



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL
EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

FLÁVIA LOPES DE ALMEIDA NASCIMENTO

ANÁLISE DA POROSIDADE EM CONCRETOS LEVES REFORÇADOS COM FIBRAS DE
PIAÇAVA UTILIZANDO TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS EM
MICROTOMOGRAFIAS DE RAIOS X.

ILHÉUS-BA
2019

FLÁVIA LOPES DE ALMEIDA NASCIMENTO

**ANÁLISE DA POROSIDADE EM CONCRETOS LEVES
REFORÇADOS COM FIBRAS DE PIAÇAUA UTILIZANDO
TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS EM
MICROTOMOGRAFIAS DE RAIOS X.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual de Santa Cruz, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia.

Orientadora: Prof. Dra. Susana Marrero Iglesias

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Eduardo Ambrósio

ILHÉUS-BA
2019

N244

Nascimento, Flávia Lopes de Almeida.

Análise da porosidade em concretos leves reforçados com fibras de piaçava utilizando técnicas de processamento de imagens em microtomografia de raios X / Flávia Lopes de Almeida Nascimento. – Ilhéus, BA: UESC, 2019.

55f. : il.; anexos.

Orientadora: Susana Marrero Iglesias.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Santa Cruz. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia.

Inclui referências.

1. Concreto leve. 2. Piaçaba. 3. Processamento de imagens. 4. Tomografia computadorizada por raios X. 5. Porosidade. I. Título.

CDD 620.136

FLÁVIA LOPES DE ALMEIDA NASCIMENTO

**ANÁLISE DA POROSIDADE EM CONCRETOS LEVES
REFORÇADOS COM FIBRAS DE PIAÇAVA UTILIZANDO
TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS EM
MICROTOMOGRAFIAS DE RAIOS X.**

Ilhéus-BA, 26/02/2019

Comissão Examinadora

Prof. Dra. Susana Marrero Iglesias
UESC
(Orientador)



Prof. Dr. Paulo Eduardo Ambrósio
UESC
(Coorientador)



Prof. Dr. Aprígio Augusto Lopes Bezerra
UESC



Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis
IPRJ-UERJ

Aos meus pais que sempre me incentivaram
à buscar o conhecimento.

Agradecimentos

À Deus, por sempre me guiar, amparar e dar forças.

Ao meu esposo, Yann, por todo apoio, compreensão e companheirismo durante esta caminhada.

À minha orientadora, professora Susana Marrero Iglesias, por todo empenho, apoio, paciência e força transmitidos ao longo dessa jornada.

Ao meu coorientador, professor Paulo Eduardo Ambrósio, pelos ensinamentos e sugestões que tanto auxiliaram na realização deste trabalho.

Ao professor José Renato de Castro Pessoa, por toda confiança, paciência, motivação e apoio não só na melhoria deste trabalho como na minha vida profissional.

A todos os professores, técnicos e estagiários que estão envolvidos no curso de pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia.

Ao professor Ricardo Tadeu Lopes que produziu as microtomografias no Laboratório de Instrumentação Nuclear da COPPE/UFRJ.

À todos os colegas da turma 2017.1 do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia, em especial a Dárcio Rocha da Silva, Fabilone Santos da Silva, Felipe Antunes dos Santos e Denilson Oliveira Melo, por estarem sempre dispostos a me ajudar.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo incentivo financeiro durante esses dois anos.

Aos amigos do LEMER, em especial à Marina Freire de Aragão Dias, por toda amizade e sugestões tão fundamentais para a realização deste trabalho.

A todos aqueles que de uma forma ou outra contribuíram para esse trabalho.

Análise da porosidade em concretos leves reforçados com fibras de piaçava utilizando técnicas de processamento de imagens em microtomografias de raios x.

Resumo

A construção civil se apresenta como solução eficiente para a reciclagem de resíduos provenientes de outras indústrias pela diversidade de materiais usados neste setor. Dentre estes resíduos encontra-se o EVA (Ethylene Vinyl Acetate), de difícil descarte e amplamente utilizado na confecção de calçados, material esportivo entre outras. Ao ser introduzido na mistura de concretos, o EVA permite a obtenção de compósitos leves e com boas propriedades térmicas e acústicas. No entanto, sua utilização reduz as propriedades mecânicas do produto final. Para melhorar a resistência deste composto, evitando a propagação das fissuras, fibras vegetais como a piaçava, podem ser adicionadas à mistura. Por tratar-se de um material recente, o concreto leve produzido com EVA e reforçado com fibras de piaçava, necessita de caracterização e análise para que sua estrutura e composição sejam melhor compreendidas. Neste trabalho propomos uma metodologia para análise de concretos leves a partir da aplicação de técnicas de processamento e análise de imagens em microtomografias de raios X. As imagens utilizadas neste trabalho foram obtidas a partir de amostras de diferentes concretos leves produzidos com 5%, 15% e 25% de EVA e reforçados com 1% de fibras de piaçava. As rotinas elaboradas permitem a obtenção das características geométricas e dos tons de cinza dos elementos no interior do concreto para separá-los e classificá-los como poros, grãos de EVA, fibras de piaçava e agregado graúdo obtendo resultados satisfatórios. Por fim, analisamos a influência da adição do EVA e das fibras de piaçava na porosidade do concreto, característica que influi em propriedades como a resistências à compressão, a abrasão, sua estabilidade química, durabilidade e etc.

Palavras-chave: Concreto leve. EVA. Fibras de piaçava. Processamento de Imagens. Microtomografia de raios X. Porosidade.

Porosity's analysis of lightweight concretes reinforced with piassba fibers using image processing techniques In x-ray microtomographies

Abstract

Civil construction presents itself as an efficient solution for recycling other industries' waste due to the diversity of materials used in this sector. Among these residues is EVA, which is difficult to dispose and widely used in shoe making, sports equipment and others. When introduced into concrete's mixture, EVA allows the production of lightweight composites with good thermal and acoustic properties. However, its use reduces the mechanical properties of the final product. To improve the efficiency of this compound, avoiding cracks propagation, plant fibers such as piassava can be added to the mixture. Because it is a recent material, the lightweight concrete produced with EVA and reinforced with piassava fibers, needs characterization and analysis so that its structure and composition can be better understood. In this work we propose a methodology for the analysis of lightweight concretes from the application of processing and analysis' techniques in x-ray microtomography images. The images used in this work were obtained from different samples of lightweight concretes produced with 5%, 15% and 25% of EVA and reinforced with 1% of piassava fibers. The elaborated routines allow to obtain the geometric and grayscale characteristics of the elements inside the concrete to separate them and classify them as pores, EVA grains, piassava fibers and large aggregates obtaining satisfactory results. Finally, we analyzed the influence of the addition of EVA and piassava fibers on concrete's porosity, a characteristic that influences properties such as compressive strength, abrasion, chemical stability, durability and others.

Keywords: Lightweight concrete. EVA. Piassava Fibers. Image processing. X-ray microtomography. Porosity.

Lista de figuras

Figura 1 – Tipos de concreto leve de acordo com seu método de produção: (a) concreto com agregados leves, (b) concreto celular e (c) concreto sem finos.	5
Figura 2 – Resíduos de placas de EVA.	6
Figura 3 – (a) Fibras de piaçava; (b) Palmeira <i>Attalea funifera</i>	10
Figura 4 – Imagem digital com sua respectiva representação matricial.	14
Figura 5 – Multiplicação de imagens: (a) imagem digital radiológica; (b) imagem binária com duas regiões de interesse; (c) Resultado da multiplicação das imagens (a) e (b).	15
Figura 6 – Tipos básicos de imagem em relação à intensidade.	15
Figura 7 – Efeitos da escolha do limiar na binarização de imagens monocromáticas: (a) imagem em tons de cinza; (b) histograma correspondente à imagem (a); (c) e (d) imagens binárias obtidas com os limiares 128 e 64, respectivamente.	18
Figura 8 – Operações de erosão e dilatação na imagem A pelo elemento estruturante E.	19
Figura 9 – Esquema das misturas utilizadas no trabalho.	21
Figura 10 – Esquema para formação do código de identificação das amostras. . .	22
Figura 11 – Imagens geradas pelo microtomógrafo: (a) Concreto sem agregado leve e fibras – CR, (b) Concreto com adição de 15% de agregado leve – EF15, (c) Concreto com adição de 15% de agregado leve e 1% de fibra de piaçava – 1EF15.	23
Figura 12 – Imagens ajustadas em contraste:(a) Concreto sem agregado leve e fibras – CR, (b) Concreto com adição de 15% de agregado leve – EF15, (c) Concreto com adição de 15% de agregado leve e 1% de fibra de piaçava – 1EF15.	24
Figura 13 – Histograma das amostras utilizadas no trabalho.	25
Figura 14 – Imagens binarizadas com destaque para os poros, EVA e fibras: (a) Concreto referência – CR, (b) Concreto com adição de 15% de EVA – EF15, (c) Concreto com adição de 15% de EVA e 1% de fibra de piaçava – 1EF15.	27
Figura 15 – Imagens binarizadas com destaque para o agregado graúdo: (a) Concreto referência – CR, (b) Concreto com adição de 15% de EVA – EF15, (c) Concreto com adição de 15% de EVA e 1% de fibra de piaçava – 1EF15.	27

Figura 16 – Imagens filtradas: (a) Poros e grãos de EVA da amostra EF15, (b) Poros, grãos de EVA e fibras da amostra 1EF15.	28
Figura 17 – Vistas frontal e lateral da fibras no interior das amostas.	30
Figura 18 – Exemplo das imagens utilizadas na determinação de cada elemento presente no concreto.	32
Figura 19 – Imagens utilizadas na validação da metodologia.	32
Figura 20 – Imagens resultantes do processamento da imagem teste contendo poro, fibra e EVA.	34
Figura 21 – Percentual de branco, em cada fatia, das amostras com destaque para poros, fibra e EVA.	35
Figura 22 – Percentual de branco, em cada fatia, das amostras com destaque para o agregado graúdo.	35
Figura 23 – Percentual de branco médio encontrado nas amostras com destaque para poros, fibras e EVA.	37
Figura 24 – Percentual de branco médio encontrado nas amostras com destaque para o agregado graúdo.	38
Figura 25 – Porosidade média encontrada nas amostras.	39
Figura 26 – Percentual médio de EVA encontrada nas amostras.	42
Figura 27 – Percentual médio de fibras encontrado nas amostras.	43

Lista de tabelas

Tabela 1 – Códigos de identificação para cada uma das amostras.	22
Tabela 2 – Quantidades de imagens de cada amostra.	23
Tabela 3 – Limiar utilizado na binarização das imagens para destacar poros, EVA e fibras.	26
Tabela 4 – Limiar utilizado na binarização das imagens para destacar o agregado graúdo.	26
Tabela 5 – Valores mínimos e máximos de percentual de branco referente aos poros, EVA e fibras encontrados para cada uma das amostras.	36
Tabela 6 – Valores mínimos e máximos de percentual de branco referente ao agregado graúdo encontrados para cada uma das amostras.	36
Tabela 7 – Percentual médio de regiões de cor branca de cada tipo de mistura representando poros, fibra e EVA.	36
Tabela 8 – Percentual médio de regiões de cor branca de cada tipo de mistura representando o agregado graúdo (brita).	37
Tabela 9 – Valores de porosidade média obtida para cada amostra através da análise de microtomografias de raio X.	39
Tabela 10 – Valores de porosidade média obtida para cada amostra através da análise de microtomografias de raio X.	39
Tabela 11 – Percentuais médios de EVA encontrados nas amostras.	41
Tabela 12 – Percentual médio de fibra nas amostras com adição de 1% de fibra.	43
Tabela 13 – Porcentagens médias encontradas para os elementos presentes em cada amostra.	44

Lista de abreviaturas e siglas

UESC	Universidade Estadual de Santa Cruz
DCET	Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas
PPGMC	Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia
EVA	Ethylene Vinyl Acetate
END	Ensaaios Não Destrutivos
ABENDI	Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos
μ CT	Microtomografia Computadorizada de Raios - X
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EPS	Poliestireno Expandido
ABICALÇADOS	Associação Brasileira das Indústrias de Calçados
CO ₂	Dióxido de Carbono
PET	Polyethylene Terephthalate
RDC	Resíduos de Construção e Demolição
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CT	Tomografia Computadorizada
μ m	Micrômetro
m	Metro
mm	Milímetro
EG	EVA grosso
EF	EVA fino
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
LEMER	Laboratório de Ensaaios Mecânicos e Resistência do Materiais

μa Microampère

kV Quilovolt

Sumário

1 – Introdução	1
2 – Fundamentação Teórica	4
2.1 Concreto leve	4
2.2 EVA como agregado leve	6
2.3 Fibras naturais como elementos de reforço	9
2.4 Microtomografia de Raios X	11
2.5 Processamento de Imagens	12
2.5.1 Imagens Digitais	13
2.5.2 Operações Aritméticas	14
2.5.3 Histograma	15
2.5.4 Transformações de Intensidade	16
2.5.5 Limiarização	17
2.5.6 Morfologia Matemática	17
2.5.7 Representação e Descrição	19
3 – Materiais e Métodos	21
3.1 Pré-processamento das imagens microtomográficas	23
3.2 Segmentação das imagens microtomográficas	24
3.3 Processamento das imagens microtomográficas	27
3.3.1 Amostras contendo apenas EVA fino	29
3.3.2 Amostras contendo apenas EVA grosso	29
3.3.3 Amostras contendo EVA fino e fibra	30
3.3.4 Amostras contendo EVA grosso e fibra	30
3.4 Determinação da porcentagem de cada material	31
3.5 Validação da metodologia	32
4 – Resultados e Discussões	34
5 – Conclusão	45
Referências	47

Anexos	54
ANEXO A – Fluxograma da rotina utilizada na classificação dos elementos . . .	55

1 Introdução

O concreto se encontra entre os materiais mais tradicionais usados em indústrias como a construção civil. Este material é composto basicamente por um meio aglomerante, obtido a partir da mistura de cimento e água, no qual está inserido um material granular como a areia, pedregulho ou brita denominado agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O rápido crescimento populacional e a constante extração de recursos naturais que este crescimento implica fazem da construção civil uma solução para este problema ambiental devido a diversidade de materiais utilizados, permitindo o reaproveitamento de resíduos de outros setores e o desenvolvimento de tecnologia para tal fim. A substituição dos agregados utilizados na produção de concretos e argamassas por resíduos provenientes tanto da indústria da construção civil quanto de outras indústrias possibilita a diminuição do impacto ambiental gerado pelo descarte incorreto destes resíduos e o desenvolvimento de novos materiais com propriedades interessantes. Além disso, de acordo com Lucas e Benatti (2008), a prática de incorporação de resíduos sólidos na construção civil pode levar a uma redução dos custos com os tratamentos e descarte final destes resíduos.

A indústria calçadista gera, todos os anos, um grande volume de resíduos que, normalmente, são descartados em aterros. Dentre estes resíduos encontram-se os retalhos de EVA (Ethylene Vinyl Acetate) provenientes do corte de placas para fabricação de solados e palmilhas de calçados.

O EVA é um material inerte e estável e, devido sua baixa massa específica, apresenta boas características acústicas e térmicas. Ao ser incorporado no concreto, o EVA pode atuar como substituto de parte do agregado, dando origem a um compósito leve e de boas propriedades térmicas e acústicas podendo ser classificado como concreto leve.

Existem vários fatores que podem influenciar nas propriedades do concreto como é o caso da qualidade dos materiais utilizados e suas respectivas porcentagens. Santiago (2008) em seu estudo sobre a possibilidade de obtenção de concreto leve utilizando EVA como agregado percebeu que, ao aumentar as porcentagens de resíduos no traço do concreto, houve um aumento tanto no teor de ar incorporado quanto na relação água/cimento (a/c).

A escolha do fator água/cimento (a/c) é um passo importante no momento de determinar a dosagem do concreto pois a quantidade de água na mistura influencia diretamente na quantidade de vazios no interior da matriz ou sua porosidade. A

porosidade é uma propriedade do concreto que está diretamente relacionada com a qualidade do material por estar associada à sua resistência. Quanto maior o volume de vazios no interior do concreto, menor será sua resistência. Além disso, a porosidade está relacionada à durabilidade do concreto por propiciar o transporte de agentes potencialmente agressivos como ar, água e gases (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para melhorar a resistência perdida com a incorporação do EVA, fibras podem ser adicionadas ao concreto. Quando incorporadas à matriz cimentícia, as fibras, atuam como pontes de tensão evitando a propagação das fissuras (NEVILLE, 2013).

Dentre as várias fibras que podem ser incorporadas ao concreto encontram-se as fibras naturais que têm como vantagem sua ampla disponibilidade na natureza. Entre estas fibras, a piaçava é um material abundante na região sul da Bahia que possui sua produção voltada principalmente para a confecção de vassouras. Compostos novos, como é o caso do concreto leve com adição de EVA e reforçados com fibras de piaçava, devem passar por uma análise criteriosa de suas propriedades para determinar seu melhor uso e suas características ótimas, assim como as proporções dos componentes para alcançar estas características.

Os ensaios não destrutivos (END) vêm apresentando-se como uma ferramenta importante na avaliação das propriedades do concreto. A partir destes ensaios é possível obter informações sobre a massa específica, resistência, módulo de elasticidade, porosidade, permeabilidade entre outras características do concreto. A principal vantagem do uso de END está no fato de causarem pouco ou nenhum dano à amostra ensaiada (ABENDI, 2017).

A tomografia computadorizada de raios X (CT) é classificada como um método não invasivo que permite, de maneira eficiente, caracterizar materiais. Sua utilização permite produzir imagens que auxiliam na determinação de defeitos, posições, tamanhos e formas no interior do material sem que haja destruição da amostra (LIMA et al., 2007).

Originalmente utilizada na área médica, a μ CT, a partir da década de 80, passou a ser incorporada ao estudo de materiais rochosos com o intuito de analisar sua estrutura interna (NASCIMENTO-DIAS, 2017). Desde então, a técnica tem sido empregada no estudo de diversos tipos de materiais.

Em compostos cimentícios, a μ CT tem sido utilizada há décadas como técnica de caracterização e análise de características como porosidade, permeabilidade e presença de fraturas em argamassas e concretos (MASAD et al., 1999; LANDIS, 2004; LU et al., 2006; BOUVARD et al., 2007; PESSÔA et al., 2014; BERNARDES et al., 2017).

Aplicando técnicas de processamento de imagens é possível extrair informação sobre a estrutura interna do material, usando às imagens obtidas através do microtomo-

grafia.

Processamento de imagens digital é o conjunto de técnicas utilizadas para manipular imagens a partir de dispositivos eletrônicos. De acordo com [Loureiro \(2016\)](#), quando há necessidade de tratamento ou quantificação de uma imagem, métodos de segmentação devem ser aplicados às imagens com o intuito de extrair os critérios desejados.

Assim, este trabalho tem como objetivo a análise de concretos leves produzidos com diferentes porcentagens de EVA e reforçados com fibras de piaçava a partir de imagens microtomográficas e processamento de imagens. Serão, primeiramente, identificados os materiais presentes no interior do concreto. Ao distinguir cada material é possível analisar os agregados e os vazios de forma mais detalhada. Esta análise é muito importante porque a partir da identificação de cada material é possível perceber como estes interagem entre si e, conseqüentemente, afetam as características do concreto, fundamentalmente sua porosidade que afeta diretamente o comportamento do concreto in-situ.

Para atingir o objetivo deste trabalho, os seguintes objetivos específicos serão realizados:

- Desenvolver uma metodologia e rotinas computacionais para processar as imagens microtomográficas;
- Avaliar o emprego da técnica de segmentação através do processamento de imagens digitais, para a separação dos diferentes elementos que compõem o interior da amostra;
- Obter descritores geométricos e de tons de cinza dos elementos das imagens;
- Criar rotina que analise os descritores e seja capaz de discriminar os agregados e poros da amostra;
- Analisar a influência do EVA e das fibras de piaçava na porosidade do concreto.

Na próxima seção serão apresentados os fundamentos teóricos das técnicas utilizadas neste trabalho. Na seção 3 serão detalhados os materiais e a metodologia utilizados. Na seção 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, na seção 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho e os trabalhos posteriores que serão desenvolvidos.

2 Fundamentação Teórica

Nesta seção analisaremos os fundamentos teóricos dos materiais, assim como as metodologias utilizadas neste trabalho.

2.1 Concreto leve

O concreto é um dos materiais mais comumente utilizados na construção civil. A facilidade na obtenção de recursos para sua produção, sua alta resistência às intempéries e sua capacidade em moldar-se em diferentes formas e tamanhos, faz com que o concreto seja o material mais adequado para maioria das construções quando comparado, por exemplo, ao aço e a madeira.

O concreto pode ser classificado de acordo com sua massa específica em três categorias ([MEHTA; MONTEIRO, 2014](#)):

- Concreto de densidade normal;
- Concreto leve;
- Concreto pesado.

De acordo com a [ABNT \(2015a\)](#), o concreto leve caracteriza-se por ser um concreto endurecido que, quando seco em estufa, possui valores de massa específica que variam entre 800 e 2000 kg/m³.

O uso do concreto leve tem sido uma característica na indústria da construção há séculos devido ao fato de poder ser aplicado como elemento estrutural, componente de alvenaria e/ou isolante térmico. Com o desenvolvimento industrial e o crescimento da população, suas expectativas como material têm aumentado, esperando um material consistente, confiável e com características previsíveis.

De acordo com [Rossignolo \(2009\)](#), os concretos leves podem ser classificados de acordo com seus métodos de produção da seguinte forma:

- Utilizando agregados leves com valores baixos de densidade. Este método de produção dá origem ao concreto com agregados leves.
- Introduzindo vazios de grande volume no interior do concreto. Este tipo de concreto é conhecido como concreto aerado, celular ou espumoso.
- Retirando os agregados finos do concreto dando origem ao concreto sem finos.

Na Figura 1 são apresentadas as estruturas internas dos três diferentes tipos de concreto leve segundo esta classificação.

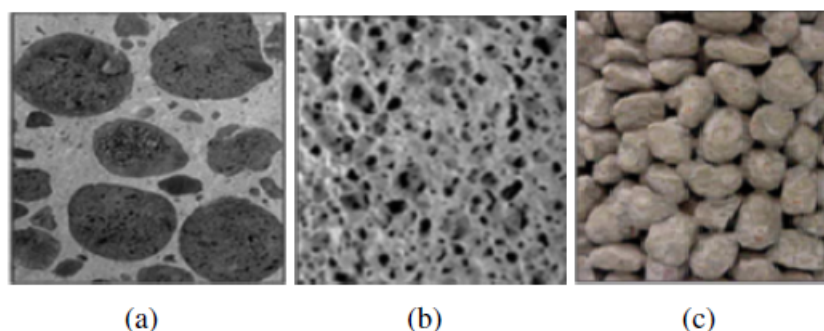


Figura 1 – Tipos de concreto leve de acordo com seu método de produção: (a) concreto com agregados leves, (b) concreto celular e (c) concreto sem finos.

Fonte: [Rossignolo \(2009\)](#).

A mistura do concreto leve, independentemente do método de produção utilizado, deverá ser feita através da incorporação de ar ou a partir da utilização de agregados leves causando uma diminuição na massa específica.

A redução das cargas provenientes do peso próprio do concreto é um dos benefícios obtidos com a diminuição da massa específica. Isso possibilita a obtenção de estruturas capazes de suportar uma maior solicitação de cargas com seções transversais menores e tamanho dos alicerces reduzidos ([ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005](#)). Porém, a principal vantagem da utilização do concreto leve é econômica ([JAMAL, 2017](#)), considerando a facilidade no transporte, a melhoria na eficiência estrutural e a facilidade de renovação e reparação.

É importante ressaltar que o aumento de vazios no interior do concreto leve pode causar uma redução na resistência do material quando em comparação com o concreto normal ([NEVILLE, 2013](#)). Em contrapartida, o concreto normal é conhecido por ser um material frio e pesado enquanto o concreto leve permite um bom isolamento térmico devido à presença de ar, tornando sua utilização ideal como elemento de vedação, diminuindo o consumo de energia com condicionamento térmico ([AL-JABRI et al., 2005](#)). Além disso, a diminuição da massa específica do concreto causa um aumento na relação resistência/peso e redução dos custos em uma construção diminuindo em certas ocasiões a espessura de paredes e tetos ([SATISH; BERNTSSON, 2002](#)). Outras vantagens importantes são melhor resistência ao fogo e a desastres sísmicos ([BILODEAU et al., 2004](#); [ROSSIGNOLO, 2009](#); [TOPÇU, 1997](#)).

2.2 EVA como agregado leve

Os agregados leves podem ser classificados em naturais ou artificiais. Os agregados leves naturais, como a pedra-pomes e o tufo vulcânico, são aqueles obtidos diretamente de jazidas, porém, pouco utilizados devido à variabilidade de suas propriedades e a localização das jazidas. Já os agregados leves artificiais são aqueles obtidos a partir de processos industriais ou pela reciclagem de resíduos como, por exemplo, resíduos de Poliestireno Expandido (EPS), pneu e Ethylene Vynil Acetate (EVA) ([SANTIANO, 2008](#)).

O EVA é um copolímero obtido a partir da polimerização do Etileno com Acetato de Vinila que surgiu nos anos 70 como alternativa ao uso do couro. Uma de suas várias aplicações é a produção de placas expandidas que, posteriormente, serão cortadas no formato de palmilhas e solados usados na confecção de calçados ([GARLET, 1998](#); [MELO; MENDONÇA, 2016](#)). Os resíduos das placas expandidas de EVA são apresentados na Figura 2.



Figura 2 – Resíduos de placas de EVA.

Fonte: [Tarozzo \(2014\)](#).

Dentre as principais características dos copolímeros de EVA encontram-se a boa processabilidade, estabilidade térmica, capacidade de resistência ao impacto, resistência à fadiga, resiliência, tenacidade e flexibilidade ([ILDEFONSO, 2007](#)).

[Melo e Mendonça \(2016\)](#) destacaram como benefícios da utilização de resíduos de EVA na produção de blocos pré-moldados para confecção de telhados verdes extensivos modulares, a absorção de resíduos industriais, melhor desempenho térmico, maior capacidade de retenção de águas pluviais, maior flexibilidade de arranjos e execução do telhado verde facilitada.

A indústria de calçados se beneficia das boas características do EVA como sua facilidade de ser modelado ao calor, sua leveza e facilidade de corte. Entre 2015 e 2016, estima-se que as indústrias de calçados brasileiras produziram 954 milhões de pares de sapatos, sendo que o Nordeste se destacou por produzir 58,2% do total nacional, sendo

o plástico/borracha o material predominante na produção. A Bahia fica atrás apenas dos Estados do Ceará e da Paraíba possuindo mais de 200 empresas distribuídas em 50 municípios do Estado ([ABICALÇADOS, 2017](#); [SEBRAE, 2017](#)). De acordo com [Greven e Garlet \(1997\)](#), a quantidade de resíduos gerados a partir dos processos utilizados no corte das placas de EVA pode variar de 12% a 20%.

O EVA é um material termofixo, ou seja, pode modificar sua estrutura molecular sob aquecimento, o que permite sua moldagem, porém, dificulta seu reprocessamento ([MANCINI et al., 2011](#)). Além disso, é um material de difícil descarte pois a utilização da incineração é inviável devido à geração de gases tóxicos neste processo (CO_2) e, pela sua baixa massa específica que faz com que sejam necessárias áreas de grande tamanho para o descarte deste material.

Por tratar-se de um material não biodegradável os resíduos de EVA acumulam-se cada vez mais em aterros sendo necessária a criação de mecanismos que permitam seu reaproveitamento. O setor de construção civil é uma alternativa para reutilizar resíduos de outras indústrias, devido à ampla escolha de matérias-primas e ao grande número de componentes aplicados nos processos de construção ([CONROY et al., 2006](#)).

[Gomes et al. \(2015\)](#) estudou a viabilidade de aplicação de agregados reciclados na obtenção de concretos leves. No estudo foram utilizados dois tipos de agregados, um proveniente de blocos vazados de concreto com EPS e outro de blocos cerâmicos. Em ambos os casos foi possível obter concreto leve sem função estrutural, mas aplicáveis, por exemplo, em painéis e blocos.

No trabalho de [Oliveira et al. \(2010\)](#) foram testadas diversas fibras, como de bagaço de cana-de-açúcar, cama de frango e casca de arroz como aditivos minerais substitutos ao cimento Portland na produção de compósitos fibrosos e concreto leve, obtendo resultados satisfatórios para a cinza de casca de arroz.

[Uchôa et al. \(2015\)](#) realizou um estudo para identificar quais materiais reciclados têm sido utilizados em painéis de vedação de concreto leve. Foi observado o uso de diversos materiais sendo os mais citados o EPS, proveniente de embalagens térmicas, o EVA, da indústria calçadista, a escória da indústria siderúrgica e flocos de borracha provenientes do descarte de pneus.

Em [Siqueira Maia et al. \(2004\)](#), se testaram amostras de blocos de concreto com adição de poliuretano e estudaram suas propriedades mecânicas usando microscopia eletrônica, concluindo sua viabilidade, porém, sinalizando o desafio de manter a resistência mecânica e o índice de absorção quando o agregado leve é incluído no material. Também, [Fioriti et al. \(2007\)](#), estudou as características de um concreto leve para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. Seus resultados mostraram queda na resistência à compressão,

mas, grande capacidade de absorção de energia (tenacidade).

Um trabalho interessante foi desenvolvido por [Choi et al. \(2009\)](#), 2009, caracterizando argamassas e concretos com agregados finos com restos de garrafas de polyethylene terephthalate (PET) sinalizando como melhor resultado, uma maior eficiência estrutural (taxa de compressão/densidade) que o concreto de referência para o concreto leve com 25% de resíduo de agregado.

Quanto ao uso de resíduos de Ethylene Vinyl Acetate (EVA) provenientes da indústria calçadista na construção civil, [Greven e Garlet \(1997\)](#) apresentam-se como pioneiros no estudo. Os autores pesquisaram os efeitos da aplicação de EVA no concreto e concluíram uma significativa diminuição na resistência mecânica do mesmo. Diante deste resultado foi proposta a utilização do concreto leve obtido em funções onde a baixa densidade do material seja essencial e a solicitação de cargas seja reduzida como, por exemplo, em locais onde seja necessário o isolamento térmico e acústico, enchimento de vãos e confecção de placas para forros.

[Santiago \(2008\)](#), ao estudar a possibilidade de utilizar agregados de EVA e RCD (Resíduos de construção e demolição) para obtenção de concretos leves observou que, para as quantidades de agregados analisadas, todos os traços contendo EVA resultaram em concretos com massa específica inferior a 2000 kg/m^3 o que não foi observado para concretos com RCD. Além disso, foi possível perceber que, quanto maior o teor de agregados naturais substituídos, maior o teor de ar incorporado, menor a massa específica do material final e maior foi relação água/cimento.

[Rocha et al. \(2013\)](#), estudaram blocos de pré-moldados que chamaram de EVAi, para alvenaria intertravada e analisaram sua produção, desempenho e importância no projeto de habitação social. Já [Pimentel et al. \(2006\)](#), tinham proposto blocos de vedação, com novas dimensões, usando resíduos de EVA, como uma solução produtiva.

A escolha de um material como EVA nas misturas de concreto leve se deve principalmente as vantagens que pode oferecer na:

- Melhoria no conforto térmico e acústico nas edificações;
- Redução das cargas na estrutura devido à reduzida massa específica do agregado de EVA;
- Redução da quantidade de resíduos de EVA dispostos em aterros;
- Redução no impacto ambiental gerado pela constante extração de agregados naturais de jazidas.

Soluções comerciais já têm sido propostas, como é o caso de pequenas empresas como a Solid Sound ([SOLID SOUND, 2013](#)) que comercializa blocos de concreto leves

para construção de locais que requerem isolamento acústico ou Juno EPCR que também comercializa misturas de concreto leve, incluindo aqueles com restos de EVA.

Porém, em estudos realizados recentemente ([SILVA et al., 2013](#); [COSTA et al., 2016](#); [ANDRADE; GUIMARÃES, 2017](#)) e naqueles mencionados anteriormente ([GREVEN; GARLET, 1997](#); [PIMENTEL et al., 2006](#); [SANTIAGO, 2008](#); [ROCHA et al., 2013](#)) sinalizam a redução da resistência à compressão nos compósitos cimentícios leves produzidos com EVA.

2.3 Fibras naturais como elementos de reforço

Mesmo considerando todas as suas vantagens, o concreto, e em específico o concreto leve, possui algumas limitações importantes. Entre elas temos sua reduzida capacidade de deformação e a facilidade de propagação das fissuras quando sob ação de esforços de tração ([SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013](#)). Uma solução para tal situação é a adição de fibras à matriz cimentícia para atuar como ponte de tensões.

De acordo com [Neville \(2013\)](#), as fibras são materiais que se caracterizam por possuírem grande razão entre comprimento e diâmetro e que, quando adicionadas ao concreto agem como elementos de reforço, aumentando sua resistência à fissuração e à fadiga, sua tenacidade além de reduzir a retração.

O concreto reforçado com fibras (CRF) pode ser definido como um material que possui o cimento como meio aglomerante onde estão inseridos os agregados e fibras descontínuas discretas. Estas fibras podem ser obtidas a partir de materiais sintéticos como o aço, propileno e vidro ou a partir de materiais naturais como sisal, celulose, coco e piaçava ([NEVILLE, 2013](#); [MEHTA; MONTEIRO, 2014](#)).

Para [Pardini e Levy Neto \(2006\)](#), as fibras sintéticas ainda apresentam desempenho estrutural superior ao das fibras naturais, porém, vantagens como baixa massa específica, maciez e abrasividade reduzida, além de serem biodegradável, não tóxica e reciclável, consumir pouca energia na produção e, principalmente, o baixo custo tem tornado as fibras vegetais um recurso interessante para o reforço de materiais cimentícios.

De acordo com [Beraldo et al. \(2000\)](#), é possível obter grande parte das fibras a serem utilizadas como elemento de reforço a partir de resíduos provenientes de setores agrícolas e industriais. Sua utilização permite o reaproveitamento deste material evitando seu descarte no meio ambiente.

Diante disso, [Savastano Júnior e Pimentel \(2000\)](#), identificaram, a partir de um levantamento realizado junto aos principais centros brasileiros produtores e/ou processadores de fibra, oito diferentes tipos de fibras com o maior potencial para

aplicação em matrizes cimentícias. São elas: sisal, piaçava, coco, algodão, celulose de eucalipto, rami, banana pseudocaule e malva.

As fibras de sisal e coco foram as primeiras a despertar interesse nos pesquisadores, existindo uma grande variedade de pesquisas voltadas tanto para o comportamento de concretos e argamassas reforçadas com essas fibras, quanto para a durabilidade das mesmas na presença de meio alcalino (COUTTS; WARDEN, 1992; TOLÊDO FILHO et al., 2000; PIMENTEL, 2004; TONOLI et al., 2007; SILVA et al., 2014; BORGES, 2017).

Já o caso da piaçaba começa a estudar-se a partir de 2010, aproximadamente. As fibras de piaçava ou piaçaba são obtidas a partir da folha da palmeira *Attalea funifera* uma espécie endêmica do litoral dos estados da Bahia, Sergipe e Alagoas encontrada dentro de uma faixa estreita da Mata Atlântica (GUIMARÃES; SILVA, 2012). A Figura 3 (a) apresenta as fibras de piaçava e 3 (b) piaçaveiras.



Figura 3 – (a) Fibras de piaçava; (b) Palmeira *Attalea funifera*.

Fonte: Nascimento et al. (2012).

No Brasil, a produção da fibra de piaçava chegou a 45.644 toneladas em 2016 (IBGE, 2016). A extração das fibras é voltada, principalmente, para a produção de vassouras, escovas, tapetes, cordas e telhados sendo que os resíduos provenientes do beneficiamento das fibras, cerca de 30% (13.693 toneladas), são queimados ou descartados em aterros (REIS; CARNEIRO, 2013; SAVASTANO JÚNIOR; PIMENTEL, 2000).

Na Bahia, a produção atingiu 42.983 toneladas em 2016 sendo, a região sul, responsável por, aproximadamente, 98,7% da produção de todo estado (42.407 toneladas) (IBGE, 2016).

A expressiva participação do estado da Bahia, mais especificamente da região sul do estado, na produção nacional de piaçava, associada à necessidade de uma melhor

disposição do material de refugo gerado pelo beneficiamento da fibra e à possibilidade de utilização como material de reforço em compósitos cimentícios, atraiu a atenção de diversos pesquisadores.

[Reis e Carneiro \(2013\)](#) avaliaram a possibilidade de utilizar a borra da piaçava como elemento de reforço em argamassas poliméricas. Foram analisados os mecanismos de fratura e endurecimento de compostos contendo 1%, 2%, 5%, 10% e 15% de fibras em substituição em peso de areia, sendo possível observar uma melhora no comportamento à flexão.

Trabalhos como de [Silva et al. \(2011\)](#), [Silva et al. \(2013\)](#), [Santos et al. \(2015\)](#), [Santos et al. \(2016\)](#), [Mendonça \(2016\)](#), [Loureiro \(2016\)](#), [Dias \(2017\)](#) analisam as características de compósitos leves reforçados com fibras de piaçava.

2.4 Microtomografia de Raios X

A radiografia convencional, a tomografia computadorizada (CT) e a microtomografia computadorizada de raios X (μ CT) são técnicas que consistem na capacidade que os materiais têm de absorver os raios X de maneira diferente dependendo da sua composição química e densidade ([REIS NETO et al., 2011](#)).

Inicialmente desenvolvida para auxiliar em diagnósticos médicos, a μ CT tem sido utilizada como uma técnica de análise não destrutiva que permite a investigação da estrutura interna de materiais.

Entende-se por ensaios não destrutivos (END), as técnicas de inspeção aplicadas aos materiais sem que haja danos físicos ou mecânicos. Entre as técnicas de END mais utilizadas estão a emissão acústica, a técnica de líquido penetrante, o ultrassom, a termografia e a radiografia ([ABENDI, 2017](#)).

Na (μ CT), o objeto é colocado entre uma fonte emissora de raios X e um detector e rotacionado em 360°. A cada rotação é gerada uma projeção obtida a partir dos valores de radiação absorvidos pela amostra coletados pelo detector ([DOMINGUEZ et al., 2017](#)). Com o uso de algoritmos de reconstrução se obtém centenas de imagens bidimensionais que correspondem às seções transversais do objeto. A sobreposição destas imagens permite a visualização tridimensional da estrutura interna da amostra ([WOLSKI et al., 2014](#)).

Esta técnica permite a obtenção de imagens em alta resolução, segundo [Paulus et al. \(2000\)](#) 50 microns ou menos, num rápido processo de aquisição. Por esta razão tem sido uma ferramenta interessante para a análise da estrutura interna de materiais heterogêneos onde as propriedades da microestrutura são extremamente difíceis de quantificar ([LANDIS, 2004](#)).

De acordo com [Pereira et al. \(2016\)](#) a partir da análise de imagens geradas por μ CT pode-se obter informações a respeito dos grãos, vazios, fraturas, defeitos e minerais presentes nos materiais, além de permitir quantificar algumas de suas propriedades como porosidade, permeabilidade e elasticidade.

Por muito tempo, a utilização da μ CT como técnica de análise de materiais, era, principalmente, voltada para o estudo de rochas sedimentares trazendo resultados satisfatórios ([WELLINGTON et al., 1987](#); [ARGANDOÑA et al., 2003](#); [GEET et al., 2000](#); [REIS NETO et al., 2011](#); [PALOMBO et al., 2015](#)). Em compósitos cimentícios, esta técnica vem sendo utilizada há algumas décadas para análise da microestrutura de concretos e argamassas.

Na análise de argamassas, [Bentz et al. \(1994\)](#), ao utilizarem a microtomografia de raios X para investigar a microestrutura tridimensional (3D) de uma argamassa exposta ao ataque de sulfatos com a resolução de 10 μ m, conseguiram obter as principais características da amostra.

[Wolski et al. \(2014\)](#) utilizaram uma fonte de raios X *synchrotron* para obter imagens 3D de uma argamassa com incorporação de contas de vidro. Através da análise da estrutura interna de poros e propriedades de interface foi possível quantificar suas influências na resistência e fratura.

[Lu et al. \(2006\)](#) analisaram a estrutura física da rede de poros na argamassa com o intuito de identificar características que possibilitassem a prever o transporte de íons de cloreto e, conseqüentemente, a durabilidade do material. Para isto, foram analisadas as imagens 3D obtidas a partir de um microtomógrafo, de 4 tipos de argamassa, em resoluções espaciais de 1 e 4 μ m.

[Dominguez et al. \(2017\)](#), [Santos et al. \(2015\)](#) e [Silva et al. \(2013\)](#) utilizaram técnicas de processamento de imagens para caracterizar argamassas leves produzidas com grãos de EVA e reforçadas com fibras de piaçava. Neste trabalho, técnicas de processamento de imagens são utilizadas para o estudo da porosidade em concretos leves reforçados com fibras de piaçava.

2.5 Processamento de Imagens

O termo processamento de imagens refere-se à aplicação de diversas operações sequenciais em imagens digitais, a partir de um computador, com o objetivo de extrair informações ([SILVA, 1996](#)). É importante ressaltar que a determinação das operações que deverão ser aplicadas nas imagens depende da imagem utilizada bem como das informações que se deseja obter.

A aplicação de técnicas de processamento em imagens digitais tem possibilitado

a solução de problemas práticos de diversas áreas como medicina, geologia, geografia, biologia, engenharia, ciência dos materiais, entre outras (NEVES; PELAES, 2001). O uso destas técnicas para a determinação de características dos materiais, como é o caso da porosidade, usando imagens de tomografia está sendo explorada.

A primeira etapa do processamento de imagens consiste na aquisição das mesmas onde pode ser utilizado um tipo de sensor para digitalização como um scanner, uma câmera de TV, um tomógrafo, entre outros.

De acordo com Marques Filho e Vieira Neto (1999), a imagem obtida na etapa de aquisição pode apresentar imperfeições que diminuem sua qualidade como ruído, inadequados contraste e brilho, entre outros. Para diminuir estas imperfeições, operações matemáticas podem ser efetuadas diretamente aos valores de intensidade dos *pixels* (operações de baixo nível). Essa etapa é denominada pré-processamento.

A próxima etapa consiste na segmentação, onde as imagens são divididas em partes para identificar os objetos ou regiões de interesse para sua posterior classificação e análise na etapa final do processamento de imagens (SILVA, 1996). A seguir serão apresentados os fundamentos das operações aplicadas nas imagens microtomográficas utilizadas neste trabalho.

2.5.1 Imagens Digitais

Uma imagem digital monocromática pode ser descrita como uma função de intensidade de luz $f(x, y)$ onde x e y denotam coordenadas espaciais e o valor de f no ponto (x, y) é proporcional ao brilho (ou nível de cinza) da imagem neste ponto (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

Uma imagem digital é formada por uma finidade de pontos onde cada ponto é denominado elemento de imagem ou *pixel* (*picture elements*). Segundo Jähne (2002), as posições de cada pixel seguem a notação de matriz, onde o primeiro índice m representa a posição de uma linha e o segundo índice n representa a posição de uma coluna. Os valores de m e n variam de 0 até $m - 1$ e de 0 até $n - 1$, respectivamente. Desta forma, uma imagem digital em tons de cinza é formada por $m \times n$ pixels que possuem valores que podem variar, por exemplo, no intervalo de 0 a 255. A Figura 4 apresenta uma imagem monocromática com sua representação matricial.

Nestas imagens diversas operações podem ser realizadas para eliminar ruídos ou destacar detalhes. Este é o caso das operações aritméticas, de limiarização, da análise de histograma ou transformação de intensidade.

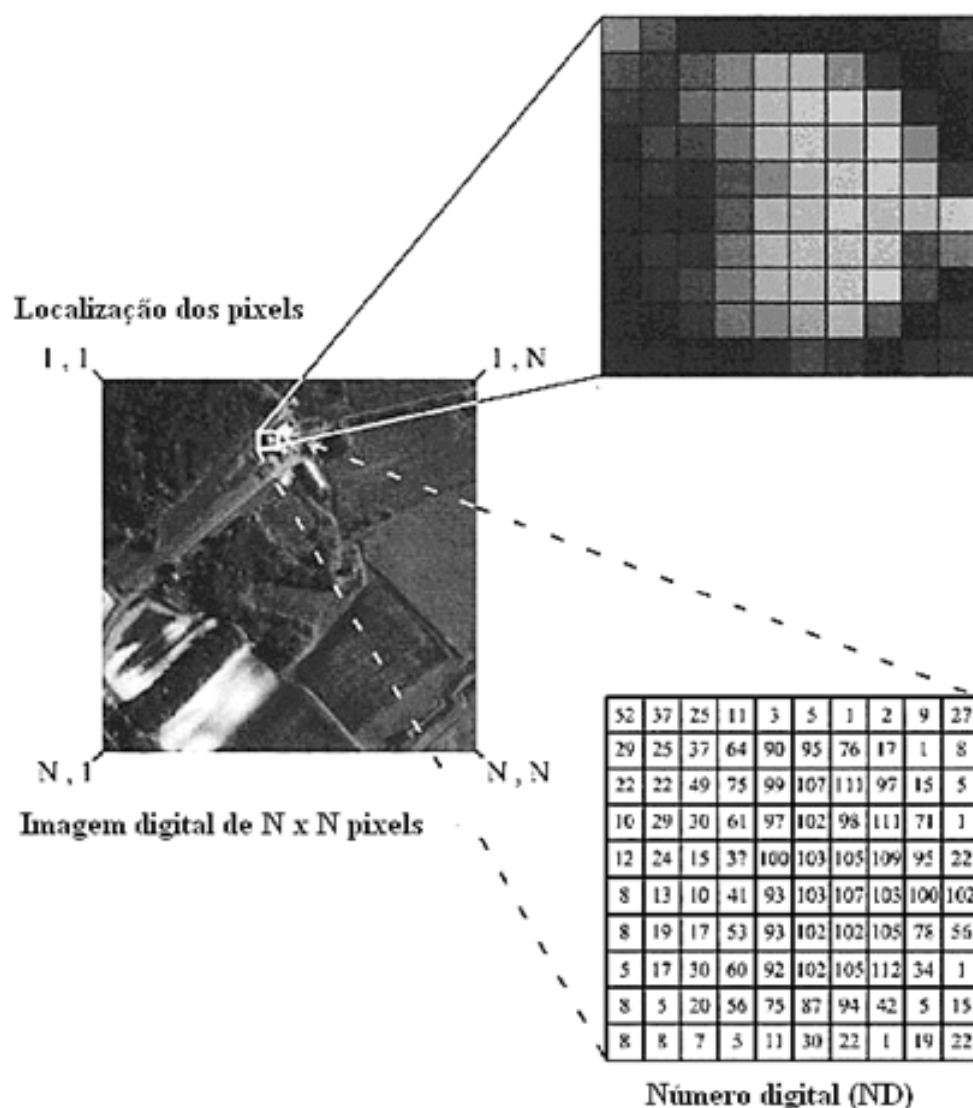


Figura 4 – Imagem digital com sua respectiva representação matricial.

Fonte: [IPMA \(2018\)](#).

2.5.2 Operações Aritméticas

Entendendo uma imagem como uma matriz de números inteiros, é possível manipular os valores de seus *pixels* numericamente utilizando operações aritméticas. De acordo com [Gonzalez e Woods \(2010\)](#), as operações aritméticas envolvem uma ou mais imagens são realizadas *pixel a pixel* correspondentes.

Assim, duas imagens de mesmo tamanho X e Y podem ser processadas e produzir uma terceira imagem, Z , utilizando as operações de soma, subtração, multiplicação e divisão ([MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999](#)). A Figura 5 apresenta o processo de multiplicação de duas imagens com o intuito de destacar regiões.

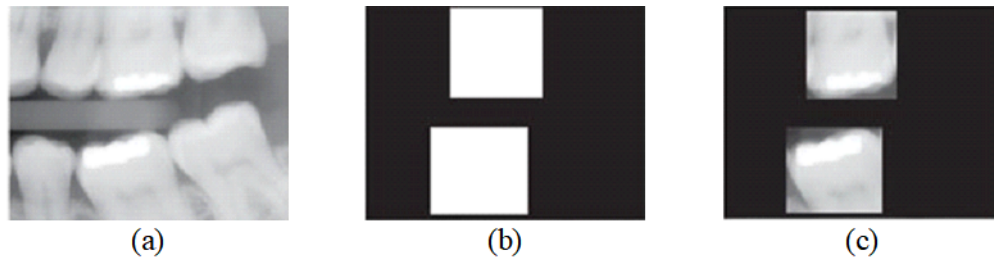


Figura 5 – Multiplicação de imagens: (a) imagem digital radiológica; (b) imagem binária com duas regiões de interesse; (c) Resultado da multiplicação das imagens (a) e (b).

Fonte: [Gonzalez e Woods \(2010\)](#).

2.5.3 Histograma

O histograma de uma imagem é o gráfico de frequência que fornece, para cada valor de nível de cinza, a quantidade de *pixels* correspondentes ([SILVA, 1996](#)). De acordo com [Neves e Pelaes \(2001\)](#), a visualização do histograma permite inferir a respeito da qualidade da imagem, quanto ao seu nível de contraste e quanto ao seu brilho médio. Além disso, a análise do histograma de uma imagem pode fornecer informações bastante úteis na etapa de segmentação ([GONZALEZ; WOODS, 2010](#)).

De acordo com [Gonzalez e Woods \(2010\)](#), calcular um histograma é algo simples e sua manipulação pode ser utilizada para realçar imagens através da transformação de intensidades. Na Figura 6 são apresentados quatro tipos básicos de imagem: escura, clara, baixo contraste e alto contraste.

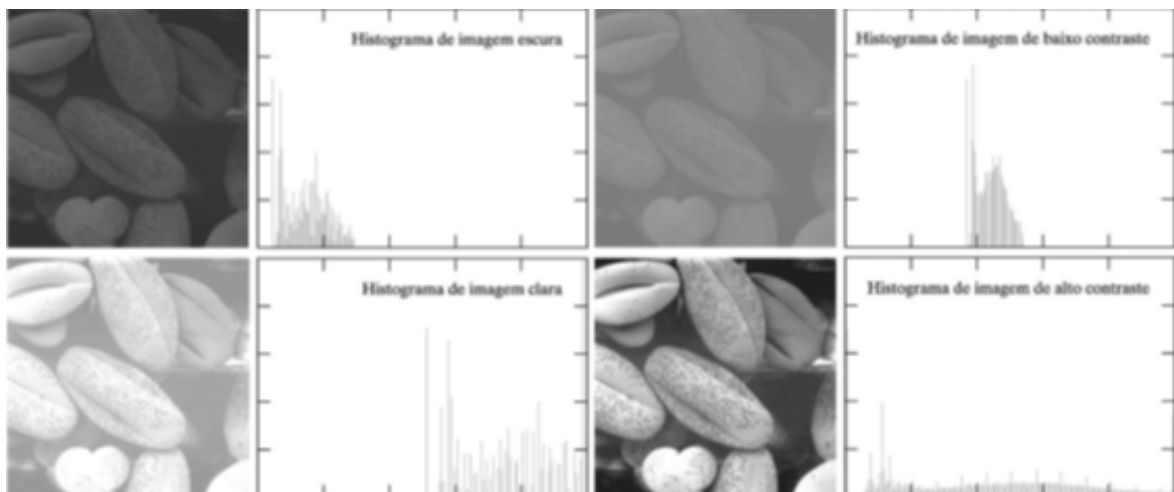


Figura 6 – Tipos básicos de imagem em relação à intensidade.

Fonte: [Gonzalez e Woods \(2010\)](#).

2.5.4 Transformações de Intensidade

De acordo com [Gonzalez e Woods \(2010\)](#), as técnicas utilizadas no processamento de imagens podem ocorrer em dois tipos de domínio, o domínio espacial e o domínio da transformada. Ainda segundo os autores, o domínio espacial representa o próprio plano da imagem onde as técnicas de processamento são aplicadas diretamente aos seus *pixels*. Já o processamento no domínio da transformada requer que uma imagem seja transformada no domínio da transformada, processada nesse domínio e, em seguida, seja obtida a transformada inversa para que a imagem retorne ao domínio espacial.

Das técnicas de processamento de imagens no domínio espacial, as técnicas de transformações de intensidade estão entre as técnicas mais simples e permitem a manipulação do contraste de maneira a realçar imagens podendo ser descritas pela equação 1:

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (1)$$

onde $f(x, y)$ representa a imagem de entrada, $g(x, y)$ a imagem de saída e T é uma função de transformada de intensidade que irá mapear cada *pixel* de tom de cinza da imagem de entrada em um novo tom de cinza na imagem de saída ([MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999](#)).

As transformações de intensidade podem ser classificadas em transformações lineares ou não-lineares. Uma transformação não-linear é uma operação pontual onde o mapeamento da intensidade de cada pixel que compõe a imagem em outro valor de intensidade é realizado através de uma função não-linear. Em contrapartida, uma transformação linear realiza o mapeamento através de uma função linear.

Um exemplo de função linear é a transformação de alargamento de contraste que consiste na expansão da faixa de níveis de intensidade de uma imagem de maneira que todo o intervalo de intensidades seja abrangido ([GONZALEZ; WOODS, 2010](#)). Para essa operação é necessário, primeiramente, determinar os limites inferior e superior do histograma da imagem de entrada para que estes possam ser expandidos.

A função de alargamento pode ser descrita da seguinte forma da equação 2:

$$m = a.n + b \quad (2)$$

onde a inclinação da reta, a , é o nível de contraste que será imposto à imagem original $f(x, y)$, n é o valor do pixel na imagem original, m é o valor do mesmo *pixel* após transformação e b é a variável que controla a intensidade global da imagem de saída. Valores de a superiores a 1 causam aumento no contraste da imagem enquanto valores menores que 1 causam diminuição no contraste da imagem.

2.5.5 Limiarização

Neves e Pelaes (2001), o processo de segmentação consiste em subdividir uma imagem em suas partes podendo ser uma das etapas mais complicadas do processamento. A segmentação de uma imagem permite a discriminação de objetos tanto entre si quanto em relação ao *background* (QUEIROZ; GOMES, 2006).

Os algoritmos de segmentação são baseados na propriedade de descontinuidade onde presume-se que seja possível a detecção das fronteiras das regiões devido às descontinuidades em intensidades ali presentes e, na propriedade de similaridade, onde a imagem é dividida em regiões que sejam semelhantes de acordo com critérios preestabelecidos (GONZALEZ; WOODS, 2010).

Dentre as técnicas que se baseiam na segmentação por regiões encontra-se a limiarização ou *thresholding* onde os *pixels* recebem o valor 0 ou 1 a partir de um valor de intensidade limiar (T) resultando em uma imagem binária onde os objetos de interesse são separados do restante da imagem. Quando o valor de T é constante e pode ser aplicado a toda imagem o processo de limiarização é denominado global (GONZALEZ; WOODS, 2010).

Para Silva (1996), a partir da análise do histograma de uma imagem é possível determinar o limiar (T) mais conveniente para a binarização. A Figura 7 mostra uma imagem em tons de cinza com seu respectivo histograma e duas outras imagens binárias obtidas com diferentes valores de *threshold*. Note que para valores diferentes de limiar, resultados diferentes são obtidos devendo sua escolha ser realizada com cautela.

2.5.6 Morfologia Matemática

Para auxiliar na extração destas informações pode-se utilizar a morfologia matemática. Esta ferramenta, baseada na teoria dos conjuntos, consiste na aplicação de operações matemáticas às imagens de maneira a ressaltar aspectos específicos das formas, pela transformação através de um conjunto definido denominado elemento estruturante, para que estas possam ser analisadas (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999). O elemento estruturante é tido como um pequeno conjunto ou subimagem que possui forma e tamanhos definidos que são comparados aos conjuntos (objetos) presentes na imagem modificando sua forma e seu tamanho (GONZALEZ; WOODS, 2010).

As operações morfológicas básicas são as operações de dilatação e erosão. As operações de dilatação e erosão são basicamente responsáveis por expandir e encolher uma imagem, respectivamente. Na operação de dilatação o elemento estruturante percorre toda a região de interesse e, caso algum *pixel* preto seja vizinho a um *pixel* branco, ele é invertido na imagem de saída fazendo com que os objetos cresçam em área

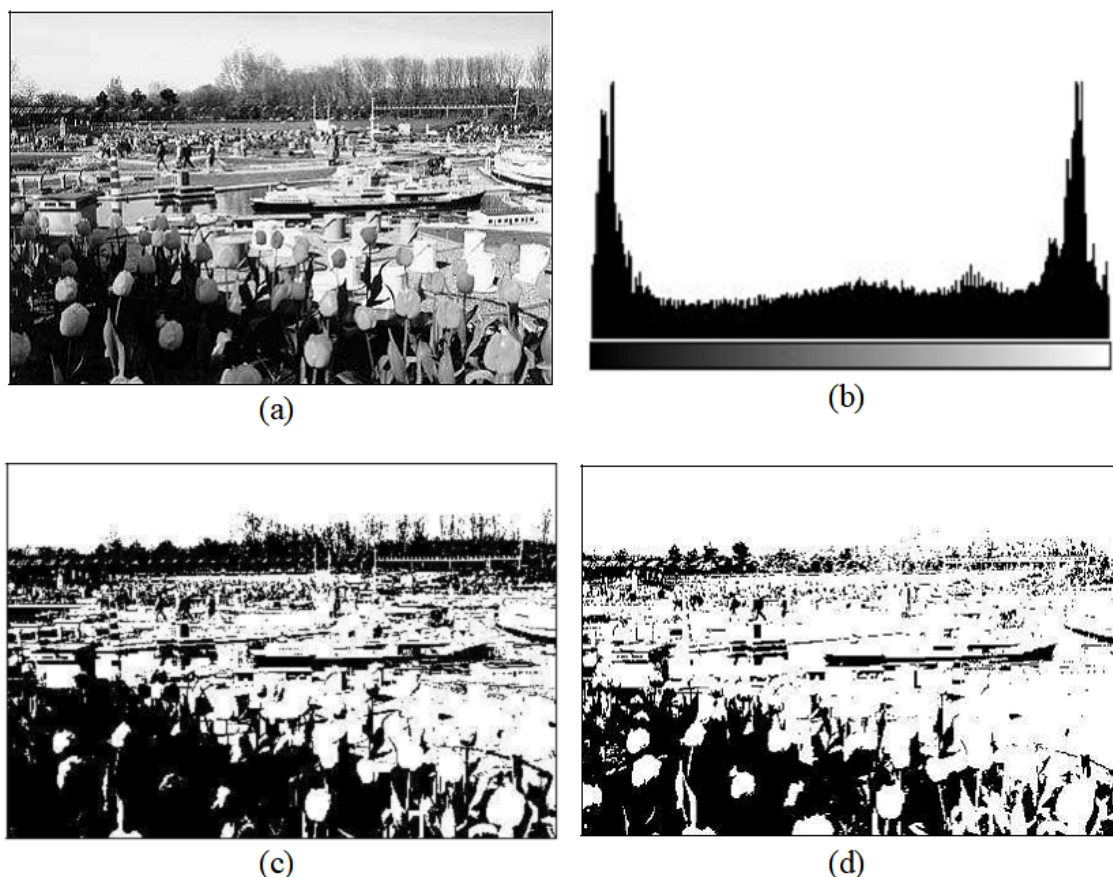


Figura 7 – Efeitos da escolha do limiar na binarização de imagens monocromáticas: (a) imagem em tons de cinza; (b) histograma correspondente à imagem (a); (c) e (d) imagens binárias obtidas com os limiares 128 e 64, respectivamente.

Fonte: [Marques Filho e Vieira Neto \(1999\)](#)(Adaptado).

e os buracos diminuem ou sejam eliminados. Já na operação de erosão, cada *pixel* branco presente na borda do objeto analisado, caso tenha pelo menos um vizinho branco, é invertido na imagem saída fazendo com que os objetos diminuam ou sejam eliminados e os buracos aumentem ([GOMES, 2001](#)).

A Figura 8 apresenta uma imagem *A* passando pelas operações de erosão e dilatação através de um elemento estruturante *E* (3x3) bem como as respectivas imagens resultantes.

De acordo com [Silva \(1996\)](#), estas operações, quando utilizadas em conjunto, produzem vários efeitos nas imagens. Duas importantes operações morfológicas são as operações de abertura e fechamento. O processo de abertura, caracterizado pela aplicação da operação morfológica de erosão seguida de uma dilatação, é geralmente utilizado para suavizar o contorno de um objeto, romper os istmos e eliminar saliências finas. Já o processo de fechamento, obtido a partir de uma operação de dilatação seguida de erosão, também é utilizado com intenção de suavizar contornos, porém, ao contrário

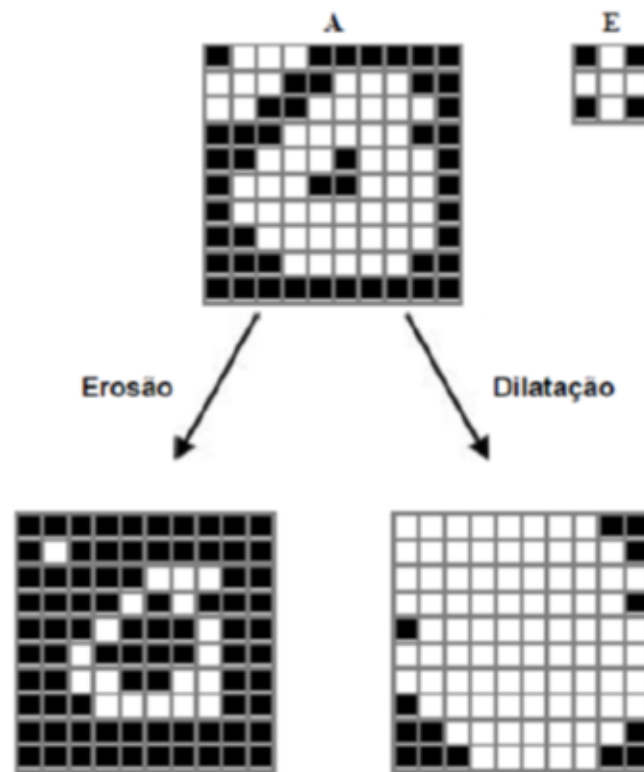


Figura 8 – Operações de erosão e dilatação na imagem A pelo elemento estruturante E.

Fonte: [Gomes \(2001\)](#).

da operação de abertura, une as discontinuidades estreitas e alonga os golfos finos, elimina pequenos buracos e preenche lacunas.

2.5.7 Representação e Descrição

Na última etapa do processamento de imagens, as regiões resultantes da etapa de segmentação devem passar pelo processo de representação e descrição para que as informações possam ser extraídas.

De acordo com [Gonzalez e Woods \(2010\)](#), uma imagem pode ser representada de duas formas: em termos de suas características externas, enfatizando a forma da região e, em termos das características dos *pixels* que compõem a região de maneira a enfatizar características como cor e textura. Após a escolha do tipo de representação para a região, essa representação deve ser descrita em relação suas respectivas características.

Os descritores utilizados para caracterizar a fronteira de uma região são denominados descritores de fronteira. Entre os descritores de fronteira mais simples encontram-se o eixo maior e o eixo menor. O eixo maior de uma fronteira é o nome dado à linha que conecta os dois pontos extremos que compõem o diâmetro da fronteira. Já o eixo menor é dado pela linha perpendicular ao eixo maior com um comprimento

tal que uma caixa que passa pelos quatro pontos exteriores da interseção entre as duas linhas envolve completamente a fronteira (GONZALEZ; WOODS, 2010). A razão entre o eixo menor e o eixo maior dá origem a outro descritor básico de fronteira denominado excentricidade.

Com relação aos descritores regionais (descrevem regiões de uma imagem), a área é um dos descritores mais simples e pode ser definido como a quantidade de *pixels* presentes na região.

Segundo Gonzalez e Woods (2010), a análise da textura de uma região é uma abordagem interessante na descrição uma imagem podendo ser divididas em abordagem estatística, abordagem estrutural e abordagem espectral.

O atributo de textura pode ser representado de forma estatística utilizando-se medidas estatísticas fornecidas pelo histograma de uma imagem ou região. Uma das medidas estatísticas mais simples é a média que pode ser obtida a partir da soma da intensidade de cada *pixel* presente na região de interesse dividida pelo número de *pixels* que compõem essa região.

3 Materiais e Métodos

Nesta seção comentaremos as principais características dos corpos de prova produzidos, assim como o processo de obtenção das microtomografias. Logo, detalharemos os principais passos do processamento das imagens microtomográficas, a eliminação de ruídos, o realce dos elementos, assim como a segmentação para a separação dos objetos no concreto (poros, EVA, fibras e brita).

Para a confecção dos corpos de prova deste trabalho foram utilizados 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 2 cm.

A incorporação do EVA e das fibras de piaçava ao traço do concreto foi realizada por substituição em volume do agregado graúdo. O concreto sem adição de fibra e/ou grãos de EVA foi denominado concreto referência. Para os grãos de EF, foram substituídos 0% (Concreto Referência – CR), 5%, 15% e 25%. Para as duas últimas porcentagens (15% e 25%), foi incorporado 1% de fibras de piaçava. Já para os grãos de EG as variações utilizadas foram de 0% (CR) e 15% com 1% de fibra. A Figura 9 apresenta o esquema com as siglas e porcentagens utilizadas na confecção dos corpos de prova.

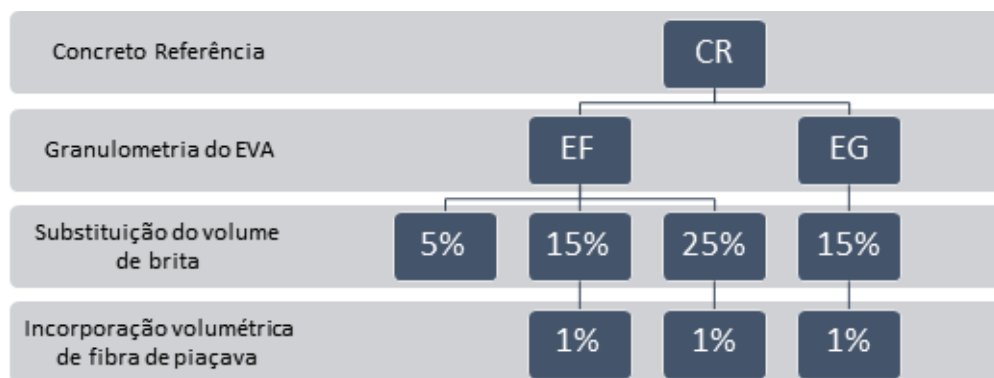


Figura 9 – Esquema das misturas utilizadas no trabalho.

Fonte: Dias (2017). (Adaptado).

Para a identificação de cada corpo de prova, foi utilizado um código dependente da composição de cada mistura. A Figura 10 apresenta o esquema utilizado para criação

deste código. Os 8 códigos de identificação gerados para cada mistura utilizada neste trabalho são apresentados na Tabela 1.

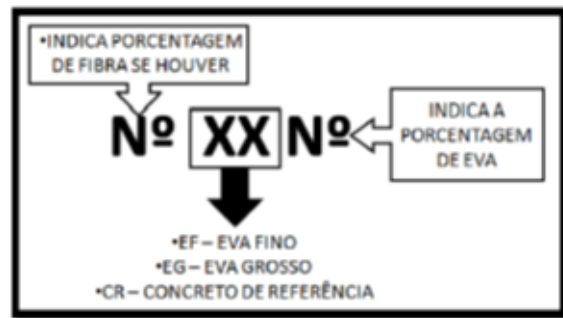


Figura 10 – Esquema para formação do código de identificação das amostras.

Fonte: Dias (2017).

Tabela 1 – Códigos de identificação para cada uma das amostras.

	Grãos de EVA					
	EVA Fino				EVA Grosso	
	Fibras	0%	5%	15%	25%	15%
	0%	CR	EF5	EF15	EF25	EG15
	1%	-	-	1EF15	1EF25	1EG15

O preparo da massa foi realizado manualmente seguindo as orientações descritas pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) para um resistência à compressão de 20 MPa e os corpos de prova foram moldados em fôrmas cilíndricas com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura de acordo como a NBR 5738 (ABNT, 2015b).

Todo o processo de produção dos corpos de prova foi realizado por Dias (2017) no Laboratório de Ensaio Mecânicos e Resistência dos Materiais (LEMER) da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC).

As imagens tomográficas foram obtidas através de um scanner de alta energia SkyScan® 1173, versão 1.6, do Laboratório de Instrumentação Nuclear da COPPE na Universidade Federal do Rio de Janeiro. A configuração do aparelho foi ajustada para uma corrente de 80 μ A e uma tensão de 100 kV.

Para ajustar os espécimes ao porta amostra do tomógrafo, foi necessário extrair dos corpos de prova, um testemunho com 25 mm de diâmetro e 40 mm de altura. As projeções foram reconstituídas através do *software* NRecons® versão 1.7.7.0.

Para cada testemunho foram geradas em torno de 2.100 imagens da sua seção transversal, todas em escala de cinza (8 bits) com 2240x2240 *pixels* cada uma. Na Tabela 2 são apresentadas as quantidades de imagens geradas para cada amostra.

Tabela 2 – Quantidades de imagens de cada amostra.

Amostra	Número de imagens
CR	2.215
EF5	2.136
EF15	2.103
1EF15	2,101
EF25	2.089
1EF25	2,168
EG15	2.107
1EG15	2,107

A Figura 11 mostra uma imagem gerada pelo microtomógrafo para cada tipo de mistura ((a) concreto sem adição de EVA e fibra – CR, (b) concreto com adição de 15% de EVA – EF15 e (c) concreto com adição de 15% de e 1% de fibra):

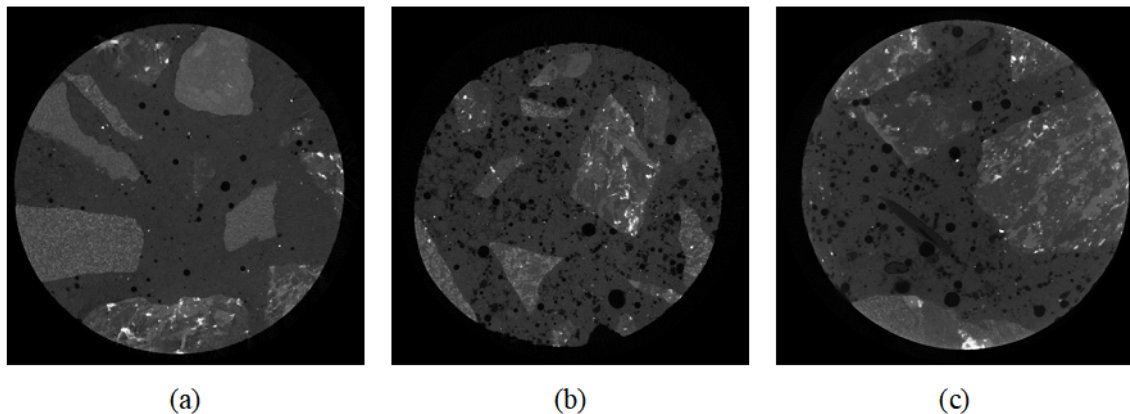


Figura 11 – Imagens geradas pelo microtomógrafo: (a) Concreto sem agregado leve e fibras – CR, (b) Concreto com adição de 15% de agregado leve – EF15, (c) Concreto com adição de 15% de agregado leve e 1% de fibra de piaçava – 1EF15.

3.1 Pré-processamento das imagens microtomográficas

Após a aquisição, as imagens microtomográficas foram ajustadas em relação ao seu contraste. Para isso, os valores de intensidade das imagens foram redistribuídos, de modo que seu histograma ocupasse toda faixa dinâmica de valores de intensidade usados na representação dessas imagens. Este processo, conhecido como alargamento de contraste (vide 2.5.4), fez com que todo o intervalo de intensidades da imagem fossem atingidos. Além disso, 1% dos *pixels* que representam as imagens tiveram seus valores saturados nos valores de intensidades mais altos e mais baixos. O resultado do processo de ajuste das imagens apresentadas na Figura 11 pode ser observado na Figura 12.

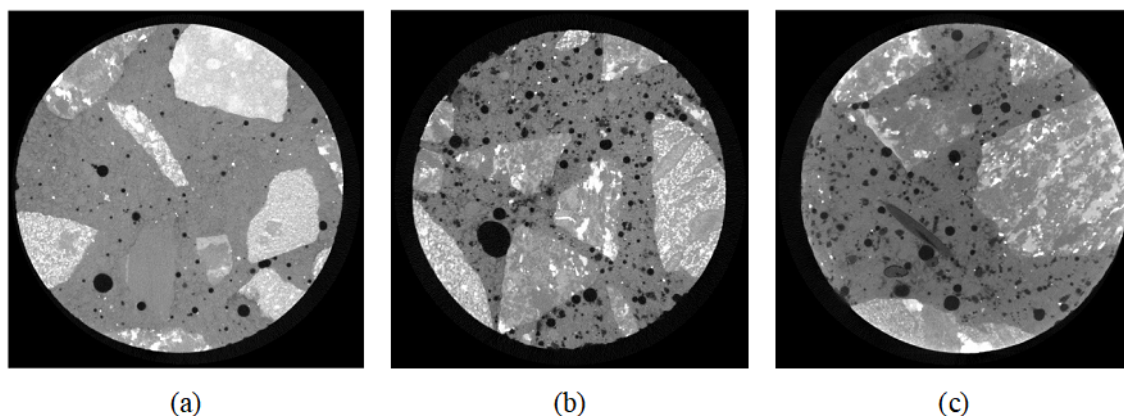


Figura 12 – Imagens ajustadas em contraste: (a) Concreto sem agregado leve e fibras – CR, (b) Concreto com adição de 15% de agregado leve – EF15, (c) Concreto com adição de 15% de agregado leve e 1% de fibra de piaçava – 1EF15.

3.2 Segmentação das imagens microtomográficas

Após o pré-processamento das imagens, elas foram segmentadas para a separação dos elementos (poros, grãos de EVA, fibras e agregado graúdo) contidos no interior da pasta através da binarização das imagens.

Para a determinação do *threshold* utilizado na binarização das imagens com intuito de destacar os poros, grãos de EVA e as fibras, foi necessário realizar uma análise dos histogramas de cada amostra. A Figura 13 apresenta os histogramas obtidos para cada uma das amostras.

Analizando os histogramas é possível perceber que existe uma concentração de *pixels* nos níveis de cinza variando entre 0 e 50, aproximadamente. A análise das imagens em conjunto à análise dos histogramas, permite inferir que estes valores de cinza representam os poros, os grãos de EVA e as fibras.

Além do pico referente aos materiais anteriormente citados, existe um outro pico de concentração de *pixels* referente à matriz cimentícia dos compostos. Este pico possui valores variando entre 100 e 170, aproximadamente.

Diante desta análise foi possível determinar o melhor valor de *threshold* para utilizar na binarização das imagens. Na Tabela 3 são apresentados os valores de *threshold* utilizados na limiarização das imagens com o objetivo de destacar os poros, os grãos de EVA e as fibras.

Nesse processo, todos os *pixels* com valores menores aos utilizados como limiar foram considerados poros, fibras ou EVA e receberam valor 1. Os demais *pixels* encontrados na imagem receberam valor 0.

Após o destaque dos poros, grãos de EVA e fibras, foi realizado o processo de

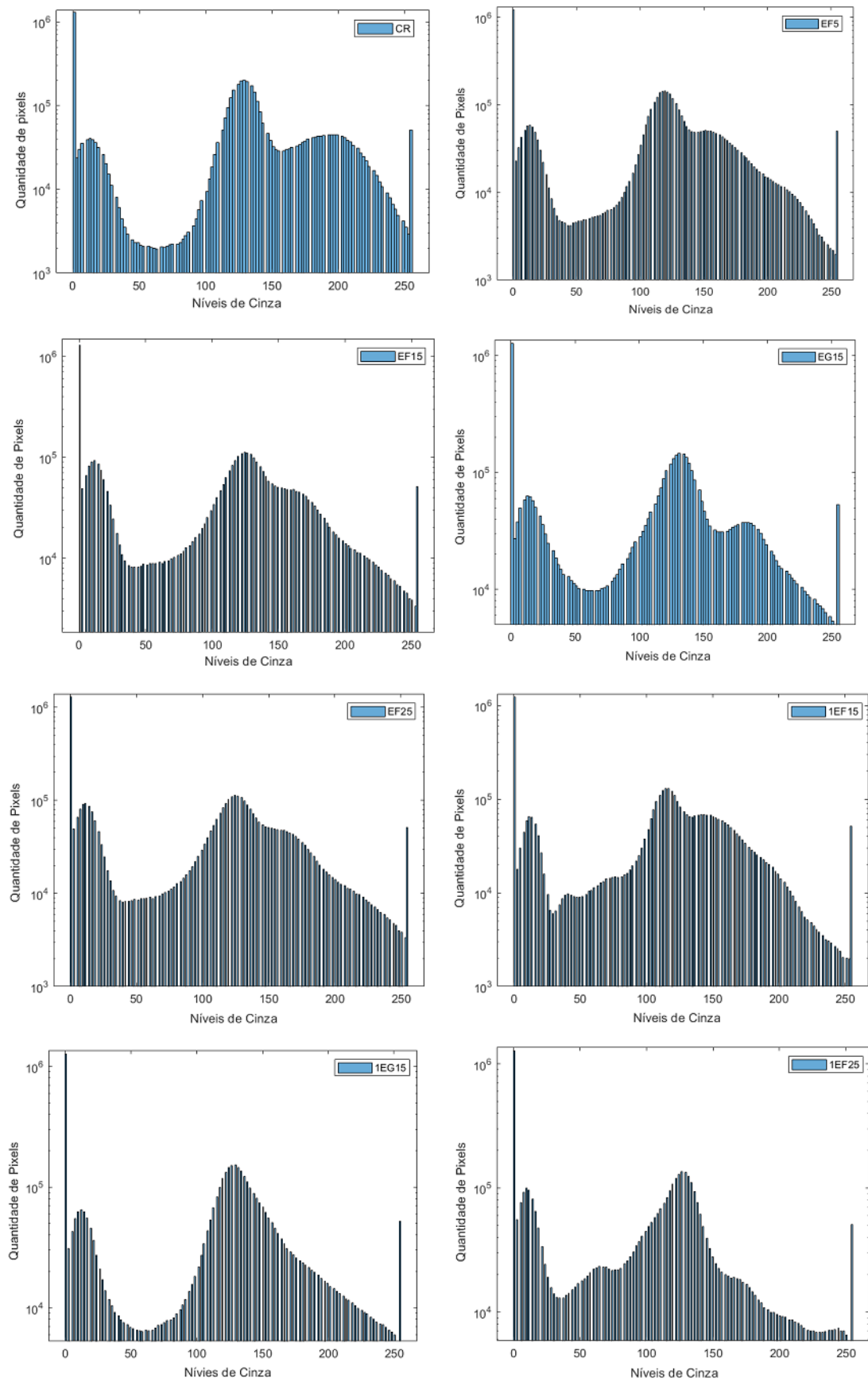


Figura 13 – Histograma das amostras utilizadas no trabalho.

Tabela 3 – Limiar utilizado na binarização das imagens para destacar poros, EVA e fibras.

Amostra	Limiar	Amostra	Limiar
CR	75	EG15	75
EF5	75	1EF15	100
EF15	75	1EF25	80
EF25	75	1EG15	90

binarização das imagens originais com um novo valor de *threshold* com o objetivo de destacar o agregado graúdo das amostras. Para a determinação do limiar ideal para esse processo, foi realizada uma análise dos histogramas das imagens originais de cada amostra. Após alguns testes, foi possível determinar o valor de limiar a ser utilizado na binarização das imagens para destaque das britas. A Tabela 4 apresenta os valores de limiar utilizados para cada amostra.

Tabela 4 – Limiar utilizado na binarização das imagens para destacar o agregado graúdo.

Amostra	Limiar	Amostra	Limiar
CR	57	EG15	60
EF5	59	1EF15	57
EF15	60	1EF25	60
EF25	60	1EG15	58

Ao contrário do que ocorreu no processo para destacar os poros, fibras e EVA, nesse processo todos os *pixels* com valores superiores ao determinado pelo limiar foram considerados como agregado graúdo e receberam valor 1 e os demais receberam valor 0.

A última etapa da segmentação consistiu em filtrar as imagens utilizando operação morfológica de abertura caracterizada pela aplicação do processo de erosão seguido pelo processo de dilatação. Para as amostras com destaque dos poros, EVA e fibras foi utilizado um elemento estruturante circular de raio 3. Já nas amostras binárias que destacam o agregado graúdo foi utilizado elemento estruturante circular de raio 10.

As Figuras 14 e 15 apresentam as imagens obtidas após aplicação dos processos de binarização e morfologia destacando as fibras, poros e grãos de EVA e destacando o agregado graúdo, respectivamente. As Figuras 14 (a) e 15 (a) mostram as imagens do concreto sem EVA e fibras. As Figuras 14 (b) e 15 (b) apresentam o concreto com

adição de 15% de EVA e as Figuras 14 (c) e 15 (c) apresentam as imagens obtidas para o concreto contendo adição de 1% de fibra e 15% de EVA.

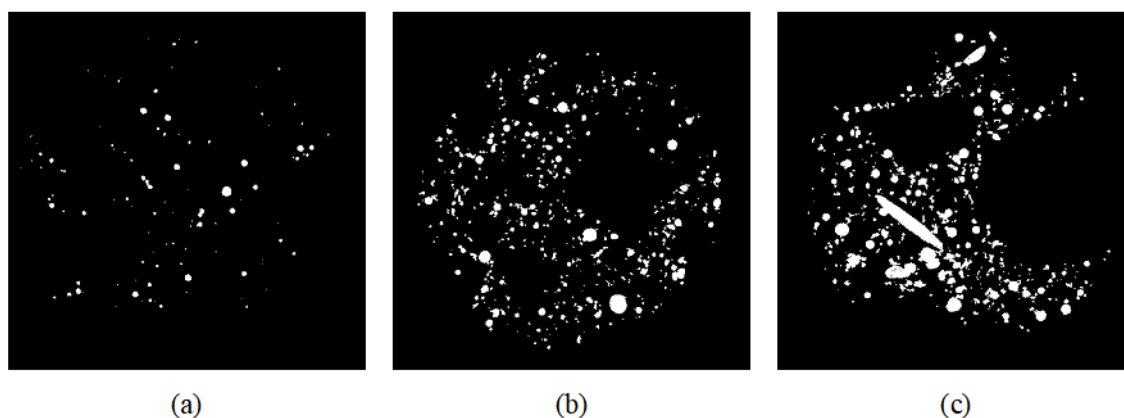


Figura 14 – Imagens binarizadas com destaque para os poros, EVA e fibras: (a) Concreto referência – CR, (b) Concreto com adição de 15% de EVA – EF15, (c) Concreto com adição de 15% de EVA e 1% de fibra de piaçava – 1EF15.

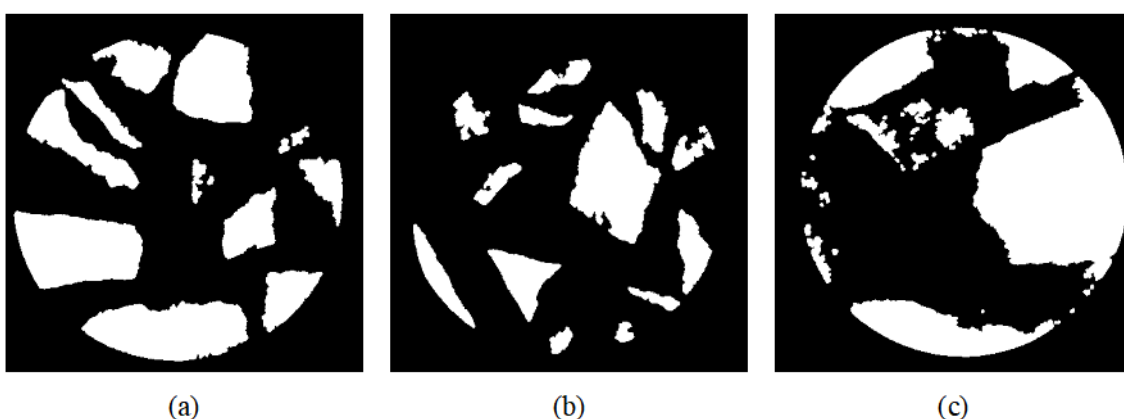


Figura 15 – Imagens binarizadas com destaque para o agregado graúdo: (a) Concreto referência – CR, (b) Concreto com adição de 15% de EVA – EF15, (c) Concreto com adição de 15% de EVA e 1% de fibra de piaçava – 1EF15.

As imagens binárias destacando os agregados graúdos foram salvas para posterior contagem. Já as amostras destacando os poros, grãos de EVA e fibras, passaram por mais algumas etapas de maneira que fosse possível separá-los. Essas etapas são apresentadas a seguir.

3.3 Processamento das imagens microtomográficas

Com os objetos em cada amostra isolados, iniciou-se a etapa de processamento cujo objetivo principal foi separar os poros, grãos de EVA e fibras para posterior contabilização e análise. É importante ressaltar que as imagens referentes a amostra sem adição

de EVA e fibras não participaram desse processo pois todas as regiões destacadas na etapa anterior representam apenas os poros. As imagens do CR serviram apenas para obtenção de informações para o processamento do restante das imagens.

Para atingir o objetivo, o primeiro passo foi criar uma rotina para identificar e rotular as regiões destacadas na etapa anterior. A ideia principal foi realizar uma varredura de toda imagem binarizada de maneira que, quando uma região fosse identificada, os *pixels* contidos nela recebessem uma numeração em uma matriz auxiliar de mesma dimensão da imagem binária. Dessa maneira foi possível analisar cada região individualmente.

Em seguida, para cada região, foram obtidas sua área e sua excentricidade. Além disso, para obter a média dos valores de cinza de cada região foi necessário resgatar os tons de cinza originais de cada pixel contido nesta região. Sabendo que na imagem binária os valores que representam as regiões recebem valor 1 e o restante da imagem recebe valor 0, a imagem ajustada das amostras foi multiplicada pela imagem binária dando origem a uma terceira imagem contendo apenas as regiões em seus tons de cinza originais denominada imagem filtrada. A Figura 16 apresenta as imagens obtidas após o processo de multiplicação das imagens. A Figura 16 (a) apresenta a imagem filtrada do concreto contendo 15% de EVA fino e a Figura 16 (b) apresenta a imagem filtrada da amostra de concreto contendo 1% de fibra e 15% de EVA fino.

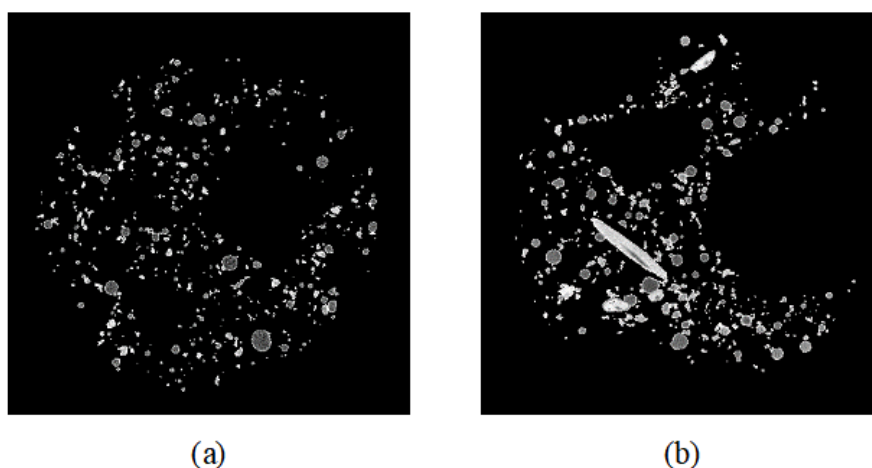


Figura 16 – Imagens filtradas: (a) Poros e grãos de EVA da amostra EF15, (b) Poros, grãos de EVA e fibras da amostra 1EF15.

Obtidos os valores da área, da excentricidade e da média dos valores de cinza de cada região, foi iniciado o processo de classificação de cada região, de cada imagem da amostra, em poro, fibra ou EVA.

Na rotina desenvolvida para a classificação das regiões, o tipo de amostra influenciou diretamente tanto nos critérios utilizados quanto na ordem de aplicação dos

mesmos no momento de identificar os materiais. Diante disso, o processo de classificação dos materiais foi dividido de acordo com os tipos de materiais presentes na amostra: apenas EVA fino, apenas EVA grosso, EVA fino e fibra, EVA grosso e fibra. A seguir são apresentados cada um desses processos.

3.3.1 Amostras contendo apenas EVA fino

Nestas amostras, as primeiras regiões identificadas foram aquelas que representam os poros. Ao calcular a excentricidade das regiões são obtidos valores entre 0 e 1 onde, o valor 0 representa um círculo e o valor 1 representa um segmento de linha. Considerando que os poros são bolhas de ar aprisionadas no interior da pasta e, por isso, possuem uma forma mais arredondada, próxima de um círculo as regiões com valores de excentricidade menores ou iguais a 0,560 foram considerados poros. Esse valor de excentricidade foi determinado a partir da análise das imagens de concreto sem adição de EVA e/ou fibra (Concreto Referência). Na análise verificou-se que os valores de excentricidade dos poros variavam entre 0 e 0,560.

Porém, ao avaliar as imagens que resultaram desse processo, verificou-se que alguns grãos de EVA também poderiam estar sendo considerados poros. Além disso, alguns poros irregulares, resultantes da presença de algum agregado próximo, poderiam não estar sendo levados em consideração. Para contornar essa situação, foi acrescentada à análise da excentricidade, a análise da média dos tons de cinza. Foi verificado que a média dos tons de cinza das regiões que representam os poros nas amostras com adição apenas de EVA fino, era menor ou igual a 185. Assim, caso, em uma região, fosse verificado um valor de excentricidade menor ou igual a 0,560, a região era considerada poro. Caso o valor de excentricidade encontrado fosse maior que 0,560 a média dos valores de cinza dos *pixels* presentes deveria ser menor que 185 para ser considerado poro. Caso contrário, a região seria classificada como EVA fino.

Determinados os poros, as regiões que os representavam foram subtraídas da imagem filtrada deixando apenas as regiões referentes aos grãos de EVA fino.

3.3.2 Amostras contendo apenas EVA grosso

Nas amostras contendo apenas adição de EVA grosso, a classificação das regiões foi realizada apenas a partir da análise da excentricidade pois o EVA grosso possui tons de cinza muito próximos dos tons presentes nos poros não permitindo a análise da média dos tons de cinza das regiões.

Assim, caso fosse verificado que uma região possuía valor de excentricidade menor ou igual a 0,560 ela era considerada poro caso contrário, ela era considerada como EVA grosso.

3.3.3 Amostras contendo EVA fino e fibra

Assim como para as amostras contendo apenas EVA fino, o primeiro passo na classificação das regiões das amostras com adição de EVA fino e fibras foi determinar as que pertenciam aos poros. Regiões com valores de excentricidade maiores que 0,560 e média dos tons de cinza menor ou igual a 185 e, regiões com valores de excentricidade menores ou iguais a 0,560 com média de tons de cinza menor ou igual a 180 foram considerados poros. Determinadas as regiões referentes aos poros, estas foram subtraídas da imagem filtrada, dando origem a uma imagem auxiliar contendo apenas os grãos de EVA fino e as fibras.

Para a separação dos grãos de EVA fino das fibras foi utilizado o valor da área de cada região. Os grãos de EVA fino, ao contrário das fibras, possuem tamanhos reduzidos e, conseqüentemente, áreas reduzidas. Em análise, percebeu-se que as regiões que representam as fibras eram maiores e, portanto, continham mais *pixels* no seu interior. As fibras podem ser encontradas nas amostras nas formas frontal ou lateral e ainda assim possuir mais *pixels* em suas respectivas regiões. A Figura 17 apresenta uma imagem onde são encontradas fibras frontais e laterais. Na rotina, uma região era considerada como grão de EVA caso possuísse área menor que 4200, caso contrário a região era considerada fibra.

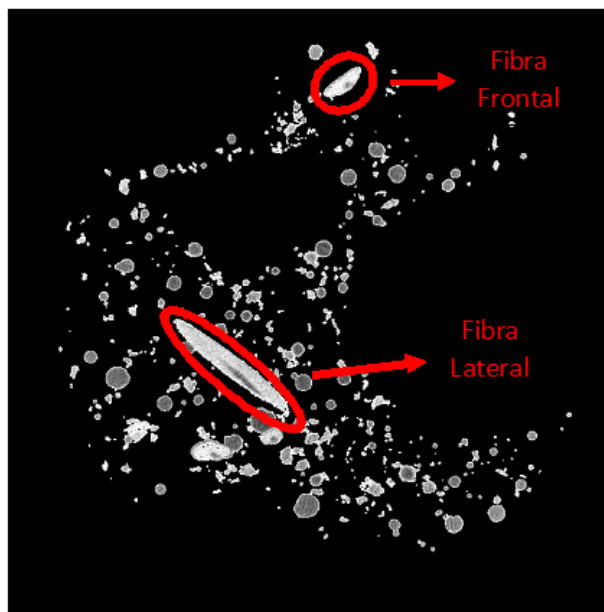


Figura 17 – Vistas frontal e lateral da fibras no interior das amostras.

3.3.4 Amostras contendo EVA grosso e fibra

Ao contrário do que foi realizado nas amostras anteriores, para as imagens microtomográficas da amostra contendo EVA grosso e fibra, a classificação das regiões

foi iniciada pelas fibras. Para a determinação das mesmas foram utilizados os critérios de área e média dos tons de cinza. Caso uma região tivesse uma média de tons de cinza maior ou igual a 200 e uma área maior ou igual a 3000 ela era considerada como fibra. Em seguida, as regiões consideradas como fibra, foram subtraídas da imagem filtrada e a análise envolveu a separação apenas dos grãos de EVA grosso e dos poros.

Para a separação dos grãos de EVA grosso dos poros seguiu o que foi realizado nas amostras contendo apenas EVA grosso.

No Anexo 1 é apresentado um fluxograma das etapas realizadas no processamento das imagens.

Terminada a separação dos materiais, foi possível determinar a porcentagem de cada material na amostra.

3.4 Determinação da porcentagem de cada material

Considerando os resultados obtidos na fase de separação dos poros, grãos de Eva e fibras, assim como do agregado graúdo foi possível obter uma estimativa da porcentagem de cada elemento presente nas amostras. Foi calculada, então, a razão da quantidade de *pixels* que representam cada um dos elementos contidos no concreto (área total do elemento) em cada fatia da imagem pela quantidade de *pixels* total da amostra (área total da amostra). A operação utilizada é apresentada na equação 3.

$$\text{Porcentagem do elemento} = \frac{\text{Área total do elemento}}{\text{Área total da amostra}} \times 100 \quad (3)$$

A Figura 18 apresenta o processo de determinação da porcentagem de cada material realizado para o concreto referência. A Figura 18 (a) apresenta a imagem binária contendo apenas os poros contabilizados, a Figura 18 (b) apresenta a imagem binária contendo a área total da amostra.

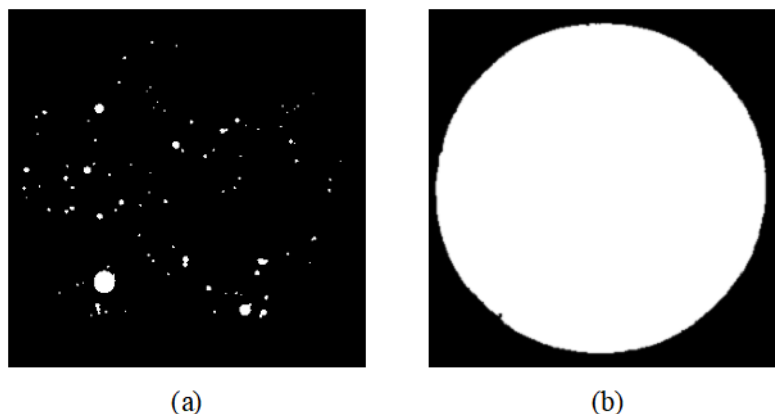


Figura 18 – Exemplo das imagens utilizadas na determinação de cada elemento presente no concreto.

3.5 Validação da metodologia

De maneira a validar a metodologia utilizada foram criadas 3 imagens em tons cinza com dimensões 700 x 700 *pixels* representadas pelas Figuras 19 (a), (b) e (c). A Figura 19 (a) apresenta a imagem que representa o concreto referência, a Figura 19 (b) representa o concreto com adição apenas de EVA fino e a Figura 19 (c) representa a amostra com adição de fibra e EVA fino.

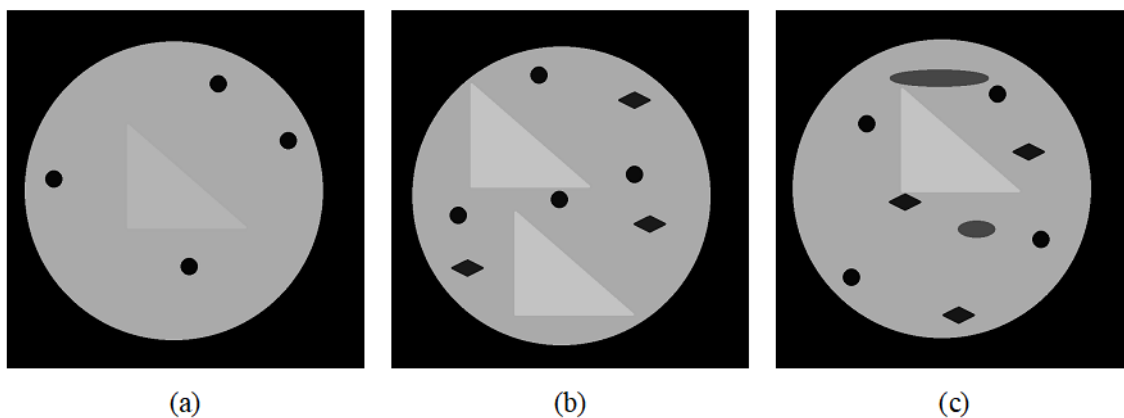


Figura 19 – Imagens utilizadas na validação da metodologia.

As áreas circulares representam os poros, os losangos representam os grãos de EVA fino, a elipse representa as fibras e os triângulos representam o agregado graúdo. Os objetos foram criados com tons de cinza próximos ao apresentado pelos materiais presentes nas imagens.

Além da utilização das imagens teste, os testemunhos utilizados para obtenção das imagens das amostras CR, EF5 e EF25 obtiveram seus valores de porosidade determinados pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. Esse ensaio consiste

em envolver a amostra com mercúrio em uma câmara previamente evacuada onde, a aplicação gradual de pressão, irá forçar a entrada do líquido nos poros superficiais da amostra (COOK; HOVER, 1999). Através do volume de mercúrio intrudido na amostra e o próprio volume da amostra é possível determinar a porosidade total na amostra.

A determinação da porosidade das amostras foi realizada no Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos através do porosímetro de mercúrio da marca AMINCO USA modelo 5000 psi.

4 Resultados e Discussões

Nesta seção apresentaremos os resultados obtidos neste trabalho. Primeiramente serão apresentados os resultados obtidos com as imagens teste. Em seguida, as informações das imagens microtomográficas de cada amostra de concreto obtidas na metodologia serão mostradas e discutidas.

Ao passar pela rotina criada os objetos das imagens teste foram separados e contabilizados. Para verificar se a contagem dos pixels estava correta, foi utilizado o programa Image J para contabilizar as áreas. A Figura 20 apresenta as imagens resultantes do processamento para a imagem teste que representa o concreto com EVA e fibra.

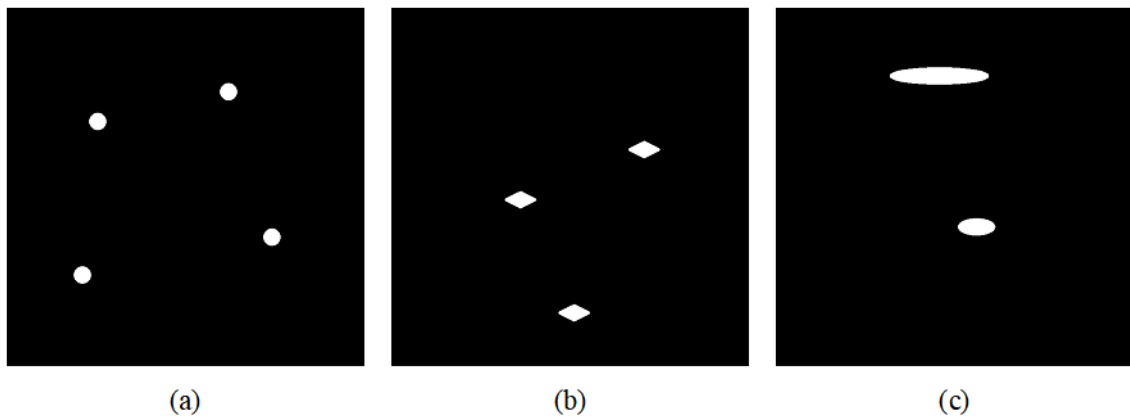


Figura 20 – Imagens resultantes do processamento da imagem teste contendo poro, fibra e EVA.

É possível perceber que os materiais foram separados corretamente. Além disso, como esperado, os valores das áreas de cada objeto assim como dos materiais como um todo encontrados na rotina criada foram os mesmos obtidos pelo Image J.

Através da binarização das imagens, seguida da aplicação da operação morfológica de abertura, foi possível destacar, em cada fatia, o percentual de *pixels* que representam os poros, grãos de EVA, fibras e agregado graúdo. As Figuras 21 e 22 apresentam o percentual de branco encontrado, em cada fatia, nas amostras destacando os poros, EVA e fibras e, agregado graúdo, respectivamente.

Pode-se perceber que, ao longo das fatias dos dois grupos de imagens, ocorre uma variação do percentual de branco referente às porcentagens de elementos no interior das amostras. Essa variação ocorre pois, o concreto é um material heterogêneo e a distribuição de seus componentes não ocorre de maneira homogênea. Além disso, existe a possibilidade de que em algumas fatias seja encontrado um agregado graúdo

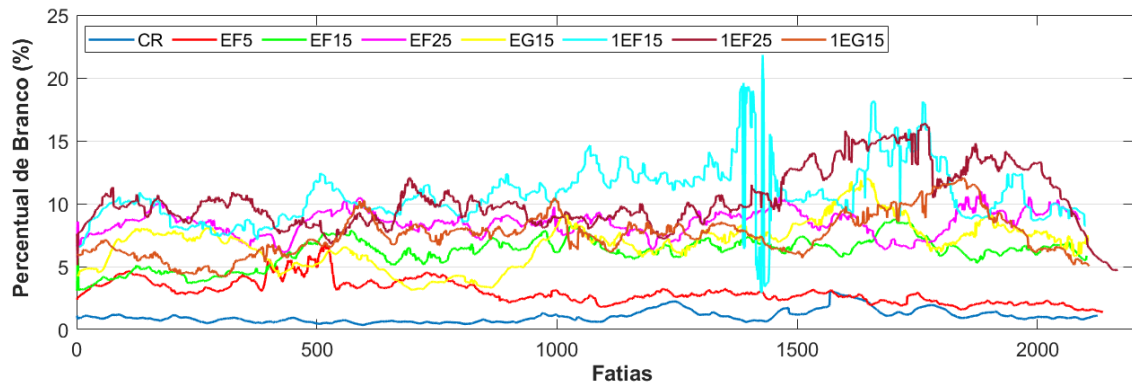


Figura 21 – Percentual de branco, em cada fatia, das amostras com destaque para poros, fibra e EVA.

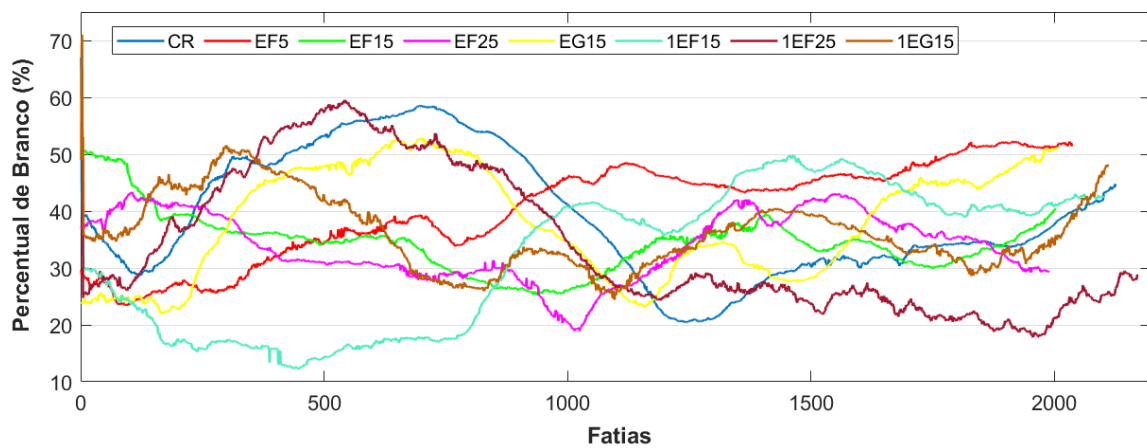


Figura 22 – Percentual de branco, em cada fatia, das amostras com destaque para o agregado graúdo.

de maior dimensão, o que dificulta a visualização dos materiais naquele trecho como é afirmado por [Pessôa et al. \(2014\)](#).

Nas tabelas 5 e 6 são apresentados os valores máximos e mínimos encontrados para cada amostra nos dois gráficos anteriores.

Ao analisar os valores encontrados para a amostra contendo 1% de fibra de piaçava e 15% de EVA fino da Figura 21, é possível notar uma discrepância para os valores encontrados entre as fatias 1300 e 1500, aproximadamente. Em análise das imagens filtradas obtidas na etapa de segmentação notou-se que, para essa amostra, o *threshold* escolhido para binarização não foi o ideal para todo o conjunto de imagens produzindo valores não esperados.

Diferentemente da Figura 21, onde o percentual de branco representa 3 elementos diferentes, a Figura 22 representa apenas o percentual de agregado graúdo encontrado em cada fatia de uma determinada amostra. Como é possível perceber também houve

Tabela 5 – Valores mínimos e máximos de percentual de branco referente aos poros, EVA e fibras encontrados para cada uma das amostras.

Amostra	Variação de Branco (%)	Amostra	Variação de Branco (%)
CR	0,35 – 3,03	EG15	3,15 – 11,98
EF5	1,37 - 6,87	1EF15	2,96 – 21,82
EF15	3,08 – 8,76	1EF25	4,71 – 16,40
EF25	6,13 – 10,78	1EG15	4,22 – 12,05

Tabela 6 – Valores mínimos e máximos de percentual de branco referente ao agregado graúdo encontrados para cada uma das amostras.

Amostra	Variação de Branco (%)	Amostra	Variação de Branco (%)
CR	20,49 – 58,54	EG15	21,91 – 52,86
EF5	23,53 – 52,58	1EF15	12,22 – 70,00
EF15	25,23 – 50,73	1EF25	17,81 – 69,00
EF25	18,94 – 43,34	1EG15	24,41 – 71,00

variação nos valores encontrados ao longo das fatias.

Percebendo a variação do percentual de branco, foi determinado que seria utilizada a média dos valores para representar os parâmetros analisados a seguir. A Tabela 7 apresenta os valores de branco médios obtidos para as amostras que representam os poros, EVA e fibras. A partir dos valores apresentados na Tabela 7 foi desenvolvido um gráfico de barras representado pela Figura 23.

Tabela 7 – Percentual médio de regiões de cor branca de cada tipo de mistura representando poros, fibra e EVA.

Amostra	Percentual de Branco Médio (%)	Amostra	Percentual de Branco Médio (%)
CR	1,04	EG15	6,81
EF5	2,99	1EF15	10,73
EF15	6,15	1EF25	10,31
EF25	8,46	1EG15	7,53

Analisando a Figura 23 nota-se que, nas amostras contendo apenas poros e EVA, os valores de percentual médio de branco foram aumentando com a adição de EVA às

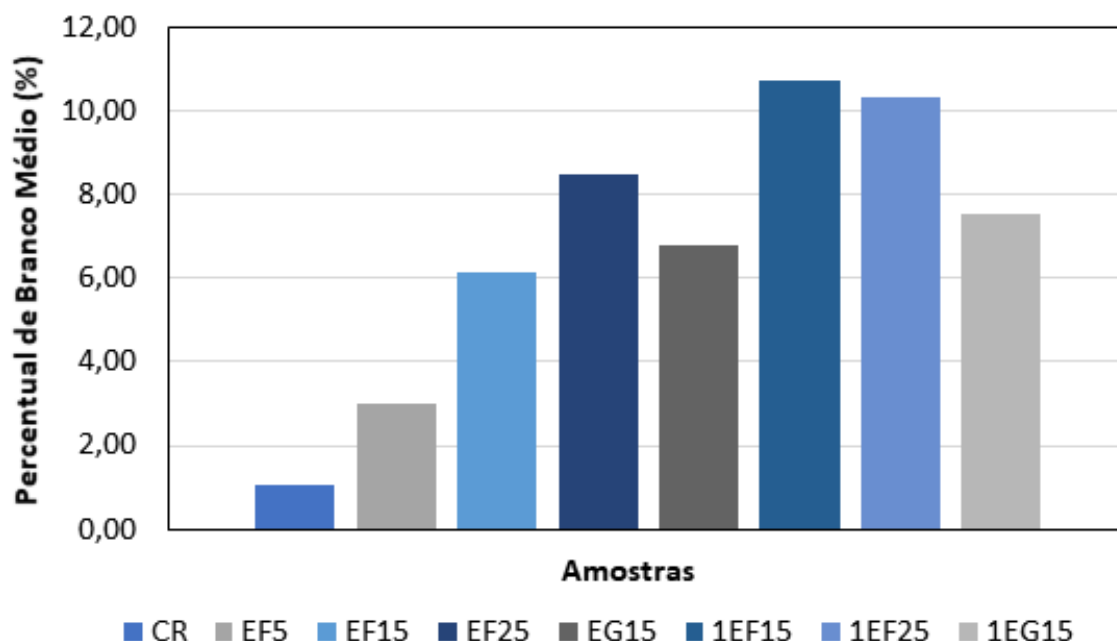


Figura 23 – Percentual de branco médio encontrado nas amostras com destaque para poros, fibras e EVA.

amostras assim como esperado devido ao aumento de materiais no interior da pasta. Além disso, os valores encontrados para as amostras contendo 15% de EVA fino e 15% de EVA grosso ficaram bem próximos. Já nas amostras contendo fibras, o valor obtido para a amostra com 15% de EVA fino é ligeiramente maior que o valor encontrado para a amostra com 25%. A discrepância nos resultados obtidos para a amostra 1EF15 pode ter afetado esse resultado ou a presença de um agregado graúdo de maior dimensão na amostra 1EF25 não permitindo a presença de mais elementos na amostra.

Na Tabela 8 são apresentados os percentuais médios de branco obtidos para as amostras que representam o agregado graúdo. A partir dos dados dessa Tabela foi gerado um gráfico de barras representado pela Figura 24.

Tabela 8 – Percentual médio de regiões de cor branca de cada tipo de mistura representando o agregado graúdo (brita).

Amostra	Percentual de Branco Médio (%)	Amostra	Percentual de Branco Médio (%)
CR	39,13	EG15	38,14
EF5	40,37	1EF15	32,27
EF15	34,51	1EF25	34,20
EF25	33,89	1EG15	36,23

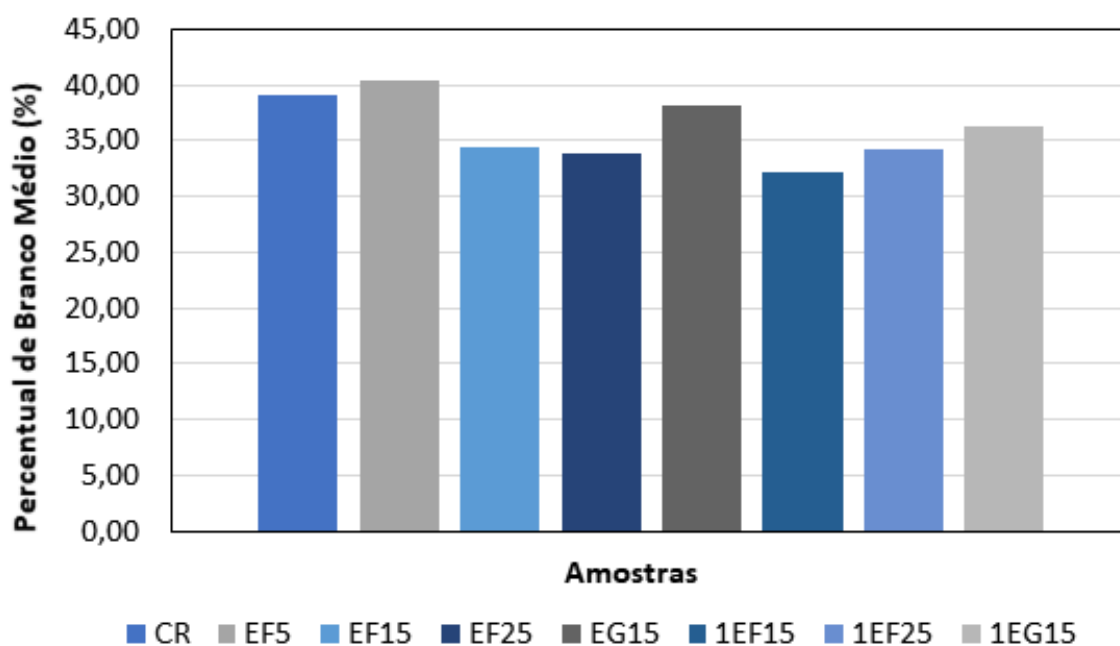


Figura 24 – Percentual de branco médio encontrado nas amostras com destaque para o agregado graúdo.

Na análise dos percentuais médios de agregado graúdo, ao contrário do que foi observado para o grupo de imagens que representam os agregados miúdos no interior da matriz cimentícia, esperava-se que à medida em que o volume de agregado miúdo aumentasse nas amostras, o percentual de branco diminuísse, já que os volumes de EVA e fibras incorporados ao traço foram em substituição ao volume de brita.

Diante do exposto, as amostras contendo adição apenas de EVA fino, estão de acordo com o esperado pois os valores encontrados foram diminuindo à medida em que foram adicionados mais agregados leves. A amostra de concreto puro deveria apresentar o maior valor entre as amostras, porém, a amostra contendo 5% de EVA fino apresentou um percentual maior. Nas amostras com adição de 1% de fibra os valores encontrados foram contrários aos esperados. Como foi dito anteriormente, a presença do agregado graúdo de dimensão pode ter influenciado este resultado. Além disso, considerando a heterogeneidade do concreto, a amostra utilizada pode não gerar resultados que representem bem a realidade do sistema (BERNARDES et al., 2017).

Após o processamento das imagens, foi possível obter os percentuais de poros, EVA e fibras, separadamente, em cada amostra. Na Tabela 9 são apresentados os valores de porosidade ou índice de vazios obtidos para as amostras analisadas. Esses valores são representados por um gráfico de barras na Figura 25.

A Tabela 10 apresenta os resultados de porosidade obtidos para as amostras de concreto puro, com adição de 5% de EVA fino e com adição de 25% de EVA fino pelo

Tabela 9 – Valores de porosidade média obtida para cada amostra através da análise de microtomografias de raio X.

Amostra	Porosidade Média (%)	Amostra	Porosidade Média (%)
CR	1,04	EG15	1,82
EF5	1,85	1EF15	3,81
EF15	3,64	1EF25	4,14
EF25	5,2	1EG15	2,00

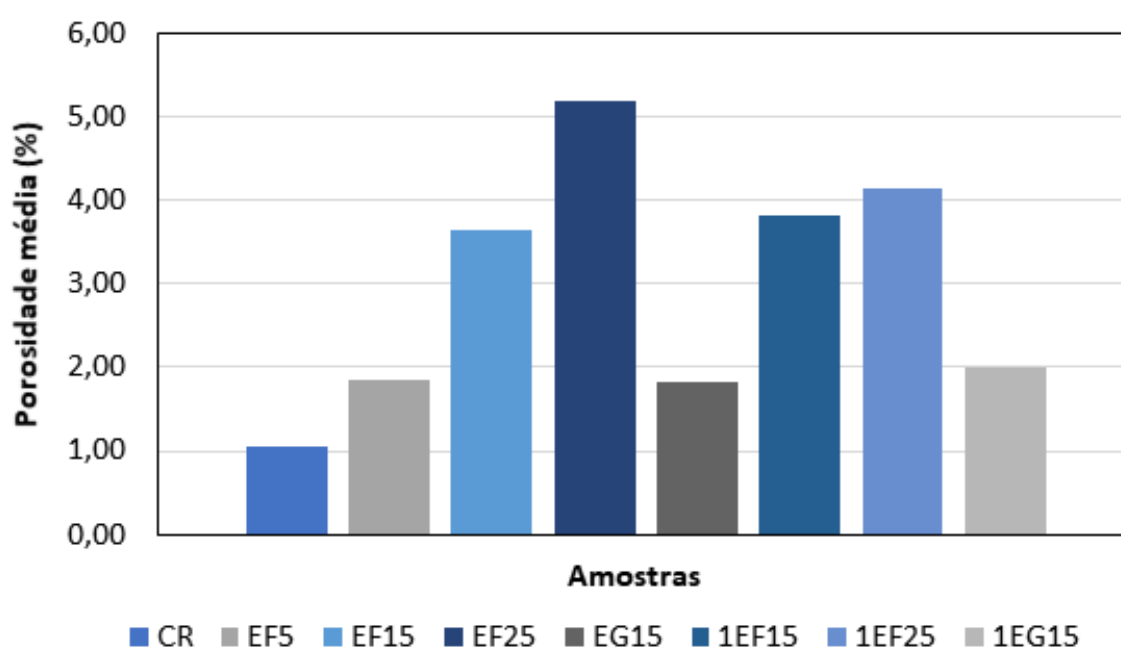


Figura 25 – Porosidade média encontrada nas amostras.

processo de intrusão de mercúrio.

Tabela 10 – Valores de porosidade média obtida para cada amostra através da análise de microtomografias de raio X.

Porosidade (%)		
CR	EF5	EF25
1,51	4,21	16,45

A partir da análise dos valores obtidos de porosidade pela análise das imagens microtomográficas é possível perceber que a amostra do concreto referência obteve

menor valor. Para as amostras contendo apenas 5%, 15% e 25% de EVA fino, os valores de porosidade aumentaram com o acréscimo de EVA. Santiago (2008) também observou um aumento na incorporação de ar à medida em que o agregado natural era substituído pelo EVA. Esse fenômeno também foi observado para os valores de porosidade encontrados através do ensaio de intrusão de mercúrio.

Comparando os resultados obtidos pelo ensaio de intrusão de mercúrio e análise das microtomografias de raios X para o concreto referência, é possível perceber uma pequena diferença nos valores encontrados. De acordo com Cook e Hover (1999) se o sistema de poros não for contínuo, as paredes dos poros podem se romper à medida em que o mercúrio penetra na amostra. Esse fenômeno pode explicar essa pequena divergência nos valores encontrados pelos diferentes métodos aplicados nessa amostra em particular.

Na análise das amostras contendo 5% e 15% de EVA fino, nota-se uma maior discrepância nos valores encontrados pelos métodos de intrusão de mercúrio e processamento das imagens microtomográficas. Acredita-se que, por se tratar de um material muito poroso, o EVA permitiu a penetração de parte do mercúrio, produzindo valores de porosidade tão diferentes dos obtidos pela análise das microtomografias de raios x.

Quando comparadas as amostras contendo apenas 15% de EVA grosso e 15% de EVA fino, foi observado que a amostra com adição de 15% de EVA fino apresentou um valor de porosidade superior ao da amostra com EVA grosso. Como a granulometria dos dois materiais é diferente, para substituir os 15% em volume de agregado graúdo retirados do traço é necessário um volume maior de EVA fino que EVA grosso.

Nas amostras com adição de fibra, a porosidade apresentou um aumento, mesmo que reduzido, com o aumento da quantidade de materiais na pasta para as amostras com adição de EVA fino. Ao comparar as amostras com 15% de EVA grosso e fino, assim como observado nas amostras sem adição de fibra, o valor de porosidade encontrado para a amostra com adição de EVA fino foi superior ao da amostra com EVA grosso. Devido à diferença na granulometria dos grãos de EVA, o volume de EVA fino necessário para substituir 15% do volume de agregado graúdo retirado do traço é maior que o volume de EVA grosso.

As amostras com adição de fibra e 15% de EVA fino (1EF15) ou grosso (1EG15) apresentaram valores de porosidade superiores aos valores encontrados para as amostras com a mesma porcentagem de EVA e sem adição da fibra. Esse comportamento indica que, assim como ocorrido nas amostras sem adição de fibra, ao aumentar o volume de materiais na matriz cimentícia, maior será o índice de vazios do concreto. Em contrapartida, na análise das amostras com adição de 25% de EVA fino com ou sem adição de o valor de porosidade encontrado para a amostra sem adição foi superior ao da amostra com adição de fibra. Esse comportamento pode indicar que, para essa amos-

tra em questão, a fibra de piaçava pode ter contribuído para a redução da quantidade de poros.

Carvalho et al. (2016) ao analisar a influência da adição de 1,5% de fibra de sisal nas propriedades tecnológicas do concreto, perceberam uma diminuição no teor de absorção de água deste concreto quando comparado ao concreto convencional indicando que a adição da fibra pode ter contribuído para o fechamento de poros e proporcionado uma melhor compactação do concreto.

A seguir, na Tabela 11, são apresentados os percentuais médios de EVA encontrados nas amostras.

Tabela 11 – Percentuais médios de EVA encontrados nas amostras.

Amostra	Percentual Médio de EVA (%)	Amostra	Percentual Médio de EVA (%)
CR	-	EG15	4,97
EF5	1,14	1EF15	4,81
EF15	2,50	1EF25	4,90
EF25	3,03	1EG15	4,93

A Figura 24 apresenta o gráfico de barras obtido a partir dos percentuais apresentados na Tabela 11.

Analizando os valores encontrados para o percentual de EVA nas amostras, é possível perceber que, para as amostras com adição apenas de EVA fino, os valores foram gradualmente elevados à medida em que se elevava a porcentagem de agregado leve adicionado na amostra.

Na amostra contendo 15% de EVA grosso sem adição de fibra o valor de percentual médio de EVA encontrado, mesmo apresentando menor valor de porosidade, foi significativamente maior ao apresentado pela amostra com o mesmo percentual de EVA fino. A adição do agregado leve grosso pode ter proporcionado um menor volume de vazios no corpo-de-prova como um todo (100mmx200mm) porém pode ter havido uma concentração da quantidade do material na região onde o testemunho foi retirado para obtenção das imagens.

Nas amostras com adição de fibra de piaçava, os valores de percentual de EVA encontrados ficaram muito próximos, porém maiores que os encontrados para as amostras sem adição de fibra. De acordo com Neville (2013) quanto maior a quantidade de material presente na matriz cimentícia, menor poderá ser sua consistência podendo

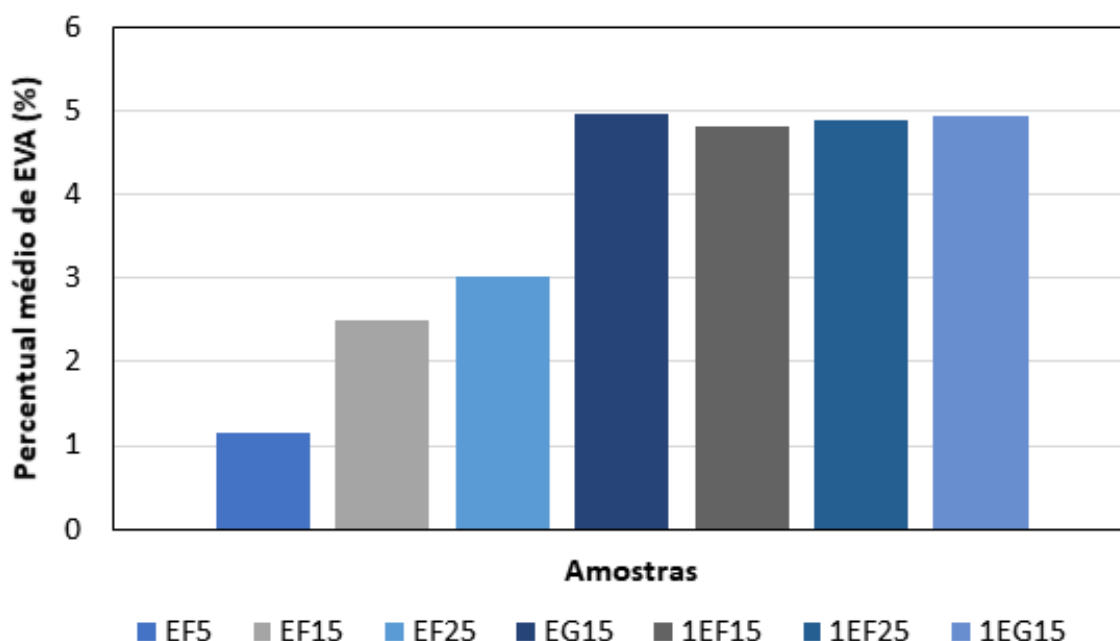


Figura 26 – Percentual médio de EVA encontrada nas amostras.

causar aglomeração dos agregados em determinados pontos do concreto. Isso pode justificar menor ou maior presença dos materiais na amostra analisada.

Além disso, como já foi falado, o maior problema encontrado na análise do concreto é que este é um material heterogêneo e seus componentes estão dispostos de maneira irregular gerando resultados que não representam bem a realidade do material. [Bernardes et al. \(2017\)](#) apontam a conflitante questão de se utilizar a microtomografia de raios X na análise de concretos devido à necessidade de se trabalhar com amostras de pequena dimensão sendo que o volume de amostra utilizado pode não representar o conjunto como um todo. Os autores também apontam que, dependendo da posição onde os testemunhos são retirados, haverá influência nos resultados obtidos.

Na Tabela 12 são apresentados os percentuais médios de fibra encontrados para as amostras contendo adição de 1% de fibra de piaçava. Em seguida, a Figura 27 apresenta um gráfico em barras onde representando os valores demonstrados na Tabela 12.

Na análise da Tabela 12, percebe-se que a amostra com adição de 15% EVA fino um percentual de fibra mais elevado que nas amostras com adição de 25% de EVA e 15% de EVA grosso. Como dito anteriormente, as fibras podem ser encontradas nas amostras de maneira frontal ou lateral. O que pode ter acontecido é que, na amostra 1EF15, foram encontradas mais fibras com vistas laterais aumentando seu percentual. Outra explicação seria que, devido às complicações ocorridas no momento da binarização,

Tabela 12 – Percentual médio de fibra nas amostras com adição de 1% de fibra.

Amostra	Percentual Médio de Fibra (%)
1EF15	2,23
1EF25	0,86
1EG15	0,60

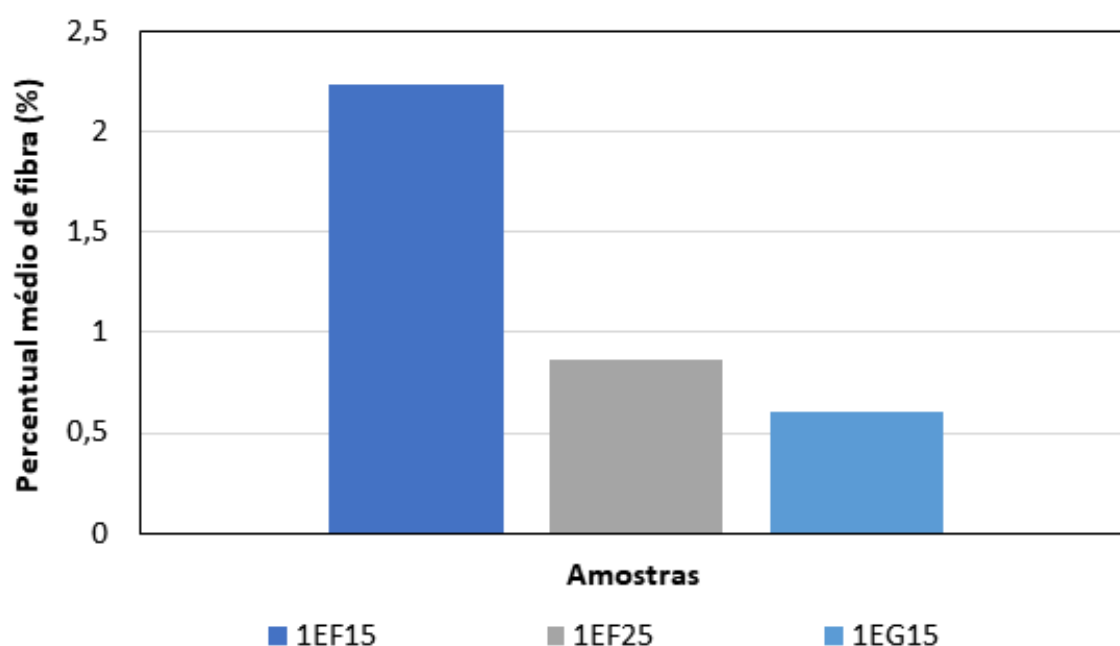


Figura 27 – Percentual médio de fibras encontrado nas amostras.

alguns poros podem ter sido classificados como fibra. A diferença encontrada para as amostras 1EF25 e 1EG15 pode ser justificada pela maior presença da fibra na amostra com 25% de EVA fino.

Vale ressaltar que foram identificados alguns problemas na técnica utilizada para separação dos elementos nas amostras contendo adição de fibra o que pode ter gerado as discrepâncias discutidas acima. Foi notado que, devido à grande quantidade de elementos no interior da matriz, eles se encontravam muito próximos o que tornou mais complicado o processo de separação. Devido à proximidade de seus tons de cinza e o fato de os elementos estarem muito próximos uns dos outros, no processo de binarização algumas regiões podem ter sido conectadas.

Na Tabela 13 são apresentados os percentuais médios encontrados para todos os elementos de cada amostra analisada.

Tabela 13 – Porcentagens médias encontradas para os elementos presentes em cada amostra.

Amostras	Percentuais dos Elementos (%)			
	Poro	EVA	Fibra	Brita
CR	1,04	-	-	39,13
EF5	1,85	1,14	-	40,37
EF15	3,64	2,50	-	34,51
EF25	5,2	3,03	-	33,89
EG15	1,82	4,97	-	38,14
1EF15	3,81	4,81	2,23	32,27
1EF25	4,14	4,90	0,86	34,20
1EG15	2,00	4,93	0,60	36,23

A seguir são apresentadas as conclusões deste trabalho.

5 Conclusão

A caracterização de novos materiais é uma etapa fundamental na verificação da aplicabilidade destes materiais. A microtomografia computadorizada de raios X, associada às técnicas de processamento de imagens, tem se mostrado uma ferramenta importante no estudo da porosidade por permitir a análise da estrutura interna dos materiais.

Neste trabalho, foram analisados 7 conjuntos de imagens microtomográficas obtidas de concretos leves produzidos com incorporação de 5%, 15% e 25% de EVA com diferentes granulometrias podendo ou ser reforçados com 1% de fibra de piaçava. Também foi realizada a análise de um conjunto de imagens referente a um concreto convencional que serviu como referência para a análise das imagens de concreto leve.

Foi desenvolvida uma metodologia onde as imagens, primeiramente, passaram pelo pré-processamento onde foi possível ajustá-las em relação ao seu contraste. Em seguida, as imagens ajustadas passaram pelo processo de binarização (etapa de segmentação) onde as regiões de interesse de análise foram destacadas. Foram gerados dois grupos de imagens, um contendo as regiões que representam os poros, grãos de EVA e fibras e, um segundo grupo com destaque para os agregados graúdos.

A partir do grupo de imagens com destaque para os grãos de EVA, fibra e poros foi possível obter uma imagem auxiliar contendo apenas as regiões de interesse de estudo com seus respectivos tons de cinza. Nas imagens auxiliares foram utilizados descritores de forma e textura para identificar cada região presente no interior de cada amostra de concreto. Os elementos foram classificados em poro, EVA ou fibra.

Após a classificação de cada elemento foram obtidos os seus respectivos percentuais no interior das amostras possibilitando analisar a influência da incorporação de agregado leve (EVA) e da fibra de piaçava na porosidade dos concretos.

As amostras contendo adição apenas de EVA fino, apresentaram melhores resultados devido ao fato de apresentarem menor quantidade de material no interior da matriz e tons de cinza e formatos diferentes possibilitando uma separação mais eficiente dos materiais.

A amostra de concreto puro apresentou menor valor de porosidade entre todas as amostras analisadas tanto pelo método de análise das imagens quanto pelo ensaio de intrusão de mercúrio onde os valores encontrados foram próximos.

Através desse trabalho foi possível verificar a influência negativa da adição de EVA à matriz cimentícia. Quanto maior o percentual de EVA no concreto maiores foram

os valores encontrados para a porosidade. A mesma relação foi observada pelo ensaio de intrusão de mercúrio realizado nas amostras com 5% e 25% de EVA fino. Porém, diferentemente da amostra de concreto puro, os valores de porosidade encontrados para as amostras EF5 e EF25 pelo ensaio de intrusão de mercúrio foram, significativamente, superiores aos encontrados pela análise das imagens podendo a presença do EVA nas amostras ter interferido no resultado do ensaio devido sua excessiva porosidade.

Nas amostras com adição de fibra e 15% de EVA fino e grosso verificou-se um aumento da porosidade em relação às amostras com a mesma porcentagem de EVA, porém sem adição de fibra. O mesmo não foi verificado para a amostra com 25% de EVA fino podendo a presença da fibra ter contribuído para a diminuição da porosidade.

A metodologia utilizada na realização deste trabalho foi baseada em outras metodologias aplicadas em amostras de argamassa leve produzidas com incorporação de EVA e reforçadas com fibras de piaçava o que permitiu produzir bons resultados. Porém, alguns problemas foram encontrados durante a execução das técnicas utilizadas neste trabalho que podem ser decorrentes da diferença entre os materiais, principalmente pela presença do agregado graúdo.

Como trabalhos futuros sugerimos utilizar outra técnica para a binarização das imagens de maneira a proporcionar melhor identificação dos materiais. Além disso, seria interessante incluir outros descritores à análise das regiões. Outra sugestão seria a análise tridimensional das imagens microtomográficas por considerar as características volumétricas dos materiais presentes no interior do concreto possibilitando melhor análise e, conseqüentemente, classificação dos mesmos.

Por fim, seria interessante, avaliar uma quantidade maior de testemunhos para uma mesma amostra com o intuito de melhor representar a amostra como um todo.

Referências

- ABENDI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **Ensaaios não destrutivos e inspeção**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://www.abendi.org.br/abendi/>>. Acesso em: 15 de julho de 2018.
- ABICALÇADOS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE CALÇADOS. **Relatório setorial: Indústria de calçados do Brasil**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://www.abicalcados.com.br>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2018.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento portland - preparo, controle, recebimento e aceitação**. Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- AL-JABRI, K. S.; HAGO, A.; AL-NUAIMI, A.; AL-SAIDY, A. Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 35, n. 8, p. 1472–1479, 2005.
- ANDRADE, E. S.; GUIMARÃES, C. C. Propriedades de argamassas com EVA (Ethylene Vinyl Acetate) em substituição parcial ao agregado. **Rev. Elet. de Engenharia Civil**, v. 13, p. 174–192, 2017.
- ARGANDOÑA, V. G. Ruiz de; RODRIGUEZ-REY, A.; CELORIO, C.; CALLEJA, L.; SUÁREZ DEL RIO, L. M. Characterization by X-ray computed tomography of water absorption in a limestone used as building stone in the Oviedo Cathedral (Spain). **Geological Society, London, Special Publications**, v. 215, n. 1, p. 127–134, 2003. ISSN 0305-8719.
- BENTZ, D.; MARTYS, N. S.; STUTZMAN, P.; LEVENSON, M.; GARBOCZI, E.; DUNSMUIR, J.; SCHWARTZ, L. X-ray microtomography of an astm c109 mortar exposed to sulfate attack. **MRS Online Proceedings Library Archive**, Cambridge University Press, v. 370, 1994.
- BERALDO, A.; LOPES, W.; CARVALHO, J.; ARZOLLA, J.; SEVEGNANI, K.; SOUZA, P. Efeito da espécie vegetal do tipo de cimento e do tratamento utilizado sobre a resistência à compressão de compósitos. In: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**. [S.l.: s.n.], 2000. v. 8.
- BERNARDES, E. E.; MAGALHÃES, A. G. de; VASCONCELOS, W. L.; CARRASCO, E. V. M.; NUNES, E. H. M.; LIMA, L. B. de. Caracterização de corpos de prova de tamanho reduzido desenvolvidos para ensaios de microtomografia de raios x (μ -ct). **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 10, n. 5, 2017.
- BILODEAU, A.; KODUR, V.; HOFF, G. Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 26, n. 2, p. 163–174, 2004.

- BORGES, A. P. S. N. **Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- BOUVARD, D.; CHAIX, J.-M.; DENDIEVEL, R.; FAZEKAS, A.; LÉTANG, J.; PEIX, G.; QUENARD, D. Characterization and simulation of microstructure and properties of eps lightweight concrete. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 37, n. 12, p. 1666–1673, 2007.
- CARVALHO, R. R. C.; CAVALLINI NETO, G.; CANDIDO, V. S. Utilização de fibra de sisal como agente de reforço em matriz cimentária para fabricação de blocos de concreto. In: **60º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. Águas de Lindóia: [s.n.], 2016.
- CHOI, Y. W.; MOON, D. J.; KIM, Y. J.; LACHEMI, M. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 23, n. 8, p. 2829–2835, 2009. ISSN 09500618. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036>>.
- CONROY, A.; HALLIWELL, S.; REYNOLDS, T. Composite recycling in the construction industry. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Elsevier, v. 37, n. 8, p. 1216–1222, 2006.
- COOK, R. A.; HOVER, K. C. Mercury porosimetry of hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 6, p. 933–943, 1999. ISSN 00088846.
- COSTA, M. d. R. d. M. M. d.; PINTO, M. C. C.; PESSANHA, M. D.; TREVISAN, D. B.; HERZER, P. H. Argamassas contendo resíduos a base de eva e poliéster como agregado leve. In: **XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**. São Paulo: [s.n.], 2016. p. 299–311.
- COUTTS, R. S. P.; WARDEN, P. G. Sisal pulp reinforced cement mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 14, n. 1, p. 17–21, 1992. ISSN 09589465.
- DIAS, L. A. **Concreto incorporado com eva e fibras de piaçava: uma alternativa sustentável na construção civil**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2017.
- DOMINGUEZ, D. S.; ALMEIDA, H. C.; IGLESIAS, S. M.; LOPES, R. T.; ALVES, H. D. Processamento de imagens microtomográficas de alta resolução na caracterização de amostras de argamassa leve. **Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis**, v. 11, n. 1, p. 13–21, 2017. ISSN 23180692.
- FIORITI, C. F.; AKEMI, I.; AKASAKI, J. L. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 4, p. 43–54, 2007.
- GARLET, G. **Aproveitamento de resíduos de E.V.A. (Ethylene Vinyl Acetate) como agregado para concreto leve na construção civil**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Feira do Rio Grande do Sul, 1998.
- GEET, M. V.; SWENNEN, R.; WEVERS, M. Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocuss x-ray computerised tomography. **Sedimentary Geology**, Elsevier, v. 132, n. 1-2, p. 25–36, 2000.

GOMES, O. d. F. M. **Processamento e Análise de Imagens Aplicados à Caracterização Automática de Materiais**. Dissertação (Mestrado) — PUC-Rio, 2001.

GOMES, P. C. C.; ALENCAR, T. F. F. d.; SILVA, N. V. d.; MORAES, K. A. d. M.; ANGULO, S. C. Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. **Ambiente Construído**, SciELO Brasil, v. 15, n. 3, p. 31–46, 2015.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. **Processamento digital de imagens**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. ISBN 978-85-7605-401-6.

GREVEN, A.; GARLET, G. Concreto leve utilizando resíduos de eva da indústria calçadista. **Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis**, v. 1, n. 1.997, p. 93–100, 1997.

GUIMARÃES, C. A. L.; SILVA, L. A. M. **Piaçava da Bahia (*Attalea funifera* Martius): do extrativismo à cultura agrícola**. Ilheus - BA: Editus, 2012. 262 p. ISBN 9788574552828.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura - PEVS**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2018.

ILDEFONSO, J. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do copolímero etileno acetato de vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas (processo seco)**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2007.

IPMA - INSTITUTO PORTUGUÊS DO MAR E ATMOSFERA. **Imagens de Satélite - Visualização**. [S.l.], 2018.

JÄHNE, B. Digital Image Processing. In: **Digital Image Processing**. [S.l.: s.n.], 2002. ISBN 0780333306.

JAMAL, H. **Classification & advantages of lightweight concrete**. 2017. Disponível em: <<http://www.aboutcivil.org/lightweight-concrete-composition-classification-advantages.htm>>. Acesso em: 17 de janeiro de 2018.

LANDIS, E. X-ray microtomography applications to heterogeneous materials. **Applications of X-Rays in Mechanical Engineering 2004**, p. 1–6, 2004.

LIMA, I.; APPOLONI, C.; OLIVEIRA, L. de; LOPES, R. T. Caracterização de materiais cerâmicos através da microtomografia computadorizada 3d. **Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação**, v. 1, n. 2, p. 22–27, 2007.

LOUREIRO, G. M. **Caracterização de misturas de argamassas leves utilizando algoritmos de clusterização**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Santa Cruz, 2016.

LU, S.; LANDIS, E.; KEANE, D. X-ray microtomographic studies of pore structure and permeability in portland cement concrete. **Materials and Structures**, Springer, v. 39, n. 6, p. 611–620, 2006.

- LUCAS, D.; BENATTI, C. T. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 1, n. 3, p. 405–418, 2008.
- MANCINI, S. D.; MONTAGNOLI, R. M.; GUERRERO, P. C.; PRESTES, S. M. D.; TOUBIA, C. M.; JÚNIOR, E. M.; LIMA, T. de C. Desafios e potencialidades da reciclagem de plásticos termofixos. In: **26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Porto Alegre: [s.n.], 2011.
- MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999. 331 p. ISSN 0102261X. ISBN 8574520098.
- MASAD, E.; MUHUNTHAN, B.; SHASHIDHAR, N.; HARMAN, T. Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis. **Journal of computing in civil engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 13, n. 2, p. 88–95, 1999.
- MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: Microestrutura, Propriedades, e Materiais**. [S.l.]: IBRACON, 2014. ISBN 9788598576213.
- MELO, A. B.; MENDONÇA, T. N. M. Blocos cimentícios com resíduos de eva para telhado verde extensivo modular: contribuição dos componentes no isolamento térmico. **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 10, n. 1, 2016.
- MENDONÇA, R. S. **Caracterização de argamassas leves usando processamento tridimensional de imagens e processamento paralelo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2016.
- NASCIMENTO, D. C. O.; FERREIRA, A. S.; MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M.; KESTUR, S. G. Studies on the characterization of piassava fibers and their epoxy composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Elsevier, v. 43, n. 3, p. 353–362, 2012.
- NASCIMENTO-DIAS, B. L. do. Aplicações multidisciplinares da microtomografia de raios x e sua utilização na caracterização e análises não-destrutivas de materiais. **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**, v. 4, n. 2, 2017.
- NEVES, S. C. M.; PELAES, E. G. Estudo e implementação de técnicas de segmentação de imagens. **Revista Virtual de Iniciação Acadêmica da UFPA**, v. 1, n. 2, p. 1–11, 2001.
- NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto**. [S.l.]: Bookman Editora, 2013.
- OLIVEIRA, D. C. G.; CANIATTO, V. C.; CORREIA, A. R. M.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO JR., H. . Utilização de cinzas de cama sobreposta de suínos como material pozolânico na elaboração de compósitos cimentícios por extrusão. In: **IX Congresso Latino-Americano e do Caribe de Engenharia Agrícola e XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. [S.l.: s.n.], 2010.
- PALOMBO, L.; ULSEN, C.; ULIANA, D.; COSTA, F. R.; YAMAMOTO, M.; KAHN, H. Caracterização de rochas reservatório por microtomografia de raios X. **Holos**, v. 5, p. 65, 2015. ISSN 1807-1600.
- PARDINI, L. C.; LEVY NETO, F. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

- PAULUS, M. J.; GLEASON, S. S.; KENNEL, S. J.; HUNSICKER, P. R.; JOHNSON, D. K. High resolution x-ray computed tomography: an emerging tool for small animal cancer research. **Neoplasia**, Elsevier, v. 2, n. 1-2, p. 62–70, 2000.
- PEREIRA, A.; LEIDERMAN, R.; ALMEIDA, R.; BAGUEIRA, R. Experiências na engenharia da uff com microtomografias de raios-x. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia-RIPE**, v. 2, n. 11, p. 18–33, 2016.
- PESSÔA, J. R. d. C.; DOMINGUÊZ, J. S.; CARVALHO G. DE, A. J. T. d. Porosidade do concreto determinada por microtomografia com raio x e processamento de imagens. **Engenharia Estudo e Pesquisa (ABPE)**, v. 14, n. 2, p. 20–26, 2014.
- PIMENTEL, L. L. **Durabilidade de argamassas modificadas por polímeros e reforçadas com fibras vegetais**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- PIMENTEL, U. H. O.; ROCHA, F. M. D.; MELO, A. B. D. Utilização De Resíduos Da Indústria De Calçados Em Blocos De Vedação Com Novas Dimensões - Leveza E Produtividade. In: **XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**. Florianópolis: [s.n.], 2006. p. 4309–4318.
- QUEIROZ, J. E. R. d.; GOMES, H. M. Introdução ao processamento digital de imagens. **RITA**, v. 13, n. 2, p. 11–42, 2006.
- REIS, J. M.; CARNEIRO, E. P. Effect of piassava lees in the fracture behavior of polymer mortars. **Composite Structures**, Elsevier Ltd, v. 95, p. 564–568, 2013. ISSN 02638223.
- REIS NETO, J. M. d.; FIORI, A. P.; LOPES, A. P.; MARCHESE, C.; PINTO-COELHO, C. V.; VASCONCELLOS, E. M. G.; SILVA, G. F. da; SECCHI, R. A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 3, p. 498–508, 2011.
- ROCHA, F. M. D.; MELO, A. B.; SILVA, E. P.; TORRES, S. M. Pré-moldado (bloco EVAi) para alvenaria intertravada: projeto, produção, desempenho e simulação de uso em habitação social. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 47–60, 2013. ISSN 1678-8621.
- ROSSIGNOLO, J. A. Concreto leve estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações. **São Paulo: Pini**, 2009.
- ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. Concreto estrutural leve. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.**, Ibracon, 2005.
- SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D. de. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. **Revista Materia**, v. 18, n. 2, p. 1273–1285, 2013. ISSN 15177076.
- SANTIAGO, E. Q. R. **Utilização de agregados de EVA e RCD para a obtenção de concretos leves**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Feira de Santana, 2008.
- SANTOS, F. M.; SOUZA, T. F.; BARQUETE, D. M.; AMADO, F. D. Comparative analysis of the sisal and piassava fibers as reinforcements in lightweight cementitious composites with EVA waste. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 128, p. 315–323, 2016. ISSN 09500618.

- SANTOS, J.; IGLESIAS, S.; DOMINGUEZ, D.; ALMEIDA, H. Caracterização de argamassas leves reforçadas com fibras de piaçava utilizando tomografia computadorizada e análise de fourier. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 10, n. 2, 2015.
- SATISH, C.; BERNTSSON, L. Lightweight aggregate concrete, science, technology, and applications. **Published in the USA by Noyes Publications/William Andrew Publishing**, 2002.
- SAVASTANO JÚNIOR, H. S.; PIMENTEL, L. L. Suitability of vegetable fiber residues as construction material. **Revista Brasileira de Engenharia ...**, p. 103–110, 2000.
- SEBRAE - SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Estudo de mercado. Indústria: Couro e Calçados**. [S.l.], 2017.
- SILVA, E. J. d.; SILVA, P. D. da; MARQUES, M. L.; Fornari Junior, C. C. M.; GARCIA, F. C.; LUZARDO, F. H. M. Resistência à compressão de argamassas em função da adição de fibra de coco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 12, p. 1268–1273, 2014. ISSN 1415-4366.
- SILVA, F. d. A. **Aplicação de técnicas de processamento de imagens na caracterização de materiais**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.
- SILVA, R.; ALVIM, R.; DOMÍNGUEZ, D. Study of mechanical strength of a cementitious composite reinforced with piassava fibers. **ETC Educação, Tecnologia e Cultura**, v. 8, p. 29–39, 2011.
- SILVA, R. M.; DOMINGUEZ, D. S.; ALVIM, R. C.; IGLESIAS, S. M. Análise da resistência mecânica e porosidade de um compósito cimentício leve com EVA e reforçado com fibras de piaçava. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 8, p. 44–50, 2013. ISSN 18098797.
- SIQUEIRA MAIA, L.; STRAMARI, M.; FOLGUERAS, M. Adição de poliuretano expandido para a confecção de blocos de concreto leve. **Revista Matéria**, v. 9, n. 4, p. 399–410, 2004.
- SOLID SOUND. 2013. Disponível em: <<http://www.solidsound.com.br/produto/301-bloco-macico>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2018.
- TAROZZO, H. **Tijolo de borracha: empresários usam EVA para construção**. 2014. Disponível em: <<http://casa.abril.com.br/materiais-construcao/tijolo-de-borracha-empresarios-usam-eva-para-construcao/>>. Acesso em: 24 de janeiro de 2018.
- TOLÊDO FILHO, R. D.; SCRIVENER, K.; ENGLAND, G. L.; GHAVAMI, K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p. 127–143, 2000.
- TONOLI, G. H. D.; JOAQUIM, A. P.; ARSENÈ, M. A.; BILBA, K.; SAVASTANO JR, H. Performance and durability of cement based composites reinforced with refined sisal pulp. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 22, n. 2, p. 149–156, 2007. ISSN 10426914.

TOPÇU, I. B. Semi lightweight concretes produced by volcanic slags. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 27, n. 1, p. 15–21, 1997.

UCHÔA, S. B. B.; TONHOLO, J.; ARRUDA, T. H. de S.; GOMES, P. C. C.; MORAES, K. A. d. M. Prospecção tecnológica: painéis de vedação utilizando concreto leve e materiais reciclados. **Cadernos de Prospecção**, v. 8, n. 4, p. 780–790, 2015.

WELLINGTON, S. L.; VINEGAR, H. J. et al. X-ray computerized tomography. **Journal of Petroleum Technology**, Society of Petroleum Engineers, v. 39, n. 08, p. 885–898, 1987.

WOLSKI, S. D.; BOLANDER, J.; LANDIS, E. An *in-situ* x-ray microtomography study of split cylinder fracture in cement-based materials. **Experimental Mechanics**, Springer, v. 54, n. 7, p. 1227–1235, 2014.

Anexos

ANEXO A – Fluxograma da rotina utilizada na classificação dos elementos

