Porosidade do Concreto Determinada por Microtomografia com Raio X e Processamento de Imagem

José Renato de Castro Pessôa¹ Joel Sanchez Dominguéz² Gil de Carvalho¹ Joaquim Teixeira de Assis¹

Resumo

O objetivo principal desse trabalho é apresentar a utilização de métodos não destrutivos (END), como a microtomografia com Raio X e técnicas de aquisição e processamento de imagens, para obtenção da porosidade do concreto. São apresentados dois métodos. Com um método as imagens foram obtidas por meio de microtomografia por Raio X e no outro foi utilizado o escâner comercial. Essas imagens foram processadas por meio de técnicas de processamento de pixel e morfologia matemática. Os resultados obtidos para a porosidade foram comparados com resultados obtidos pela NBR 9778 (2005) – (Absorção de água, índice de vazios e massa específica em argamassa e concreto endurecido). Os resultados mostraram compatibilidade entre os dois métodos apresentados e o método proposto pela NBR 9778 (2005).

Palavras-chave: Concreto; Porosidade; Microtomografia; Raio X; Processamento de Imagens.

1 Introdução

Nem sempre métodos diferentes de determinação da porosidade do concreto resultam em valores semelhantes. Isso porque os métodos de ensaios tradicionais para a determinação desse índice geralmente alteram a estrutura da pasta de cimento, principalmente quando envolvem adição ou remoção de líquido. (NEVILLE, 1997). Um exemplo disso é o uso da intrusão do mercúrio no estudo do sistema de poros da pasta de cimento, que admite que os poros vão se estreitando com o aumento da profundidade, ao passo que, na verdade, alguns poros têm uma abertura mais estreita, o que distorce o valor da porosidade determinado por este método (COOK e HOVER, 1993).

A automação de métodos que determinam a porosidade de materiais é objetivo de trabalhos que vêm sendo produzidos ao longo do tempo. Alguns desses métodos utilizam imagens de alta qualidade que são trabalhadas através de técnicas e programas de processamento de imagens digitais.

Neste trabalho são descritos dois métodos não destrutivos (END) para obtenção da porosidade superficial do concreto; a microtomografia com Raio X e

técnicas de obtenção e processamento de imagens digitais. As porosidades médias superficiais encontradas foram comparadas com as porosidades volumétricas obtidas por meio do método proposto pela NBR 9778 (2005) – (Absorção de água, índice de vazios e massa específica em argamassa e concreto endurecido) por meio de ensaios realizados na Universidade Federal de São Carlos SP, no Departamento de Engenharia de Materiais.

2 Metodologia

Entendendo-se imagem como uma forma compacta de representar muitas informações, em um sistema de processamento de imagens essas informações podem passar por diversas formas de representação a partir do objetivo definido para aplicação.

A primeira etapa é a aquisição de uma imagem, onde pode ser utilizado um tipo de sensor para digitalização. O sensor pode ser um scanner, uma câmera de TV, um tomógrafo, etc. A natureza do sensor e da imagem que ele produz é determinada pela aplicação.

¹ Professor Doutor, Instituto Politécnico, UERJ, RJ.

² Doutorando, Instituto Politécnico, UERJ, RJ. Instituto Politécnico, UERJ, Rua Bonfim 25 – Vila Amélia – Nova Friburgo, Rio de Janeiro, Brasil.

No processamento de imagens o estudo morfológico concentra-se nas características geométricas das imagens e aplica-se em diversas áreas do processamento de imagens, como filtragem, segmentação, realce e outras (JAIN, 1989).

A idéia principal da morfologia matemática consiste em conjuntos de *picture elements* (pixels), que são reunidos em grupos, representando uma estrutura bidimensional (forma), e sobre os quais são realizadas operações matemáticas que ressaltam aspectos específicos das formas para que essas possam ser reconhecidas e medidas (BANON e BARRERA, 1998).

A Morfologia Matemática pode ser traduzida como a aplicação de definições e princípios matemáticos, ressaltando-se aspectos específicos das formas permitindo que sejam contadas ou reconhecidas. É uma metodologia para a descrição de operadores, e sua base consiste em extrair de uma imagem desconhecida a sua geometria e topologia com a utilização da transformação de uma outra imagem completamente definida, chamada elemento estruturante. As principais aplicações da Morfologia Matemática são nos processos de filtragem de ruídos, segmentação de partes, esqueletização, etc. (MEYER, 1986).

3 Procedimento Experimental

Os corpos de prova foram moldados com concreto de 20 MPa e concreto de 30 MPa de resistência à compressão coletados na concreteira, antes de entrar no caminhão.

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos com as seguintes dimensões para os diferentes ensaios:

Porosidade pela NBR 9778 (2005) – cilíndrico medindo 100 mm (diâmetro) x 200 mm (altura).

Porosidade por microtomografía – cilíndrico medindo 25 mm (diâmetro) x 50 mm (altura).

Porosidade por escâner – cilíndrico medindo 100 mm (diâmetro) x 15 mm (altura).

Todos os corpos de prova foram obtidos de corpos-de-prova cilíndricos medindo 100 mm x 200 mm.

3.1 Porosidade Volumétrica pela NBR 9778 (2005)

Foi realizado no Centro de Ciências Exatas e Tecnologia – Departamento de Ciências dos Materiais da Universidade Federal de São Carlos o ensaio apresentado na NBR 9778 (2005) – (Absorção de água, índice de vazios e massa específica em argamassa e concreto endurecido) em um corpo-de-prova cilíndrico medindo 100 mm x 200 mm com 20 MPa de resistência à compressão e em um com 30 MPa de resistência à compressão com as mesmas dimensões. Os resultados

obtidos para o índice de vazios estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados obtidos nos ensaios realizados na Universidade Federal de São Carlos.

Concreto	Porosidade Volumétrica (%)	
20 MPa	1,9	
30 MPa	2,1	

3.2 Porosidade Superficial por Microtomografia

Como o microtomógrafo utilizado (SkyScan 1172) só consegue medir amostras de concreto com pequeno diâmetro, utilizou-se sete corpos de prova cilíndricos medindo 25 mm x 50 mm moldados com concreto de 20 MPa e 7 com concreto de 30 MPa.

Para a execução das microtomografias por Raio X, foi utilizado um aparelho compacto de microtomografia de alta resolução (14,97 μm) da SkyScan, modelo 1172 da EMBRAPA/São Carlos.

Esse sistema tem um tubo de Raios X que opera dentro de um intervalo de tensão de 20 a 100 kV e com potência até 10 W. Tem um tamanho de foco variável com a potência aplicada.

As Principais características do equipamento utilizado são:

(<http://www.skyscan.be/products/1172.htm>)

- Fonte de raios X
 20-100 kV, 10 W, < 5 μm.
 20-80 kV, 8 W, < 8 μm.
- Detector de raios X:

11 Mp, CCD de 12-bits com acoplamento ótico a um cintilador.

- Tamanho máximo do objeto:
 - 27 mm no diâmetro (varredura simples).
- Detalhes de detectabilidade:
 - < 0,8 µm na mais alta resolução.
- Reconstrução:

PC ou cluster.

- Segurança radiológica:
 - $< 1~\mu Sv/h$ em qualquer ponto na superfície do equipamento.

Para minimizar os efeitos distorsivos da tomografia devido ao efeito de endurecimento de feixe (LIMA, 2002), foram utilizados dois filtros, (AL + Cu), colocados entre a fonte de radiação e o objeto a ser inspecionado. A Figura 1 mostra o microtomógrafo utilizado na pesquisa.



Figura 1 – Microtomógrafo SkySkan 1172.

Foi desenvolvido um programa em MATLAB® para ler cada imagem gerada e determinar a área de vazios para obtenção da porosidade superficial. Os únicos parâmetros que necessitaram de intervenção do usuário no programa foram as intensidades do contraste e o "threshold" da binarização. Estes parâmetros foram modificados para cada conjunto de imagens que foi processado. Para cada corpo de prova foram obtidas em média 1000 imagens. Cada imagem foi ajustada em contraste, binarizada e filtrada utilizando a operação morfológica de fechamento (dilatação seguida de erosão) com elemento estruturante circular de raio igual a 2 pixels para a remoção de pontos isolados interpretados como ruído. Na imagem-resultado foram contados os vazios obtidos em 2D. A seguir é mostrada a sequência de operações do programa desenvolvido.

Lê cada imagem em RGB



Ajusta escala de cinza da imagem



Binariza a imagem ajustada



Inverte a imagem binarizada



Aplica operação morfológica de fechamento com elemento estruturante circular de raio igual a 2 pixels



Soma os pixels brancos (poros)



Verifica porcentagem de pixels brancos sobre o total de pixels da imagem. e calcula área total da amostra, área de concreto, área de vazios (poros), índice de porosidade da superfície (%) e distribuição de poros por tamanho.

$$Porosidade Superficial (\%) = (1)$$

A Figura 2 mostra uma seção transversal com dois cortes de uma imagem reconstruída das radiografias obtidas.

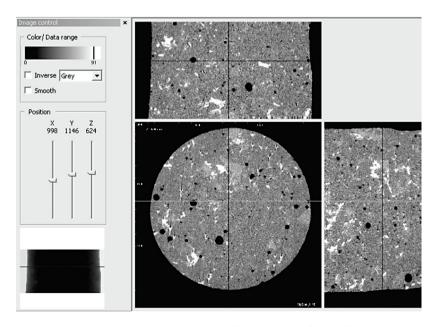


Figura 2 – Seção transversal com cortes de um CP. (Tela do programa Data Viewer – www.skyscan.be).

A Figura 3 mostra as fases do processamento de uma imagem adquirida no microtomógrafo.

A Tabela 2 mostra o número de imagens analisadas e a porosidade superficial média encontrada por

corpo de prova moldado com concreto de 20 MPa.

A Tabela 3 mostra o número de imagens analisadas e a porosidade superficial média encontrada por corpo-de-prova moldado com concreto de 30 MPa.

Tabela 2 – Número de imagens analisadas por corpo de prova, porosidade superficial média e desvio padrão para os corpos de prova moldados com concreto de 20 MPa.

СР	Imagens	Porosidade Superficial Média (\bar{x}) (%)	Desvio Padrão (σ) (%)
1	1045	1,1	0,57
2	1044	0,8	0,42
3	1044	1,4	0,97
4	1044	0,6	0,52
5	1046	1,2	1,27
6	1046	0,9	0,77
7	1046	1,4	1,06

Tabela 3 – Número de imagens analisadas por corpo de prova, porosidade superficial média e desvio padrão para os corpos de prova moldados com concreto de 30 MPa.

СР	Imagens	Porosidade Superficial Média (\bar{x}) (%)	Desvio Padrão (σ) (%)
1	1046	1,0	0,80
2	1046	1,2	0,55
3	1046	2,3	1,62
4	962	0,9	0,57
5	1046	2,5	1,26
6	1046	1,3	0,67
7	1046	2,2	0,95

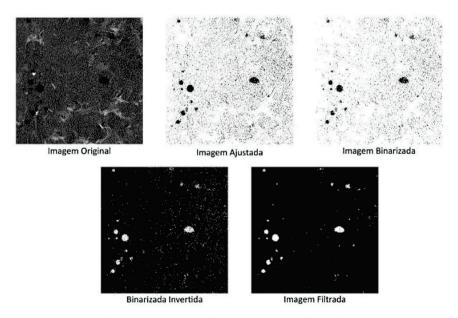


Figura 3 – Fases do processamento de uma imagem adquirida no microtomógrafo.

Desvio Padrão
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}$$
 (2)

A Tabela 4 mostra a porosidade superficial média total para as duas séries de corpos de prova.

Tabela 4 – Porosidade média total encontrada para os corpos de prova moldados com concreto 20 MPa e para os moldados com com creto 30 MPa.

Concreto	Nº Imagens	Porosidade Superficial Média (%)
20 MPa	7.315	1,0
30 MPa	7.238	1,6

3.3 Porosidade Superficial por Escâner

Foram utilizadas para cada tipo de concreto 42 superfícies circulares medindo 100 mm de diâmetro adquiridas de corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 15 mm de altura. Estes corposde-prova foram obtidos de corpos-de-prova maiores medindo 100 mm x 200 mm. Como a porosidade linear superficial e volumétrica devem ser equivalentes a média da porosidade superficial encontrada entre as superfícies foi comparada com a porosidade volumétrica encontrada em dois corpos de prova preparados com concreto da mesma batelada e ensaiados pelo método apresentado na NBR 9778. Em cada superfície foram adquiridas quatro imagens quadradas medindo 25 mm de lado. Para cada tipo de concreto foram adquiridas, portanto, 168 imagens a serem analisadas. Foi utilizada uma proteção feita com plástico rígido transparente com aberturas na região de leitura da imagem, para que o corpo de prova não danificasse o vidro do escâner. A Figura 4 mostra uma superfície utilizada para a obtenção das imagens.

As imagens foram escaneadas através de uma multifuncional EPSON TX200 e digitalizadas na resolução de 2400 dpi. Foi desenvolvido um programa em MATLAB® para ler a imagem e processá-las com o objetivo de ser determinada a área de vazios. Cada imagem foi lida e posteriormente separada em suas componentes HSV, já que a imagens obtidas pelo escâner estão em RGB e não em tons de cinza como no caso das imagens obtidas por microtomografia. Foi escolhido o padrão HSV em detrimento ao RGB, pois neste não era possível identificar claramente os poros em nenhuma de suas camadas, R, G ou B. Utilizandose então o padrão HSV foi escolhida a camada V para o processamento, pois essa foi a que melhor representou os poros na imagem. A componente V foi ajustada

em contraste e binarizada. Essa imagem foi filtrada utilizando a operação morfológica de fechamento, (dilatação seguida de erosão), com elemento estruturante circular de raio igual a 2 pixels para a remoção de pontos isolados, que foram interpretados como ruído. Nessa imagem-resultado foram contados os vazios obtidos pelos pixels brancos.

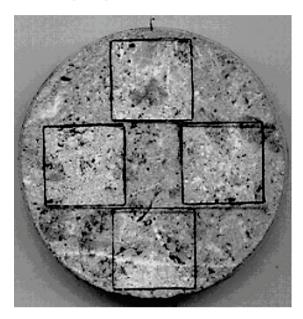


Figura 4 – Imagens obtidas pelo escâner por superfície estudada.

A seguir é mostrada a seqüência de operações do programa desenvolvido.

Lê cada imagem em RGB

 $\downarrow \downarrow$

Converte imagem para HSV



Separa a componente V



Ajusta escala de cinza da componente V



Binariza a componente V ajustada



Inverte a componente V binarizada



Aplica operação morfológica de fechamento com elemento estruturante circular de raio igual a 2 pixels



Soma os pixels brancos (poros)



Verifica porcentagem de pixels brancos sobre o total de pixels da imagem (porosidade superficial)

Os únicos parâmetros que necessitaram da intervenção do usuário no programa foram as intensidades do contraste e o "threshold" da binarização. Esses parâmetros foram modificados para cada conjunto de imagens que foi processado. A Figura 5 mostra um CP no escâner e duas imagens obtidas.

A Figura 6 mostra a metodologia computacional utilizada no processamento das imagens obtidas pelo escâner.

Tabela 5 – Porosidade média total encontrada para os concretos de 20 MPa e 30 MPa.

Concreto	Nº Imagens	Porosidade Superficial Média (%)
20 MPa	168	1,7
30 MPa	168	1,6

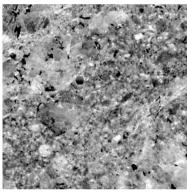
A Tabela 5 mostra a porosidade superficial média total encontrada para os concretos com 20 MPa e 30 MPa.

4 Análise de Resultados e Conclusões

A Tabela 6 mostra um quadro comparativo entre os resultados obtidos pelos dois métodos utilizados neste trabalho e os resultados obtidos pelo ensaio prescrito na NBR 9778 (2005).

Primeiramente pode-se observar que as porosidades do concreto de 20 MPa encontradas pelo método apresentado na NBR 9778 e pelo método da análise das imagens obtidas pelo microtomógrafo são menores que as encontradas para o concreto de 30 MPa. Em se tratando de concretos com resistências à compressão





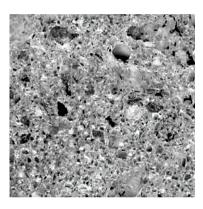


Figura 5 – Escâner utilizado e duas imagens adquiridas.

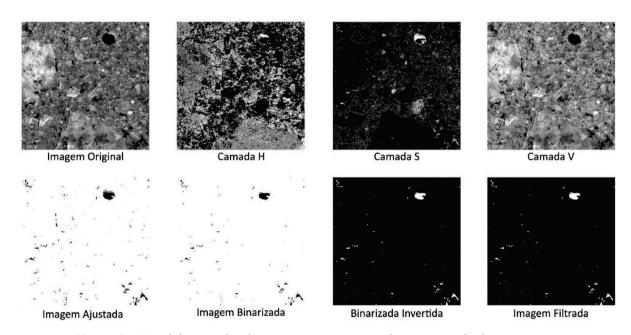


Figura 6 – Metodologia utilizada para o processamento das imagens obtidas por escâner.

Tabela 6 – Quadro comparativo dos resultados obtidos nos ensaios.

Concreto —	Porosidade Superficial Média (%)		Porosidade Volumétriva (%)
	Escâner	Microtomografia por Raio X	NBR 9778 (2005)
20 MPa	1,7	1,0	1,9
30 MPa	1,6	1,6	2,1

bem próximas e preparados sob as mesmas condições climáticas e pelo mesmo fabricante, é possível ter ocorrido algum erro de dosagem no momento da mistura. Por exemplo, alterações no fator água cimento do concreto com maior resistência, no dosador da concreteira, alteraria seu índice de vazios ocasionando um índice de porosidade maior para esse concreto do que o de menor resistência.

Um fator que contribuiu para que houvesse diferença nos resultados entre os três métodos foi a presença de ruído no processamento das imagens. Como as intensidades do contraste e o "threshold" da binarização necessitam da intervenção do usuário do programa, alguns poros podem ter sido perdidos no corte ou algum ruído pode ter sido contado como poro.

Observou-se também que quanto menor for o tamanho dos poros mais favorecimento à resistência do concreto existirá. Apesar da porosidade do concreto de 30 MPa ter sido maior que a do concreto de 20 MPa, foi observada uma concentração maior de poros menores no concreto de 30 MPa.

Houve uma maior diferença entre a porosidade encontrada para o concreto de 20 MPa pelo método da análise das imagens obtidas pelo microtomógráfo (1,0%). Como o concreto é um material heterogêneo e as amostras utilizadas foram amostras medindo uma polegada de diâmetro por aproximadamente duas de comprimento, existe a possibilidade de em alguma amostra estar presente um de agregado graúdo de maior dimensão, o que alteraria a porosidade naquele trecho.

Pode-se observar que as médias das porosidades superficiais calculadas pelas imagens obtidas por microtomografia e por escâner, podem ser utilizadas como parâmetro para uma avaliação da porosidade do concreto utilizado, visto que a porosidade linear superficial e volumétrica devem ser equivalentes.

O método utilizando-se o escâner se apresenta como um método aceitável por seus resultados e, principalmente, por seu baixo custo e facilidade de operação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte financeiro dado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), e a Embrapa/Cnpdia – São Carlos, pelo apoio para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

ABNT NBR 9778 (2005) – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

BANON, G. J. F, BARRERA, J. Bases da Morfologia para a Análise de Imagens Binárias. INPE, São José dos Campos, 1998.

COOK R.A. AND HOVER K. C. Mercury porosimetryof cemente-based materials and associated correction factors. ACI Materials Journal, 90, n. 2, pp 152-61, 1993.

JAIN, A. K. Fundamentals of Digital Image Processing. Prentice Hall, New Jersey, 1989.

LIMA, I. Quantificação Histomorfométrica 2D a partir de Tomografia Computadorizada 3D. Dissertação. (Mestrado em Ciências — Engenharia Nuclear) — Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2002.

MEYER, F. Automatic Screening of Cytological Specimens. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 35, pp.356-369, 1986.

NEVILLE A. M. **Propriedades do Concreto.** Pini 2^a Ed. São Paulo – Brasil, 1997.