

## PROCESSAMENTO DE IMAGENS MICROTOMOGRÁFICAS DE ALTA RESOLUÇÃO NA CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS DE ARGAMASSA LEVE

**Dany S. Dominguez<sup>1,2\*</sup>, Helder C. Almeida<sup>1</sup>, Susana M. Iglesias<sup>2</sup>, Ricardo T. Lopes<sup>3</sup> e Haimon D. L. Alves<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Programa de Pós-graduação em Ciência, Inovação e Modelagem em Materiais, Universidade do Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 45662-900, BA, Brasil*

<sup>2</sup>*Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia, Universidade do Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 45662-900, BA, Brasil*

<sup>3</sup>*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Programa de Engenharia Nuclear. Bloco I-133 - Centro de Tecnologia, Rio de Janeiro, Caixa Postal 68509, RJ, Brasil*

**Palavras Chave:** Microtomografia, Caracterização de materiais, Processamento de imagens, Concreto leve.

**Resumo.** A indústria da construção civil destaca-se pela facilidade em absorver resíduos de outros processos industriais, o que contribui significativamente a diminuir o impacto ambiental do desenvolvimento urbanístico. Neste sentido, a utilização de concretos leves que incorporem grãos de EVA (Etileno-Acetato de Vinila) e fibras de piaçava alinha-se com os princípios de desenvolvimento sustentável. Uma alternativa para caracterizar estes novos materiais via ensaios não-destrutivos é a microtomografia de raios X com técnicas de processamento de imagens. O uso de microtomografia de baixa resolução e o cálculo de parâmetros geométricos (bidimensionais e tridimensionais) dos agregados foi abordado em trabalhos anteriores. Neste artigo apresentamos a caracterização de amostras de concreto leve através de imagens microtomograficas e análises de histograma. Os resultados mostram que utilizando esta técnica é possível identificar agregados (EVA ou piaçava) presentes nas amostras de concreto leve, assim como os poros e fissuras possibilitando a caracterização das propriedades mecânicas do material usando métodos não-destrutivos.

---

Endereços de e-mail: [dldominguez@gmail.com](mailto:dldominguez@gmail.com)\*, [helder.uesc@gmail.com](mailto:helder.uesc@gmail.com), [smiglesias@uesc.br](mailto:smiglesias@uesc.br), [ricardo@lin.ufjf.br](mailto:ricardo@lin.ufjf.br), [haimon.dlafis@gmail.com](mailto:haimon.dlafis@gmail.com).

## 1 INTRODUÇÃO

O aproveitamento de resíduos industriais é uma das principais opções para diminuir o impacto ambiental e implementar o desenvolvimento sustentável nas próximas décadas. A construção civil apresenta um grande potencial para acolher estes resíduos ao incorporá-los em suas argamassas e concretos para diversos fins. Neste trabalho propomos a incorporação de resíduos da indústria calçadista, especificamente, o Etileno-Acetato de Vinila (EVA) na elaboração de concretos leves que podem ser utilizados com fins não estruturais na construção. Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria do Plástico [1], a produção de plásticos no Brasil em 2012 foi de 6 milhões de toneladas, deste total 2 % esteve relacionado ao consumo de EVA, e se considerarmos que deste consumo aproximadamente 18 % é descartado [17], o descarte de EVA em 2013 no Brasil foi de 21.600 toneladas, valor que tem-se incrementado continuamente pelo crescimento da indústria calçadista.

O concreto leve é um material compósito importante na construção civil. Surgiu como uma proposta de material para atender exigências específicas de algumas obras como redução de custos e melhoria na relação resistência/peso de uma construção. Os principais objetivos do uso do concreto leve são o aprimoramento da relação resistência/peso na construção de edifícios altos, assim como o melhoramento do isolamento térmico e acústico de edificações, isto, sem aumentar a espessura das camadas de concreto [8]. Estas características permitem a redução do peso próprio e das cargas na fundação, o que viabiliza a construção em solos com menor capacidade de suporte.

Diversos autores propõem a utilização de EVA em diferentes componentes construtivos [7, 9, 11], entretanto, é conhecido que a adição de agregados leves ao concreto diminui suas propriedades mecânicas, nestes casos é comum reforçar estes materiais utilizando fibras naturais [6, 12]. Para fins de reforço, o concreto leve estudado incorpora fibras de piaçava, o que produz um aumento na resistência do material [14]. Em presença de um novo material é importante determinar o tamanho e distribuição e volumes de agregados e poros visando determinar a adequação deste material para seu uso construção civil [4].

O material proposto, concreto leve tendo como agregados grão de EVA e fibras de piaçava, tem sido caracterizado utilizando diversas técnicas: ensaios mecânicos de tração e compressão [13], microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC) de baixa resolução e processamento bidimensional [15] e tridimensional de imagens [4]. Entretanto, o processamento bidimensional de seções transversais do corpo de prova e a análises de parâmetros geométricos, em alguns casos, não pode diferenciar as fibras dos grãos de EVA, ou entre grãos de EVA e poros [15]. Por este motivo, tentou-se caracterizar o novo material utilizando processamento tridimensional de imagens e um algoritmo de crescimento de regiões, este enfoque enfrentou problemas de significância estatística e alto custo computacional [16, 4]. Os problemas com imagens de baixa resolução e análises geométrica motivaram o uso de imagens de alta resolução e a inclusão de técnicas de processamento de imagens que não envolvam parâmetros geométricos.

Neste artigo, propomos trabalhar com amostras de dimensões maiores e um microtomógrafo mais potente, o que permitirá gerar imagens de maior resolução, estas imagens serão analisadas utilizando técnicas de processamento do histograma, visando identificar os poros, grãos de EVA e fibras de piaçava presentes nas amostras. Na próxima seção detalhamos o material utilizado e detalhamos a confecção das amostras. Na seção 3 oferecemos alguns comentários sobre ensaios microtomográficos e análises de histograma. Na seção 4, apresentamos e discutimos os resultados deste trabalho. Por último, na seção 5 abordamos as conclusões do trabalho e sugestões para os trabalhos futuros.

## 2 AMOSTRAS DE CONCRETO

Para a caracterização das amostras de concreto leve, utilizando EVA como agregado e reforçadas com fibras de piaçava, foram considerados três tipos de mistura na fabricação dos corpos de prova:

- Mistura I: argamassa pura, contendo apenas água, cimento e areia
- Mistura II: argamassa com EVA, contendo água, cimento, areia e grãos de EVA
- Mistura III: argamassa com EVA e fibras, contendo água, cimento, areia, grão de EVA e fibras de piaçava

A proporção de agregado leve de EVA e as fibras de piaçava adicionadas nas misturas foi pré-determinada em 1 % da massa de areia, cimento e água. Das três misturas propostas a II e III correspondem à argamassas leves. O cimento utilizado foi o Portland tipo CP II – E 30, a areia natural foi coletada em obras cíveis da região e submetida a um processo de secagem em estufa, para ter as condições ideais de umidade. As placas de EVA obtidas como resíduos da indústria calçadista foram submetidas a um moinho de facas, e os grãos resultantes peneirados. Foram escolhidos os grãos entre 850 e 1180  $\mu\text{m}$  (16 e 20 *mesh*) para a preparação dos corpos de prova. Por último as fibras de piaçava foram separadas, limpas e cortadas manualmente em pedaços de 10 mm de longitude.

Com estes materiais foram preparadas as misturas e moldados corpos de prova prismáticos de 160 mm de comprimento e base quadrada de 40 mm de lado. Após 24 horas da moldagem foi feita a desforma dos corpos de prova, e submetidos à cura úmida por 28 dias. O processo de elaboração dos corpos de prova acompanhou os procedimentos recomendados na norma brasileira para fabricação e cura de corpos de prova de concreto NBR 5738 [2].

Os corpos de prova fabricados tinham dimensões que não permitiam seu uso diretamente em ensaios de microtomografia. As dimensões da amostra a ser ensaiada no microtomógrafo dependeram da potencia do aparelho e da densidade do material. Para atender as limitações físicas do microtomógrafo disponível, foi necessário cortar os corpos de prova usando uma serra de concreto, e obter amostras de 40 mm de altura e base quadrada de 25 mm. Uma representação do esquema de corte utilizado na obtenção das amostras é oferecida na Figura 1.

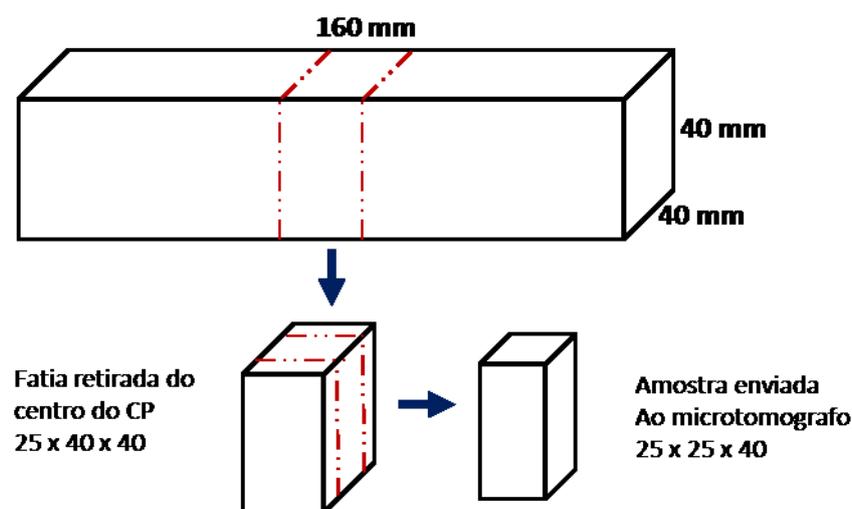


Figura 1: Esquema de corte efetuado nos corpos de prova para obter as amostras submetidas a microtomografia

Na geração das amostras foi escolhida uma fatia central para termos uma maior homogeneidade em relação a todo o corpo de prova e facilitar as tarefas de corte. Por outro lado, a relação entre as dimensões da amostra e as dimensões dos agregados presentes (EVA ou fibras de piaçava) garante uma boa significância estatística, uma vez que podemos encontrar um número elevado destes elementos no interior das amostras.

### 3 IMAGENS MICROTOMOGRAFICAS

A  $\mu$ TC tem suas raízes na Tomografia Computadorizada, a qual tem sido utilizada para imagens médicas por mais de 40 anos [5]. Por ser um procedimento não invasivo, com um alto poder de resolução (da ordem de microns) a  $\mu$ TC é um avanço das técnicas de inspeção por Raios X. Esta técnica é baseada no poder de absorção de Raios X em determinados materiais, dependendo de suas densidades e números atômicos [5, 10]. O funcionamento de um ensaio de  $\mu$ TC consiste, basicamente, em um feixe de raios X incidindo sobre uma amostra, coletando-se posteriormente a esta exposição, os valores de radiação absorvidos pelo material. A amostra é revolucionada na frente do feixe gerando um conjunto de imagens bidimensionais chamadas de projeções. Estas projeções são armazenadas no computador e processadas por um algoritmo de reconstrução [3] gerando um conjunto de imagens bidimensionais que representam as seções transversais da amostra. O empilhamento das imagens das seções transversais produz uma imagem tridimensional da estrutura interna do objeto.

As amostras de concreto obtidas pelo corte dos respectivos corpos de prova, conforme descrito na seção anterior, foram submetidas aos ensaios de microtomografia. Para cada tipo de mistura foram ensaiadas duas amostras, totalizando seis amostras. Foi utilizado o microtomografo Skyscan 1173, com os parâmetros de 130 kV e 1 mA, para voltagem e corrente respectivamente. Neste microtomografo uma projeção da amostra é gerada a cada  $0,5^\circ$ , totalizando 720 projeções. Após a reconstrução, são obtidas 1800 fatias ou imagens de seções transversais da amostra, cada uma destas fatias com dimensão de 1148 x 1148 pixels. O objetivo deste trabalho é caracterizar a presença de poros, grãos de EVA e fibras nas amostras sem utilizar parâmetros geométricos, como áreas, volume e excentricidade. A caracterização geométrica, apresentada em [4, 15], tem alto custo computacional, sendo inviável para imagens de alta resolução e amostras grandes, como as utilizadas neste trabalho. Ilustramos as diferenças entre as imagens microtomograficas de baixa resolução (trabalhos anteriores) e de alta resolução na Figura 2. Ao compararmos as imagens (a) baixa resolução e (b) alta resolução, observa-se que nas imagens de alta resolução temos uma maior definição em cores, existindo tons de cinza diferentes para a argamassa, os poros, os grãos de EVA e as fibras. Este fato sugere, que a análise de histogramas pode ser utilizada para identificar a presença de poros e agregados nas amostras.

A metodologia de processamento de imagens utilizada neste trabalho pode ser dividida em duas etapas: (i) pré-processamento e (ii) análise de histograma. Na etapa de pré-processamento dedicada a seleção da região de interesse (ROI, *Region of Interest*), é feita a rotação, corte das bordas externas das imagens e geração das imagens tridimensionais mediante o empilhamento das fatias bidimensionais. Na etapa de análise, os histogramas para cada tipo de mistura são construídos e analisados. Os resultados do processamento das imagens microtomograficas são oferecidos na próxima seção.

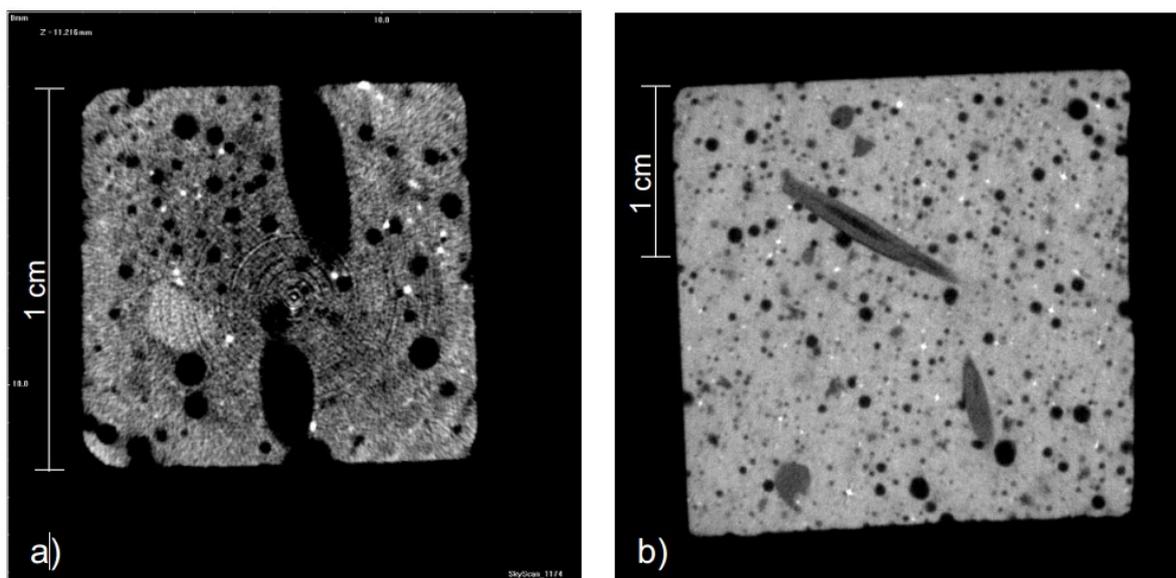


Figura 2: Imagens microtomograficas de amostras de concreto com EVA como agregado leve e piaçava como material de reforço. (a) Imagem de baixa resolução, amostra de 10 x 10 x 20, equipamento Skyscan 1174. (b) Imagem de alta resolução, amostra de 25 x 25 x 40, equipamento Skyscan 1173

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para os três tipos de mistura considerados neste trabalho; argamassa pura (I), argamassa com EVA (II) e argamassa com EVA e fibras (III), foram construídos os respectivos histogramas. Os histogramas para cada tipo de amostra, que incluem as duas imagens tridimensionais de cada amostra, tendo cada imagem tridimensional as dimensões de 1148 x 1148 x 1800 *voxels*, são oferecidos na Figura 3.

Analisando a Figura 3 é possível identificar uma alta concentração de *voxels* entre os tons 150 e 180 em todos os tipos de amostras. Pela grande concentração e por estar presente em todas as imagens, pode-se afirmar que estes tons correspondem aos valores característicos da argamassa. No histograma das amostras com argamassa e EVA (Figura 3b) foi possível identificar uma pequena concentração de *voxels* na faixa entre 80 e 95, comportamento que não ocorre nas amostras de argamassa pura. Sendo assim, pode-se afirmar que há diferenças, porem discretas, entre as cores de poros e EVA. Entretanto, no histograma das amostras com EVA e fibra de piaçava (Figura 3c) pode-se verificar uma concentração acentuada de *voxels* nos tons entre 50 e 100, o que difere dos elementos encontrados nos outros histogramas.

Para se afirmar, com acurácia, que esta concentração dos tons de cinza nas amostras com EVA e fibra, é causada pela presença destes elementos internos, é necessário levar em consideração o volume dos objetos de cada tipo (poros, EVA ou fibras) presente nas imagens. Logo, é recomendável calcular pesos para os tons de cinza encontrados de acordo com a quantidade encontrada de cada um, em relação ao total de *voxels* das imagens. Para isso a paleta foi dividida em 24 faixas de tons de cinza, e calculada a porcentagem de *voxels* presentes em cada uma dessas faixas, em seguida, foi traçado o gráfico comparativo das concentrações entre todos os tipos de amostras, este gráfico aparece na Figura 4.

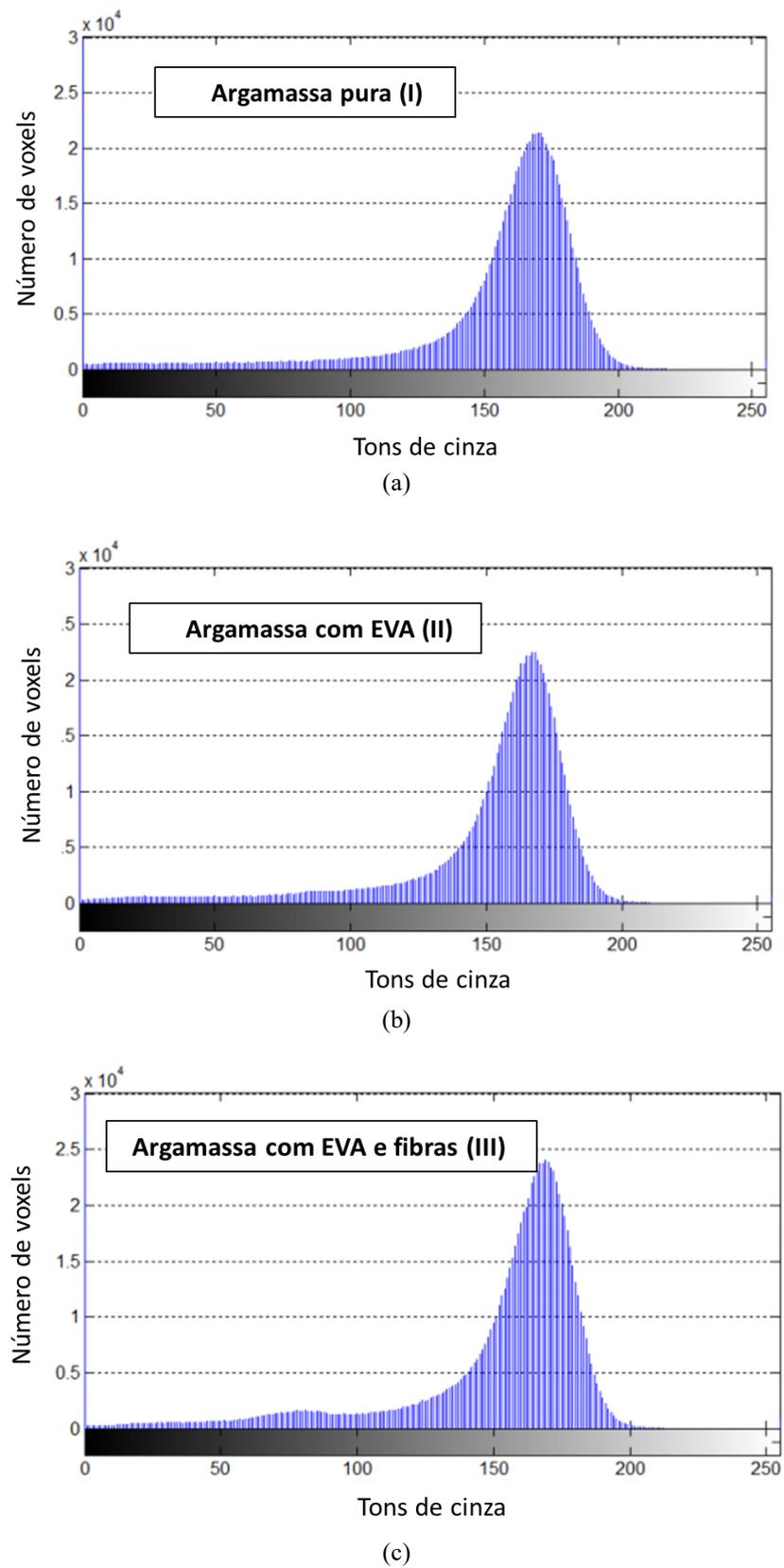


Figura 3: Histogramas para cada tipo de mistura; (a) Argamassa pura, (b) Argamassa com EVA, e (c) Argamassa com EVA e fibras

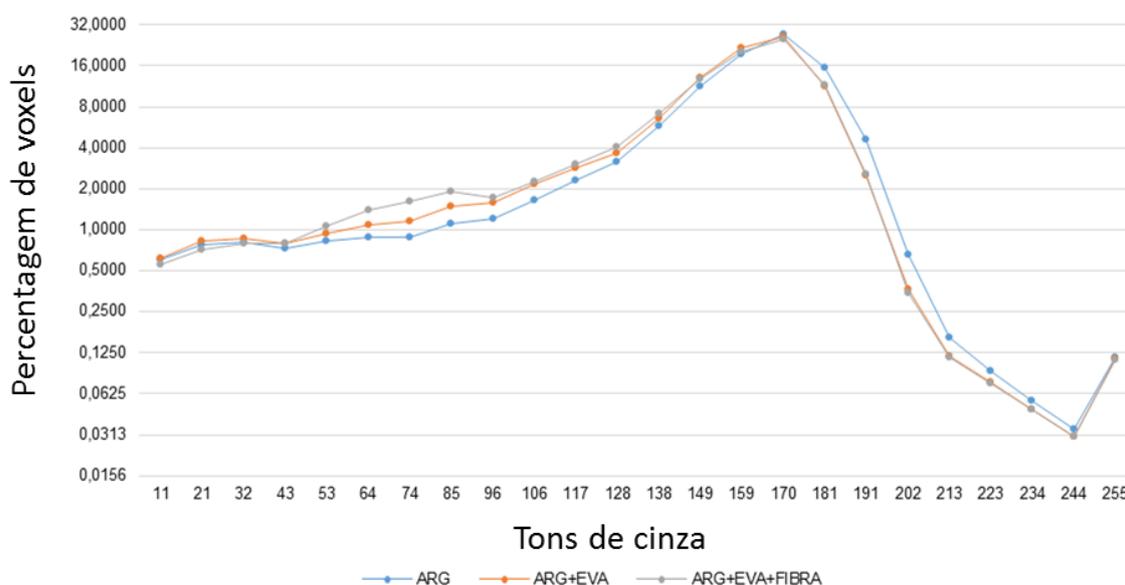


Figura 4: Gráfico comparativo de porcentagens de *voxels*, para diferentes faixas de tons de cinza para os três tipos de mistura

Ao analisar o gráfico representado pela Figura 4 pode-se verificar curvas diferentes para cada tipo de amostras. Em todas as amostras pode-se verificar concentrações semelhantes nos níveis de cinza entre 0 e 50, e entre 210 e 255. Em contrapartida, entre os tons 50 e 210 todas as amostras tiveram concentrações diferentes. Pode-se verificar que a amostra com argamassa pura possui maior concentração que as demais nos níveis de cinza maiores que 170, em compensação possui menor concentração que todas as outras duas nos níveis abaixo de 150. Logicamente, devido a maior quantidade de argamassa (cores entre 150 e 180) e menor peso dos vazios (cores menor que 150).

Nas amostras com argamassa e EVA, e com argamassa, EVA e fibra de piaçava, o comportamento das curvas é semelhante. Há concentração de tons de cinza a partir de 50, mas pode-se observar que nas amostras com argamassa, EVA e fibra, entre os tons 50 e 100 há uma maior concentração que nas demais, caracterizando a existência de fibras. Nas amostras com argamassa e EVA apenas, também houve concentração de *voxels* entre os tons de 50 e 100, mas em um nível abaixo dos encontrados nas amostras com EVA e fibra e acima dos encontrados nas amostras apenas com argamassa. Logo, este incremento corresponde ao EVA encontrado nas amostras. Por fim, pode-se afirmar que os agregados EVA e as fibras possuem os mesmos tons de cinza, entre 50 e 100, mas em concentrações diferentes para cada amostra.

Em resumo podemos afirmar que a argamassa pode ser identificada pelos tons de cinza na faixa de 150 a 180, e os agregados EVA ou piaçava pelos tons na faixa de 50 a 100, claramente os *voxels* pretos tons abaixo de 20 correspondem aos poros.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho propomos a caracterização de amostras de concreto leve utilizando imagens microtomográficas de alta resolução e processamento de imagens. Especificamente foi utilizado EVA como agregado leve e fibras de piaçava como material de reforço. O custo computacional do processamento de imagens microtomográficas tridimensionais de alta resolução, limita o uso da análise morfológica baseada em parâmetros geométricos. Por este motivo, propomos a utilização de análise de histograma.

Para executar as análises foram fabricados corpos de prova para três diferentes tipos de mistura: argamassa pura, argamassa com EVA, e argamassa com EVA e fibras. A partir destes corpos foram extraídas amostras de 25 x 25 x 40 mm que foram submetidas a ensaios de microtomografia, gerando imagens tridimensionais do interior das amostras em escala de cinzas. Estas imagens foram processadas em duas etapas: a primeira dedicada à seleção do ROI e a segunda à construção e análise dos histogramas por tipo de mistura.

As análises realizadas permitiram identificar os agregados presentes nas amostras, e obter as faixas de tons de cinza características à argamassa e aos agregados. Não foi possível identificar faixas características que permitam separar os agregados entre se, ou seja distinguir entre EVA e piaçava. Podemos concluir que à análise de histograma é uma ferramenta útil na identificação dos agregados presentes nas misturas quando temos imagens microtomográficas de alta resolução.

A partir destes resultados, o próximo objetivo da pesquisa será ampliar os estudos para amostras com diferentes volumes de agregados, estudando a correlação entre o volume de agregados e as características das imagens considerando as porcentagens de tons de cinza na faixa característica, permitindo associar finalmente estes as propriedades mecânicas do material. Adicionalmente, esta técnica de caracterização pode ser ampliada para outros tipos de fibras vegetais como sisal e coco, com objetivo de estudar a distribuição destas na matriz de concreto. Por outro lado, a caracterização do material pode ser complementada com outras técnicas não-geométricas como a análise de Fourier.

### ***Agradecimentos***

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) e a Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC) pelo suporte financeiro oferecido para o desenvolvimento deste trabalho.

### **REFERÊNCIAS**

- [1] Associação Brasileira da Indústria do Plástico – ABIPLAST. *Perfil 2013 da Indústria Brasileira da Transformação de Material Plástico*, 2014. Disponível em <[http://file.abiplast.org.br/download/links/links2014/perfil2013\\_abiplast\\_final\\_web.pdf](http://file.abiplast.org.br/download/links/links2014/perfil2013_abiplast_final_web.pdf)>. Acesso em janeiro de 2017.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 5738: *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de amostras*, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- [3] J. S. Dominguez, L. F. Oliveira, N. Alves Junior, e J. T. de Assis. Using Graphics Processing Units to Parallelize the FDK Algorithm for Tomographic Image Reconstruction. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 6:760-768, 2012.
- [4] S. M. Iglesias, H. C. Almeida, D. S. Dominguez, e J. F. L. Santos. Three-Dimensional Image Processing Applied to the Characterization of Lightweight Mortar Reinforced with Piassaba Fibers. *Em: 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI)*, 4191:4197, Barcelona, 2014.
- [5] E. N. Landis, e D. T. Keane. X-ray microtomography. *Materials Characterization*, 61:1305-1316, 2010.
- [6] P. R. L. Lima, R. J. Santos, S. R. Ferreira, R. D. Toledo Filho. Characterization and treatment of sisal fiber residues for cement-based composite application. *Engenharia Agrícola*, 34: 812-825, 2014.

- [7] P. R. L. Lima, M. B. Leite, e E. D. Q. Santiago. Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW. *Waste Management (Elmsford)*, 30:1107-1113, 2010.
- [8] P. K. Mehta. e P. J. M. Monteiro. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo: PINI, 1994.
- [9] A. B. Melo, M. R. F. Lima Filho. Avaliação de desempenho estrutural de protótipo com paredes construídas com blocos EVA. *Ambiente Construído*, 9:141–155, 2009.
- [10] R. Moreno-Atanasio, R. A. Williams, e X. Jia, X. Combining X-ray microtomography with computer simulation for analysis of granular and porous materials. *Particuology* 8: 81–99, 2010.
- [11] E. D. Q. Santiago, P. R. L. Lima, M. B. Leite e R. D. Toledo Filho. Mechanical behavior of recycled lightweight concrete using EVA waste and CDW under moderate temperature. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 2:211–221, 2009.
- [12] H. Savastano Jr., S.F. Santos, M. Radonjic, W.O. Soboyejo. Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 31:232–243, 2009.
- [13] R. M. Silva, R.C. Alvim, D.S. Dominguez. Study of mechanical strength of a cementitious composite reinforced with piassava fibers, *E.T.C. Educação, Tecnologia e Cultura*, 8:29-39, 2011.
- [14] R. M. Silva, D. S. Dominguez, R.C. Alvim, S.M. Iglesias. Analysis of mechanical strength and porosity of a composite cement with lightweight EVA and piassava fibers, *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 8.1:44–50, 2013.
- [15] R. M. Silva, D. S. Dominguez, J.T. Assis, e S. M. Iglesias. Characterization of Lightweight Cementitious Composites Reinforced with Piassava Fibers using Mechanical Tests and Micro-tomography. *International Review of Chemical Engineering (I.R.E.C.H.E.)*, 5:415–422, 2013.
- [16] S. Tafesse, J. M. R. Fernlund, F. Bergholm. Digital sieving-Matlab based 3-D image analysis. *Engineering Geology*, 137:74–84, 2012.
- [17] A. J. Zattera, O. Bianchi, M. Zeni e C. A. Ferreira. Caracterização de Resíduos de Copolímeros de Etileno-Acetato de Vinila - EVA. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 15:73–78, 2005.