

Resistência à Compressão do Concreto por Imagens Microtomográficas

José Renato de Castro Pessôa^{1,4}

Joel Sanchez Domínguez³

Gil de Carvalho^{1,2}

Joaquim Teixeira de Assis¹

Resumo

Neste trabalho foi utilizada a microtomografia por Raio X para se obter a porosidade do concreto e relacioná-la com a sua resistência à compressão. Para isso foram retirados de um concreto endurecido sete testemunhos medindo uma polegada de diâmetro. Esses testemunhos foram microtomografados utilizando-se um aparelho compacto de alta resolução da SkyScan® modelo 1172, produzindo aproximadamente 1000 seções transversais de cada testemunho. Processando-se digitalmente essas imagens mediante morfologia matemática e processamento de pixels foi obtido um valor percentual médio para a porosidade do concreto. Usando-se o valor da porosidade foram aplicadas as equações propostas por Powers, Ryshkevitch, Schiller e Hasselmann, relacionando-se essa porosidade com a resistência à compressão do material. A técnica da microtomografia por Raio X bem como o processamentos das imagens obtidas geraram resultados para a porosidade do material compatíveis com resultados obtidos pelo ensaio normalizado na NBR 9778 (2005). As equações de Powers, Ryshkevitch, Hasselmann e Schiller deram origem a curvas resistência x porosidade para o tipo de concreto estudado. Chegou-se a conclusão que todas as curvas podem ser utilizadas para se estimar a resistência à compressão do concreto a partir de sua porosidade quando utilizadas em concretos com porosidade abaixo de 20 %.

Palavras-chave: Concreto, Porosidade, Resistência à Compressão, Microtomografia por Raio X.

Abstract

In this work the microtomography by X-ray was used to obtain the porosity of the concrete and then relates it to its compressive strength. For this were collected seven samples of a hardened concrete, with one inch of diameter each one. Were made CT scans of the seven samples of concrete using the tomography SkyScan 1172. The tomographic process produced approximately 1000 slices for each sample. Making digital processing of these images using mathematical morphology and pixel processing was obtained a mean percentage value for concrete porosity. With porosity value were applied to the equations proposed by Powers, Ryshkevitch, Schiller and Hasselmann to relate the porosity and compressive strength of the material. The equations proposed by Powers Ryshkevitch, Hasselmann and Schiller yielded curves (strength x porosity) for the particular concrete type studied. The conclusion that all curves can be used to estimate the compressive strength of the concrete from its porosity when used in concrete with a porosity below 20 %.

Keywords: Concrete, Porosity, Compressive Strength, X-ray Microtomographic.

1 Professor D. Sc. – Departamento de Mecânica e Energia – IPRJ – UERJ.

2 Professor D. Sc. – Universidade Estácio de Sá – UNESA.

3 Doutorando – Departamento de Modelagem Computacional – IPRJ – UERJ.

4 Professor Pesquisador D. Sc. Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC.

1 Introdução

A resistência do concreto, normalmente, fornece uma ideia geral da qualidade do concreto, por estar ligada à estrutura da pasta de cimento. A presença de falhas, descontinuidades e poros é significativa e, para entender sua influência na resistência, é importante considerar a mecânica da fratura do concreto sob tensão. Um fator fundamental é a porosidade, isto é, o volume relativo de poros ou vazios na pasta de cimento. Os vazios podem ser considerados como causas de diminuição da resistência (NEVILLE, 2013). Verifica-se que a presença de vazios diminui muito a resistência do concreto chegando, segundo NEVILLE (1997), a uma redução de 30 % na resistência com 5 % de vazios ou a uma perda de 10% de resistência com 2 % de vazios. Esses vazios são bolhas de ar aprisionado ou espaços deixados depois de retirado o excesso de água. O volume dessa água está ligado principalmente ao fator água/cimento da mistura (NEVILLE, 1997). Além do volume a distribuição, a forma e as dimensões dos poros também têm influência na resistência do concreto (POWERS, 1949). A porosidade da pasta de cimento hidratada e a microfissuração são de difícil quantificação de maneira eficiente, de modo que para fins de engenharia é necessário recorrer a um estudo empírico dos efeitos de vários fatores sobre a resistência do concreto. Neste trabalho a resistência à compressão do concreto foi relacionada a sua porosidade por meio de espessões empíricas encontradas na literatura e propostas por Powers, Ryshkevitch, Hasselmann e Schiller (ODLER, 1991). A automação de métodos não destrutivos que determinam a porosidade do concreto é objetivo de trabalhos que vêm sendo produzidos recentemente. Alguns desses métodos utilizam imagens de alta definição que são trabalhadas por meio de técnicas e programas para processamento dessas imagens digitais. O termo imagem digital, ou simplesmente imagem, refere-se à função bidimensional de intensidade da luz $f(x,y)$, onde x e y denotam as coordenadas espaciais e o valor f em qualquer ponto (x,y) é proporcional ao brilho (ou níveis de cinza) da imagem naquele ponto (JAIN, 1989). Para gerar uma imagem digital, $f(x,y)$ deve ser discretizada ao longo de x e y , e na amplitude $z = f(x,y)$. Para tanto é feita uma amostragem (normalmente uniforme) de $f(x,y)$ nas direções x e y , gerando uma matriz de $N \times M$ amostras, seguida de uma quantização do valor de $f(x,y)$ em L níveis de cores. Nesta matriz, cada elemento (x,y) , $x = 0, 1, 2, \dots, M-1$ e $y = 0, 1, 2, \dots, N-1$ é chamado de pixel (uma abreviação de “picture elements”) (WOODS, 2009). Entendendo-se imagem como uma forma compacta

de representar muitas informações, em um sistema de processamento de imagens estas informações podem passar por diversas formas de representação a partir do objetivo definido para aplicação. Neste trabalho a porosidade do concreto foi calculada por meio de processamento de imagens digitais obtidas por meio de microtomografia por Raio X. Essas imagens foram processadas por meio de técnicas de processamento de pixel e morfologia matemática. As microtomografias foram realizadas no laboratório da Embrapa em São Carlos – SP. Os resultados obtidos para a porosidade foram comparados com resultados obtidos por meio do método tradicionalmente utilizado e normalizado na NBR 9778 (2005) – Absorção de água, índice de vazios e massa específica em argamassa e concreto endurecido realizado no Centro de Ciências Exatas e Tecnologia – Departamento de Ciências dos Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

Foi realizado ensaio para verificação da resistência mecânica à compressão do concreto na empresa Comercial Projemart em Nova Friburgo por meio da NBR 5739 (2007).

2 Metodologia e Procedimento Experimental

Foram obtidos sete testemunhos cilíndricos com uma polegada de diâmetro extraídos de um concreto endurecido com 30 MPa de resistência à compressão. A Figura 1 mostra testemunhos recém-extraídos.



Figura 1 – Testemunhos recém-extraídos de um concreto com 30 MPa de resistência à compressão.

Para a execução das microtomografias por Raio X foi utilizado um aparelho compacto de microtomografia de alta resolução (14,97 μ m) 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 (<http://www.skyscan.be/products/1172.htm>). A Figura 2 mostra o microtomógrafo utilizado.



Figura 2 – Aparelho SkyScan 1172 da EMBRAPA – SC.

Foi desenvolvido um programa em MATLAB® para ler cada imagem gerada e determinar a área de vazios para obtenção da porosidade. Os únicos parâmetros que necessitaram de 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. Para cada testemunho foram obtidas em média 1000 imagens. Cada imagem foi ajustada em contraste, binarizada e filtrada utilizando-se a operação morfológica de fechamento (dilatação seguida de erosão) com elemento estruturante circular de raio igual a 2 pixel para a remoção de pontos isolados interpretados como ruído. Na imagem-resultado foram contados os vazios obtidos em 2D. A Figura 3 mostra uma seção transversal com dois cortes de uma imagem reconstruída das radiografias obtidas de um dos testemunhos microtomografados.

A fim de se relacionar a porosidade encontrada para o concreto com a sua resistência mecânica à compressão utilizou-se quatro expressões empíricas encontradas na literatura. Determinou-se primeiramente o valor de uma resistência intrínseca à porosidade encontrada pelas imagens microtomográficas utilizando-se o valor obtido em laboratório para a resistência à compressão do material por meio do ensaio descrito pela norma NBR 5739 (2005).

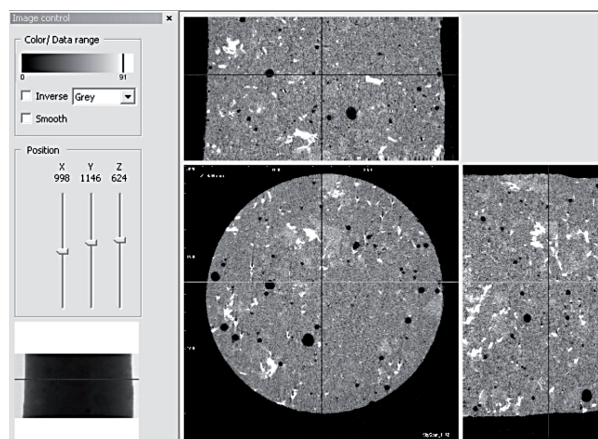


Figura 3 – Sessão transversal com cortes de um testemunho (Tela do programa Data Viewer – www.skyscan.be).

2.2 Expressões utilizadas para relacionar a resistência à compressão do concreto com a porosidade encontrada

2.1.1 Expressão de Powers (1958)

$$f_c = a x^3 \quad \text{Equação 1}$$

onde

- f_c = resistência à compressão aos 28 dias;
- a = resistência intrínseca do material com porosidade zero;
- x = relação gel-espaço, que para uma pasta completamente hidratada é essencialmente $(1 - p_c)$, sendo p_c é a porosidade capilar;

2.1.2 Expressão de Ryshkevitch (1953), mesma fórmula proposta por Mehta e Monteiro (2006)

$$s = s_0 e^{-kp} \quad \text{Equação 2}$$

onde

- s = resistência do material que possui uma dada porosidade p ;
- s_0 = resistência intrínseca para a porosidade zero;
- k = constante que varia de 2,6 a 3,0 e depende do tipo de cimento.

2.1.3 Expressão de Schiller (1958)

$$f_c = k \ln \left(\frac{p_0}{p} \right) \quad \text{Equação 3}$$

onde

f_c = resistência à compressão aos 28 dias;
 $p_0 = 1 - \phi$ média;
 ϕ média = porosidade média;
 k = constante empírica.

2.1.4 Expressão de Hasselmann (1962)

$$\sigma_0 = \sigma (1 - kp) \quad \text{(Equação 4)}$$

onde

σ_0 = resistência à compressão aos 28 dias;
 σ = resistência intrínseca para a porosidade zero;
 k = constante que varia de 2,6 a 3,0 e depende do tipo de cimento;
 p = porosidade.

3 Resultados

3.1 Porosidade

A Tabela 1 mostra os resultados encontrados para a porosidade média em cada testemunho por imagens obtidas das seções transversais por microtomografia por Raio X. Foram analisadas aproximadamente 1000 imagens por testemunho e calculada a porosidade média e o desvio padrão por testemunho.

Tabela 1 – Número de imagens analisadas por testemunho e porosidade média.

CP	nº Imagens	Porosidade Média (\bar{X}) (%)
1	1046	2,1
2	1046	1,2
3	1046	2,3
4	962	2,0
5	1046	2,5
6	1046	1,8
7	1046	2,2
Média		2,0

Tabela 3 – Resultados obtidos no ensaio à compressão.

Testemunho	Tempo de cura (dias)	Velocidade (MPa/seg)	Ensaio Realizado		Tensão Média (MPa)
			Força (tf)	Tensão (MPa)	
1	28	0,6	27,39	34,9	39,3
2	28	0,5	31,95	40,7	
3	28	0,43	33,13	42,2	

A Tabela 2 mostra o resultado obtido no ensaio segundo a NBR 9778 (2005) – Absorção de água, índice de vazios e massa específica em argamassa e concreto endurecido realizado no Centro de Ciências Exatas e Tecnologia – Departamento de Ciências dos Materiais da Universidade Federal de São Carlos para o testemunho 3.

Tabela 2 – Resultados obtidos no ensaio realizado na Universidade de São Carlos segundo a NBR 9778 (2005) no testemunho 3.

Testemunho	Porosidade média por Microtomografia (%)	Porosidade pela NBR 9778 (2005) (%)
3	2,3	2,08

3.2 Resistência à Compressão

A Tabela 3 mostra os resultados do ensaio à compressão axial segundo a norma NBR 5739 (2007).

3.3 Aplicação das Fórmulas Empíricas

3.3.1 Fórmula de Powers

Utilizando o resultado para a porosidade (p) encontrada por microtomografia por Raio X de 2,0 %, foi calculado o valor para a resistência intrínseca à porosidade zero do concreto (a). Para o valor da resistência à compressão f_c foi utilizado o valor médio obtido no ensaio à compressão segundo a 5739 (2007) de 39,3 MPa.

$$f_c = ax^3 \Rightarrow 39,3 = a \cdot 0,98^3 \Rightarrow a = 41,76 \text{ MPa}$$

onde $x = 1 - p = 1 - 0,02 = 0,98$

Depois de obtido o valor para a resistência intrínseca a equação da curva *resistência x porosidade* para esse concreto será:

$$f_c = 41,76 (1 - p)^3 \quad \text{(Equação 5)}$$

3.3.2 Expressão de Ryshkevitch, mesma fórmula proposta por Mehta e Monteiro (2006)

Adotando o valor encontrado para a porosidade (p) de 2,0 %, e para a resistência à compressão de 39,3 MPa e fazendo o mesmo procedimento utilizado na equação de Powers com $k = 3$ se obtém a seguinte equação para a curva *resistência x porosidade*:

$$s = 41,80e^{-3p} \quad (\text{Equação 6})$$

3.3.3 Fórmula de Schiller

O valor da porosidade à força zero p_0 foi calculado da seguinte forma:

$$p^0 = 1 - \phi \text{ média}; \text{ portanto, } p_0 = (1 - 0,02) = 0,98.$$

Adotando-se o valor encontrado para a porosidade p de 2 %, e para a resistência à compressão de 39,3 MPa, o valor da constante k na equação será:

$$39,3 = k \ln\left(\frac{0,98}{0,02}\right) \Rightarrow k = 10,1$$

Depois de obtido o valor para k a equação da curva *resistência x porosidade* para este concreto é dada por:

$$f_c = 10,1 \ln\left(\frac{0,98}{p}\right) \quad (\text{Equação 7})$$

3.3.4 Expressão de Hasselmann

Adotando-se o valor encontrado para a porosidade p de 2,0 %, e para a resistência à compressão de 39,3 MPa e fazendo o mesmo procedimento utilizado nas equações anteriores com $k = 3$ se obtém a seguinte equação para a curva *resistência x porosidade*:

$$\sigma_0 = 41,8(1 - 3p) \quad (\text{Equação 8})$$

3.4 Curvas resistência x porosidade obtidas

A Figura 4 mostra as curvas de *resistência x porosidade* para as equações de Powers, Schiller, Ryshkevitch e Hasselmann, respectivamente.

4 Análise dos Resultados e Conclusões

Os resultados obtidos para a porosidade do concreto por microtomografia por Raio X podem ser utilizados para calibração das curvas por serem praticamente iguais aos resultados obtidos para a porosidade pela NBR 9778(2005). O resultado obtido para a resistência média à compressão em três corpos de prova por meio do ensaio apresentado na NBR 5739 (2005) foi utilizado na calibração das curvas analisadas. A técnica da microtomografia por Raio X se mostrou satisfatória para se obter uma estimativa de resistência à compressão em concretos por meio da porosidade. Observa-se na Figura 4 que para baixas porosidades as curvas apresentam resultados próximos sendo que as curvas de Powers e Ryshkevitch são praticamente iguais.

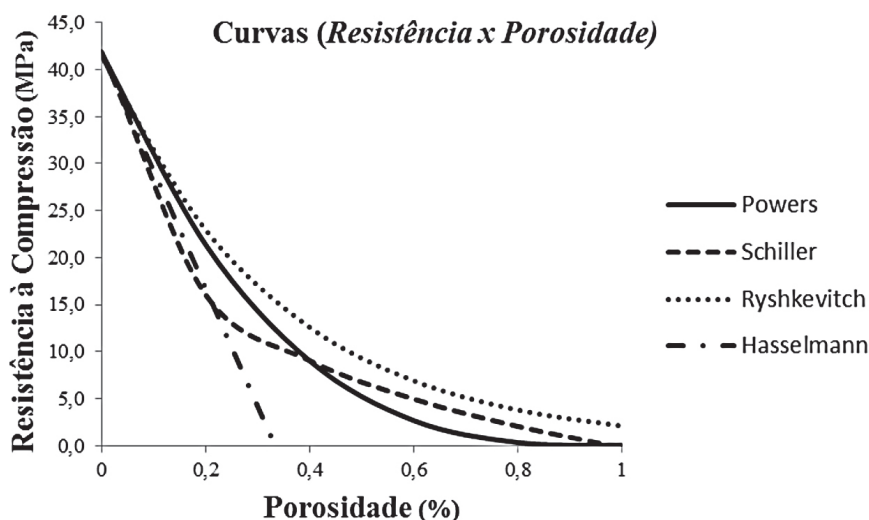


Figura 4 – Curva de Powers, Schiller, Ryshkevitch e Hasselmann.

Conclui-se que todas as curvas podem ser utilizadas para se estimar a resistência à compressão do concreto a partir de sua porosidade quando utilizadas em concretos com porosidade abaixo de 20 %. Acima desse valor, o que não é comum para a maioria dos concretos, deverá ser realizada uma análise mais cuidadosa, pois as curvas começam a apresentar diferenças significativas. No caso de não haver amostras de concreto da estrutura analisada, a fim de se obter uma estimativa da resistência à compressão para a calibração das curvas, pode-se obtê-la por esclerometria ou por outro ensaio não destrutivo como, por exemplo, o ultrassom.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade do Estado do Rio de Janeiro – IPRJ e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio para o desenvolvimento desta pesquisa.

6 Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.
- HASSELMANN, D. P. H. **Relation between effects of porosity on strength and on Young's modulus of elasticity of polycrystalline materials**. Journal of the American Ceramic Society, USA, 1962.
- JAIN, A. K. **Fundamentals of Digital Image Processing**. Prentice Hall: New Jersey, 1989.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete, Microstructure, Properties and Materials**. 3ª ed. USA: McGRAW HILL, 2006.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2ª ed., Brasil, Pini, 1997.
- NEVILLE, A. M., BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª ed, Brasil, Bookman, 2013.
- ODLER I. **Strength of cement – (final report)**. RILEM – Materials and Structures, USA, 1991.
- POWERS, T. C. **The Air Requirement of Frost Resistant Concrete**. Washington D.C. Highway Research Board Proceedings 29th Annual Meeting. USA, 1949.
- RYSHKEWITCH, E. **Composition and strength of porous sintered alumina and zirconia**. Journal of the American Ceramic Society, USA, 1953.
- SCHILLER, K. K. **Porosity and strength of brittle solids**. W. H. Walton ed. Mechanical properties of non-metallic materials. London, 1958.
- WOODS, R. E.; GONZALEZ, R. C. **Processamento Digital de Imagens**. 3ª ed., Brasil, Pearson, 2009.