimensional analysis of the microtomographic images offers descriptors that make it possible to characterize these samples. The results were satisfactory when compared with mercury porosimetry tests performed on the samples.

Keywords: Lightweight concretes. Segmentation. Microtomography. Tridimensional images.

¹ Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Universidade Estadual de Santa Cruz.

ORCID: 0000-0002-1244-7374

E-mail: thsoliveira@uesc.br

² Professora Plena do Departamento de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual de Santa Cruz.

ORCID: 0000-0002-4955-6216

³ Professor Pleno do Departamento de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual de Santa Cruz.

ORCID: 0000-0002-6043-3591

1. INTRODUÇÃO

O descarte de resíduos sólidos, principalmente de origem industrial, é uma das consequências do intenso processo de urbanização e do progresso tecnológico das últimas décadas, tornando-se um problema ambiental carente de solução adequada (Iglesias et al., 2018). Assim, a indústria da construção planeja a reutilização de diferentes dejetos industriais como uma alternativa para reduzir o impacto ambiental tanto na construção civil quanto na produção industrial (LOPES; RUDNICK; MARTINS, 2018; STRECKER; SILVA; PANZERA, 2014).

Logo, substituir agregados pode ajudar a obter concretos leves, cuja massa específica não ultrapassa 2000 kg/m³ (ABNT, 2015a), ajudando a reduzir o peso próprio das estruturas, enquanto utiliza materiais que seriam, por exemplo, descartados na natureza. Um dos resíduos que podem ser utilizados nestes concretos é o EVA, material proveniente da indústria calçadista, que traz características de resiliência ao concreto (KUNZLER *et al.*, 2017).

Entretanto, agregados leves podem reduzir a resistência do concreto a tensões de compressão. A recuperação da resistência é possível com a inclusão de fibras que agem como pontes de tensão para evitar a propagação de fissuras, além de melhorar a resistência ao impacto e à fadiga, e tenacidade (OLIVEIRA; GOUVEIA; TEIXEIRA, 2014). Entre estas fibras temos as de piaçava, uma espécie de palmeira, nativa da região sul da Bahia.

A necessidade de estudar a estrutura interna para compreender seu comportamento e entender o verdadeiro potencial desses materiais nos levam a priorizar os ensaios não-destrutivos, que mantêm a estrutura do material ensaiado, evitando perdas de materiais e descartes desnecessários. Entre estes, destaca-se a microtomografia computadorizada de raios-X (micro-CT ou μ CT), através da qual é possível analisar a microestrutura e obter informações quantitativas e qualitativas da amostra.

Segundo Du Plessis e Boshoff (2019), uma das principais aplicações da micro-CT envolve a capacidade de identificar diferentes componentes na imagem, porém esse processo requer uma segmentação para separar os materiais e identificá-los. Segmentar consiste em dividir a imagem em diferentes regiões, que serão analisadas posteriormente por algoritmos especializados em busca de informações (Albuquerque & Albuquerque, 2000).

De acordo com Gonzales e Woods (2010), quando as distribuições de intensidade dos pixels de fundo e de objeto de uma imagem são suficientemente diferentes é possível definir o limiar, de forma empírica, ou manual, através da análise do histograma. Entretanto, na maioria das aplicações existe uma variabilidade geralmente suficiente entre as imagens que, mesmo sendo a análise do histograma uma abordagem adequada, um algoritmo capaz de calcular automaticamente o valor do limiar para cada imagem, de forma iterativa, se faz necessário.

A limiarização, ou thresholding, é uma técnica de segmentação que utiliza um ou mais valores de limiares de níveis cinza para separar a imagem em dois ou mais grupos, separando os pixels que representam os objetos da frente e do fundo da imagem (GONZALEZ; WOODS, 2010). Entre as técnicas de limiarização automatizadas, destacam-se, por exemplo, os métodos K-means (JAIN, 2010), de Otsu (OTSU, 1979) e o Fuzzy C-means (BEZDEK, 1981).

Ainda, Xu *et al.* (2011) obtiveram sucesso com uma modificação no método de Otsu, combatendo a tendência, que foi observada, do limiar à classe que possui maior variância intraclasse, através de um novo limiar, necessariamente menor do que aquele estabelecido pelo método de Otsu original. Para essa técnica, foi dada o nome de “range-constrained Otsu method” (Método de Otsu com restrição de alcance).

Neste trabalho, os métodos citados foram utilizados para limiarizar as imagens de μ CT, a fim de obter a melhor separação entre a pasta de cimento, que fora considerada como fundo, e os poros, agregados leves de EVA, fibras piaçava e o agregado graúdo (brita), os quais foram considerados como objetos de estudo. Ainda, foi possível obter resultados de porosidade aparente para cada uma das amostras. Tais resultados foram comparados com os ensaios de porosimetria de mercúrio realizados nas mesmas.

Assim, o presente trabalho utiliza técnicas de processamento de imagens tridimensionais, para segmentar imagens de micro-CT de concretos leves reforçados com fibras, calculando o volume total de objetos dentro das amostras para então serem extraídos os valores de porosidade aparente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizadas oito amostras de concretos contendo diferentes combinações de EVA e fibras de piaçava, além de uma amostra de concreto comum para

ser utilizado como referência. Para a confecção destes corpos de prova, Dias (2017) utilizou cimento Portland CP II e 40 RS, água, areia fina como agregado miúdo, britas 0 e 1 como agregados graúdos, superplastificante, EVA moído e fibras de piaçava. Os grãos de EVA utilizados foram divididos em duas categorias em relação ao seu diâmetro: os grãos com diâmetros entre 2,36 mm e 1,18 mm foram classificados como EVA grosso (EG) e, os grãos com diâmetros menores que 850 µm foram classificados como EVA fino (EF). A medida escolhida para as fibras de piaçava foi de, aproximadamente, 2 cm, que corresponde à dimensão máxima característica do agregado graúdo

O EVA e as fibras de piaçava foram incorporados ao traço do concreto por substituição do volume de agregado graúdo. O concreto sem adição de fibra e/ou grãos de EVA foi denominado concreto de referência (CR). As amostras com EVA fino receberam a abreviação EF e aquelas com EVA grosso foram denominadas EG, ambas seguidas do percentual adicionado. Os corpos de prova que ainda sofreram adição de 1% de Fibras receberam este valor à frente do nome. Por exemplo, a amostra com 25% de EVA fino e 1% de fibras foi chamada de “1EF25”, enquanto a amostra com 15% de EVA grosso foi chamada de “EG15”.

As imagens microtomográficas foram obtidas usando um microtomógrafo SkyScan® 1173, versão 1.6, do Laboratório de Instrumentação Nuclear da COPPE – RJ. Para que fosse possível ajustar os espécimes ao tomógrafo, foi necessário extrair dos corpos de prova um testemunho com 25 mm de diâmetro e 40 mm de altura. As projeções obtidas foram reconstituídas através do software NRecons® versão 1.7.7.0.

Os ensaios geraram, para cada testemunho, em torno de 2100 imagens da sua seção transversal, todas em escala de cinza (8 bits) com 2240x2240 pixels cada uma.

2.1 Segmentação das imagens microtomográficas

As imagens obtidas a partir do ensaio microtomográfico possuem bordas provenientes do processo de captura que não devem ser contabilizadas no cálculo do volume. Por esse motivo, em cada fatia bidimensional, foi utilizado um algoritmo de crescimento de regiões que percorre a imagem em todas as direções e identifica regiões buscando mudanças bruscas nos valores de intensidade entre dois pixels até que uma máscara é formada com o tamanho exato da área da amostra. Para reduzir as falhas advindas das irregularidades

das imagens, este procedimento foi finalizado com uma operação morfológica de fechamento.

Para o processo de segmentação, a região de interesse (ROI) da imagem deve ser definida a fim de separar a pasta de cimento dos elementos contidos no seu interior, sejam eles poros, EVA fino ou grosso, fibras de piaçava e agregados graúdos. A técnica escolhida para a segmentação das imagens foi a limiarização (GONZALEZ; WOODS, 2010).

Várias aplicações apresentam a definição do limiar de binarização (threshold) utilizando o histograma da imagem e escolhendo, através de sua análise, o valor que melhor se adequa à sua necessidade (MOREIRA *et al.*, 2012). Porém, este método de definição do limiar está sujeito a uma decisão humana e, portanto, a uma margem de erro maior (DU PLESSIS; BOSHOFF, 2019).

De forma que os objetos das imagens sejam definidos com mais precisão e evitando que um mesmo limiar seja utilizado para toda uma amostra, foram desenvolvidas rotinas de algoritmos conhecidos como Otsu e range-constrained Otsu, automatizando a seleção do limiar ótimo de binarização.

Inicialmente, os poros, grãos de EVA e fibras de piaçava são considerados ROI e as imagens segmentadas de modo que a binarização apresente os valores mais coerentes e possam se aproximar da realidade das amostras.

A limiarização realizada com destaque para poros, EVA e fibras, utilizando o algoritmo original de Otsu (OTSU, 1979), apesar de satisfatória, pode apresentar problemas, pois o limiar pode ser tendencioso para a classe com maior variância intraclasse, neste caso, as regiões mais claras da imagem (XU *et al.*, 2011). Dessa forma, o método acaba por classificar de forma errônea alguns objetos, colocando-os na mesma classe da pasta de cimento e do agregado graúdo.

Nesse cenário, Xu *et al.* (2011) tiveram sucesso em eliminar essa tendência do método de Otsu. Para as amostras de concreto, o método mostrou resultados satisfatórios, separando bem os objetos ao mesmo passo que soluciona o problema ocorrido com o Otsu original. Todo o processo seguinte, no que diz respeito as imagens com destaque para poros, EVA e fibras, foi realizado com as imagens binarizadas através do range-constrained Otsu.

As diferenças entre os métodos ficam evidentes na Fig. 1 que exhibe exemplos de (a) uma imagem original e suas binarizações através dos métodos (b) Otsu e (c) Range-constrained Otsu.

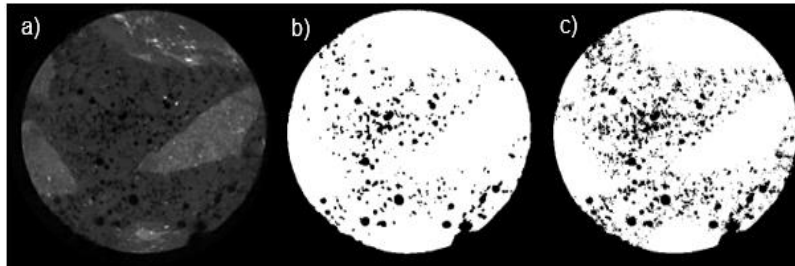


Figura 1. (a) Imagem original de microtomografia da amostra EF25 e imagens da mesma amostra binarizada pelos métodos: OTSU (b) e range-constrained Otsu (c).

Para que seja realizada uma caracterização completa das amostras de concreto, garantindo a confiabilidade do método, é essencial que seja realizada, também, a segmentação do agregado graúdo. Embora o método de Otsu tenha funcionado bem para separar os demais elementos, se fez necessária a utilização de um outro método de segmentação que conseguisse segmentar as pedras, tornando o agregado graúdo a ROI.

O método k-means foi o escolhido por ser um método moderno, que vem sendo utilizado com sucesso em estudos de imagens microtomográficas (GONZALES-BARRON & BUTLER, 2006) e possibilita ajustes de forma a reposicionar os centroides iniciais. Então, uma operação morfológica de abertura utilizando um elemento estruturante de raio 10 é realizada, eliminando pequenos buracos e preenchendo lacunas, ao ponto de se obter uma binarização satisfatória com destaque para os agregados graúdos. O resultado dessa segmentação pode ser visto na Fig. 2 que apresenta uma fatia da amostra de concreto com 15% de EVA fino (EF15).



Figura 2. Imagem da amostra com 15% de EVA fino (EF15) binarizada com destaque para o agregado graúdo.

2.2 Processamento das imagens

Após realizada a segmentação das imagens foi possível então alimentar o algoritmo de processamento tridimensional para calcular o volume percentual de objetos presentes nas amostras. Hounsfield (1973) esclareceu que, ao tentar analisar um corpo de três dimensões através de imagens bidimensionais, pode ocorrer uma grande perda de informações geométricas dos elementos. Por este motivo, uma análise tridimensional possui um grande potencial para definir características não disponíveis em imagens bidimensionais. Informações importantes como volume e esfericidade podem ser essenciais para caracterização do objeto em análise.

Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo serial de duas passagens do tipo Union-Find. O método, inicialmente elaborado em Mendonça (2016), apenas para o estudo de argamassas, foi baseado na implementação de Fricke (2004). O algoritmo foi adaptado pelos autores para atender as demandas do estudo de amostras de concretos, passando a considerar a presença dos agregados graúdos e adaptando as diferenças correspondentes aos mecanismos de hardware e de captura de imagem.

O método trata-se de um algoritmo de duas passagens para imagens bidimensionais que foi adaptado para tratar imagens tridimensionais e retornar os elementos encontrados com suas respectivas características. A função $\text{union}(x,y)$ informa que os segmentos x e y são o mesmo, como as equivalências são transitivas, todos os itens equivalentes a x são também equivalentes a y . A função $\text{find}(y)$ retorna o rótulo que atualmente representa o segmento e dará a mesma resposta da função $\text{find}(x)$, já que ocorreu um $\text{union}(x,y)$.

O algoritmo percorre todos os elementos da matriz tridimensional em uma determinada ordem que não é alterada pela complexidade da imagem, da esquerda para a direita, linha a linha, utilizando as posições anteriores na própria imagem bidimensional e posições apenas da imagem imediatamente anterior à analisada. Assim, esse algoritmo mantém apenas duas imagens binarizadas por vez carregadas na memória e uma imagem parcial em tons de cinza, tornando o consumo de memória mais eficiente, possibilitando a análise de imagens tridimensionais com tamanho superior à sua memória física.

É importante ressaltar que o algoritmo foi definido em função da sua eficiência computacional e gerenciamento de memória, pois, mesmo trabalhando com vizinhança-6,

essa técnica testa apenas 3 vizinhos. Essa leitura gera um ganho de desempenho na análise em relação a outras técnicas, como crescimento de regiões, porém com os mesmos resultados.

Ao percorrer a imagem, para cada voxel ocupado com o valor 1 é atribuído um rótulo temporário e sua vizinhança é analisada. Se o voxel não tem vizinhos com valor diferente de 0, ele recebe um rótulo novo. Se tem um vizinho, é atribuído a ele o rótulo que atualmente representa o segmento vizinho, pois são parte do mesmo objeto.

Se o voxel tiver mais de um vizinho é usado o rótulo de um dos vizinhos, descoberto com a função find() (Fig. 3 (b)) e, caso os vizinhos possuam rótulos diferentes, é necessário garantir a unicidade dos rótulos através da função union(), pois correspondem a um mesmo objeto. Este processo se repete até o último voxel da imagem (Fig. 3 (c)).

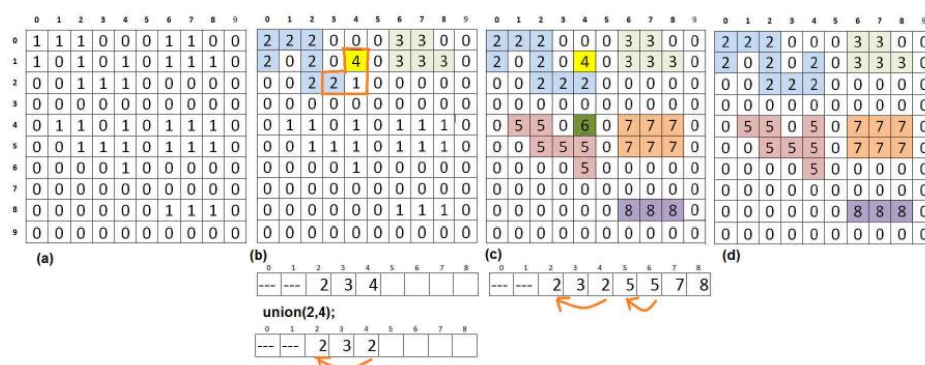


Figura 3. Ilustração bidimensional da rotina tridimensional: (a) imagem binarizada não rotulada, (b) vizinhos com rótulos diferentes são encontrados, (c) fim da primeira passagem e (d) rotulação definitiva realizada na segunda passagem.

Fonte: IGLESIAS *et al.*, 2018.

Por fim, é realizada uma segunda passagem, na qual os rótulos provisórios são substituídos pelos rótulos definitivos (Figura 3 (d)) e são extraídas as características geométricas dos objetos encontrados, incluindo o volume total de objetos em relação ao total da amostra, além das características relacionadas aos tons de cinza, como média e desvios padrão.

Nessa abordagem são mantidas carregadas na memória apenas duas imagens já segmentadas por vez e uma imagem parcial em tons de cinza, tornando o consumo de memória mais eficiente e possibilitando a análise de imagens tridimensionais com tamanho superior à sua memória física. Esta redução na memória é possível uma vez que algoritmos de duas passagens analisam os voxels em uma ordem predeterminada.

Por utilizar imagens bidimensionais duas a duas não é possível que no final da primeira passagem se tenha uma matriz completa com todos os objetos rotulados, mesmo que com rótulos temporários. Portanto, isso faz com que na segunda passagem parte do processo precise ser refeito, inclusive uma nova carga das imagens na memória, impactando diretamente no tempo de processamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O algoritmo de duas passagens, criado para análise tridimensional, foi testado com imagens de prova, nas quais a quantidade de elementos e suas características eram conhecidas, provando sua acurácia. Após os testes, os pacotes de imagens das amostras reais foram analisados pelo algoritmo de duas passagens sendo extraídas as informações utilizadas para identificação dos poros, agregados graúdos e agregados reciclados (EVA e piaçava) presentes nas amostras.

O primeiro parâmetro analisado foi a relação entre a quantidade de elementos presentes nas amostras e os volumes destes objetos. Como as imagens obtidas pela μ CT possuem pixel equivalente a 12.11 μ m e foram utilizados grãos de EVA entre 850 μ m e 1180 μ m, pode-se afirmar que, caso não haja deformação, o volume destes pode variar entre 181138 e 484407 voxels.

Entretanto, no processo de confecção do concreto, os grãos de EVA podem sofrer compressão. Também, existem poros na faixa de volume correspondente àquela encontrada para os grãos de EVA, portanto, o limiar de volume não seria suficiente para identificá-los. Para complementar a classificação, são utilizadas medidas de tons de cinza.

Observando os histogramas das imagens, os agregados (grãos de EVA ou fibras de piaçava) possuem em sua composição uma porcentagem maior de pixels com tons de cinza que variam entre 120 e 180, esse intervalo recebeu o nome de Tons de Interesse (TOI). Desta forma, foi analisada a porcentagem de voxels com TOI dos elementos das amostras e, utilizando o concreto de referência (CR) como parâmetro base, uma rotina que combina o volume dos elementos e o percentual dos seus tons de interesse foi desenvolvida para separar poros e grãos de EVA.

Correlacionando os dados dos volumes das amostras com EVA, foi possível perceber que todas possuíam uma quantidade grande de objetos com volume abaixo de 10 mil voxels que não sofria modificações significativas à medida que o percentual de EVA aumentava.

A partir deste ponto os objetos com volume menor que 25 mil voxels destacavam-se em relação à diferença dos TOI. A amostra de referência possuía significativa quantidade de objetos abaixo de 25% dos TOI, enquanto nas demais amostras os objetos estão acima desse valor. Por este motivo, os objetos que apresentam estas condições são considerados poros e os demais EVA.

À medida que o volume aumenta, o percentual de TOI dos objetos no CR diminui, de forma que objetos de até 50 mil voxels de volume são considerados poros caso possuam TOI menor que 20%. Volumes superiores estabelecem o limiar do TOI em 15%.

Para identificar as fibras de piaçava foi analisado também o que chamamos de tons escuros (TE) que são aqueles tons de cinza abaixo de 10. Voxels com esses tons de cinza indicam áreas onde existe predominantemente ar.

Uma das características das fibras de piaçava é a existência de uma área de baixíssima densidade no centro do objeto. Como a fibra é um elemento natural e com o fato de ser possível encontrar somente um pedaço nas amostras, foi considerado que para o objeto ser considerado fibra ele deve possuir volume acima de 50 mil voxels, porém possuir TOI maior que 15% e TE acima de 15%.

Como o volume máximo dos grãos de EVA é em torno de 485 mil voxels, foi determinado que objetos acima de 500 mil voxels precisam ter apenas TOI acima de 15% para serem considerados fibras. Esta margem foi adotada caso haja algum aumento de volume dos grãos de EVA em decorrência da absorção de água na composição dos corpos de prova.

A rotina de classificação permitiu separar os materiais, contabilizá-los e obter seus volumes em voxels e o percentual destes em relação ao total das amostras.

A Tabela 1 descreve os resultados da leitura tridimensional feita pelo algoritmo em termos de volume percentual de objetos encontrados, utilizando as imagens segmentadas com destaque para o agregado graúdo.

Tabela 1. Percentual de objetos encontrados nas amostras de concreto, segmentadas com destaque para agregado graúdo no algoritmo tridimensional.

Amostra de concreto	CR	EF5	EF15	EF25	EG15	1EF05	1EF15	1EF25	1EG15
Objetos encontrados (%)	37,02	31,31	35,40	36,61	34,61	33,99	40,87	28,65	26,22

Fonte: Autoria própria.

A abordagem tridimensional traz precisão ao modelo, tendo os valores variado entre 26,22% e 40,87%. Os resultados expressam o caráter heterogêneo do concreto ao mesmo passo que se encontram em uma faixa de valores compatível com a estimativa da composição dos corpos de prova, cuja adição de agregado graúdo variou entre 32,80% e 44,16% do volume total do traço.

A Tabela 2 retorna os valores de porosidade encontrados com base na rotina de classificação específica para cada tipo de amostra.

Tabela 2. Percentual de porosidade encontrado nas amostras de concreto, segmentadas com destaque para agregado miúdo no algoritmo tridimensional.

Amostra de concreto	CR	EF5	EF15	EF25	EG15	1EF05	1EF15	1EF25	1EG15
Objetos encontrados (%)	1,28	1,79	1,44	1,89	1,34	1,55	0,87	1,76	2,69

Fonte: Autoria própria.

Os valores de porosidade obtidos reiteram a dificuldade de se trabalhar com as amostras de dimensão reduzida. O corpo de prova de 25mm x 40mm lido no microtomógrafo possui um volume pequeno que pode não representar o conjunto de forma satisfatória. Ainda, Bernardes et al. (2017) indicam que, conforme a posição de onde os testemunhos são retirados, o resultado poderá ser influenciado.

Por outro lado, o valor encontrado para o concreto de referência (CR), que representa o seu índice de porosidade, de 1,28% apresenta uma pequena diferença em relação aos resultados dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, realizado nos corpos de prova originais, o qual apresenta valor de 1,51%, apenas 0,23% acima do ensaio de microtomografia.

A amostra com 1% de fibra e 15% de EVA fino apresentou o menor valor de porosidade (0,87%) entre as amostras estudadas, esse valor coincide a presença do maior percentual de agregado graúdo (40,87%). A presença de um agregado graúdo de maior dimensão pode influenciar diretamente nos valores de porosidade, por não permitir a presença de mais elementos na amostra.

Em caráter comparativo, foram reconhecidos 222217 objetos como poros na amostra 1EF15, o que representou apenas 0,87% do volume total da amostra, enquanto no CR foram identificados 218619 objetos como poros, representando 1,28% do volume total desta amostra. O que significa dizer que apesar da maior quantidade de poros, ela não reflete no percentual em relação ao volume da amostra. Esta relação pode ser explicada por conta

da presença de uma quantidade maior de objetos em combinação com um maior percentual de agregado graúdo, limitando o tamanho dos poros.

Os percentuais de objetos classificados como grãos de EVA nas amostras foram contabilizados e a tabela 3 resume estes resultados. Avaliando os resultados encontrados é possível perceber que à medida que o EVA foi adicionado nas amostras, o percentual encontrado também cresceu. Baseado no volume de composição dos traços das amostras, foi possível estimar o percentual total de grãos de EVA adicionados. Todas as amostras com 15% de EVA, por exemplo, apresentaram uma faixa de valores próxima.

Tabela 3. Percentual de grãos de EVA encontrados nas amostras de concreto, segmentadas com destaque para agregado miúdo no algoritmo tridimensional.

Amostra de concreto	CR	EF5	EF15	EF25	EG15	1EF5	1EF15	1EF25	1EG15
EVA encontrados (%)	0,01	2,09	7,74	11,26	7,78	0,10	6,31	10,63	5,55

Fonte: Autoria própria.

Com base nestes valores nota-se que a extrapolação do traço que deu origem às amostras, possui boa representatividade no que diz respeito ao percentual de grãos de EVA encontrados nos corpos de prova de 25 mm x 40 mm lidos no microtomógrafo, nas amostras com 5% de EVA, por exemplo, estima-se que a adição representa em torno de 2,22% do volume total.

Os resultados encontrados no algoritmo retornaram para as amostras com 15% de EVA fino, sem e com adição de fibras, 7,74% e 6,31%, respectivamente. No traço, estimou-se uma porcentagem de, aproximadamente, 6,59% para estas amostras.

A exceção nesta análise está na amostra 1EF5, que apresentou apenas 0,10% de objetos reconhecidos como grãos de EVA, este valor se refere à apenas 412 objetos. A amostra EF5, por exemplo, retornou 2997 objetos rotulados como EVA, equivalentes a 2,09% do volume total da amostra. Como visto anteriormente, a presença de um agregado graúdo de maior dimensão pode ter afetado os resultados dessa amostra, não permitindo a presença de uma quantidade maior de objetos.

Ainda refletindo os resultados expressos na tabela 3, o concreto de referência retornou 219051 objetos, dos quais 432 foram identificados como grãos de EVA. Isso contabiliza um erro em torno de 0,01% nesta abordagem tridimensional. Apesar de dificultada a conferência, estima-se que o erro das demais amostras giram em torno do mesmo valor.

As amostras contendo fibras também foram contabilizadas pelo algoritmo e esses resultados foram expostos na Tabela 4.

Tabela 4. Percentual de fibras de piaçava encontradas nas amostras de concreto, segmentadas com destaque para agregado miúdo no algoritmo tridimensional.

Amostra de concreto	CR	1EF5	1EF15	1EF25	1EG15
Fibras encontradas (%)	0,0	0,22	0,91	0,79	0,29

Fonte: Autoria própria.

Na estimativa realizada com base no traço das amostras as fibras de piaçava representam 0,98% do volume total dos corpos de prova de 100 mm x 200 mm. Na análise tridimensional esses valores apresentaram uma variação, sendo o menor na amostra 1EF5 com 0,22% e o maior na amostra 1EF15 com 0,91%.

Acredita-se que a amostra 1EF5 apresentou poucos elementos, seja EVA ou fibras, em decorrência da posição da qual o testemunho foi retirado. É possível que, na formação dos corpos de prova, os elementos tenham sofrido algum grau de segregação, na qual o testemunho não tenha conseguido pegar uma amostra significativa dos elementos.

As amostras 1EF15 e 1EF25 aparentam refletir bem os traços das amostras, retornando 0.91% e 0,79% respectivamente. É importante ainda ressaltar o tamanho do elemento fibra de piaçava, definido em 20 mm, quando confrontado com o tamanho da amostra lida no microtomógrafo (25 mm x 40mm) pode não permitir a presença significativa dentro da amostra.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos percentuais encontrados para cada elemento em cada uma das amostras.

Tabela 5. Percentual dos elementos encontrados nas amostras de concreto na abordagem do algoritmo tridimensional.

Amostras	Percentuais dos elementos (%)			
	Poros	EVA	Fibra	Brita
CR	1.28	-	-	37.02
EF5	1.79	2.09	-	31.31
EF15	1.44	7.74	-	35.40
EF25	1.89	11.26	-	36.61
EG15	1.34	7.78	-	34.61
1EF5	1.55	0.10	0.22	33.99
1EF15	0.87	6.31	0.91	40.87
1EF25	1.76	10.63	0.79	28.65
1EG15	2.69	5.55	0.29	26.22

Fonte: Autoria própria.

A análise tridimensional, portanto, nos permite avançar no processo de classificação dos elementos contidos no interior das amostras com adições de agregados reciclados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca constante por processos industriais cada vez mais sustentáveis traz à tona a diversidade de estudo de materiais alternativos. É o que acontece com concretos leves com adição de grãos de EVA, subproduto da indústria calçadista, e reforçados com fibras de piaçava, nativas da região sul da Bahia. A caracterização destes materiais é essencial para a avaliação de sua usabilidade e o ensaio de microtomografia computadorizada de raios-X, quando associado a técnicas de processamento de imagens, se prova ferramenta importante neste processo, por permitir o estudo da estrutura interna e porosidade.

Neste trabalho foram analisados 8 conjuntos de imagens microtomográficas de concretos leves produzidos com incorporação de 5%, 15% e 25% de grãos de EVA com variações na granulometria e podendo ou não ser reforçados com 1% de fibra de piaçava. Além destas, foi analisada também uma amostra de concreto comum que serviu de referência para o estudo das amostras de concretos leves.

A etapa de segmentação representou um avanço importante nos estudos dos ensaios microtomográficos de concretos. Automatizar a binarização permitiu obter resultados mais precisos uma vez que à cada imagem foi designado um limiar próprio, reduzindo a propagação de erro nas etapas seguintes. Uma segmentação eficiente aumenta a confiabilidade do método e garante uma boa leitura nos algoritmos de classificação.

Os resultados encontrados foram comparados com dados obtidos a partir da composição do traço a partir do qual os corpos de prova foram formados, comprovando a relevância do algoritmo e a eficácia da rotina. Uma avaliação dos falsos positivos de EVA no concreto de referência (0,01%) permitiu afirmar que a metodologia de classificação adotada é satisfatória e com nível de erro baixo.

As amostras contendo apenas grãos de EVA apresentaram melhores resultados por possuírem uma menor quantidade de material no interior da matriz cimentícia e uma variação maior nos tons de interesse, permitindo uma separação mais eficiente.

A metodologia utilizada na realização deste trabalho foi baseada em outras metodologias aplicadas para análise tridimensional de concretos e argamassas leves produzidos com incorporação de grãos de EVA e reforçadas com fibras piaçava, o que permitiu observar as diferenças de comportamento e, principalmente, a influência da

presença do agregado graúdo, realizando com segurança análises quantitativas nas amostras e uma análise qualitativa do ensaio como um todo.

Considerando estes resultados, é possível concluir que o aumento da precisão na segmentação, proveniente da automatização do processo, é um dos principais fatores para garantir o sucesso e a viabilidade do processo de análise de imagens microtomográficas tridimensionais como ferramenta no estudo de concretos leves com o ajuste adequado da rotina de classificação, se provando mais precisa que a análise bidimensional.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: Abnt, 2015a.

ALBUQUERQUE, Márcio Portes de; ALBUQUERQUE, Marcelo Portes de. Processamento de Imagens: métodos e análises. **Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas**, 2000. Disponível em: <http://www.cbpf.br/cat/pdsi/pdf/ProcessamentoImagens.PDF>. Acesso em: 18 out. 2021.

BERNARDES, E. E.; MAGALHÃES, A. G. de; VASCONCELOS, W. L.; CARRASCO, E. V. M.; NUNES, E. H. M.; LIMA, L. B. de. Characterization of test specimens produced in reduced size for X-ray microtomography (μ -CT) tests. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 5, p. 1025-1041, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/9gysRbnXdxnJ8krgNPKwyyR/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 11 out. 2021.

BEZDEK, James C. Objective Function Clustering. In: BEZDEK, James C.. **Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms**. Boston: Springer, 1981. p. 43-93.

DIAS, Leonardo Alves. **Concreto incorporado com EVA e fibras de piaçava**: uma alternativa sustentável na construção civil. 2017. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência, Inovação e Modelagem em Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência, Inovação e Modelagem em Materiais, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2017.

DU PLESSIS, Anton; BOSHOFF, William P. A review of X-ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials. **Construction And Building Materials**, v. 199, p. 637-651, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818330307>. Acesso em: 13 out. 2021.

FRICKE, Tobin. **The Hoshen-Kopelman Algorithm**. 2004. Disponível em: <https://www.ocf.berkeley.edu/~fricke/projects/hoshenkopelman/hoshenkopelman.html>. Acesso em: 1 nov. 2021.

GONZALES-BARRON, Ursula; BUTLER, Francis. A comparison of seven thresholding techniques with the k-means clustering algorithm for measurement of bread-crumbs features by digital image analysis. **Journal Of Food Engineering**, v. 74, n. 2, p. 268-278, 2006.

GONZALES, Rafael C.; WOODS, Richard. **Processamento de imagens**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

HOUNSFIELD, Godfrey N. Computerized transverse axial scanning (tomography): part 1. description of system. **The British Journal Of Radiology**, v. 46, n. 552, p. 1016-1022, 1973.

IGLESIAS, Susana Marrero; MENDONÇA, Rodrigo Silva; ORELLANA, Esbel Tomás Valero; DOMINGUEZ, Dany Sanchez. New approaches of three-dimensional image processing applied to the study of lightweight mortars with EVA aggregates and piassava fibres. **International Journal Of Applied Pattern Recognition**, v. 5, n. 4, p. 305-329, 2018. Disponível em: <http://www.inderscience.com/offer.php?id=97106>. Acesso em: 1 nov. 2021.

JAIN, Anil K. Data clustering: 50 years beyond k-means. **Pattern Recognition Letters**, v. 31, n. 8, p. 651-666, 2010.

KUNZLER, Lara; VIER, Lucas Carvalho; BUENO, Bruna; HUPPES, Fábio Augusto Henkes; SILVA, Joice Moura da. Utilização de EVA na fabricação de concreto. **Revista GEDECON - Gestão e Desenvolvimento em Contexto**, v. 5, n. 1, p. 62-65, 2017. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/323244269.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2021.

LOPES, João Pedro; RUDNICK, Thainá; MARTINS, Carlos Humberto. Utilização de resíduos industriais para produção de concreto sustentável. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 2, p. 216-228, 2018. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/49261/pdf>. Acesso em: 23 set. 2021.

MOREIRA, Anderson C.; APPOLONI, Carlos R.; MANTOVANI, Iara F.; FERNANDES, Jaquiel S.; MARQUES, Leonardo C.; NAGATA, Rodrigo; FERNANDES, Celso P. Effects of manual threshold setting on image analysis results of a sandstone sample structural characterization by X-ray microtomography. **Applied Radiation And Isotopes**, v. 70, n. 6, p. 937-941, 2012.

MENDONÇA, Rodrigo Silva. **Caracterização de argamassas leves usando processamento tridimensional de imagens e processamento paralelo**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Curso de Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2016.

OLIVEIRA, Carlos Augusto de Souza; GOUVEIA, Leonardo Lúcio de Araújo; TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez. CONCRETO ESTRUTURAL COM ADIÇÃO DE FIBRAS VEGETAIS. **Construindo**, v. 6, n. 2, p. 14-19, 2014. Disponível em: <http://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/2762/1590>. Acesso em: 18 set. 2021.

OTSU, Nobuyuki. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. **IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics**, v. 9, n. 1, p. 62-66, 1979. Disponível

em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4310076>. Acesso em: 10 out. 2021.

STRECKER, K.; SILVA, C. A.; PANZERA, T. H. Fabricação e caracterização de compósitos a base de cimento com incorporação de poliestireno expandido (isopor). **Cerâmica**, v. 60, n. 354, p. 310-315, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/Z47gnFxyQym5M8FgY7wZ6q/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 out. 2021.

XU, Xiangyang; XU, Shengzhou; JIN, Lianghai; SONG, Enmin. Characteristic analysis of Otsu threshold and its applications. **Pattern Recognition Letters**, v. 32, n. 7, p. 956-961, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167865511000365>. Acesso em: 6 nov. 2021.