

Caracterização de argamassas leves reforçadas com fibras de piaçava utilizando tomografia computadorizada e Análise de Fourier

J. F. L. dos Santos^{1*}, S. M. Iglesias¹, D. S. Dominguez¹, H. C. Almeida²

¹Universidade Estadual de Santa Cruz, Mestrado em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia

²Universidade Estadual de Santa Cruz, Mestrado em Ciência, Inovação e Modelagem em Materiais

*Campus Soane Nazaré de Andrade, Rodovia Jorge Amado, Km 16, Bairro Salobrinho, Ilhéus-Ba

(Recebido em 22/05/2015; revisado em 01/07/2015; aceito em 22/10/2015)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Uma solução para reutilizar resíduos industriais que podem contaminar o meio ambiente, como o EVA, é usa-lo como agregado leve em misturas de argamassas que podem ser utilizadas na construção civil. Para evitar a perda das propriedades mecânicas das argamassas leves, podem ser utilizadas fibras naturais, neste caso, piaçava. Assim, este trabalho descreve uma aplicação da análise de Fourier para o estudo de imagens microtomográficas de amostras de concreto leve contendo EVA e fibras de piaçava, visando a sua caracterização. Observando o espectro de Fourier, considerando a amplitude e a posição dos picos é possível identificar cada tipo de mistura. Analisando o histograma é possível identificar os agregados usando os intervalos de frequência. Os resultados deste trabalho permitem considerar a análise de Fourier de imagens microtomográficas como uma ferramenta para a caracterização de materiais, independente dos parâmetros geométricos.

Palavras-chave: Argamassa leve; EVA; fibras de piaçava; tomografia computadorizada de raios X; análise de Fourier; histograma.

Abstract:

To solve the actual environmental problems, one solution is to reuse industrial residues in other areas as the civil construction. The EVA is a residue from footwear industry that can be used in civil construction as lightweight aggregate in mortar mixtures to use in nonstructural parts. However, studies have shown a reduction of mechanical strength when the EVA is added if compared to conventional mixtures. To solve the problem, the use of natural fibers as the piassava is considered. This paper describes an application of Fourier analysis in the micro-tomographic images for the characterization of the lightweight mortar mixtures. Using the Fourier spectrum, considering the amplitude, the positions of the peaks and the histograms, is possible to identify the presence of the aggregates in the mixtures. These results have allowed to consider, Fourier analysis as a material characterization tool that's not depends on geometrical parameters.

Keywords: Lightweight mortar; EVA; piassava fibers; micro tomography; fourier analysis; histograms.

1. Introdução

O descarte de resíduos gerados pela indústria calçadista tem exigido esforços das entidades ambientais e dos governos, pois quando manuseados inadequadamente, podem apresentar riscos à saúde pública provocando doenças e riscos ao meio ambiente. A Espuma Vinílica Acetinada (EVA) surgiu no começo da década de 1970, como alternativa ao uso do couro na produção de calçados. No Brasil são produzidas cerca de trinta e seis mil toneladas por ano de EVA e estudos mostram que de 12 a 20 por cento deste total vira resíduo. O volume destes resíduos cresce constantemente e estudos para gestão de coleta, controle e destinação são necessários para propor uma solução. Uma proposta é a reutilização destes resíduos na produção de argamassas leves para serem utilizadas na construção civil [1]

O uso de argamassa leve melhora a relação resistência/peso na construção de edifícios altos, como também o isolamento térmico e acústico, sem ter a necessidade de aumentar a espessura das camadas de concreto. Isso viabiliza a construção em solos com menor capacidade de suporte e a diminuição dos custos devido à redução do uso de aço [2].

Por outro lado, estudos também mostraram que a introdução dos resíduos de EVA provoca a diminuição da resistência do concreto à tensão de tração. Uma das soluções encontradas para atenuar este efeito é o acréscimo de fibras vegetais nas misturas, que funcionam como material de reforço [3-5]. Com a produção destas misturas e buscando sua incorporação à indústria, estudos visando à caracterização do compósito resultante são extremamente importantes e necessários.

*Email: jorgefabricio@ifba.edu.br (J. F. L. dos Santos)

Entre as alternativas para caracterização de materiais destacam-se as técnicas de Ensaios Não Destrutivos (END). Estas técnicas permitem obter características dos materiais sem gerar danos físicos ou afetar as propriedades mecânicas, permitindo o uso do objeto para outras finalidades [6].

Entre os métodos não destrutivos mais modernos encontra-se a tomografia computadorizada (TC) de raio X que permite a obtenção de imagens da estrutura interna dos materiais. A partir destas imagens podem ser realizados estudos que permitem analisar a estrutura interna dos materiais, podendo localizar defeitos ou vazios, distribuição de agregados. Logo, estes resultados podem ser utilizados para definir as propriedades mecânicas do material [7].

Dentro da Tomografia Computadorizada (TC), se encontra a microtomografia computadorizada (μ TC). A principal diferença entre a (μ TC) e a (TC) é que a primeira permite analisar a estrutura interna do material em escala micrométrica, possibilitando análises mais exaustivas e a detecção de artefatos nessa escala.

A obtenção de imagens microtomográficas permite o uso de técnicas modernas de processamento de imagens. Uma destas técnicas é a Transformada de Fourier, que tem amplo uso na análise de imagens e é aplicada em áreas como a espectrometria de infravermelho ou a difração de raios X para análise de materiais.

Neste trabalho são analisadas amostras de argamassas leves que incluem o EVA, como agregado leve e a fibra de piaçava, como material de reforço. A escolha destes agregados se deve às características da região do Sul da Bahia, primeiro pela presença de indústrias de calçados naquela localidade e segundo, pela abundância da *Attalea Fumifera Martius* de onde são extraídas as fibras de piaçava. Desta forma, as referidas misturas incluem o aproveitamento de resíduos industriais, contribuindo, conseqüentemente para atenuar o impacto ambiental gerado pelas indústrias de calçados e da construção civil.

Este trabalho tem o objetivo de criar uma metodologia não destrutiva para análise de concretos leves reforçados com fibras de piaçava, utilizando Análise de Fourier e microtomografia computadorizada

2. Materiais e Métodos

O trabalho de caracterização de argamassas leves contendo EVA e fibras de piaçava teve início anteriormente [8], onde: foram produzidos 24 corpos de prova cilíndricos para os ensaios de resistência à compressão e 72 corpos de prova prismáticos para os ensaios de resistência a tração na flexão e para aquisição de imagens por microtomografia computadorizada; e foi realizado o estudo da resistência mecânica de um compósito cimentício leve reforçado com fibras de piaçava.

Para produção da argamassa foi utilizado o cimento Portland tipo CP II - E 30 que tem como características a resistência de 30 MPa aos 28 dias de cura e massa específica de 3 kg/cm³. A areia natural utilizada na mistura foi obtida em obras de construção civil da região. A curva granulométrica da areia é mostrada na Figura 1, o eixo das ordenadas

representa a porcentagem de areia retida acumulada em cada peneira e o eixo das abscissas representa as aberturas das malhas das peneiras em milímetros. Como a areia estava muito úmida foi necessário realizar um processo de secagem utilizando uma estufa, a uma temperatura de 110 graus Celsius, por um período de quatro horas.

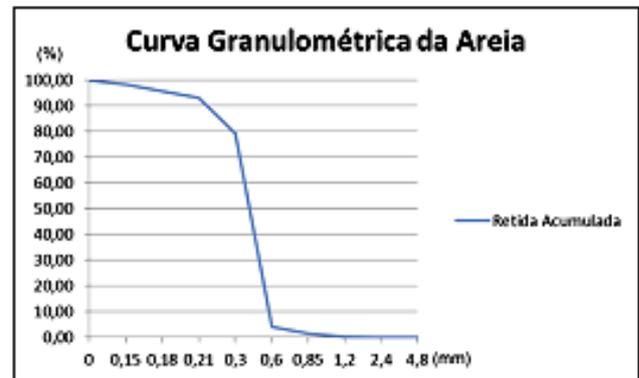


Figura 1. Curva granulométrica da areia utilizada na mistura de cimento. Fonte: [5]

O agregado leve de EVA utilizado foi obtido na fábrica da Penalty, localizada no município de Itabuna/BA, que produz artigos esportivos, entre os quais tênis, chuteiras e bolas. Os resíduos utilizados foram extraídos especificamente do processo de fabricação de bolas de futebol de campo. O EVA chega à fábrica em placas medindo entre 1 e 1,3 m². Aproximadamente, trinta e cinco por cento do EVA utilizado para produzir uma bola de futebol é descartado como resíduo. A granulometria do EVA utilizado varia de 850 a 1180 μ m.

O outro agregado utilizado na produção das misturas, a fibra de piaçava, foi adquirido na plantação da Fazenda São Miguel, localizada na cidade de Itacaré. A parte da fibra que foi utilizada foi a mais dura, e o agregado foi usado *in natura*, que foi cortada em partes menores medindo 1 cm.

Com a argamassa e os agregados foram elaborados quatro tipos de misturas [8]. Sendo que, a relação de água/cimento para todas elas foi igual a 0.4. As quantidades de EVA e fibras para cada tipo são mostradas na Tabela 1. A dimensão dos grãos de EVA das misturas B e D variam de 850 a 1180 μ m. As fibras de piaçava *in natura* foram separadas, limpas e cortadas num tamanho de 1 cm. Estes elementos foram misturados com auxílio de uma argamassadeira e moldados em fôrmas de 4,0 cm de largura e altura, e 16 cm de comprimento, para a produção dos corpos de prova prismáticos e em fôrmas com 5,0 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para os corpos de prova cilíndricos. Os corpos de prova foram desenformados e identificados após 24 horas, e em seguida foram imersos em um tanque com água por 28 dias para realizar a cura úmida.

Como os grãos de EVA e as fibras de piaçava são misturadas de forma aleatória pela argamassadeira, foi escolhida e padronizada uma fatia situada entre o centro do corpo de prova e uma das extremidades, sendo escolhida a fatia de número 12, conforme pode ser visualizado na Figura

2. Desta fatia transversal foi extraída a amostra analisada, com uma base de 1 cm² e 2 cm de altura. Para cada tipo de mistura, foram colocadas duas amostras no microtomógrafo para geração das imagens

Tabela 1. Características dos tipos de misturas

Mistura	Características da mistura
Mistura A	água, cimento e areia
Mistura B	água, cimento, areia e agregado leve de EVA (1%)
Mistura C	água, cimento, areia e fibras de piaçava (1%)
Mistura D	água, cimento, areia, agregado leve de EVA (1%) e fibras de piaçava (1%)

Como os grãos de EVA e as fibras de piaçava são misturadas de forma aleatória pela argamassadeira, foi escolhida e padronizado uma fatia situada entre o centro do corpo de prova e uma das extremidades, sendo escolhida a fatia de número 12, conforme pode ser visualizado na Figura 2. Desta fatia transversal foi extraída a amostra analisada, com uma base de 1 cm² e 2 cm de altura. Para cada tipo de mistura, foram colocadas duas amostras no microtomógrafo para geração das imagens.

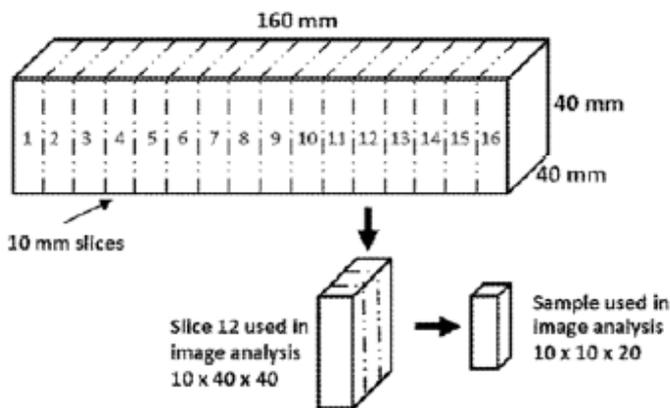
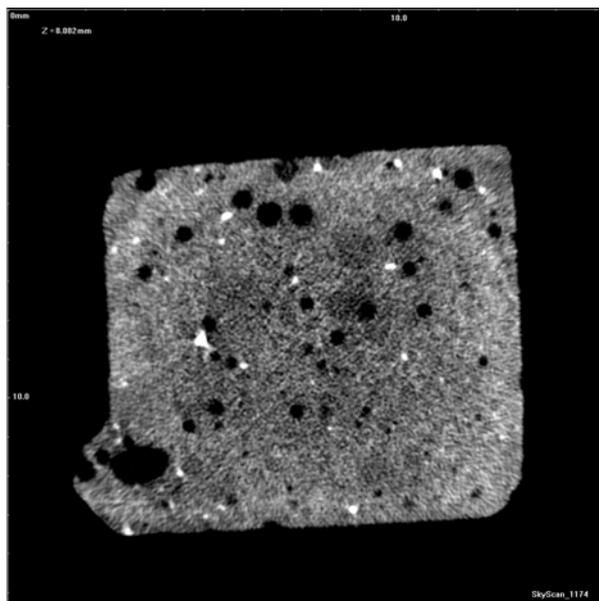


Figura 2. Esquema de corte para obtenção das amostras
Fonte: [5]

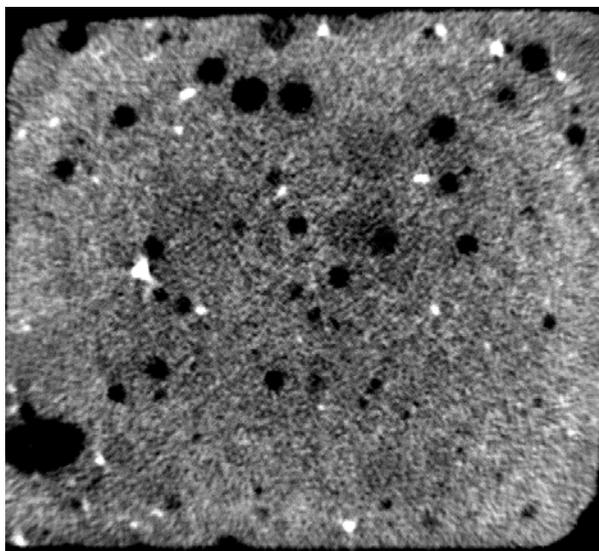
O sistema de microtomografia de raios X usado para aquisição das imagens foi do Laboratório de Ensaios Físicos do Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, no Campus de Nova Friburgo, cujo modelo é o Skyscan®, modelo 1174, composto por um tubo de raios X de microfoco com fonte de alta tensão (50 Kv e 0.800 mA), um porta amostra com manipulador de precisão e um detector baseado em uma câmara CCD de 1.3Mp (1200x1024 pixel) conectados a um computador para aquisição de dados.

O objeto é rotacionado no microtomógrafo num ângulo θ igual a 1°, variando de 0° a 360°, produzindo 360 projeções de imagens de 8 bits. O tempo de aquisição e reconstrução das imagens de microtomografia levou em torno de cinquenta minutos para cada amostra. Foram geradas imagens de duas amostras para cada um dos quatro tipos de misturas, totalizando imagens de oito amostras processadas no

microtomógrafo. Após as aquisições das projeções, as imagens foram reconstruídas através do software Nrecons® versão 1.6.4.1. Para cada tipo de mistura foram geradas cerca de 600 imagens das seções transversais das amostras. Estas imagens possuem o tamanho de 1024x1024 pixels em escala de cinza e cada uma delas ocupa o espaço de 1 MB de memória em disco. A Figura 3a mostra um exemplo de imagem da mistura C (argamassa + fibras).



(a)



(b)

Figura 3. a) Exemplo de imagem da mistura C (argamassa + fibras); b) Resultado da imagem após a execução do algoritmo de rotação e corte de bordas

Para analisar as imagens microtomográficas de argamassa leve, objeto deste estudo, foi feita uma seleção de vinte

imagens para cada tipo de mistura, mistura A (argamassa pura), mistura B (argamassa + EVA), mistura C (argamassa + fibras) e mistura D (argamassa + EVA + fibras), considerando os quatro tipos de misturas, formando um total de oitenta imagens bidimensionais.

Ao observar a Figura 3a pode-se perceber uma inclinação na imagem e uma borda escura nos quatro lados. Então, antes de aplicar a Transformada Rápida de Fourier nas imagens de argamassa, foi necessário selecionar a região de interesse (ROI – Region of Interest). Como o ROI é aquela seção da imagem que corresponde apenas à argamassa, foi necessário rotacionar as imagens e efetuar um corte de bordas. Para essa tarefa, foi desenvolvido um algoritmo em MATLAB®. O algoritmo trabalha na matriz da imagem localizando o ponto mais externo em cada um dos quatro lados da borda escura até achar um ponto com valor diferente de zero, neste ponto é realizado o corte. Como os corpos de prova não possuem formato idêntico e um mesmo corpo de prova não tem uma superfície lisa nem plana, devido a imperfeições que aparecem no corte da amostra, Figura 3a, o algoritmo encontra os valores de corte em posições diferentes para cada imagem. Isso acaba gerando imagens com tamanhos ligeiramente diferentes após o recorte. Os tamanhos variam entre 592x553 a 601x650 pixels para as oitenta imagens escolhidas para processamento. O resultado do algoritmo de rotação e recorte aplicado na imagem da Figura 3a é mostrado na Figura 3b.

Após esta etapa de pré-processamento, que incluem cortar e rotacionar as imagens, a Transformada Rápida de Fourier foi aplicada em cada uma das imagens e o espectro de frequências foi obtido. Em seguida, o histograma para cada tipo de mistura foi calculado. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo em MATLAB® que carrega as imagens de cada tipo de mistura, obtendo as frequências e calculando os histogramas para cada mistura de forma automática. A partir destes dados foram realizadas as análises dos picos das frequências para determinar as características mais importantes em cada uma das misturas.

Como o espectro gerado pela Transformada de Fourier é periódico foi possível trabalhar com uma amostra das frequências onde se considerou ser possível extrair as características fundamentais. O intervalo escolhido foi as 2200 (dois mil e duzentos) primeiras frequências. Neste intervalo, o primeiro pico mais afastado do eixo das ordenadas, foi escolhido para uma análise mais minuciosa do comportamento, o qual foi chamado neste trabalho, de pico significativo. A periodicidade do espectro pode ser observada na Figura 4, onde todos os picos depois do pico significativo diminuem a amplitude das frequências gradativamente.

Para analisar estatisticamente a amplitude do pico significativo no espectro de frequência foi calculada a média (\bar{X}) e o desvio padrão (σ) da amplitude para cada tipo de

mistura, ou seja, considerando as imagens analisadas. O limite considerado como razoável para caracterização da mistura foi o intervalo $[\bar{X} - 1,5\sigma, \bar{X} + 1,5\sigma]$, ou seja, imagens cujo

pico significativo não atendia essa condição foram retiradas da análise para se obter significância estatística da amostra.

Após a análise estatística da amplitude do pico significativo, também foi feita a análise estatística do deslocamento deste. Novamente o deslocamento do pico significativo foi calculado a média e o desvio padrão da posição deste para cada tipo de mistura. O limite considerado como razoável para caracterização do tipo de mistura foi o intervalo $[\bar{X} - 1,5\sigma, \bar{X} + 1,5\sigma]$.

Por último, foi feita a análise dos histogramas correspondentes a cada mistura. Com o objetivo de melhor representar as misturas, foi considerada a quantidade média das frequências considerando a análise estatística descrita anteriormente. Conforme visto anteriormente, após o recorte das bordas escuras, as imagens ficaram com tamanhos diferentes. O tamanho diferente das imagens influencia na quantidade de frequências. Sendo assim, o histograma foi calculado com base nas primeiras 2200 (dois mil e duzentos) frequências e uma largura de faixa de quinhentas unidades

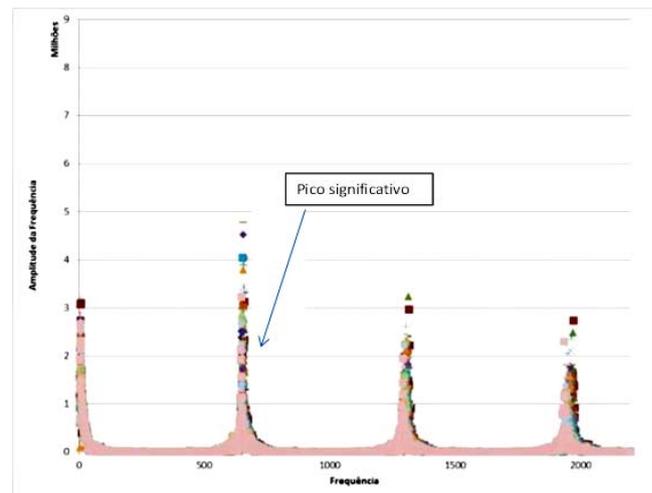


Figura 4. Espectro de frequências das imagens para a mistura do tipo C (argamassa + fibras)

3. Resultados e Discussão

Para cada um dos quatro tipos de misturas avaliados, mistura A (argamassa pura), mistura B (argamassa + EVA), mistura C (argamassa + fibras) e mistura D (argamassa + EVA + fibras), foram escolhidas vinte imagens microtomográficas de seções transversais e aplicada a Transformada Rápida de Fourier.

Nas Figuras 5, 6, 7 e 8 são mostrados os espectros das frequências por tipo de mistura. Cada imagem da amostra é representada por um determinado símbolo no gráfico. Analisando essas figuras, pode-se observar que o comportamento do espectro de frequências das imagens de cada tipo de mistura é similar. Ou seja, as frequências das vinte imagens de cada tipo de mistura possuem um

comportamento similar. Como o espectro de frequências não sofre influência quando ocorre a translação de algum artefato na imagem, o gráfico do espectro das frequências das imagens contendo artefatos com características semelhantes (tamanho e intensidade), independente da localização destes, apresenta um comportamento similar.

A Figura 5 exibe o espectro das frequências das imagens da mistura do tipo A (argamassa pura). Esta mistura de argamassa, contendo apenas cimento e areia possui a mais baixa das amplitudes do pico significativo no espectro das frequências entre todos os tipos de misturas. Isto acontece já que imagens mais homogêneas geram frequências mais baixas e no caso de argamassa pura, a ausência de agregados produz uma menor troca de frequências, logo a amplitude do pico significativo é mais baixa.

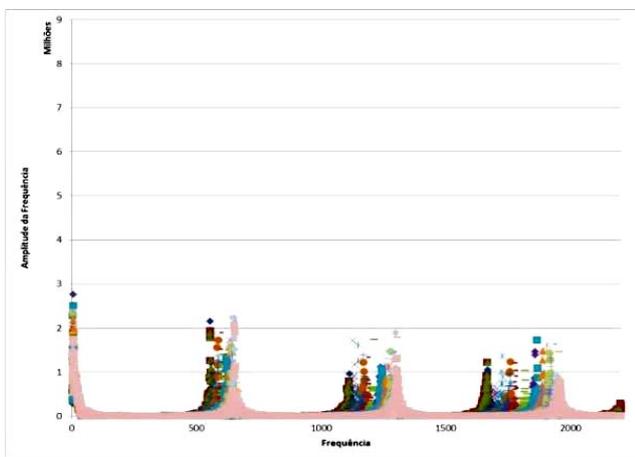


Figura 5. Espectro de frequências para a mistura do tipo A (argamassa pura)

Na Figura 6, é exibido o espectro das frequências das imagens para a mistura do tipo B (argamassa + EVA). Nesse tipo de mistura há a presença do agregado EVA. Observando o pico significativo desta mistura pode-se perceber o aumento da amplitude do pico quando comparada com a mistura de argamassa pura. A presença dos agregados de EVA gera uma imagem mais heterogênea, e conseqüentemente, a ocorrência de frequências mais altas. Conforme anteriormente, todos os picos à direita do pico significativo diminuem a amplitude das frequências gradativamente. Contudo, ocorrem apenas duas exceções nas amostras do tipo B. Essas duas imagens foram as únicas entre todas as que foram analisadas neste estudo que não seguiram esse comportamento.

A Figura 7 exibe o espectro das frequências das imagens da mistura do tipo C (argamassa + fibras), neste tipo de mistura não existe a presença de EVA, mas, em contrapartida há fibras de piaçava. A maior heterogeneidade destas imagens gera frequências mais altas. A amplitude das frequências do pico significativo das amostras do tipo C (argamassa + fibras) é maior quando comparadas com as amplitudes das imagens do tipo B (argamassa + EVA). Acredita-se que essa maior amplitude é causada devido a maior densidade da fibra, o que

gera uma diferença de intensidade maior com relação ao fundo de argamassa.

A Figura 8 mostra o espectro das frequências das imagens da mistura do tipo D (argamassa + EVA + fibras). Essas misturas contêm argamassa, EVA e fibras de piaçava. A amplitude das frequências do pico significativo desse tipo de mistura é a maior entre todas as misturas, como é possível observar ao comparar os espectros das Figuras 5, 6, 7 e 8. Este comportamento é motivado pela maior heterogeneidade das imagens neste tipo de mistura.

Analisando a amplitude do pico significativo de cada tipo de mistura nas Figuras 5, 6, 7 e 8 pode-se observar que esta aumenta proporcionalmente com o aumento do volume de agregados na mistura.

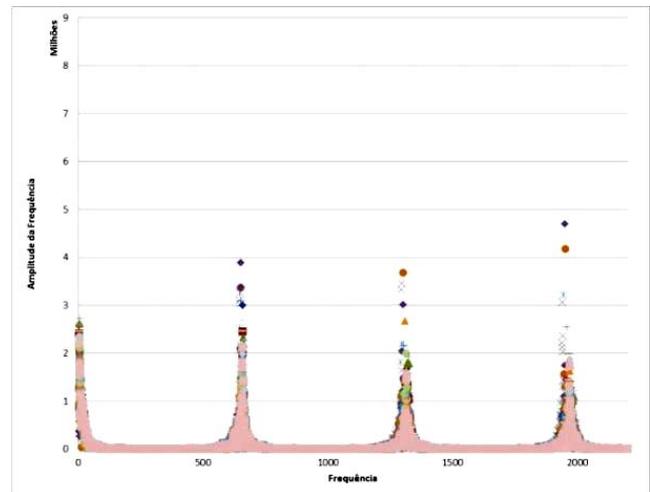


Figura 6. Espectro das frequências para a mistura do tipo B (argamassa + EVA)

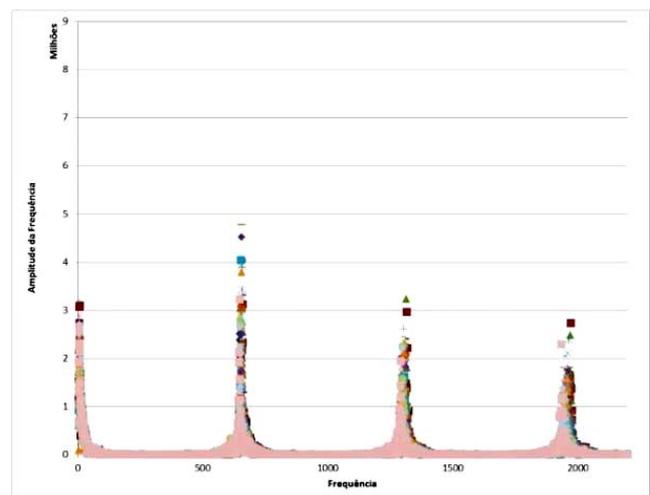


Figura 7 – Espectro das frequências para a mistura do tipo C (argamassa + fibras).

O próximo passo consiste em analisar estatisticamente a amplitude do pico significativo para cada tipo de mistura, lembrando que o pico significativo é o primeiro pico do espectro à direita da origem do eixo das ordenadas.

As Figuras 9, 10, 11 e 12 mostram a amplitude das frequências do pico significativo em cada uma das vinte imagens analisadas para cada tipo de mistura. Conforme comentado seção de Materiais e Métodos, para definir a amplitude do pico significativo em cada tipo de mistura foi seguido um procedimento estatístico, onde utilizando a amplitude do pico das vinte imagens de uma mistura foi calculada a média (\bar{X}) e desvio padrão (σ). Em seguida, foi

definido um intervalo de significância estatística $[\bar{X} - 1,5\sigma, \bar{X} + 1,5\sigma]$, sendo que as imagens com valores

fora deste intervalo foram descartadas. Finalmente, foi definida como amplitude do pico da mistura a média das amplitudes dos picos nas imagens selecionadas.

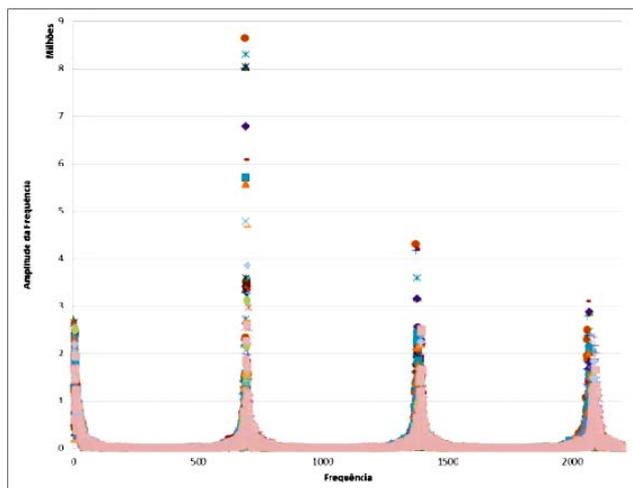


Figura 8 – Espectro das frequências para a mistura do tipo D (argamassa + EVA + fibras).

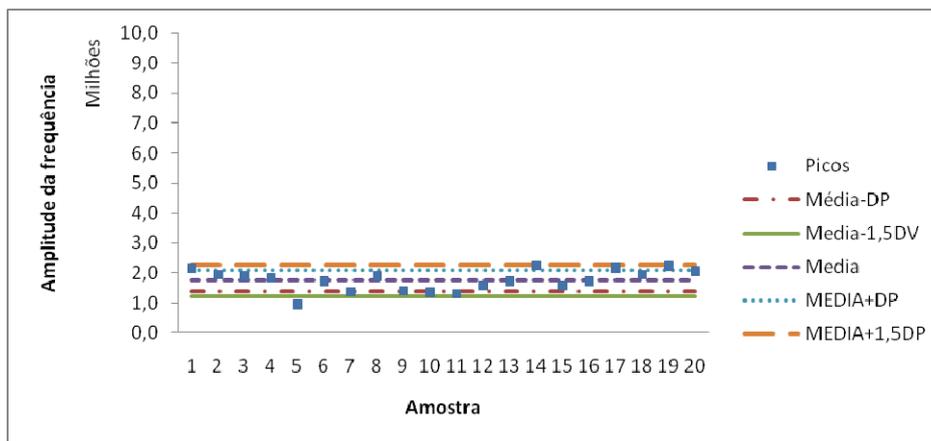


Figura 9. Análise estatística da amplitude do pico significativo das imagens da mistura do tipo A (argamassa pura)

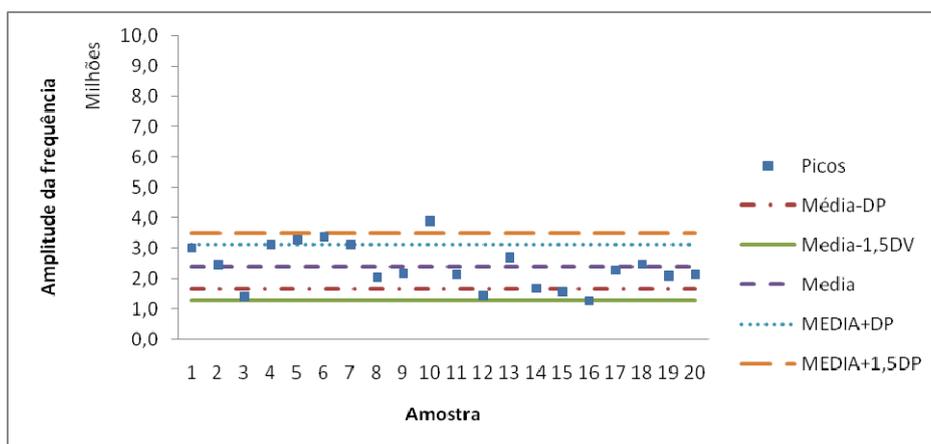


Figura 10. Análise estatística da amplitude do pico significativo das imagens da mistura do tipo B (argamassa + EVA)

Na Figura 9 é exibida a análise estatística da amplitude para as imagens de argamassa pura. É possível perceber que apenas a amplitude do pico correspondente à imagem 5 não atende ao critério de relevância estatístico estabelecido. Portanto, essa imagem da amostra foi retirada e a análise da amplitude foi feita com dezenove imagens

Na Figura 10 é ilustrada a análise estatística de amplitude para as imagens das misturas do tipo B (argamassa + EVA). Atendendo ao critério estatístico estabelecido a imagem 10 foi retirada e a amplitude do pico foi calculada com a média dos valores das outras imagens.

Nas Figuras 11 e 12 são apresentados os resultados das análises estatísticas de amplitude para as misturas do tipo C (argamassa + fibras) e para as misturas do tipo D (argamassa + EVA + fibras), respectivamente. Na mistura do tipo C foram retiradas as imagens 9, 10 e 18; e nas misturas do tipo

D foram retiradas as imagens 10 e 16. Com as imagens restantes foi calculada a amplitude do pico para essas misturas.

Ao comparar as Figuras 9 a 12, observa-se que o tamanho dos intervalos aumenta. Este é um resultado esperado porque a inclusão de agregados aumenta a heterogeneidade das imagens e a complexidade dos espectros de frequência.

Finalizando a análise da amplitude do pico significativo por tipo de mistura, os resultados foram resumidos na Tabela 2. É possível observar, que o tamanho do pico aumenta com a inclusão dos agregados, ou seja, a mistura do tipo A (argamassa pura) apresenta a menor amplitude e a mistura do tipo D (argamassa + EVA + fibras) apresenta a maior. Este resultado reforça as conclusões obtidas com a análise do espectro das frequências.

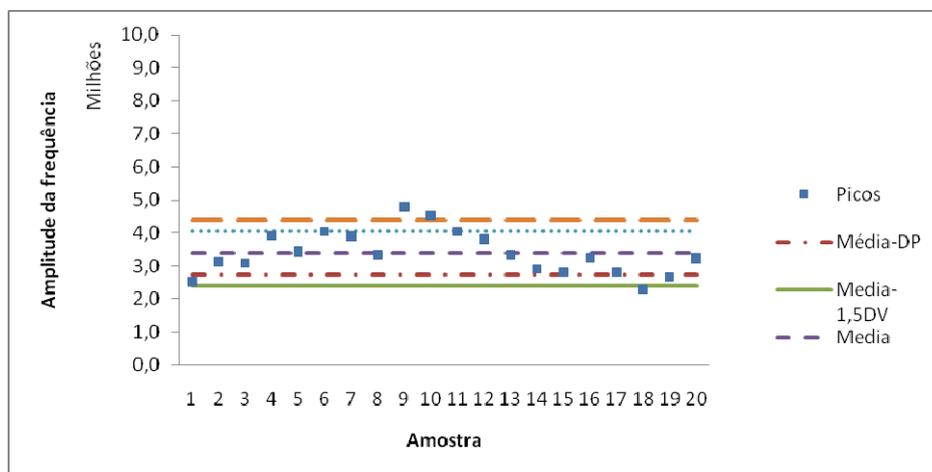


Figura 11. Análise estatística da amplitude do pico significativo das imagens da mistura do tipo C (argamassa + fibras)

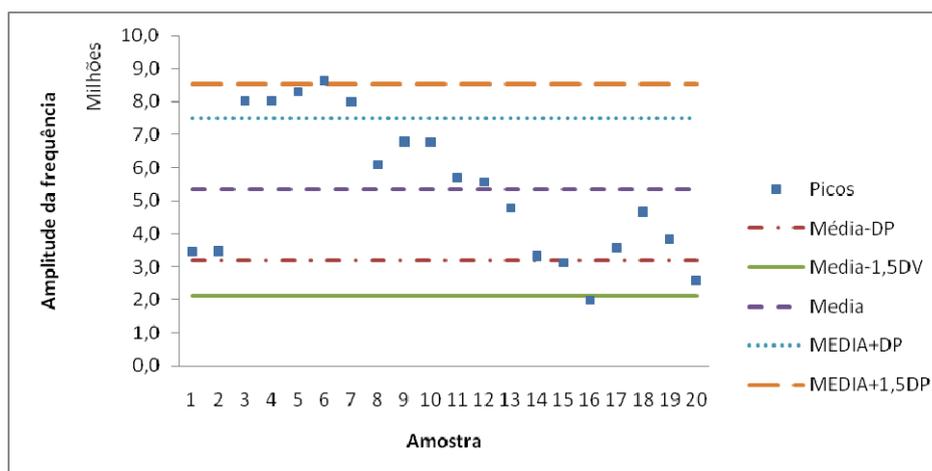


Figura 12. Análise estatística da amplitude do pico significativo das imagens da mistura do tipo D (argamassa + EVA + fibras).

Um procedimento estatístico semelhante ao descrito para a amplitude do pico significativo é realizado considerando o deslocamento deste para cada tipo de mistura. Entende-se como deslocamento a posição do pico significativo no

espectro de frequências em relação ao eixo das ordenadas. Os resultados desta análise são descritos a seguir.

As Figuras 13, 14, 15 e 16 apresentam o deslocamento do pico significativo em cada uma das vinte imagens analisadas

para cada tipo de mistura. Conforme comentado na seção de Materiais e Métodos, para definir o deslocamento do pico significativo em cada tipo de mistura foi seguido um procedimento estatístico, onde utilizando o posicionamento do pico das vinte imagens de cada mistura foi calculada a média (\bar{X}) e o desvio padrão (σ). Em seguida, foi definido um intervalo de significância estatística $[\bar{X} - 1,5\sigma, \bar{X} + 1,5\sigma]$, sendo que as imagens com valores fora deste intervalo foram descartadas. Finalmente, foi definido como deslocamento do pico da mistura a média dos posicionamentos dos picos nas imagens selecionadas.

Na Figura 13 é exibida a análise estatística do deslocamento para as imagens das misturas do tipo A (argamassa pura). É possível perceber que o deslocamento do pico correspondente às imagens 1, 2 e 3 não atende ao critério de relevância estatístico estabelecido. Por tanto, essas imagens da amostra foram retiradas e a análise da amplitude foi feita com dezessete imagens.

A Figura 14 apresenta a análise estatística do deslocamento para as imagens das misturas do tipo B (argamassa + EVA). É possível perceber que o deslocamento do pico correspondente às imagens 4 e 5 não atende ao critério de relevância estatístico estabelecido. Por tanto, essas imagens da amostra foram desconsideradas e a análise da amplitude foi feita com as outras imagens.

Tabela 2. Amplitude média do pico significativo para cada tipo de mistura

	Mistura A	Mistura B	Mistura C	Mistura D
Amplitude	1.750.617,802	2.376.788,535	3.389.662,978	5.333.832,018

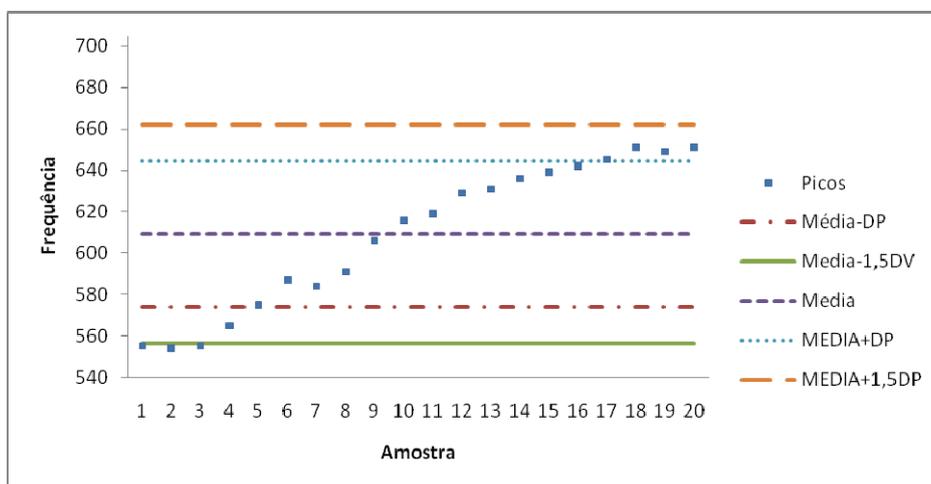


Figura 13. Análise estatística do deslocamento do pico significativo nas imagens da mistura do tipo A (argamassa pura)

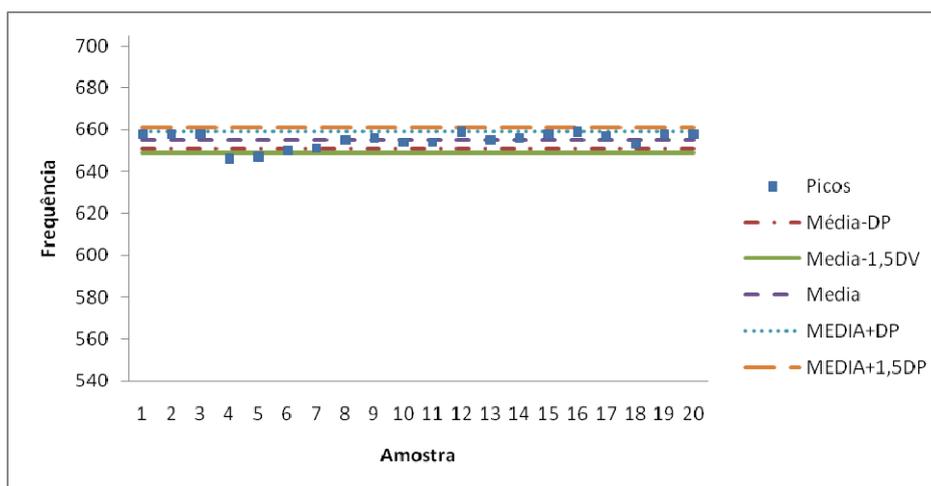


Figura 14. Análise estatística do deslocamento do pico significativo nas imagens da mistura do tipo B (argamassa + EVA)

A Figura 15 mostra a análise estatística do deslocamento para as imagens das amostras do tipo C (argamassa + fibras). Ao observar essa figura, é possível perceber que somente o deslocamento do pico correspondente a imagem 2 não atende ao critério de relevância estatístico estabelecido. Por tanto, essa imagem da amostra foi desconsiderada e a análise da amplitude foi feita com as outras dezenove imagens.

Por último, a Figura 16 mostra a análise estatística do deslocamento para as imagens do tipo D (argamassa + EVA + fibras). Ao observar essa figura, é possível perceber que somente o deslocamento do pico correspondente a imagem 14 não atende ao critério de relevância estatístico estabelecido. Por tanto, essa imagem da amostra foi desconsiderada e a análise da amplitude foi feita com as outras dezenove imagens.

Examinando o deslocamento do pico significativo percebe-se que depende da presença de agregados nas amostras, este fato pode ser analisado mais claramente na Tabela 3, que descreve os intervalos onde aparece o pico significativo no espectro de frequências para cada tipo de mistura. As frequências que caracterizam as misturas do tipo A (argamassa pura), encontra-se no intervalo [556, 661]. As frequências do tipo B (argamassa + EVA), estão no intervalo [648 e 661]. Já as frequências das misturas do tipo C (argamassa + fibras), o pico significativo aparece no intervalo [646, 657]. Finalmente, nas misturas do tipo D (argamassa + EVA + fibras), o pico está definido no intervalo [686 e 699]. Resumindo, a mistura do tipo A (argamassa pura) apresenta o menor deslocamento em relação ao eixo das ordenadas e a mistura do tipo D (argamassa + EVA + fibras) apresenta o maior.

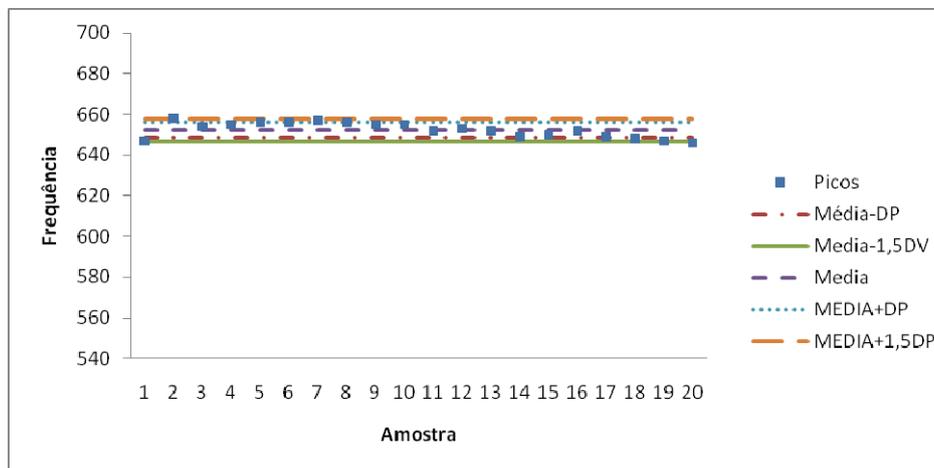


Figura 15. Análise estatística do deslocamento do pico significativo nas imagens da mistura do tipo C (argamassa + fibras)

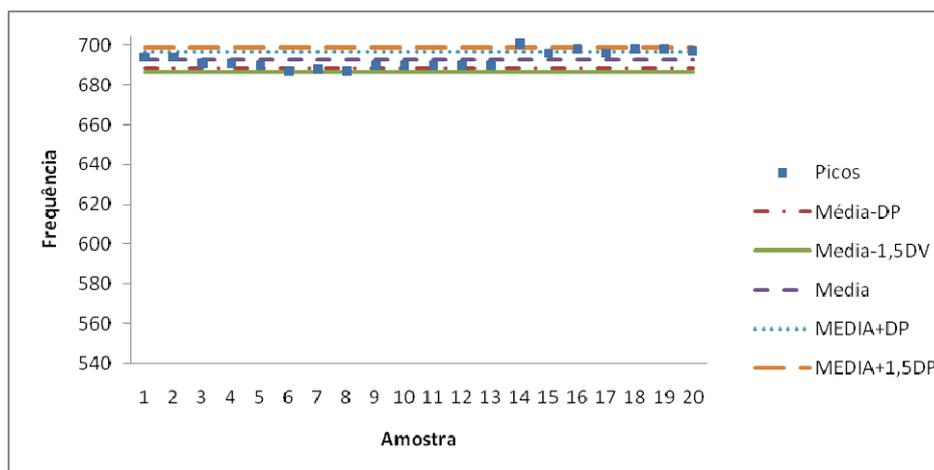


Figura 16. Análise estatística do deslocamento do pico significativo nas imagens da mistura do tipo D (argamassa + EVA + fibras)

Tabela 3. Intervalo do pico significativo para cada tipo de mistura

	Mistura A	Mistura B	Mistura C	Mistura D
Intervalo dos picos	556 a 661	648 a 661	646 a 657	686 a 699

A última etapa da caracterização das imagens microtomográficas de argamassas leves constitui na construção do histograma do espectro de frequências para cada tipo de mistura. O histograma foi construído utilizando o procedimento descrito na seção Materiais e Métodos, ou seja, considerando uma largura de faixa de quinhentas unidades e utilizando as 2200 primeiras frequências do espectro médio das vinte imagens na respectiva faixa. Os gráficos das noventa faixas, que correspondem à região de frequências mais altas, para cada tipo de misturas são apresentados nas Figuras 17, 18, 19 e 20.

Na Figura 17, que corresponde ao histograma das imagens da mistura do tipo A (argamassa pura), as frequências aparecem somente até a trigésima faixa de frequências, ou seja, uma região de frequências intermediárias.

Nas Figuras 18 e 19 são apresentados os histogramas das imagens das misturas do tipo B (argamassa + EVA), e das imagens do tipo C (argamassa + fibras), respectivamente. Ao observar e comparar esses dois histogramas, verifica-se que eles são muito semelhantes, com a ocorrência de frequências até a quinquagésima faixa. Ou seja, os histogramas ocupam as regiões de frequências intermediárias e altas.

Finalmente, na Figura 20, é exibido o histograma do espectro de frequências das imagens da mistura do tipo D (argamassa + EVA + fibras). Nessa figura, é possível perceber que o histograma apresenta frequências até a faixa de número noventa. Ou seja, no caso desta mistura, ocorre a presença de frequências nas regiões intermediárias, altas e muito altas. Um resumo da análise dos histogramas com a distribuição das faixas de frequências para cada tipo de mistura pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4. Distribuição das frequências para cada tipo de mistura

	Mistura A	Mistura B	Mistura C	Mistura D
Faixa das frequências	1-30	30-50	30-50	30-90

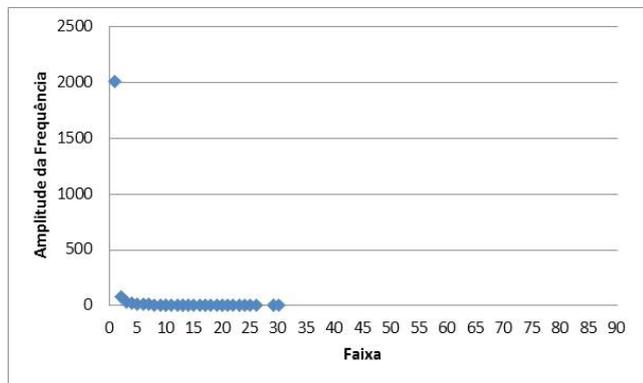


Figura 17. Histograma do espectro de frequências das imagens da mistura do tipo A (argamassa pura)

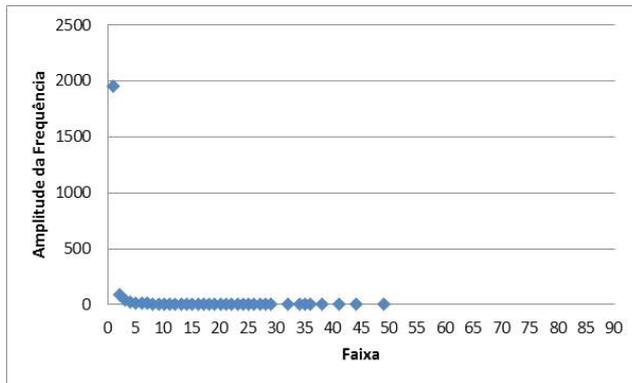


Figura 18. Histograma do espectro de frequências das imagens da mistura do tipo B (argamassa + EVA)

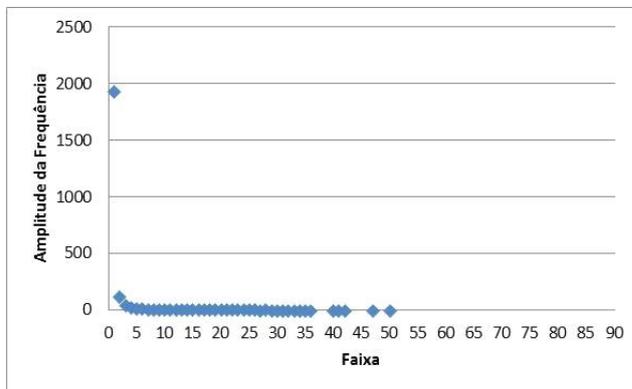


Figura 19. Histograma do espectro de frequências das imagens da mistura do tipo C (argamassa + fibras)

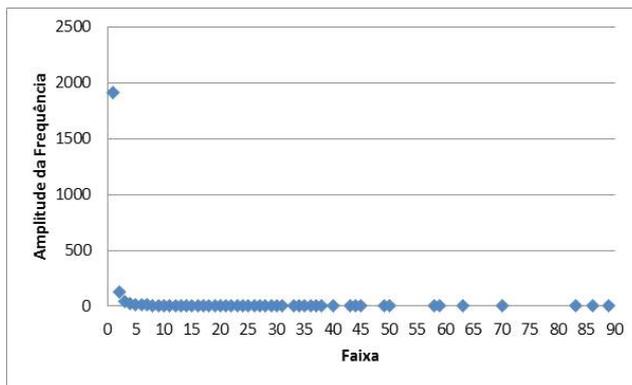


Figura 20. Histograma do espectro de frequências das imagens da mistura do tipo D (argamassa + EVA + fibras)

Da análise dos histogramas para cada tipo de mistura, Figuras 17 a 20 e da Tabela 4 permite-se perceber que a região de frequências intermediárias entre as faixas 1 e 30 corresponde a argamassa presente em todas as misturas. A região de frequências altas, entre as faixas 30 e 50 aparece em misturas onde há a presença de apenas um agregado, EVA ou fibra de piaçava. A região de frequências muito altas, com

frequências entre as faixas 50 e 90, está relacionada às misturas onde há a presença dos dois agregados. Por essas razões, a análise de histogramas do espectro de frequências é muito útil para determinar a presença de agregados. Entretanto, se houver a presença de apenas um agregado, não é possível determinar se este corresponde a EVA ou a fibra de piaçava.

4. Conclusões

No presente trabalho foram analisadas imagens de amostras de argamassa leve, que utilizam grãos de EVA como agregado leve, e fibras de piaçava como material de reforço. A utilização destas argamassas na indústria da construção civil em peças sem fins estruturais contribui para diminuir o impacto ambiental do desenvolvimento urbanístico através da reutilização de resíduos provenientes de outros setores. A técnica utilizada é baseada no uso de imagens microtomográficas e análise de Fourier, e visa identificar os agregados presentes na argamassa através do espectro de frequências sem utilizar parâmetros geométricos como área, volume ou excentricidade dos artefatos presentes nas imagens. Para este fim, foram utilizados quatro tipos de mistura: argamassa sem agregados, argamassa com grãos de EVA, argamassa com fibras e argamassas contendo EVA e fibras.

Ao analisar os resultados é possível concluir que a inclusão dos agregados aumenta a amplitude do pico significativo para cada tipo de mistura. Este valor característico pode então ser utilizado para identificar o tipo de mistura. A inclusão dos agregados também provoca um deslocamento do pico significativo diferente para cada tipo de mistura. Este elemento também pode auxiliar na identificação do tipo de mistura. A identificação utilizando as duas características do pico significativo, amplitude e deslocamento, devem oferecer resultados acurados.

A construção do histograma de frequências para cada tipo de mistura permitiu estabelecer três faixas de frequência características (intermediárias, altas e muito altas) associadas à presença de argamassa e agregados na mistura. Pode-se concluir então que a análise do histograma das frequências

pode ser uma ferramenta na identificação do tipo de mistura, entretanto não é possível diferenciar as amostras com um único agregado.

Considerando estes resultados pode-se concluir que o uso de imagens microtomográficas e análise de Fourier pode ser uma ferramenta alternativa às análises geométricas, na identificação de agregados em amostras de argamassa leve contendo grãos de EVA e fibras de piaçava.

Referências

- [1] Garlet, G., Greven, H. A. Concreto leve usando resíduos de EVA da indústria calçadista. In 1º Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades sustentáveis. 1997, Canela.
- [2] Mehta, K., Monteiro, P. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 3ª Ed. São Paulo: PINI, 1994.
- [3] Lima, P. R. L. Análise Teórica e Experimental de Compósitos Reforçados com Fibras de Sisal (Tese de Doutorado). COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- [4] Toledo Filho, R. D., Kuruvilla, J., Ghavami, K., Leslie, G. The use of sisal fibre as reinforcement in cement based composites. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n.2, p.245-255. 1999.
- [5] Silva, R. M. Characterization of Lightweight Cementitious Composites Reinforced with Piassava Fibers Using Mechanical Tests and Micro-Tomography. International Review of Chemical Engineering. Revista I.RE.C.H.E., Vol. 5, N. 6, Novembro, 2013.
- [6] Andreucci, R. Radiologia Industrial. São Paulo: ABENDI, 2013.
- [7] Hsieh, J. Computed Tomography Principles, Design, Artifacts, and Recent Advances. 2ª ed. USA: Wiley, 2009.
- [8] Silva, R. M. Estudo da resistência mecânica de um compósito cimentício leve reforçado com fibras de piaçava. Revista Educação, Tecnologia e Cultura, 2011.