

4 METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE POROS E AGREGADOS EM CONCRETO POR MEIO DE IMAGEM OBTIDA DE MICROTOMÓGRAFO

4.1 Tomografia computadorizada

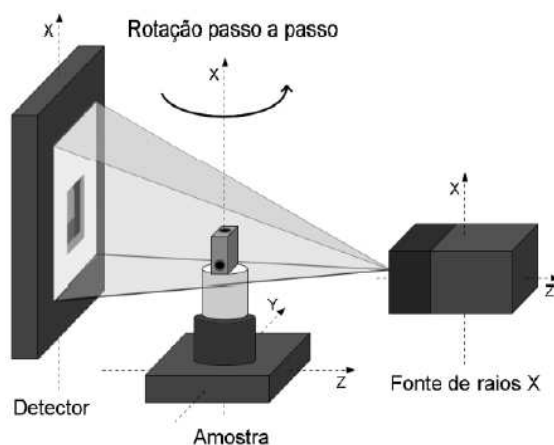
A tomografia computadorizada (CT) muito utilizada em aplicações relacionadas à medicina, trata de uma técnica capaz de visualizar o interior de um objeto de forma não destrutiva, além de seus usos na biologia diversas outras aplicações podem ser dadas à técnica de tomografia, como por exemplo, a inspeção não destrutiva de peças industriais. (MENDES, 2010; NARDELLI, 2012; BALDO, 2013)

Na tomografia as imagens são reconstruídas a partir de projeções obtidas, normalmente, pela incidência de raios X sobre o corpo em análise Oliveira (2015). Os aparelhos tomográficos geram imagens que representam cortes paralelos bidimensionais (fatias) e uniformemente espaçados.

O princípio utilizado na reconstrução tomográfica foi apresentado pela primeira vez em 1917, por Johann Radon. Entretanto, a descoberta de Radon só pode ser implementada no final da década de 60, com a evolução da capacidade de cálculo dos computadores. Apenas na década de 70 foi apresentado o primeiro aparelho de Tomografia Computadorizada (CT) por Hounsfield e Cormack.

De acordo com (MENDES, 2010, p.29), “a inspeção tomográfica industrial difere um pouco da empregada em medicina, mas, o princípio matemático de reconstrução tomográfico, é o mesmo. Na tomografia industrial o ensaio, em geral, consiste em colocar o objeto a ser analisado entre uma fonte de raios X e um detector sobre uma mesa giratória”. (OLIVEIRA, 2015)

Figura 40 – Esquema de tomografia industrial

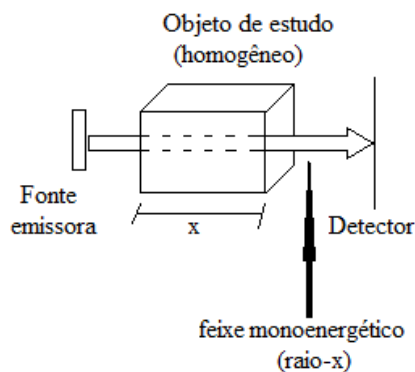


Nota: Com a amostra colocada em superfície giratória alocada entre a fonte de radiação e o detector.

Fonte: SILVA; BALDO, 2013.

O objeto em estudo deve ser colocado entre uma fonte emissora de raios X e um detector que capta a intensidade do feixe após este atravessar o objeto, figura 41.

Figura 41 – Objeto homogêneo atravessado por um feixe de raio-x



Fonte: OLIVEIRA, 2015.

A diferença de intensidade do feixe entre a fonte e o detector é chamada de atenuação e depende do material. Ao atravessar um corpo de comprimento x , o feixe monoenergético obedece a Lei de Beer-Lambert dada pela equação (7). (OLIVEIRA, 2015)

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (21)$$

Onde, I_0 é a intensidade do raio incidente, μ o coeficiente de atenuação do material, e I é a intensidade de saída do raio.

Uma variante é a Microtomografia Computadorizada (μ CT) que surge da necessidade de se analisar estruturas da ordem de micrômetros. Em seu trabalho sobre aplicação de Microtomografia aplicada à metrologia, Oliveira (2015) avalia os resultados obtidos com o equipamento utilizado, concluindo pela aplicabilidade do mesmo mediante comparações com resultados de laboratório obtidos com equipamentos de metrologia de alta precisão.

4.2 Produção das amostras e equipamento utilizado

Para a realização deste trabalho, foram tomografadas amostras corpo-de-prova cilíndrico medindo 25cm de diâmetro por 50mm de altura. Fig. 42.

Figura 42 – Corpos de Prova 25mm x 50mm utilizados na microtomografia.



Fonte: O Autor, 2015.

Foram utilizadas neste trabalho as mesmas amostras utilizadas por Pessôa (2011). Todo o concreto utilizado foi coletado diretamente na concreteira com o objetivo de se ter um material para pesquisa com as características reais do material que é normalmente utilizado nas obras (PESSÔA, 2011).

Tabela 5 – Traço para 1m^3 de concreto na amostra utilizada para testes com microtomografia.

Material	Unidade	Quantidade p/ 1 m ³
Cimento	kg	380,0
Brita 0	kg	150,0
Brita 1	kg	795,0
Areia	kg	641,0
Pó de Pedra	kg	210,0
Aditivo Plastek	l	1,87
Água	l	159,0
Relação Água/Cimento	0,42	

Fonte: Adaptado de PESSÔA, 2011.

O tomógrafo utilizado foi o SkyScan, modelo 1172, Fig. 22. Trata-se de um aparelho compacto de microtomografia de alta resolução ($14,97\ \mu\text{m}$) que opera com tubo de raios X em intervalo de tensão de 20 a 100kV e com potência até 10 W.

Figura 43 – SkyScan com a amostra de concreto



Fonte: O Autor, 2015.

Potência :100 kV, 100 mA.

Tamanho do Pixel = $14,97\ \mu\text{m}$.

DSO=181,987 mm, DSD=281,728 mm.

Filtro = Al + Cu.

Ângulo de Rotação = $0,40^\circ$.

Tempo de exposição = 885 ms.

Feixe Cônico - Ângulo Horizontal = $9,41^\circ$.

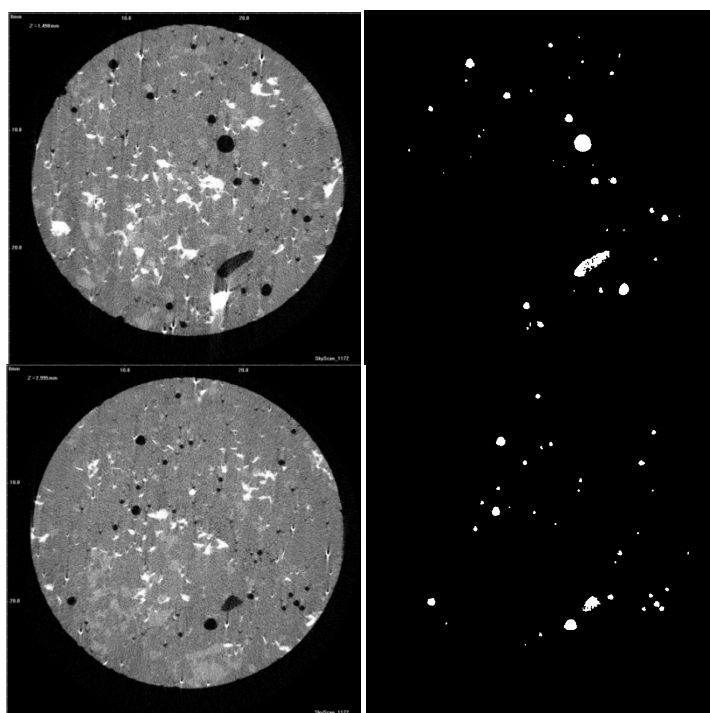
Feixe Cônico - Ângulo Vertical = $4,94^\circ$.

Espessura da fatia = $14,97\ \mu\text{m}$.

4.3 Detecção de poros na amostra

Nas imagens tomográficas apresentadas, os pontos claros representam a ocorrência da material capaz de maior atenuação do feixe de raio X, sendo os poros caracterizados por regiões com predominância de pontos extremamente escuros. Após uma inversão da imagem (complemento) e aplicando-se a metodologia utilizada no capítulo 3 foram obtidos os seguintes resultados na detecção dos poros. Fig. 44.

Figura 44 – Detecção de poros em imagem tomográfica

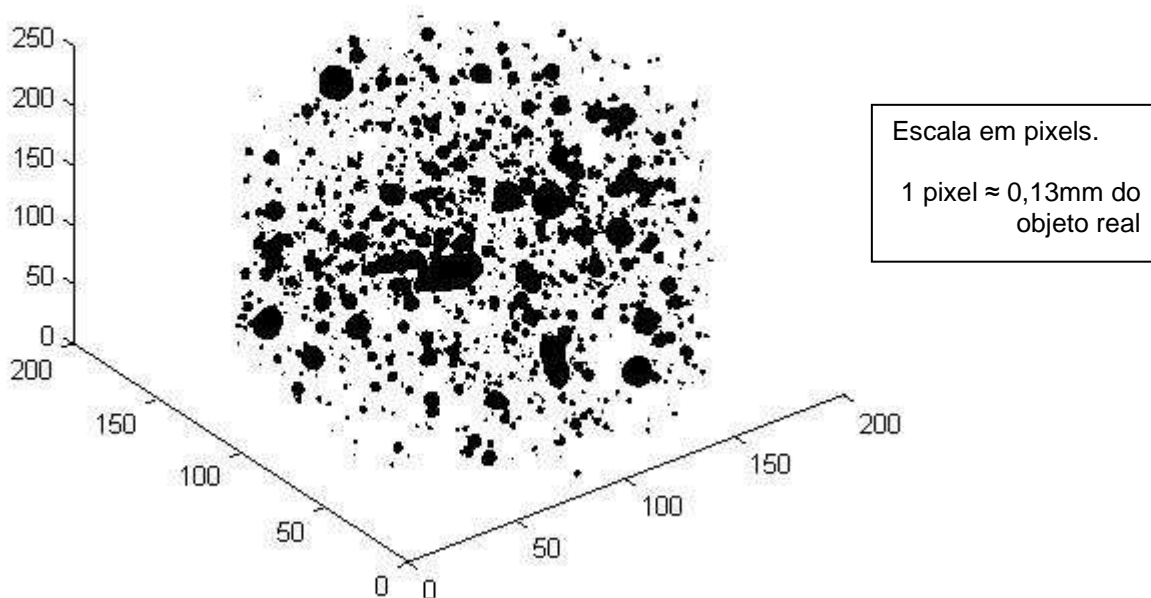


Legenda: (esquerda) - Imagens obtidas pelo SkyScan; (direita) – imagens processadas pelo MatLab ®.

Fonte: O Autor, 2015.

Geradas as imagens segmentadas, o mesmo processo foi executado para 1060 fatias do corpo de prova, 200 destas fatias foram sobrepostas para a construção de um modelo tridimensional da distribuição dos poros. Fig 45.

Figura 45 – Imagem produzida pelo MatLab ®



Nota1: Imagem apresentando a distribuição tridimensional dos poros.

Nota2: Escala em Pixels sendo cada pixel equivalente a aproximadamente 0,13 mm.

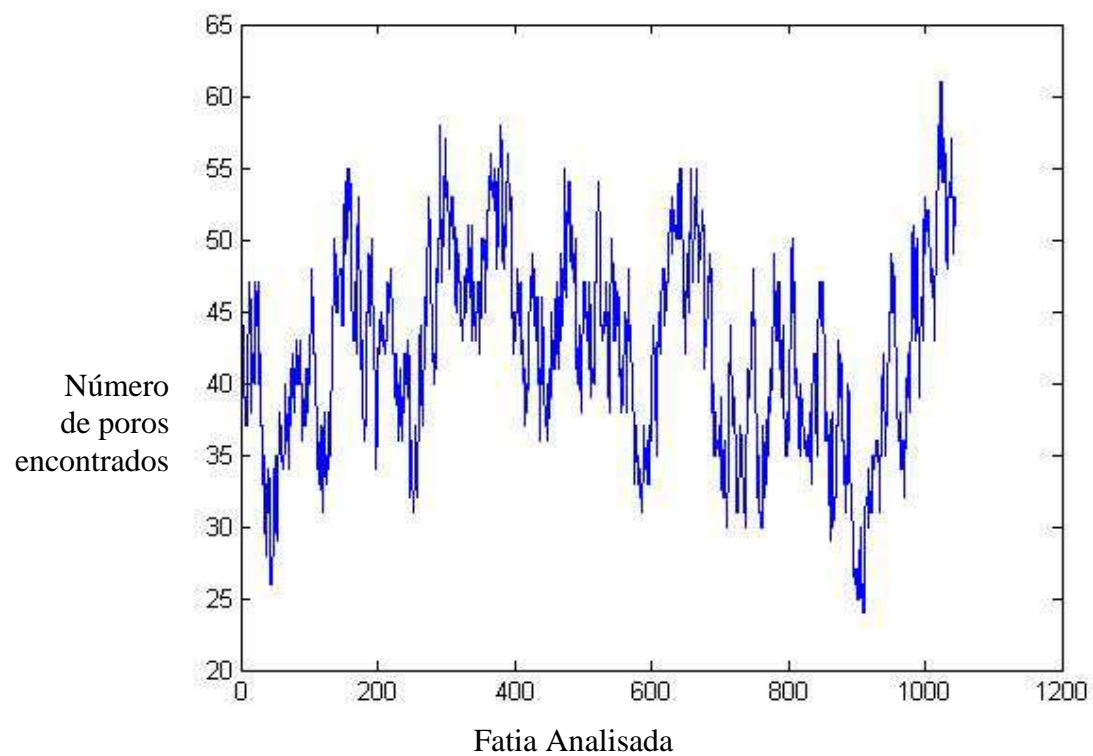
Fonte: O Autor, 2015.

Os gráficos apresentados nas figuras 46 a 49 mostram como os poros estão distribuídos nas fatias. Na Fig. 46 é apresentado o número de poros identificado em cada uma das fatias obtidas.

Como o cilindro obtido possui pequenas imperfeições, e como estas podem influenciar no cálculo do percentual de poros (porosidade), a figura 47 mostra a área da amostra observada em cada uma das fatias.

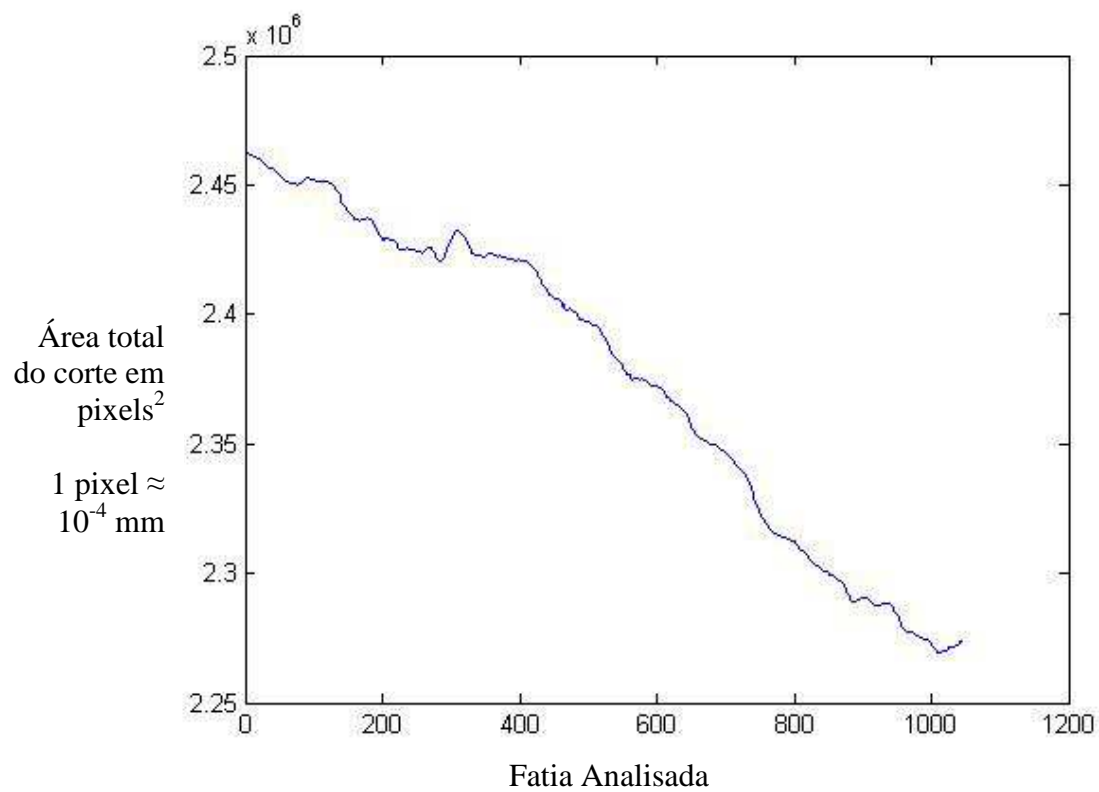
Por fim, as figuras 48 e 49 mostram respectivamente a área total ocupada pelos poros (medida em pixels) e a porosidade da amostra.

Figura 46 – Número de poros por fatia analisada



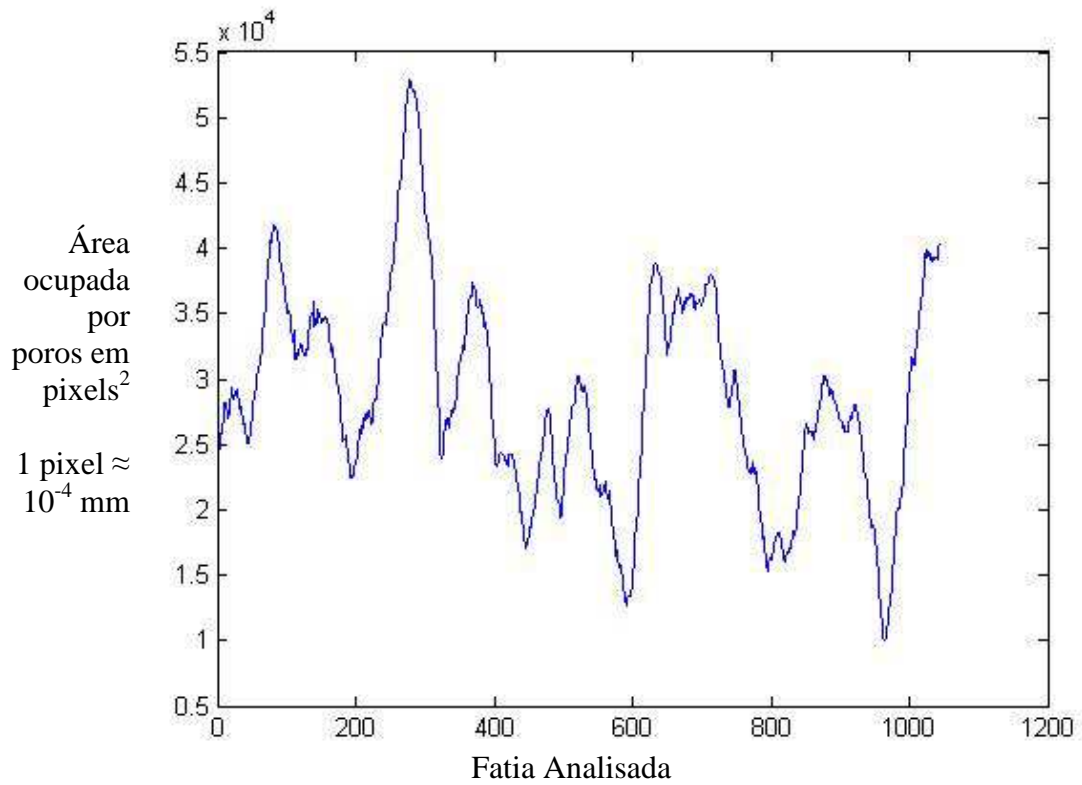
Fonte: O Autor, 2015.

Figura 47 – Área da amostra por fatia analisada



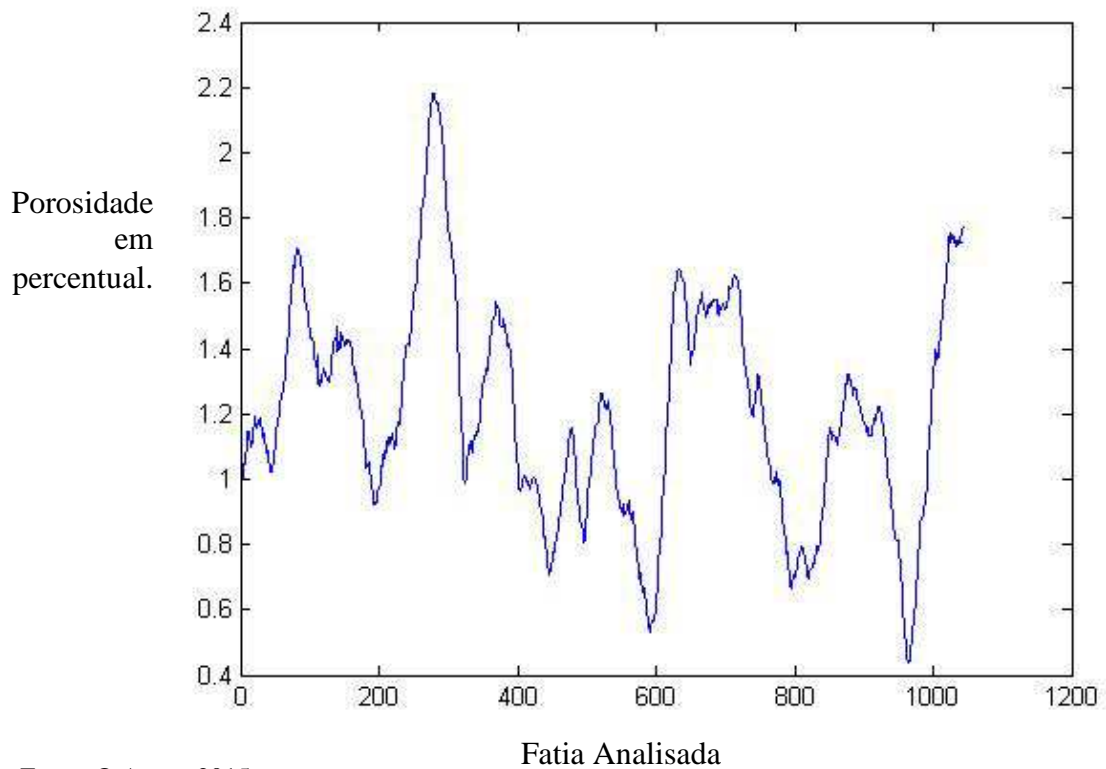
Fonte: O Autor, 2015.

Figura 48 – Área dos poros



Fonte: O Autor, 2015.

Figura 49 – Porosidade

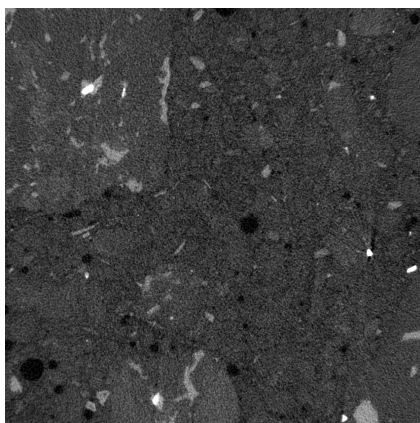


Fonte: O Autor, 2015.

4.4 Detecções de agregados na amostra

O processo de segmentação para extrair da imagem os pixels referentes a agregados demonstrou um maior desafio devido ao fato de a atenuação causada no feixe pelos agregados era semelhante à atenuação causada pela pasta de cimento. Fig. 50.

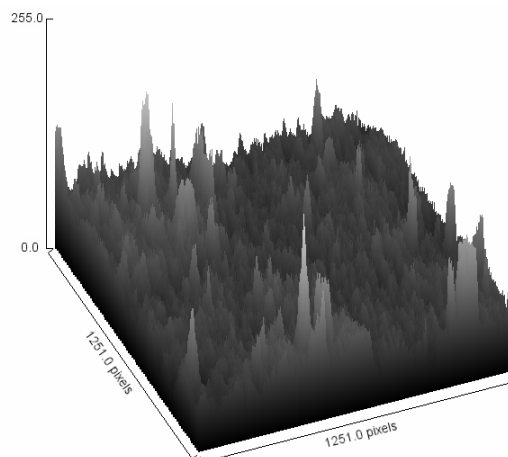
Figura 50 – Semelhança entre área de agregado e pasta



Nota: Em imagem microtomográfica.
Fonte: O Autor, 2015.

De fato, ao visualizarmos a imagem como uma superfície, Fig. 51, percebe-se tratar de uma imagem com muitos elementos de alta frequência e pouca distinção entre áreas de Pasta e Agregado.

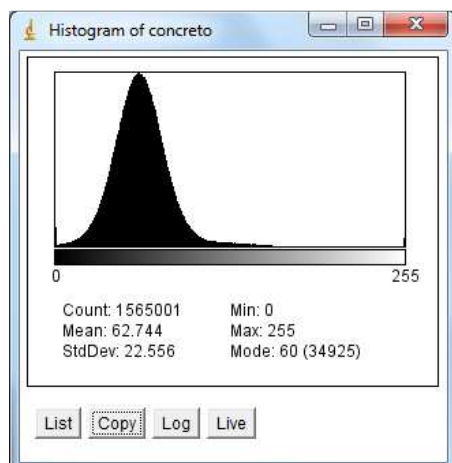
Figura 51 – Imagem como superfície



Nota: Tom de cinza em escala de 0-255.
Fonte: O Autor, 2015.

Na busca de um ponto de corte (Limiarização) que possibilitasse uma boa binarização da imagem percebe-se que o histograma (Fig. 52) apresenta um grupo de pontos com um único pico, não sendo possível a visualização de “vales” que possam sinalizar para um ponto de corte capaz de segmentar as áreas de pasta e agregado.

Figura 52 – Histograma da imagem de concreto

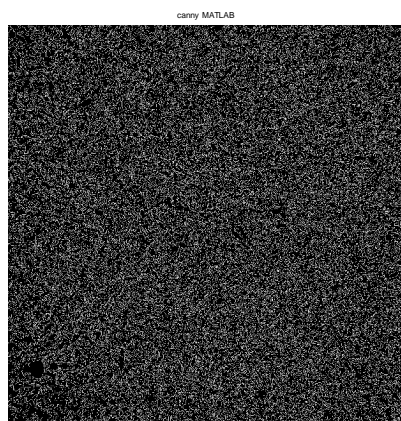


Nota: Obtida por microtomografia.

Fonte: O Autor, 2015.

Técnicas normalmente aplicadas na detecção de fronteiras entre regiões da imagem não apresentaram sucesso dada a semelhança dos índices de atenuação. Foram vários filtros comumente utilizados na detecção de bordas, como estes filtros normalmente realçam as altas frequências, eles acabam por tornar ainda mais difícil a distinção entre poros e pasta. Entre os filtros testados temos: Canny Fig 53, Roberts Fig 54, Prewitt Fig 55 e Sobel Fig. 56 e 57.

Figura 53 – Filtro de Canny



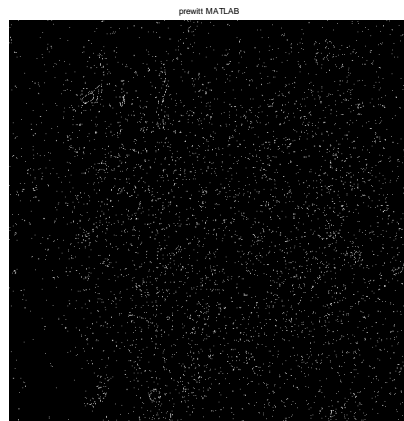
Fonte: O Autor, 2015.

Figura 54 – Filtro de Roberts.



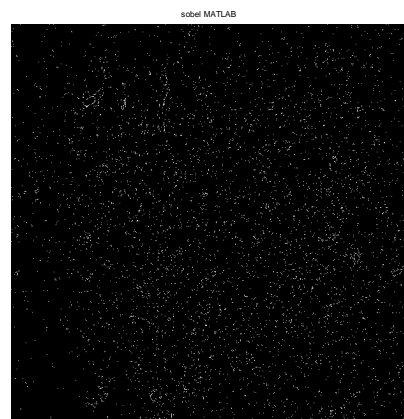
Fonte: O Autor, 2015.

Figura 55 – Filtro de Prewitt.



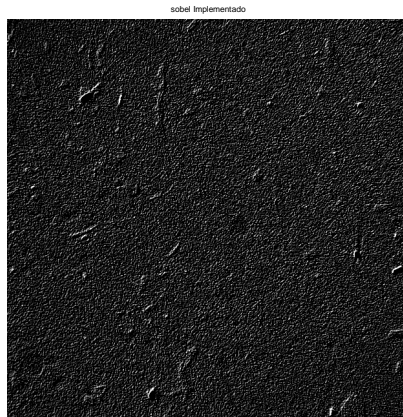
Fonte: O Autor, 2015.

Figura 56 – Filtro de Sobel



Nota: Padrão do Matlab.
Fonte: O Autor, 2015.

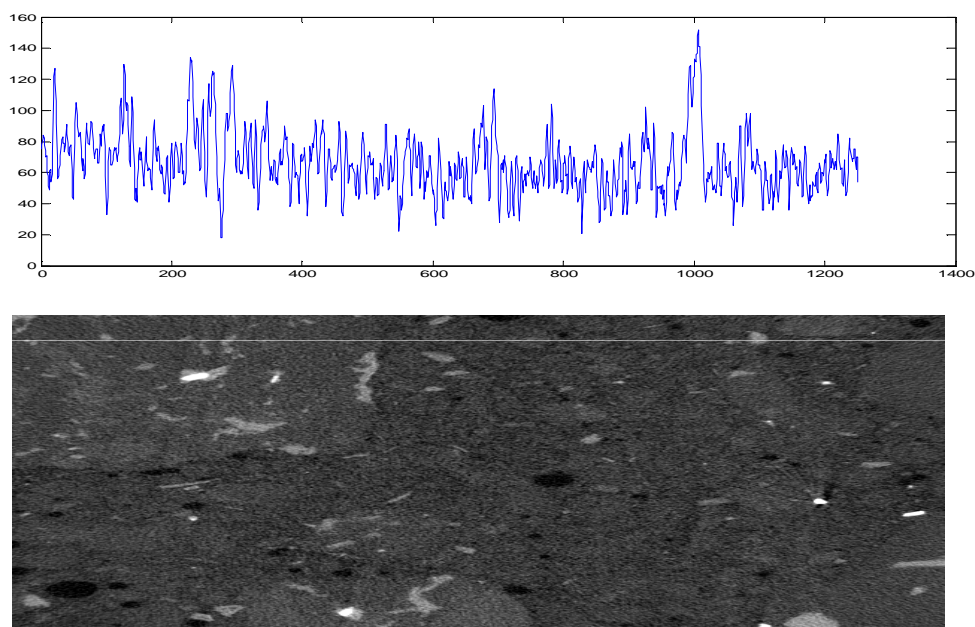
Figura 57 – Filtro de Sobel
(Implementação
Própria)



Fonte: O Autor, 2015.

Percebe-se, pela Fig 58, ao analisarmos uma linha da imagem como um sinal unidimensional, que tal sinal possui parte de sua extensão no interior de um agregado graúdo (o início da linha) e o restante na pasta do concreto. Contudo, em uma análise do sinal unidimensional por observador humano não é possível a distinção entre elas.

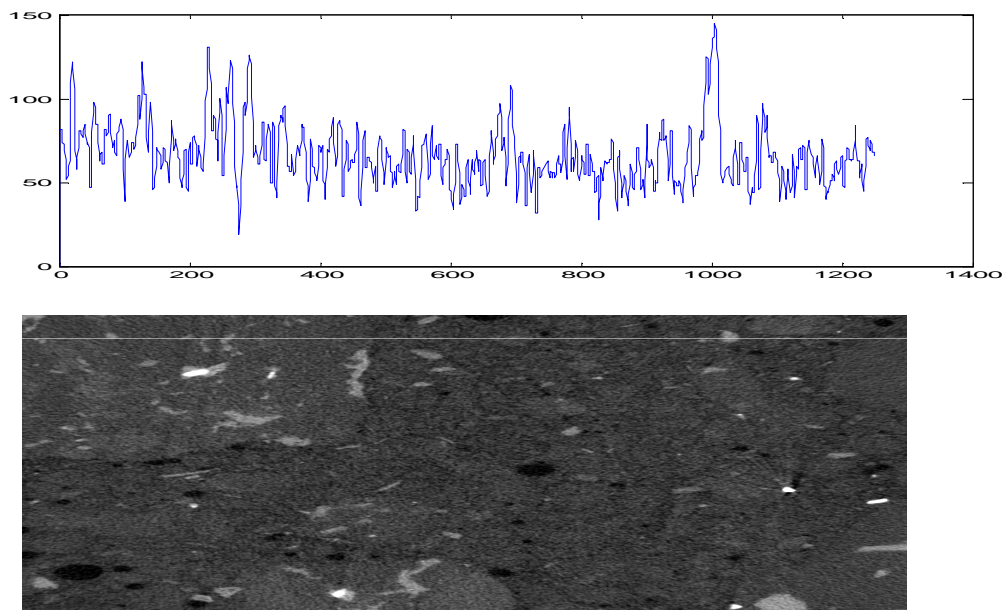
Figura 58 – Linha da imagem tomográfica exibida como sinal unidimensional



Fonte: O Autor, 2015.

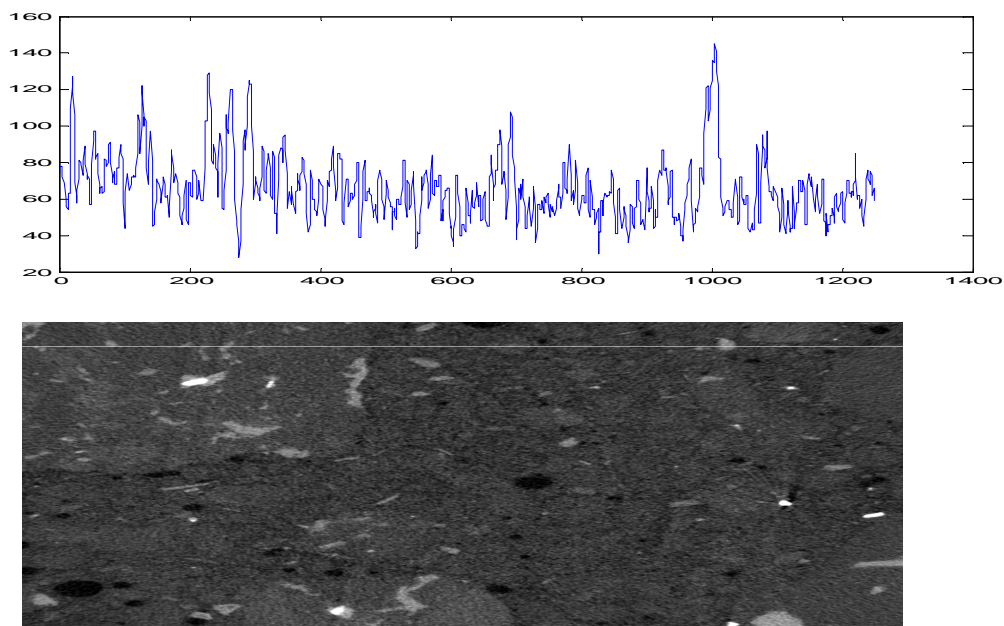
Considerando o problema da alta frequência, considere-se um teste com a aplicação de filtro de passa baixa (mediana) Fig. 59. Pouco a nenhum ganho foi obtido com a aplicação do filtro. Em outra tentativa foi aplicado um filtro de remoção de ruído morfológico em tons de cinza, Fig 60, cujo resultado igualmente não indicou qualquer avanço no objetivo da segmentação dos agregados.

Figura 59 – Aplicação do filtro de mediana



Fonte: O Autor, 2015.

Figura 60 – Aplicação de filtro de remoção de ruído morfológico



Fonte: O Autor, 2015.

4.5 Metodologia adotada para detecção de agregados por microtomografia

Após os testes a metodologia que apresentou os melhores resultados obtidos foi obtida partindo-se da binarização da imagem original e em seguida aplicando uma série de filtros morfológicos.

A escolha do ponto de limiarização apresenta-se como uma das mais desafiadoras etapas de muitos processos de segmentação, principalmente em problemas onde não se pode identificar uma distinção característica entre os pixels das regiões a serem segmentadas.

Sempre que possível, devem ser investigados métodos de determinação automatizada do *Threshold*. Para o problema analisado no método adotado, percebe-se que o *Threshold* calculado pela técnica desenvolvida por Otsu, (Também conhecido por “método de Otsu”) apresentou resultados satisfatórios, por serem equivalentes às melhores escolhas feitas por tentativa e erro.

No exemplo a seguir a escolha do threshold para a binarização foi feita utilizando o método de Otsu. Fig 61. Porém é importante ressaltar que foram testadas diversas escolhas manuais de ponto de corte, coincidindo a melhor destas escolhas com a sugerida pelo método de Otsu.

Figura 61 – *Threshold* pelo método de Otsu (continua)

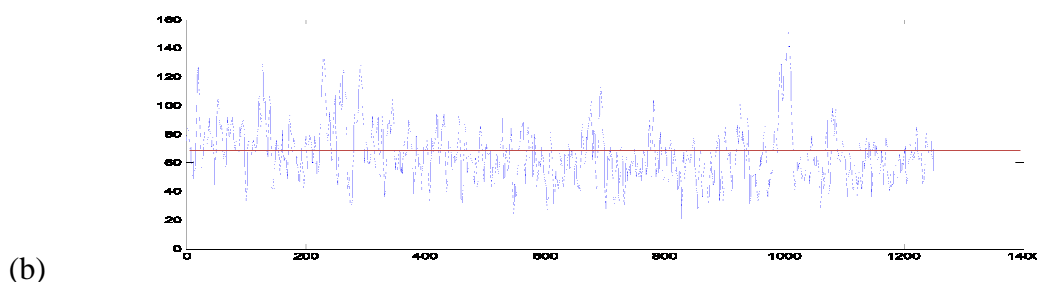
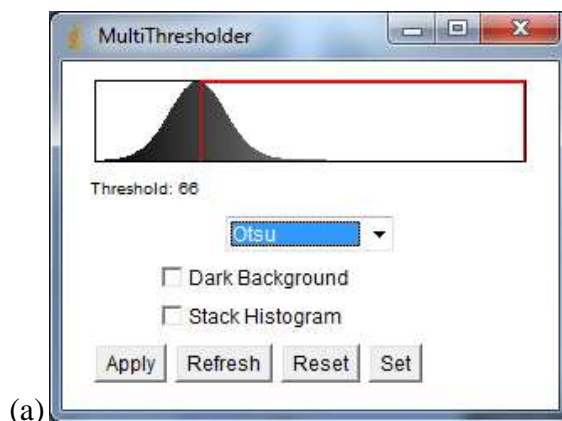
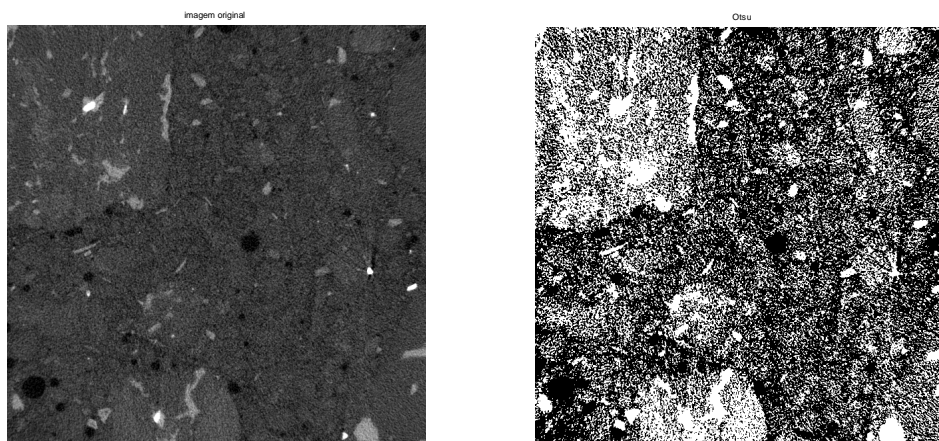


Figura 61 – *Threshold* pelo método de Otsu (conclusão)



(c)

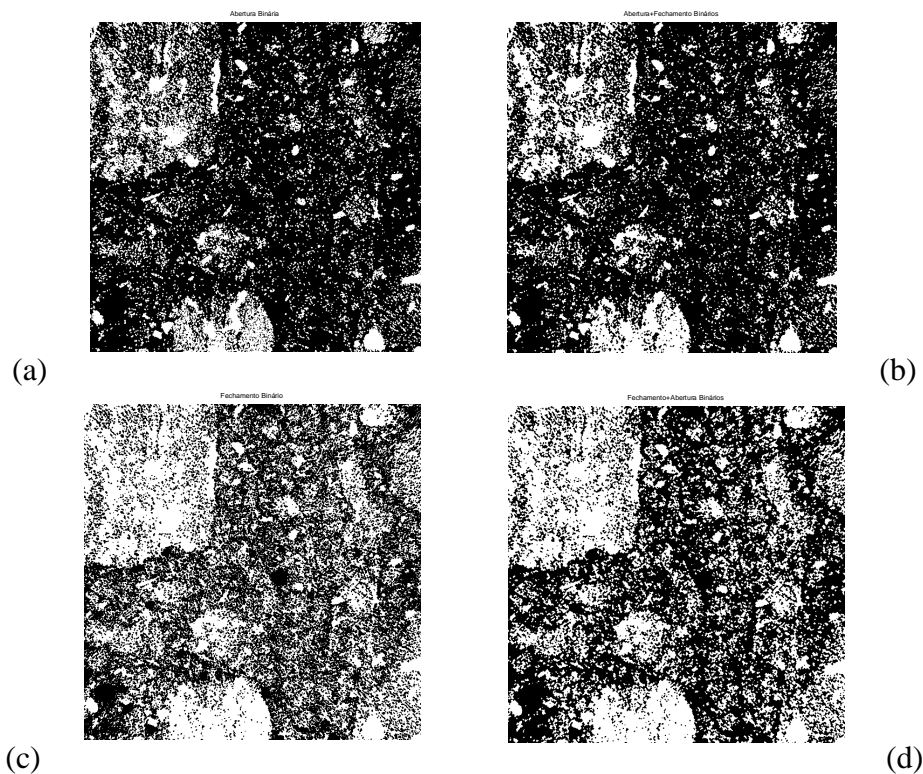
(d)

Legenda: (a) - Escolha de *threshold* pelo método de Otsu; (b) - ponto de corte sobreposto ao sinal unidimensional; (c) - imagem original; (d) - imagem binarizada.

Fonte: O Autor, 2015.

A partir da imagem binarizada obtida foram realizados vários testes com operações morfológicas, cujos resultados podem ser visualizados nas figuras 62 a 65.

Figura 62 – Operações com disco de 2 *pixels* de raio



(a)

(b)

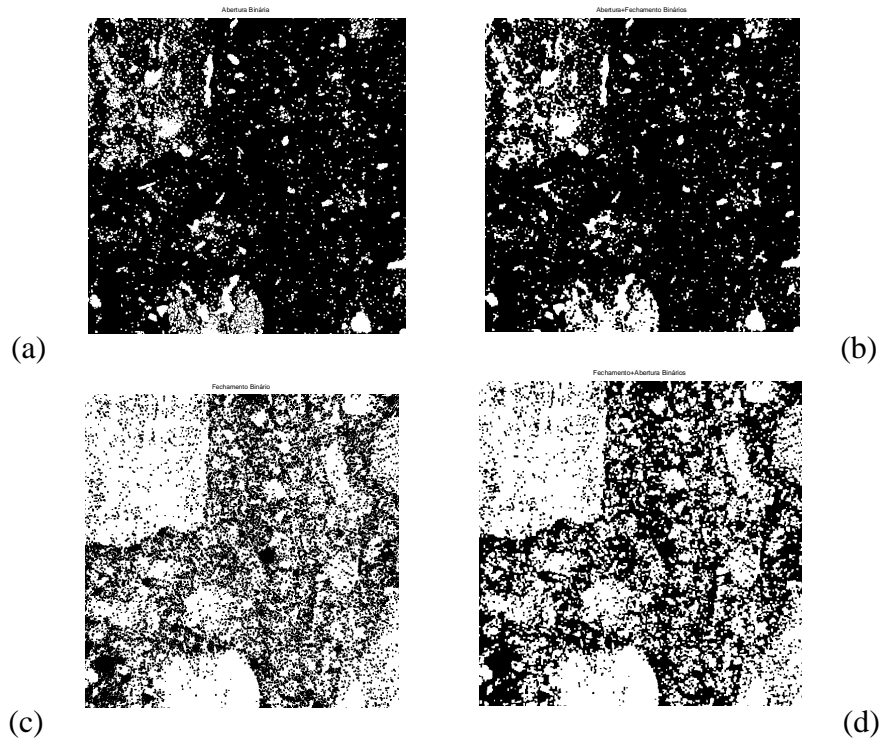
(c)

(d)

Legenda: (a) - Abertura; (b) - Abertura seguida de Fechamento; (c) - Fechamento; (d) - Fechamento + Abertura.

Nota: Operações utilizando como elemento estruturante um disco com raio = 2 *pixels*.
Fonte: O Autor, 2015.

Figura 63 – Operações com disco de 3 *pixels* de raio

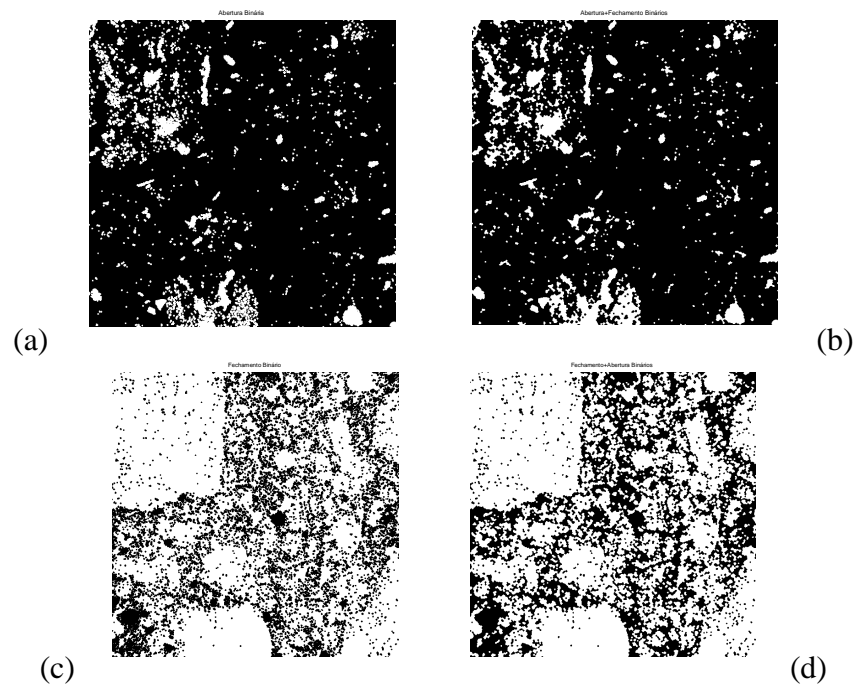


Legenda: (a) - Abertura; (b) - Abertura seguida de Fechamento; (c) - Fechamento; (d) - Fechamento seguido de Abertura.

Nota: Operações utilizando como elemento estruturante um disco com raio = 3 *pixels*.

Fonte: O Autor, 2015.

Figura 64 – Operações com disco de 4 *pixels* de raio

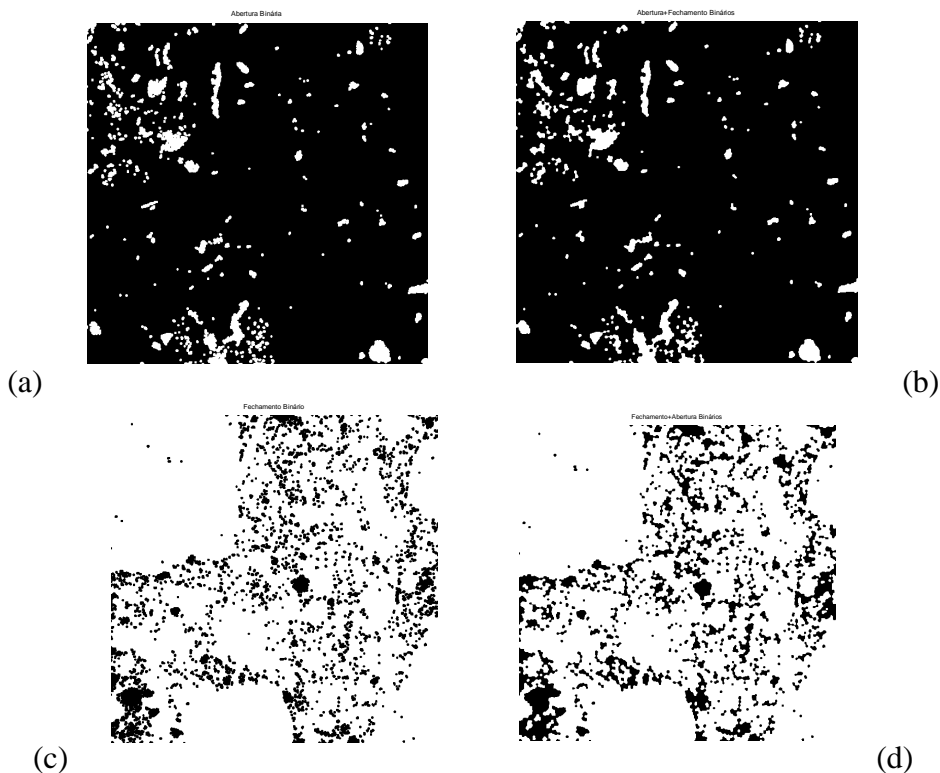


Legenda: (a) - Abertura; (b) - Abertura seguida de Fechamento; (c) - Fechamento; (d) - Fechamento seguido de Abertura.

Nota: Operações utilizando como elemento estruturante um disco com raio = 4 *pixels*.

Fonte: O Autor, 2015.

Figura 65 – Operações com disco de 5 *pixels* de raio



Legenda: (a) - Abertura; (b) - Abertura seguida de Fechamento; (c) - Fechamento;
(d) - Fechamento seguido de Abertura.

Nota: Operações utilizando como elemento estruturante um disco com raio = 5 *pixels*.

Fonte: O Autor, 2015.

Apresenta-se a seguir a seqüência de operações morfológicas de melhor resultado experimental dada pela figura 66. Nela são feitas as seguintes operações:

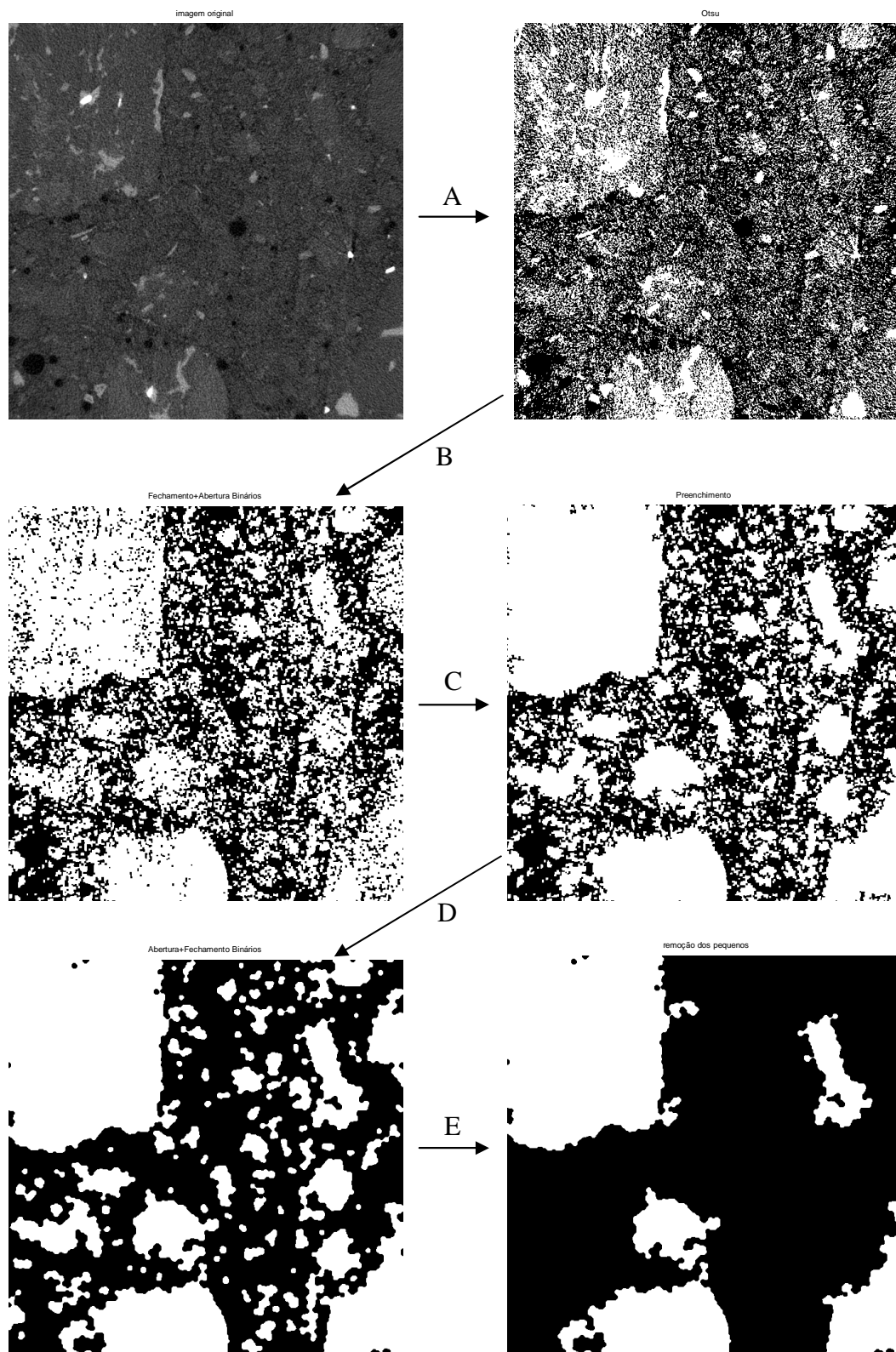
- A – Obtenção de Imagem em Preto e Branco – Binarização pelo método de Otsu;
- B – Remoção de Ruído I – Fechamento Morfológico seguido de Abertura Morfológica, ambos utilizando como elemento estruturante um disco de e *pixels* de raio;
- C – Remoção de Ruído II (pimenta) – Retirada de todas as “ilhas”, ou seja, dos grupos de pontos pretos circundados por pontos brancos;
- D – Remoção de Ruído III (sal) – Abertura Morfológica seguida de Fechamento Morfológico, ambos utilizando como elemento estruturante um disco com 8 *pixels* de raio;

E – Remoção dos elementos pequenos, com área inferior á 30k pixels, uma vez que os mesmos não possuem área suficiente para representar um agregado de tamanho mínimo segundo a norma ABNT NBR7211 (1983);

No passo “E” podemos definir o tamanho do agregado procurado, podendo dessa forma buscar apenas agregados graúdos (brita) descartando os agregados miúdos (areia).

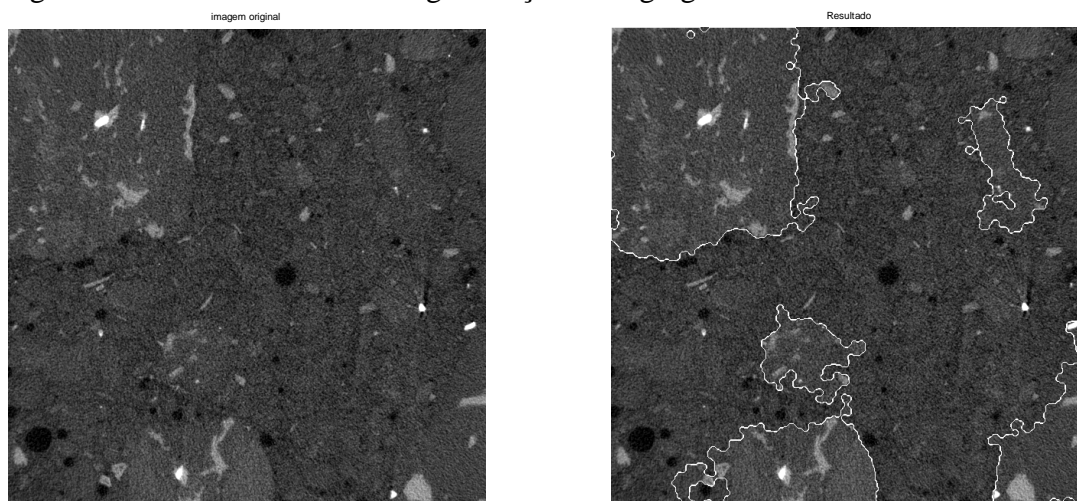
Para melhor visualização do resultado final a figura 67 mostra uma cópia da imagem original onde foi adicionado um contorno nos agregados graúdos encontrados.

Figura 66 – Processo de segmentação dos agregados em imagem tomográfica



Fonte: O Autor, 2015.

Figura 67 – Resultado final da segmentação dos agregados



Fonte: O Autor, 2015.

5 RESULTADOS

5.1 Metodologias com uso de escâner comercial

Os mesmos corpos de prova foram utilizados para todos os experimentos com escâner, de forma a possibilitar a comparação dos resultados obtidos.

5.1.1 Detecção de agregados com uso de fenolftaleína

Apresentam-se na tabela 6, os resultados referentes à quantidade de agregado graúdo obtido para o corpo de prova 1 (CP1) com o método da aplicação de fenolftaleína. Na obtenção destes dados foi feita uma contagem dos pixels identificados como pertencentes às áreas de agregado.

A nomenclatura é feita da seguinte forma: Foram utilizados três corpos de prova identificados como CP1, CP2 e CP3. Sendo analisadas para cada corpo de prova, 4 (quatro) fatias. Ex.: CP2-3 (fatia nº 3 do corpo de prova nº 2). Cada fatia produz duas superfícies analisáveis, que serão identificadas como I (superfície inferior) e S (superfície superior). Ressalvando que foram descartadas a superfície superior do 1º corte (topo), bem como a inferior do 3º corte (base).

Cada uma das superfícies produziu cinco imagens de regiões distintas, desta forma torna-se possível trabalhar arquivos menores com alta resolução. Estas imagens foram categorizadas como A, B, C, D e E. Desta forma a imagem D do CP1-2-S trata-se de uma das imagens da fatia 2 da superfície superior do corpo de prova nº 1.

Tabela 6 - Resultados da detecção de agregado graúdo para o corpo de prova 1

CORTE 1			
CP1-1-I		CP1-2-S	
IMAGEM	%	IMAGEM	%
A	34,87	A	36,06
B	33,20	B	34,27
C	39,27	C	37,07
D	45,58	D	46,79
E	44,03	E	39,52
MÉDIA	39,4	MÉDIA	38,70
MÉDIA DE AGREGADO GRAÚDO NO CORTE			39,10

CORTE 2			
CP1-2-I		CP1-3-S	
IMAGEM	%	IMAGEM	%
A	35,93	A	45,49
B	33,26	B	26,62
C	42,12	C	33,65
D	20,63	D	28,66
E	42,62	E	46,69
MÉDIA	34,9	MÉDIA	36,2
MÉDIA DE AGREGADO GRAÚDO NO CORTE			35,6

CORTE 3			
CP1-3-I		CP1-4-S	
IMAGEM	%	IMAGEM	%
A	34,86	A	36,32
B	37,53	B	45,69
C	41,69	C	46,97
D	45,47	D	42,52
E	40,83	E	43,72
MÉDIA	40,1	MÉDIA	43,6
MÉDIA DE AGREGADO GRAÚDO NO CORTE			41,8
MÉDIA DE AGREGADO GRAÚDO NO CP1 (%)			35,9

Fonte: O Autor, 2015.

Na tabela 7, são apresentados os resultados para quantidade de agregado graúdo no corpo de prova 2 (CP2).

Tabela 7 - Resultados da detecção de agregado graúdo para o corpo de prova 2

CORTE 1			
CP2-1-I		CP2-2-S	
IMAGEM	%	IMAGEM	%
A	39,41	A	35,15
B	44,76	B	40,21
C	37,17	C	41,65
D	37,29	D	38,34
E	44,67	E	34,74
MÉDIA	40,6	MÉDIA	38
MÉDIA DE AGREGADO GRAÚDO NO CORTE			39,3

CORTE 2			
CP2-2-I		CP2-3-S	
IMAGEM	%	IMAGEM	%
A	41,55	A	44,31
B	33,47	B	39,05
C	32,12	C	34,24
D	45,79	D	32,6
E	44,1	E	38,13
MÉDIA	39,4	MÉDIA	37,7
MÉDIA DE AGREGADO GRAÚDO NO CORTE			38,6

CORTE 3			
CP2-3-I		CP2-4-S	
IMAGEM	%	IMAGEM	%
A	35,91	A	43,22
B	31,57	B	32,97
C	38,61	C	42,15
D	40,65	D	32,94
E	38,15	E	39,57
MÉDIA	36,9	MÉDIA	38,2
MÉDIA DE AGREGADO GRAÚDO NO CORTE			37,6

MÉDIA DE AGREGADO GRAUDO NO CP2 (%)	38,5
--	-------------

Fonte: O Autor, 2015.

Na tabela 8 são apresentados os resultados para quantidade de agregado graúdo no corpo de prova 3 (CP3).

Tabela 8 – Resultados da detecção de agregado graúdo para o corpo de prova 3

CORTE 1			
CP3-1-I		CP3-2-S	
IMAGEM	%	IMAGEM	%
A	31,15	A	38,4
B	38,52	B	36,07
C	45,47	C	34,93
D	descarte	D	descarte
E	31,11	E	31,42
MÉDIA	36,6	MÉDIA	35,2
MÉDIA DE AGREGADO GRAÚDO NO CORTE			35,9

CORTE 2			
CP3-2-I		CP3-3-S	
IMAGEM	%	IMAGEM	%
A	44,43	A	41,54
B	33,73	B	32,22
C	45,67	C	35,7
D	30,45	D	38,12
E	43,16	E	30,49
MÉDIA	39,5	MÉDIA	36,9
MÉDIA DE AGREGADO GRAÚDO NO CORTE			38,2

CORTE 3			
CP3-3-I		CP3-4-S	
IMAGEM	%	IMAGEM	%
A	30,59	A	36,19
B	33,64	B	46,45
C	33,17	C	39,74
D	36,89	D	31,15
E	30,27	E	46,38
MÉDIA	32,9	MÉDIA	39,9
MÉDIA DE AGREGADO GRAÚDO NO CORTE			36,4
MÉDIA DE AGREGADO GRAUDO NO CP3 (%)			36,3

Fonte: O Autor, 2015.

O descarte de alguns resultados se deve ao fato de que algumas imagens estavam fora de foco, o que prejudicaria o resultado final.

Para avaliar o resultado obtido, considera-se o percentual de agregado graúdo real presente nas amostras de concreto, obtido observando-se o traço do concreto. Utilizando os dados do quadro 3 (pág 48) obtém-se a quantidade total de agregado graúdo (brita 0 e 1) e

dividindo este valor pela quantidade total de material necessário para confeccionar os três corpos de prova.

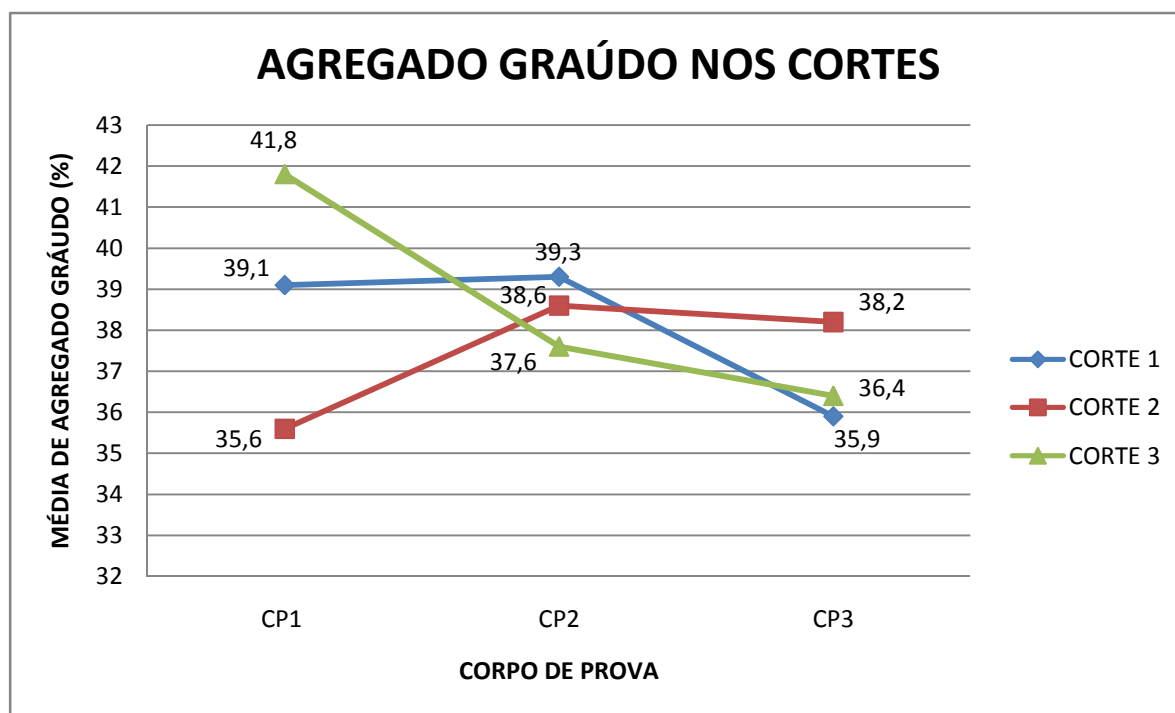
Quantidade total de agregado graúdo: 4,37kg

Quantidade total de material: 13,375kg

Obtivemos o resultado de 0,3267 kg em peso ou 32,67 %.

Na figura 68, são apresentados os valores médios de agregados graúdos nos cortes de cada corpo de prova, e na figura 69, são apresentados os valores médios de agregado graúdo em cada corpo de prova.

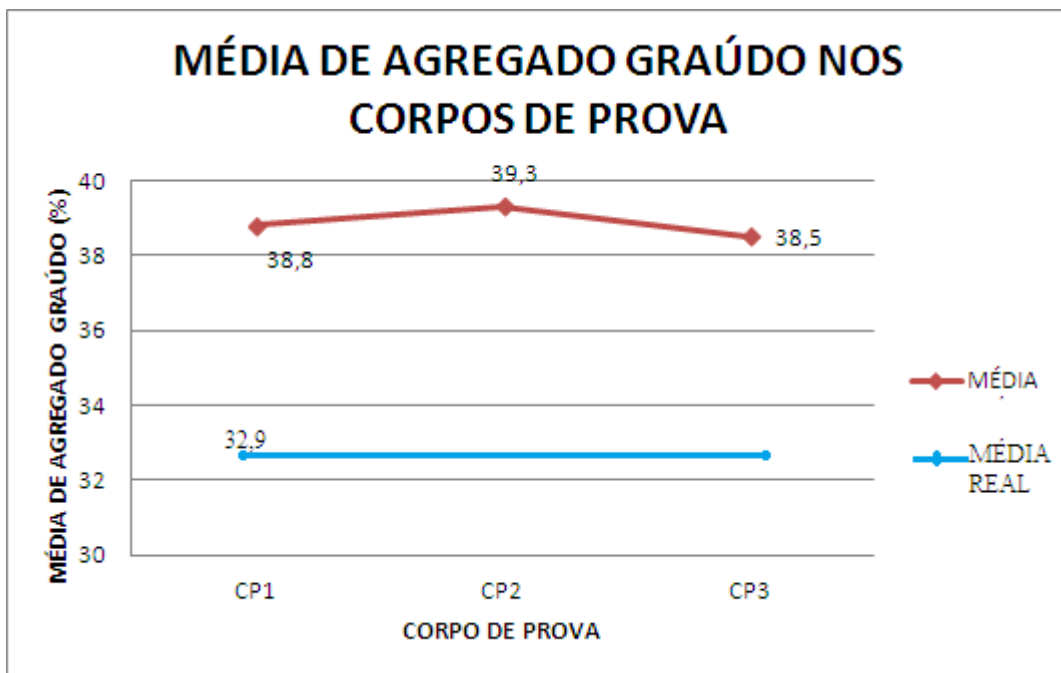
Figura 68 - Agregado graúdo nos cortes



Fonte: CHARLES, 2014.

Com os resultados obtidos pode-se verificar que o método de processamento de imagens utilizado para determinar os percentuais de agregado graúdo retornou resultados com diferença para mais de ordem de 6%. Esta diferença se deve ao fato que a água que foi colocada para confeccionar os corpos de prova evapora, ocasionando a retração da argamassa presente nos corpos de prova.

Figura 69 - Média de agregado graúdo nos corpos de prova



Fonte: CHARLES, 2014.

5.1.2 Deteccção de poros com filtro de freqüência

Nas tabelas 9 a 11 são apresentados os resultados de porosidade para os mesmos corpos de prova, estes foram obtidos com o uso da metodologia proposta no item 3.6.1

Por basear-se no contato da amostra com o vidro do escâner, o método apresentado requer de um corte preciso da amostra. Assim, como um dos cortes apresentou grande imprecisão seu resultado ficou comprometido, sendo o mesmo descartado para efeito do resultado final. Tabela 11.

Tabela 9 – Resultados da detecção de poros por frequência para o CP1

Corte 1				
Porosidade CP1-1-I			Porosidade CP1-2-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	1,75		A	2,94
B	5,00		B	5,25
C	2,35		C	6,48
D	1,60		D	2,81
E	1,94		E	2,46
MÉDIA	2,53		MÉDIA	3,99
Média de porosidade no corte:				3,26

Corte 2				
Porosidade CP1-2-I			Porosidade CP1-3-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	1,59		A	1,61
B	2,47		B	1,59
C	2,4		C	2,75
D	5,15		D	3,68
E	2,79		E	2,33
MÉDIA	2,88		MÉDIA	2,39
Média de porosidade no corte:				2,64

Corte 3				
Porosidade CP1-3-I			Porosidade CP1-4-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	1,85		A	1,02
B	1,89		B	1,66
C	1,21		C	1,38
D	1,1		D	4,23
E	2,63		E	3,46
MÉDIA	1,74		MÉDIA	2,35
Média de porosidade no corte:				2,04
POROSIDADE MÉDIA DO CP (%):				2,65

Fonte: O Autor, 2015.

Tabela 10 – Resultados da detecção de poros por frequência para o CP2

Corte 1				
Porosidade CP2-1-I			Porosidade CP2-2-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	2,23		A	1,44
B	2,3		B	3,05
C	1,54		C	3,33
D	1,61		D	4,84
E	0,75		E	5,46
MÉDIA	1,69		MÉDIA	3,62
Média de porosidade no corte:				2,66

Corte 2				
Porosidade CP2-2-I			Porosidade CP2-3-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	2,71		A	1,53
B	3,16		B	3,13
C	2,21		C	5,24
D	4,11		D	5,35
E	1,05		E	Descarte
MÉDIA	2,65		MÉDIA	3,81
Média de porosidade no corte:				3,23

Corte 3				
Porosidade CP2-3-I			Porosidade CP2-4-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	2,15		A	1,78
B	1,66		B	4,77
C	2,26		C	1,21
D	3,67		D	2,6
E	1,86		E	3,15
MÉDIA	2,32		MÉDIA	2,70
Média de porosidade no corte:				2,51
POROSIDADE MÉDIA DO CP (%):				2,80

Fonte: O Autor, 2015.

Tabela 11 – Resultados da detecção de poros por frequência para o CP3

Corte 1				
Porosidade CP3-1-I			Porosidade CP3-2-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	3,91		A	4,38
B	Descarte		B	Descarte
C	2,74		C	4,43
D	3,42		D	4,15
E	Descarte		E	2,87
MÉDIA	3,36		MÉDIA	3,96
Média de porosidade no corte:				3,66

Corte 2				
Porosidade CP3-2-I			Porosidade CP3-3-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	Descarte		A	3,93
B	5,18		B	Descarte
C	4,51		C	Descarte
D	5,76		D	5,22
E	Descarte		E	3,45
MÉDIA	5,15		MÉDIA	4,20
Média de porosidade no corte:				4,68

Corte 3				
Porosidade CP3-3-I			Porosidade CP3-4-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	3,4		A	4,1
B	Descarte		B	2,5
C	1,63		C	1,43
D	4,14		D	Descarte
E	4,14		E	5,85
MÉDIA	3,33		MÉDIA	3,47
Média de porosidade no corte:				3,40
POROSIDADE MÉDIA DO CP (%):				3,91

Fonte: O Autor, 2015.

Para avaliarem-se os resultados obtidos faz-se uso de ensaios de resistência à compressão, realizados para as amostras utilizadas e apresentados em André (2013).

Os resultados dos ensaios de resistência a compressão uniaxial foram obtidos por meio de relatório enviado pela empresa PROJEMART ENGENHARIA logo após a conclusão dos ensaios no laboratório da empresa. Na Tabela 12 podem-se observar os resultados obtidos após a realização dos ensaios. (ANDRÉ, 2013)

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial

Ensaio de resistência à compressão			
Corpo de prova	Fator A/C (Litros/kg)	Carga máxima (Kgf)	Tensão máxima (Mpa)
CP1	0,545	18540	23,6
CP2	0,697	17200	21,9
CP3	0,848	13970	17,8

Fonte: ANDRÉ, 2013.

Por sua vez, são apresentados na Tabela 13 o número de imagens analisadas (tabelas 8 a 10), o resultado de porosidade média e o desvio padrão para cada corpo de prova.

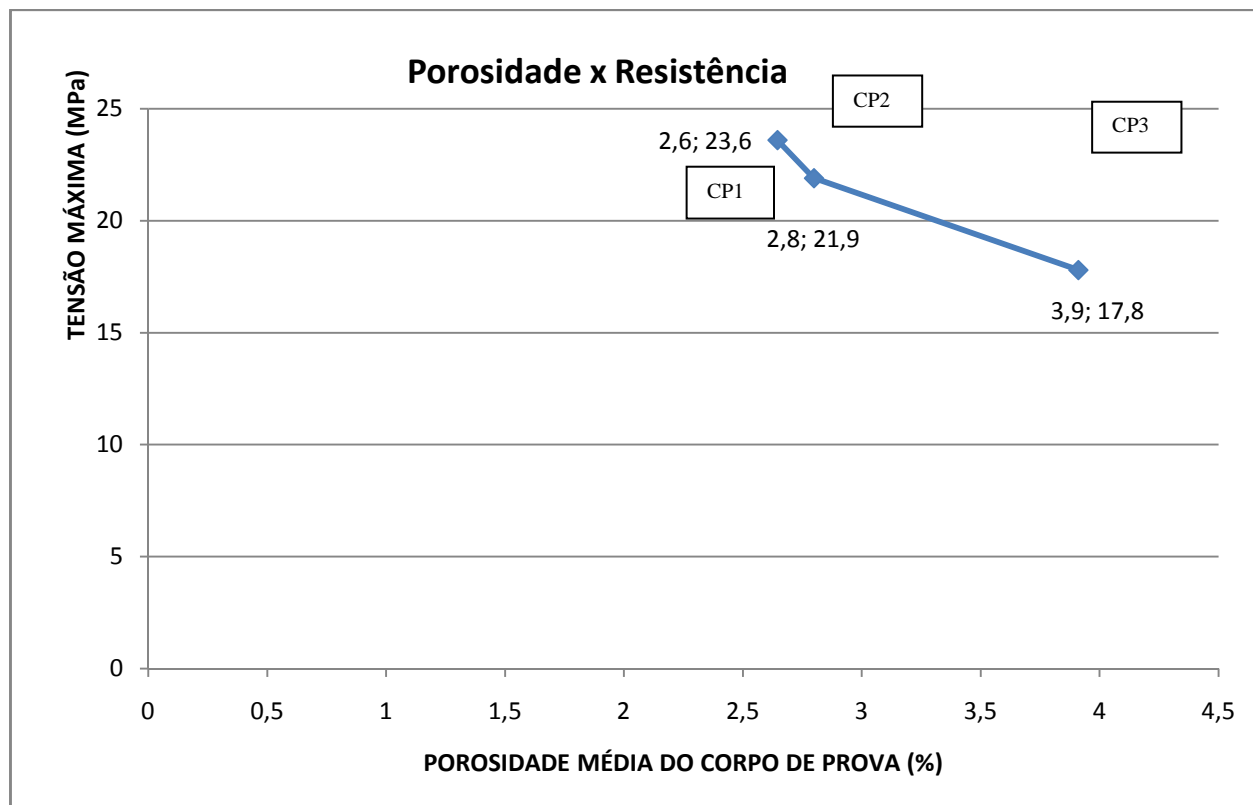
Tabela 13 – Número de imagens analisadas, porosidade média e desvio padrão

CORPO DE PROVA	IMAGENS	POROSIDADE (%)	DESVIO PADRÃO (%)
CP1	30	2,65	1,37
CP2	30	2,80	1,36
CP3	30	3,91	1,18

Fonte: ANDRÉ, 2013.

Os ensaios de compressão uniaxial confirmaram o que é dito na literatura técnica. A resistência das amostras ensaiadas ficaram em torno de 20MPa, o que era esperado já que foi utilizado um traço base de 20MPa. A queda de resistência das amostras com o aumento do fator A/C também foi algo esperado (Fig. 70), visto que segundo a literatura com o aumento de água na mistura de concreto aumenta-se a porosidade do concreto curado, diminuindo assim a sua resistência à compressão. (ANDRÉ, 2013)

Figura 70 – Relação entre porosidade no corpo de prova com a sua resistência à compressão



Fonte: ANDRÉ, 2013.

5.1.3 Deteção de poros com pó de volastonita

Nas tabelas 14 a 16 são apresentados os resultados de porosidade para os mesmos corpos de prova, estes foram obtidos a partir da pintura dos corpos de prova, proposta no item 3.6.2.

Foi feito o descarte das mesmas imagens descartadas no experimento anterior (5.1.2).

Tabela 14 – Resultados da detecção de poros por pintura para o CP1

Corte 1				
Porosidade CP1-1-I			Porosidade CP1-2-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	4,86		A	3,89
B	11,87		B	6,93
C	11,38		C	9,00
D	6,54		D	7,97
E	5,59		E	4,91
MÉDIA	7,97		MÉDIA	6,54

Corte 2				
Porosidade CP1-2-I			Porosidade CP1-3-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	8,17		A	4,90
B	6,32		B	2,65
C	4,34		C	5,86
D	5,77		D	5,18
E	9,35		E	4,33
MÉDIA	6,79		MÉDIA	4,58

Corte 3				
Porosidade CP1-3-I			Porosidade CP1-4-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	3,45		A	3,44
B	4,99		B	6,85
C	4,58		C	3,74
D	2,33		D	2,14
E	4,47		E	2,25
MÉDIA	3,96		MÉDIA	3,68
POROSIDADE MÉDIA DO CP (%):				5,59

Fonte: O Autor, 2015.

Tabela 15 – Resultados da detecção de poros por pintura para o CP2

Corte 1				
Porosidade CP2-1-I			Porosidade CP2-2-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	2,72		A	1,75
B	2,41		B	2,62
C	1,54		C	1,65
D	2,61		D	2,60
E	3,07		E	2,73
MÉDIA	2,47		MÉDIA	2,27

Corte 2				
Porosidade CP2-2-I			Porosidade CP2-3-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	2,30		A	1,34
B	7,02		B	3,61
C	4,87		C	3,10
D	1,37		D	2,13
E	2,43		E	1,62
MÉDIA	3,60		MÉDIA	2,36

Corte 3				
Porosidade CP2-3-I			Porosidade CP2-4-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	2,22		A	2,62
B	3,42		B	5,18
C	3,33		C	4,58
D	2,98		D	2,95
E	3,11		E	3,69
MÉDIA	3,01		MÉDIA	3,80
POROSIDADE MÉDIA DO CP (%):				2,92

Fonte: O Autor, 2015.

Tabela 16 – Resultados da detecção de poros por pintura para o CP3

Corte 1				
Porosidade CP3-1-I			Porosidade CP3-2-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	1,79		A	26,45
B	15,73		B	6,46
C	6,38		C	7,16
D	4,85		D	8,77
E	3,63		E	10,86
MÉDIA	6,46		MÉDIA	11,94

Corte 2				
Porosidade CP3-2-I			Porosidade CP3-3-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	5,51		A	Não informado
B	9,29		B	Não informado
C	7,39		C	Não informado
D	5,78		D	Não informado
E	12,93		E	Não informado
MÉDIA	8,18		MÉDIA	Não informado

Corte 3				
Porosidade CP3-3-I			Porosidade CP3-4-S	
Imagem	%		Imagem	%
A	Não informado		A	8,76
B	Não informado		B	6,07
C	Não informado		C	6,35
D	Não informado		D	3,83
E	Não informado		E	6,10
MÉDIA	Não informado		MÉDIA	6,02
POROSIDADE MÉDIA DO CP (%):				8,15

Fonte: O Autor, 2015.

Os resultados obtidos por esta metodologia apresentaram-se muito diferentes do valor esperando para a amostra. Ao se comparar com o método da frequência temos a diferença apresentada na tabela 17

Tabela 17 – Tabela Comparativa entre os métodos de detecção de poros por escâner

Corpo de Prova	Método da pintura	Método da Frequência	Diferença (%)
CP1	5,58	2,65	110
CP2	2,92	2,8	4
CP3	7,54	3,91	93

Fonte: O Autor, 2015.

Embora computacionalmente simples (pois evita o problema de cálculo de *Threshold*) o método mostrou-se muito impreciso, contudo, a adoção de outras técnicas para “*pintura*” podem melhorar o resultado. A necessidade de adoção de procedimentos mais precisos na produção das amostras e ferramental inadequado para a coloração das áreas de poro é apontada como provável causa para a diferença encontrada.

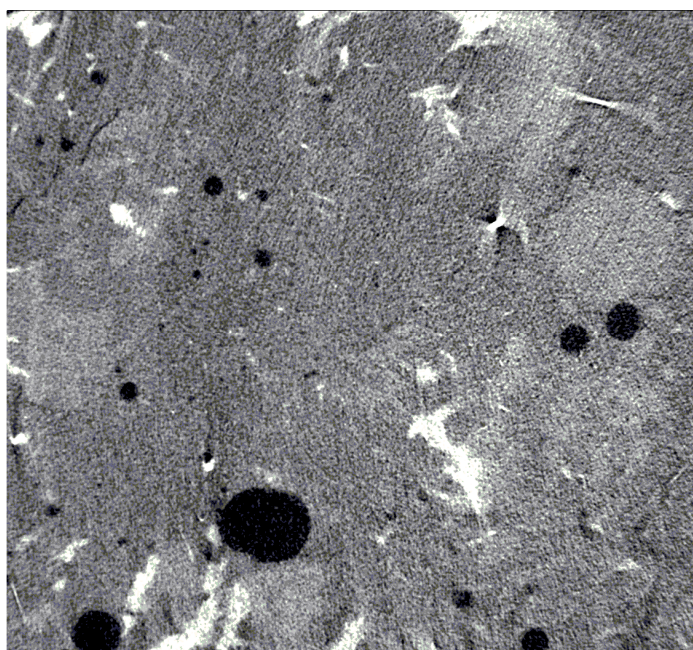
5.2 Metodologias com o uso de microtomografia

5.2.1 Detecção de Poros

A utilização de microtomografia computadorizada na detecção de poros é facilitada pela diferença entre o índice de atenuação do ar quando comparado aos índices dos demais componentes do concreto.

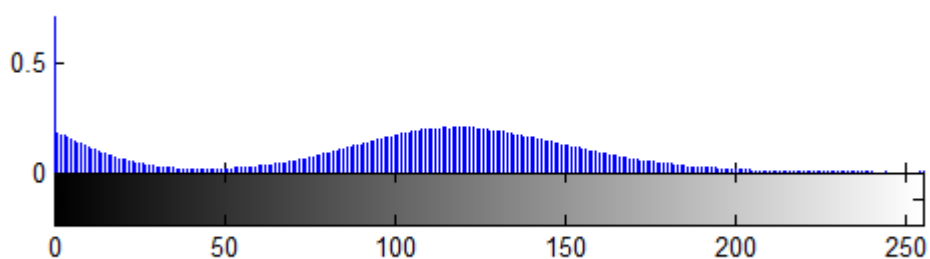
Desta forma, ao se analisar a imagem tomográfica representada pela figura 71, pode-se identificar facilmente as regiões escuras, correspondentes a poros de ar, de fato, o histograma apresentado na figura 72 apresenta uma região escura (poros), claramente separada de uma região mais clara (pasta e agregados). Neste experimento considera-se um *Threshold* de 10%, ou seja, os pixels com luminância inferior a 10% do máximo, serão considerados poros.

Figura 71 – Imagem de amostra de concreto obtida por microtomografia.



Fonte: O Autor, 2015.

Figura 72 – Histograma de imagem tomográfica



Fonte: O Autor, 2015.

Tabela 18 – Porosidade por corpo de prova. *Threshold=10%*

C.P.	Porosidade	Desvio Padrão
S30-4	1,04%	0,522
S30-5	1,60%	0,431
S30-6	3,13%	1,436
S30-7	1,48%	0,577
S30-8	2,55%	0,666
S30-9	1,43%	0,412
S30-10	3,05%	0,744

Fonte: O Autor, 2015.

A norma técnica apresenta uma porosidade esperada de 2,08%, enquanto a porosidade média observada nas amostras foi de 2,04%, de forma que concluímos pela eficiência da microtomografia na detecção dos poros.

Tabela 19 – Porosidade segundo norma técnica

Porosidade Média	Porosidade NBR 9778/2005
2,04%	2,08%

Fonte: O Autor, 2015.

5.2.2 Detecção de Agregados

Embora os resultados da detecção de poros por microtomografia sejam excelentes, o mesmo não pode ser afirmado a respeito da detecção de agregados. A facilidade da segmentação dos poros de ar decorre da grande diferença do índice de atenuação do ar presente nos poros, quando comparado aos demais componentes do concreto. Esta diferença possibilita uma fácil escolha do *threshold*.

Por outro lado, na detecção de agregados ocorre exatamente o oposto. O coeficiente de atenuação dos componentes da rocha que compõem o agregado é diverso, e ainda, semelhante aos coeficientes das substâncias da pasta. Objetivando melhorar o resultado, cada amostra teve seu ponto de limiarização determinado individualmente, sendo o mesmo ajustado pelo usuário manualmente, as operações morfológicas foram feitas considerando-se o tamanho de agregado segundo NBR 7811-83.

Tabela 20 – Percentual de Agregados por Corpo de Prova. *Threshold* variável

C.P.	Agregados	<i>Threshold</i>	Desvio Padrão
S30-4	12,19%	60%	2,263
S30-5	17,14%	66%	3,627
S30-6	21,91%	60%	3,925
S30-7	14,82%	31%	6,694
S30-8	16,20%	60%	4,955
S30-9	17,07%	70%	3,245
S30-10	14,77%	55%	1,396

Fonte: O Autor, 2015.

Comparam-se então os resultados obtidos (Tabela 20) com o traço original utilizado na confecção dos corpos de prova (Tabela 21).

Tabela 21 – Comparação dos resultados com o traço original

Percentual Médio de Agregados	Agregado miúdo – Traço	Agregado graúdo – Traço	Agregados - Traço
16,30%	30,4%	38,8%	69,2%

Fonte: O Autor, 2015.

Concluí-se a partir dos resultados obtidos, pela ineficiência do método aplicado. Por mais que fossem feitos ajustes, foram detectadas apenas 16,30 % de agregados em amostra com total de 69,2% de agregados miúdos e graúdos na sua composição. Nem mesmo o quantitativo de agregados graúdos (38,8%) foi detectado.

CONCLUSÕES E CRONOGRAMA DE ATIVIDADES FUTURAS

Partindo-se de estudos que comprovam a ligação entre a Reação Álcali-Agregado e a geometria dos agregados que compõe o concreto, bem como a distribuição dos poros de ar no mesmo, este trabalho propõe técnicas de detecção de poros e agregados em concreto endurecido, de forma a possibilitar o estudo de técnicas que melhorem o acompanhamento de estruturas existentes, bem como uma maior investigação da reação.

Na detecção de agregados com escâner comercial, percebe-se um resultado muito próximo ao traço do concreto. Conclui-se que o erro de 6% seja devido à retração do corpo de prova. A metodologia também apresenta as vantagens do baixo custo e fácil realização.

Ainda com o uso de escâner, a metodologia que envolve pintura dos corpos de prova não obteve bons resultados, contudo acreditamos que com a adoção de ferramental de maior precisão para o processo de pintura dos corpos de prova possam melhorar significativamente os resultados. Por sua vez, o método de frequência apresentou resultados dentro do esperado, que também podem ser melhorados com o refinamento da técnica, e em especial, com cortes mais precisos e testes com diferentes escâneres. (Escâneres com diferente número de espelhos, tipo de sensor CCD ou CIS, entre outros)

As técnicas de detecção de poros e agregados por escâner além de compartilharem vantagens quanto à facilidade de aplicação aliada ao baixo custo, apresentam a vantagem de poderem ser aplicadas à mesma amostra, de forma que aplicações futuras podem obter sobre a geometria dos agregados e poros, bem como sobre a posição relativa destes. Aspecto este de importância para o estudo da RAA, dada a migração de substâncias dos agregados para os poros estar relacionada à proximidade dos mesmos.

Com os testes de detecção de poros por tomografia foram observados excelentes resultados. Diferentes de outras técnicas existentes a tomografia permite uma análise não destrutiva da amostra, com alta precisão nos valores de resposta, bem como a capacidade de reconstrução tridimensional dos poros do concreto. Estes resultados apresentaram valores de porosidade superiores aos encontrados com escâner, o que era esperado haja vista a capacidade do tomógrafo de revelar poros com volume pequeno, cerca de 0,03 mm. (variando conforme equipamento utilizado).

Contudo a detecção de agregados por microtomografia apresentou se aparentemente inviável, exceto em casos específicos onde se conhece a fundo a composição da rocha.

Excetuando-se a detecção de agregados por microtomografia, foram obtidos bons resultados na avaliação das metodologias utilizadas, entretanto, seu resultado ainda pode ser refinado. Parâmetros para escolha de elementos estruturantes, e resolução da imagem podem ser testados, bem como testes com outros algoritmos de cálculo do *threshold*.

Mesmo o método de detecção de agregados por microtomografia, apesar dos resultados obtidos, pode ser testado para casos nos quais é especificado o tipo rocha utilizado como agregado. Com estas especificações, pode-se ainda, testar novos parâmetros de reconstrução das imagens tomográficas.

Um projeto de longo prazo a ser recomendado, trata da produção de amostras com agregados reativos e “forçar” a ocorrência da RAA com processos químicos conhecidos. Tais amostras seriam periodicamente analisadas pelas metodologias propostas, de forma a fornecer maiores informações sobre o comportamento da RAA no tempo para cada geometria de agregado e processo de elaboração do concreto. Processos de moagem dos compostos do concreto poderiam então serem repensados segundo novas especificações, bem como, podem ser investigados parâmetros de acompanhamento de estruturas afetadas.

A caracterização do concreto, proposta neste trabalho pode ainda ser utilizada na avaliação de diversas outras características do concreto, bem como em outras patologias, em especial teste de resistência onde são utilizadas variações na quantidade e na geometria dos agregados e na porosidade, bem como em problemas relacionados à ação gelo/degelo ou corrosão das estruturas metálicas, patologias estas, fortemente relacionada à distribuição dos poros no concreto.

Futuros desdobramentos do trabalho realizado podem melhorar as técnicas com uso de escâner pelo emprego de ferramental de maior precisão no corte das amostras. Características ópticas do escâner também podem ser estudadas objetivando-se melhor o fenômeno da detecção de poros por filtro de frequência. Feita a identificação dos elementos (poros e agregados) recomenda-se a criação de um banco de imagens, de onde podem ser obtidos valores sobre a geometria dos poros e agregados.

Ressaltamos a possibilidade de sobrepor resultados dos métodos de frequência (poros) e pintura por fenolftaleína (agregados), de forma que se tem a posição relativa destes em relação a aqueles.

Embora não se tenha obtido sucesso na detecção de agregados por microtomografia. A precisão da técnica, aliada ao fato de trata-se de método não destrutivo, possibilita estudos onde patologias como a RAA podem ser forçadas em laboratório. Sendo a amostra submetida a diversas tomografias ao longo do processo, tal estudo pode fornecer

informações sobre o comportamento das patologias e a contribuição dos poros na formação de fissuras.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. Diferenciação tectônica da plataforma brasileira. In: BARKER, A. J. *Introduction to metamorphic textures and microstructures*. [s.l.]: Blackie, 1990. 170p.
- AMO, D. G.; PÉREZ, C. B. Diagnosis of the alkali-silica reactivity potential by means of digital image analysis of aggregate thin sections. *Cement and Concrete Research*. v. 31, p.1449-1454, 2001.
- ANDRÉ, Alanderson de Moraes. *Análise da porosidade e resistência à compressão do concreto reforçado com fibras de polipropileno para diferentes dosagens de água*. 2013. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 11578 "Cimento Portland Composto", Rio de Janeiro, 1991.
- _____. NBR 5738. Procedimento para moldagem e cura de corpos-deprova. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. NBR 5739. Ensaio de compressão para corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. NBR 7211. Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1983.
- BATTAGIN, A. F. A Experiência da aplicação da norma brasileira de reação álcali-agregado ABNT NBR 15577:2008. In: SEMINÁRIO A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: CAUSAS, DIAGNÓSTICO E SOLUÇÕES, 2010. *Anais do Seminário...* IBRACON, 2010.
- CASTLEMAN, K.R. *Digital image processing*. Prentice Hall 1996. 667p.
- CHARLES, Vanusa da Silva. *Determinação do percentual de agregado graúdo no concreto utilizando processamento de imagens digitais obtidas por escâner comercial*. 2014. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2014.
- FERNANDES, R. S.; ASSIS, J. T. de. Descritores de textura na análise de imagens de microtomografia computadorizada. In: CNMAC, 35., 2014, Natal. *Proceeding of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics*. v. 3, n. 1, 2015
- FIGUERÔA, José do Patrocínio; ANDRADE, Tibério. *O ataque da Reação Álcali Agregado sobre as estruturas de Concreto: a descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de pontes e edifícios na Região Metropolitana do Recife*. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2007. 228 p.
- FURNAS. Equipe de Laboratório de Concreto. *Concreto massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: Ensaio e propriedades*. São Paulo: Walton Pacelli de Andrade.PINI, 1997.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Processamento de imagens digitais*. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 509 p.

HASPARYK, N. P. *Investigação de concretos afetados pela reação álcali agregado e caracterização avançada do gel exsudado*. 2005. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, 2005.

HELENE, Paulo; ANDRADE, T. *Concreto de Cimento Portland: Materiais de Construção Civil*. 2.ed. IBRACON, 2010. v. 2.

KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 3., 1993, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP, 1993. v. 1, p. 319-337.

KUPERMAN, S. C., FERREIRA, W. V. F. F., DAL FABBRO, J. C., NEGRINI, M. A., CIFÚ, S., KAKO, H., MARIANO, A., TAVARES, F. Ocorrência da Reação Álcali-Agregado em Tomada D'água. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURA DE CONCRETO, 1997, Goiânia. *Anais*. Goiânia : Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas, 1997. p. 213-222.

LUKSCHOVÁ, S. *Alkali-silica reaction of aggregates in real concrete and mortar specimen*. 2009. PhD (Thesis) - Faculty of Science, Charles University in Prague, 2009.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. *Processamento digital de imagens*. Rio de Janeiro: Brasport, 1999. 406 p.

NARDELLI, Vitor Camargo. *Medição geométrica utilizando tomografia computadorizada por raio-x: melhoria do desempenho metrológico através da seleção sistemática dos parâmetros de configuração*. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do Concreto*. 2a ed. São Paulo: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, Júlio Cesar Corrêa de. *Desenvolvimento de ferramenta computacional para metrologia com microtomografia computadorizada*. Tese (Doutorado) - Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2015.

PESSÔA, J.R.C. *Microtomografia com Raio X e processamento de imagem na obtenção da porosidade do concreto*. 2011. Tese (Doutorado em Modelagem Computacional) – Instituto Politecnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2011.

PETERSON, K. *Air Void analysis of hardened concrete via scanner*. 2001. Dissertação (Mestrado), Michigan Technological University, Michigan – USA, 2001.

POOLE, A.B. Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. In: SWAMY, R.N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. p 1-20.

RODRIGUES, Elisa Jardim Pina. *Determinação da porosidade do concreto utilizando imagens digitais tratadas com pó de volastonita obtidas por escâner comercial*. Trabalho de

Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2014.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; KUPERMAN, S. A Evolução e desenvolvimento dos ensaios laboratoriais na prevenção e avaliação da reação álcali-agregado (RAA). In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, 52. *Anais do 52º Congresso...* SBC, 2010.

SILVA, A.O.; WILSON, R.E.; ASSIS, J.T. Uso do Processamento de Imagem para Caracterização e Classificação da Pedra Madeira. In: ENCONTRO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL, 6., Nova Friburgo. *Anais do VI Encontro...* Nova Friburgo: IPRJ/UERJ.

STANTON, T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proceedings of American Society of Civil Engineers*. v. 66, n. 10, p. 1781-1811, Dec. 1940.

VALDUGA, L. *Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo*. 2002. 213 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Estadual de Campinas. 2002. 213p.

WIGUM, B. J. *Alkali-aggregate reaction in concrete - properties, classification and testing of Norwegian cataclastic rocks*. 1995. 227 f. PhD (Thesis) - University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology, Norway, 1995. 227 p.

WILSON, R.E. *Sistema para identificação de fitas de quartzo em imagens de pedra madeira utilizando morfologia matemática*. 2005. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Instituto Politecnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2005.

ZHANG, C.; WANG, A.; TANG, M.; WU, B.; ZHANG, N. Influence of aggregate size grading on ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, v. 29, p. 1393-1396, 1999.

Apêndice A – Códigos MatLab® desenvolvidos

```
% Pós-graduação em Modelagem Computacional
% Processamento de Sinais
% Aluno: Rodrigo Erthal Wilson
% Implementação do Filtro Sobel

function[saida]=sobel(entrada)

tamx = size(entrada,1);
tamy = size(entrada,2);

imageIn = double(entrada);

%Sobel vertical
vertical = [-1  -2  -1 ;
           0   0   0 ;
           1   2   1];
imageOutV = filter2(vertical,imageIn);

%Sobel horizontal
horizontal=[-1  0  1 ;
           -2  0  2 ;
           -1  0  1];
imageOutH = filter2(horizontal,imageIn);

%vertical+horizontal
saida=uint8(double(imageOutV) + double(imageOutH));
```

Rodrigo Erthal Wilson

```

clc;clear all;close all

arquivo = 'CPl-1-I-A';
nomearquivo = strcat(arquivo, '.jpg');

I = imread(nomearquivo);

tamx=size(I,1);
tamy=size(I,2);

%=====
% Exibe a Imagem Original
%
% Obs.: Imagem de amostra de concreto após tratamento com soda caustica
% e fenolftaleína, realçando em vermelho a pasta, e portanto, aumentando
% o contraste entre a mesma e o agregado.
%=====
%figure;imshow(I)
%title('Imagem Original')

%=====
% Componente vermelha.
%
% Obs.: Ao contrário do que poderia se esperar, sozinha a componente
% vermelha não é suficiente para segmentação dos agregados.
%=====
Red = I(:,:,1);
%figure;imshow(Red)
%title('Componente Vermelha')

%imwrite(Red, strcat(arquivo, '-RED.jpg'), 'jpg');

%=====
% Componente verde
%
% Obs.: Não apresenta informação suficiente para identificar os agregados
%=====
Green = I(:,:,2);
%figure;imshow(Green)
%title('Componente Verde')

%imwrite(Green, strcat(arquivo, '-GREEN.jpg'), 'jpg');

%=====
% Componente azul
%
% Obs.: Não apresenta informação suficiente para identificar os agregados
%=====
Blue = I(:,:,3);
%figure;imshow(Blue)
%title('Componente Azul')

%imwrite(Blue, strcat(arquivo, '-Blue.jpg'), 'jpg');

%=====
% Imagem convertida para tons de cinza
%
% Obs.: Considerando que não há motivo para aplicar pesos referentes à
% luminância de cada componente, visto que trata-se de um problema de
% visão computacional. Podemos visualizar que a imagem em tons de
% cinza perde informação referente aos agregados.
%=====
%Grey = Red/3 + Green/3 + Blue/3;
%figure;imshow(Grey)
%title('Imagem em Tons de Cinza')
%imwrite(Grey, strcat(arquivo, '-Grey.jpg'), 'jpg');

%=====
% Componente vermelha subtraída da média das componentes azul&verde
%
% Obs.: Realçados os agregados.
%=====
for m = 1:tamx
    for n = 1:tamy
        Res(m,n) = Red(m,n) - ( Blue(m,n)/2 + Green(m,n)/2);
    end
end
%figure;imshow(Res)
%figure;imhist(Res)
%title('Vermelho - Azul&Verde')
%imwrite(Res, strcat(arquivo, '-Result.jpg'), 'jpg');

Res=eqhisto(Res);
%figure;imhist(Res)
%figure;imshow(Res)

```

```

%title('Vermelho - Azul&verde, normalizado')
%imwrite(Res, strcat(arquivo, '-ResultNorm.jpg'), 'jpg');

%=====
% Testes Morfológicos
%=====

% Binarização
BW = im2bw(Res, 0.5);
%figure; imshow(BW)
%title('Vermelho - Azul&verde: Binarizado')
%imwrite(BW, strcat(arquivo, '-Binarizado.jpg'), 'jpg');

% Remoção de Ruído
se = strel('disk', 11);
Morph = imopen(imclose(BW, se), se);
%figure, imshow(Morph)
%title('Fechamento + Abertura Binária')
%imwrite(Morph, strcat(arquivo, '-RemRuidoMorph.jpg'), 'jpg');

% Remoção de elementos pequenos
Morph = imcomplement(Morph);
Morph = bwareaopen(Morph, 30000); %remove elementos com menos de 500 pixels
Morph = imcomplement(Morph);
figure, imshow(Morph)
title('Remoção dos pequenos')

%Imagem das bordas para avaliação
se = strel('disk', 1);
Bordas = Morph - imerode(Morph, se);
figure, imshow(Bordas)
title('Bordas')

% Cálculo do percentual de agregados na amostra
perim = 0;
tot = tamx * tamy;
for m = 1:tamx
    for n = 1:tamy
        if Bordas(m,n) ~= 0
            perim = perim + 1;
        end
    end
end
perc = ( perim / tot )

%Final = I;
%for m = 1:tamx
%    for n = 1:tamy
%        if Bordas(m,n) ~= 0
%            Final(m,n,:) = 255;
%        end
%    end
%end
%figure, imshow(Final)
%title('Final')
%imwrite(Final, strcat(arquivo, '-Final.jpg'), 'jpg');

```

Apêndice B – Algoritmos para operações morfológicas

```

Variável global
  OpColor: Cor;

{Implementação da Dilatação}
função Dilate(A,S: Imagem):Imagem;
variáveis
  x,y,i,j,k,l: Inteiro;
  B: Imagem;
inicio
  OpColor←preto;
  B←A;
  para y de trunc((altura_de_S-1)/2) até altura_de_A - trunc((altura_de_S+1)/2) faça
  inicio
    para x de trunc((base_de_S-1)/2) até base_de_A - trunc((base_de_S +1)/2) faça
    inicio
      se A[y,x]=OpColor então
      inicio
        k←0;
        para i de trunc(y-(( altura_de_S-1)/2)) até trunc(y+(( altura_de_S-1)/2)) faça
        inicio
          l←0;
          para j de trunc(x-((base_de_S-1)/2)) até trunc(x+((base_de_S-1)/2)) faça
          inicio
            se S[k,l]=preto então B[i,j]←OpColor;
            l←l+1;
          fim;
          k←k+1;
        fim;
      fim;
    fim;
  fim;
  Dilate←B;
fim;

```



```

{Implementação da Erosão}
função Erode(A,S: Imagem):Imagem;
variáveis
  x,y,i,j,k,l: Inteiro;
  B: Imagem;
inicio
  OpColor←branco;
  B←A;
  para y de trunc((altura_de_S-1)/2) até altura_de_A - trunc((altura_de_S+1)/2) faça
  inicio
    para x de trunc((base_de_S-1)/2) até base_de_A - trunc((base_de_S +1)/2) faça
    inicio
      se A[y,x]=OpColor então
      inicio
        k←0;
        para i de trunc(y-(( altura_de_S-1)/2)) até trunc(y+(( altura_de_S-1)/2)) faça
        inicio
          l←0;
          para j de trunc(x-((base_de_S-1)/2)) até trunc(x+((base_de_S-1)/2)) faça
          inicio
            se S[k,l]=preto então B[i,j]←OpColor;
            l←l+1;
          fim;
          k←k+1;
        fim;
      fim;
    fim;
  fim;
  Erode←B;
fim;

{Implementação da Abertura}
função Opening(A,S:Imagem):Imagem;
inicio
  Opening ← Erode(Dilate(A,S),S);
fim;

{Implementação do Fechamento}
função Closing(A,S:Imagem):Imagem;
inicio
  Closing ← Dilate(Erode(A,S),S);
Fim;

```

```

{Implementação da Inversão}
função Inverse(A:Imagem):Imagem;
variáveis
  x,y: Inteiro;
  B:Imagem;
início
  para y de 0 até altura_de_A -1 faça
  início
    para x de 0 até base_de_A -1 faça
    início
      se A[x,y] = branco então B[x,y] ← preto senão B[x,y] ← branco;
    fim;
  fim;
  Inverse ← B;
fim;

{Implementação da União}
função Union(A,B:Imagem):Imagem;
variáveis
  x,y: Inteiro;
  C:Imagem;
início
  para y de 0 até altura_de_A -1 faça
  início
    para x de 0 até base_de_A -1 faça
    início
      se A[x,y] = preto ou B[x,y] = preto então C[x,y] ← preto senão C[x,y] ← branco;
    fim;
  fim;
  Union ← C;
fim;

{Implementação da Interseção}
função Intersection(A,B:Imagem):Imagem;
variáveis
  x,y: Inteiro;
  C:Imagem;
início
  para y de 0 até altura_de_A -1 faça
  início
    para x de 0 até base_de_A -1 faça
    início
      se A[x,y] = preto e B[x,y] = preto então C[x,y] ← preto senão C[x,y] ← branco;
    fim;
  fim;
  Intersection ← C;
fim;

fim.

```