

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO USANDO RAIO X

EVALUATION OF COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE USING X RAY

ROSA, Agnus Rogerio Oliveira

Mestrando. Engenheiro Civil. Escola de Engenharia da UFMG
engenharia@setaviso.com.br

GONÇALVES, Dayana Keitty Carmo

Mestrando. Engenheiro Civil. Escola de Engenharia da UFMG
engdayana@hotmail.com

OLIVEIRA, Nívia Nascimento Custódio

Mestranda. Engenheira Civil. Escola de Engenharia da UFMG
niviaengenheira@gmail.com

RESUMO

A resistência a compressão é uma das propriedades mais relevantes do concreto, sendo ela capaz de oferecer um vislumbre da qualidade geral do material. Portanto tanto em novas quanto em antigas construções há um enorme interesse em determiná-la, para tanto pode-se fazer uso tanto de métodos destrutivos como não destrutivos, sendo em geral imposto pelas condições locais o método a ser adotado. Em avaliação de construções antigas a possibilidade de se realizar um ensaio destrutivo se torna restrita e na maior parte das vezes completamente inviável, mesmo a retirada de corpos de prova de tamanho significativo pode ser um grande desafio, e é nesse cenário que a possibilidade de se determinar a resistência a compressão através de pequenos corpos de prova com o emprego do raio x se apresenta. O emprego de raio x em associação com prensas triaxiais também tem

possibilitado um conhecimento mais aprofundado do que acontece com o concreto em momentos de impacto por exemplo. Além disso a análise através de raios x permite também a detecção precoce de reações álcali agregado, possibilitando uma ação eficiente e a baixo custo. Apesar de atualmente demandar equipamento específico e alto valor, a tecnologia se mostra extremamente eficiente no que se propõe.

Palavras-chave: concreto; De raios-X; resistência à compressão; carregamento triaxial; porosidade.

ABSTRACT

The compressive strength of concrete is one of the most important properties. It gives an idea about all the characteristic of concrete. In new as well as an old buildings there is an interest in determines the concrete compressive strength, for both cases we can make a destructive and non-destructive testing. The local conditions will impose the right method to be adopted. In old buildings the possibility to perform a destructive testing is sometimes very restricted and often completely impractical. The withdrawal of samples of significant size can be a challenge. In this situation the possibility of determine the compression strength through small samples with the use of X Ray is presented. The use of x-ray in association with triaxial presses has also allow a deeper understanding of what happens to the concrete at moments of loading, for example. Further analysis by x-ray also allows early detection of alkali-aggregate reactions, making possible effective action at low cost. Although it's require specific, high-value equipment, technology has proved to be extremely efficient

Keywords: concrete; X-ray; compressive strength; triaxial loading; porosity.

INTRODUÇÃO

A resistência à compressão é considerada como uma das propriedades mais importantes do concreto, fornecendo uma ideia geral de sua qualidade, estando ela diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento hidratado. Um dos fatores de influencia na resistência a compressão é o índice de vazios, Neville, 1997, verificou que a presença de vazios diminui significativamente a resistência, sendo observado que apenas 5% de vazios geram decréscimo de 30% na resistência. Esses vazios podem ser tanto bolhas de ar aprisionado como espaços deixados pela saída do excesso de água ou mesmo fissuras e outros defeitos. Outro fator extremamente conhecido é a relação água-cimento, exatamente pelo fato de que quando o excesso de água sai, deixa para trás vazios. Grudemo, 1975, demonstrou que é possível traçar a influencia do volume de poros sobre a resistência através de uma função exponencial.

O índice de vazios também possui enorme interesse para a determinação da vida útil das estruturas, uma vez que quanto mais poroso, maiores os danos causados pelo meio, uma vez que os agentes agressivos podem penetrar mais facilmente.

Foi a partir do conceito que é possível correlacionar o índice de vazios com a resistência a compressão que a avaliação da resistência mecânica através de raios x, começou a se desenvolver. Os primeiros estudos desenvolvidos com a utilização de raio x, estavam voltados para a mecânica dos sólidos, mas precisamente para a análise de amostras de areia. Sendo utilizado o método da Correlação Digital de Imagem (DIC) capaz de medir experimentalmente os campos de tensões e deformações em superfícies sólidas ou através do volume dos sólidos. O método inicialmente foi utilizado na década de 1980 com objetivo de medir os deslocamentos e campos de tensões dentro de objetos sólidos, e atualmente é feito com uso de imagens 3D adquiridas por micro tomografia de Raios X, existindo estudos nesse campo desenvolvidos por Bayetal, 1999, Bornertetal 2004, Lenoiretal, 2007, e diversos outros. Inicialmente trabalhava-se com fontes "SINCROTON" e atualmente é possível a obtenção de

uma fina resolução espacial na escala do grão, através da utilização de scanners de laboratório.

Hoje os Raios X permitem o estudo do comportamento do arenito, de argamassas e de concreto, sendo um equipamento inovador, digitalizando objetos de 4mm a 200mm. A técnica utilizando os Raios X, tem a vantagem de ser um método não destrutivo onde é possível caracterizar em 3D todo material, identificando inclusive a densidade do material.

O método dos raios X funciona baseado na Lei Beer-Lambert, que depende da absorção dos Raios X, da espessura do material e do coeficiente linear de absorção. Na equação a abaixo é possível identificar que: I_0 é no número de fótons emitidos pela fonte,

$$\exp\left(-\int \mu(x)dx\right)$$

O número de fótons que atinge o material estudado é o coeficiente global de atenuação linear da espessura do material atravessado pelos Raios X.

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\int \mu(x)dx\right)$$

O processo de transformação dos dados em imagens acontece através de um algoritmo que deriva o coeficiente global de atenuação para cada pixel da zona digitalizada.

No entanto é preciso um cuidado especial com a obtenção das amostras, que precisam ser representativas e não podem estar deformadas. Sendo que essas amostras são submetidas primeiramente ao raio x em condições naturais, sendo após isso tratadas com contraste e submetidas novamente ao raio x e a partir daí que se inicia o tratamento dos dados descritos anteriormente.

Atualmente o raio x, tem sido utilizado, tanto para determinação da resistência uniaxial a compressão, como para determinação da resistência e comportamento sob esforços tri axiais como, para a determinação do início de reações álcali agregado, obtendo resultados satisfatórios em todos os casos.

RESISTÊNCIA DO CONCRETO E DOSES DE TRANSMISSÃO DE RAIOS X

Um dos fatores de maior interesse no estudo do concreto endurecido é o índice de vazios, este pode ser constituído tanto de poros como de fissuras e outros defeitos. É exatamente sobre o índice de vazios que a determinação da resistência a compressão através do uso de Raios X se baseia.

Segundo, Takeda e Otsuka, 2006, ao extrair testemunhos de um concreto expô-los aos Raios X é possível obter uma imagem onde os vazios e substâncias com baixo coeficiente de absorção aparecem na cor branca, para obter apenas a porção dos vazios, os mesmos testemunhos são submetidos durante um minuto a um meio de contraste com alto coeficiente de absorção, após a remoção do excesso de contraste os testemunhos voltam a receber Raios X, o resultado é que os vazios impregnados pelo contraste aparecem em preto. Logo a diferença entre as imagens representa a diferença entre a quantidade de Raios X transmitidos ou “transmission dose reference TDD”, que pode ser entendida como a quantidade de vazios.

A porosidade aparece nas imagens desde a cor cinza até a branca. A identificação entre o que é porosidade e material denso é feita através da coloração com base em inspeção visual, fato inclusive que leva a uma margem de resultados ligeiramente diferentes. O processo constitui-se basicamente em transformar a estrutura em uma imagem onde há apenas as cores preto e branca, evidenciando assim a porosidade, como é possível observar pela figura 1 abaixo.



Figura 1 – Amostra de concreto em condições normais, após a impregnação com contraste e tratamento da imagem

Fonte: Malecot et al, 2010

A medida quantitativa da dose de transmissão é feita a partir da fórmula: $D=\log(1/T)$, onde D representa

a densidade ótica padrão e T a transmissividade, obviamente os dados obtidos são tratados por programas computacionais e são eles quem geram os resultados.

O ensaio de Raios X tem sido um grande achado para análise da resistência à compressão das estruturas de concreto, visto que o mesmo pode ser realizado com peças de tamanho reduzidos e através de correlações, a resistência à compressão pode ser estimada. Nos trabalhos de Takeda e Otsuka, é possível notar que testemunhos tradicionais de 10cm de raio ou mesmo testemunhos reduzidos, de 7cm de raio, apresentam correlação precisa entre os vazios e a resistência mecânica. No entanto os mesmos autores chamam a atenção que para corpos de prova menores é preciso um cuidado adicional uma vez que a relação água – cimento se modifica de acordo com a profundidade e a parte externa pode possuir por consequência um índice de vazios superficiais muito superiores ao interior da peça, sendo que a utilização de amostras que trabalhem apenas nessa faixa, precisam ser corrigidas.

A preocupação desses autores em utilizar testemunhos reduzidos deve-se ao fato que em campo nem sempre é possível extrair amostras de tamanhos tradicionais, e que pode ser imperativa a extração em menores proporções. Quando se executa o ensaio com corpos de prova moldados tem-se maior facilidade para utilização de ensaios destrutivos, porém, quando se trata de ensaios in loco de estruturas existem diversos fatores contrários à retirada de testemunhos com dimensões maiores, dentre eles destaca-se a interferência na resistência da estrutura, causada pela retirada do testemunho e existência de armaduras muito próximas umas das outras. Outro problema com ensaios in loco é que muitas vezes a medição da resistência do concreto com a utilização de esclerômetros, pode estar comprometida devido a deterioração superficial do concreto e da obtenção apenas da resistência superficial.

Como já foi mencionado a análise da resistência a compressão por raio x, também sofre interferência se utilizado corpos de prova extremamente pequenos, uma vez que esses por representarem pouca profundidade na peça, podem apresentar um maior índice de vazios.

Takeda e Otsuka, 2006, apresentam especificadamente estudo com testemunhos de apenas 4cm de raio, que situam exatamente nesse faixa superficial, e afirmam que é possível, no caso desses corpos de prova corrigir o valor encontrado, multiplicando por 1,22 o valor da resistência mecânica a compressão. Logo os autores mencionam comprovam que é possível através da utilização de raio x o emprego de testemunhos realmente pequenos para a determinação precisa da resistência a compressão.

Em 2009, Takeda e Otsuka, desenvolveram um estudo de caso apresentando resultados obtidos pela avaliação da resistência mecânica através de raio x, em corpos de prova reduzidos. O trabalho consistiu em comparar resultados encontrados através do ensaio tradicional de compressão uniaxial e diversos tamanhos de testemunhos submetidos ao raio x, sendo possível identificar o tamanho das amostras através da figura 2.

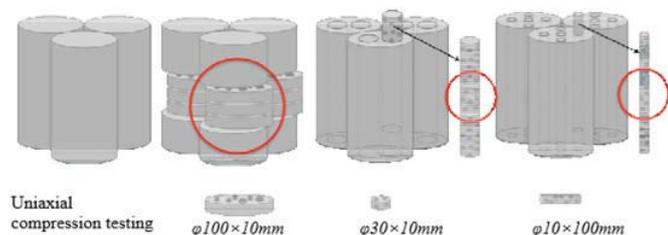


Figura 2 – Amostras de tamanhos reduzidos utilizados para determinação da resistência a compressão
Fonte: Takeda e Otsuka, 2009.

Neste estudo de caso, fica claro que quanto maior a absorção do meio de contraste pela amostra menor é a resistência final do concreto, como já mencionado anteriormente, uma vez que a absorção de contraste esta intimamente ligada com o índice de vazios. Além disso, fica confirmado, que apesar de que para retirada in loco é interessante tamanho o mais reduzido possível, tais amostras demanda um maior cuidado quanto à análise dos resultados. Uma vez que quanto menor a amostra, maior será a susceptibilidade à fissuração decorrente da perfuração, fazendo com que haja maior absorção do meio de contraste e, portanto menor resistência, apontando um falso negativo. Porém

segundo os autores este problema é simplesmente resolvido por meio da retirada de maior quantidade de amostras e através da correção para amostras menores conforme já citado anteriormente.

COMPORTAMENTO DO CONCRETO COM COMPRESSÃO TRIAXIAL - ANÁLISE DA MESO ESTRUTURA COM IMAGENS DE TOMOGRAFIA DE RAIOS X

Outro fato amplamente conhecido é que diante de um impacto o concreto não possui resistência significativa, surgindo um grave quadro de tensões tri axiais. Obviamente para compreender esse processo é preciso reproduzir a situação e identificar como o processo de perda da resistência se processa, para tanto o uso dos Raios X em associação com a prensa tri axial apresenta-se como solução viável, uma vez que a prensa reproduzirá a situação de confinamento e que os Raios X conseguirá rastrear a localização das deformações na geometria. Sendo que as imagens de alta qualidade produzidas pelo raio x possuem resolução que possibilita a compreensão dos efeitos que no concreto quando submetido a tensões tri-axiais.

Malecot et al, 2010, apresenta a análise da situação de compressão tria axial, com auxilio das imagens obtidas por raio x. Para tanto as amostras são testadas em uma prensa triaxial de alta capacidade capaz de gerar confinantes pressões de até 0,85Gpa e uma tensão axial atingindo 2,3GPa. Um sensor de posição linear, localizado na célula de pressão é utilizado para controlar o deslocamento axial do pistão, enquanto que um sensor de pressão e o sensor de carga, também localizada na célula de confinamento indicam o estado de tensão da amostra. A pressão de confinamento e de deslocamento axial do pistão, ambos servos-controlados, que oferecem a possibilidade de criação de diferentes caminhos de carregamento. Tem sido demonstrado que o efeito de fricção nas extremidades da amostra pode ser negligenciada durante triaxiais com alta confinamento.

Os testes dos autores, Malecot et al, 2010, começam pela aplicação de uma carga hidrostática até a pressão de restrição pretendida em seguida, mantendo constante tensão lateral, a amostra é axial mente carregada prensa triaxial permite a aplicação de ciclos durante a parte hidrostática ou a parte desviada do teste. Os mecanismos de degradação do concreto são investigadas através da realização de uma sucessão de ciclos de compressão triaxial de carga e descarga completa. Além disso, após cada descarga, a amostra é retirada da prensa e digitalizadas com as camadas de membrana que servem como proteção. As tensões de compressão e deformações de contração são definidas como positivas, σ_x é a principal tensão axial, P a pressão no interior da célula de confinamento, σ_m a tensão média ($\sigma_m = (\sigma_x + 2p)/3$) e q a principal diferença de tensão, ou seja, a tensão desviada.

As imagens de TC, têm uma resolução de $52\mu\text{m}$. Este valor chega a partir do tamanho do pixel do detector e o posicionamento da amostra entre a fonte de Raios X e o Detector. Este último é, a fim de ampliar o máximo possível a amostra, mas certificando-se de todo o diâmetro será digitalizado. A dimensão da zona digitalizada é aproximadamente igual a 6cm de altura por 8cm de largura. A resolução das imagens de TC é suficiente para compreender os mecanismos existentes na escala mesoscópica (tamanho do agregado) e, em seguida, associá-los com o comportamento macroscópico. Estas imagens requerem processamento para revelar a mesoestrutura e quantificar as modificações.

Diversos ensaios realizados em cada amostra em diferentes estados, de um jeito fácil para avaliar os defeitos consiste em comparar as diversas fatias de mesma parte da amostra. Fatias provenientes de duas amostras diferentes são identificadas visualmente. Imagens obtidas a TC partir de uma varredura não retratam a mesoestrutura do concretos com muita precisão, tornando-se necessária algumas modificações, de modo a melhorar a qualidade das imagens. Este processo, automático, implica simplesmente em modificar tanto o contraste quanto luminância de uma maneira que permita concentrar apenas no nível de

cinza que correspondente a mesoestrutura concreto. Estes níveis de cinza são escolhidos “pelo olho” direto do nível de cinza do histograma. A Figura abaixo, mostra a mesma fatia horizontal antes e após o processamento; com as membranas já presentes, os diversos elementos de concreto são mais facilmente visíveis. O menor nível de cinza (preto) corresponde às zonas menos densas, enquanto o nível mais elevado reflete as zonas mais densas.

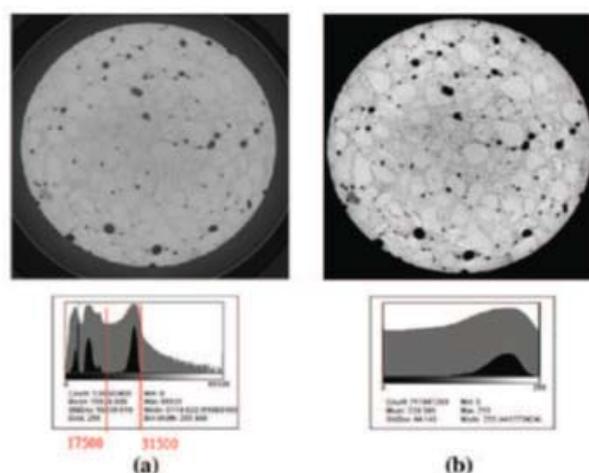


Figura 3 - Corte horizontal e histograma de espécime concreto antes e após processamento
Fonte: Malecot et al, 2010

UTILIZAÇÃO DE RAIOS X NA PREVENÇÃO DE DANOS POR RAA

Como toda patologia a reação álcali agregado, quanto mais brevemente detectada e tratada, resulta menor os custos envolvidos em tal processo. Mehta e Monteiro, 1994, chamam atenção para o fato de que a RAA, reação álcali agregado, pode desencadear tanto problemas estruturais como operacionais, e é marcada pela geração de expansões intensas, que podem ocorrer

em diferentes idades. Apesar de ser um fenômeno a muito conhecido ainda há dificuldade em entender, identificar e interromper tal reação. No entanto Takeda e Otsuka, 2006, apresentaram resultados satisfatórios na identificação precoce de tal efeito através da utilização de raios x.

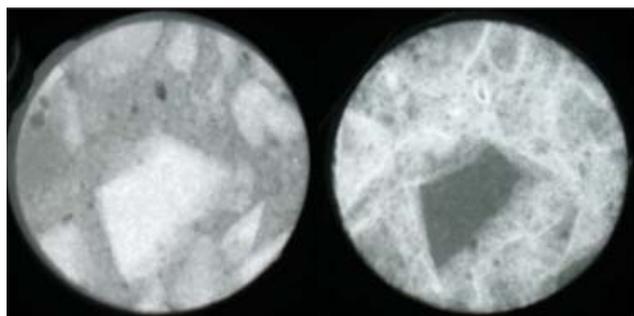


Figura 4 – Amostra de concreto sobre a ação de RAA
Fonte: Takeda e Otsuka (2006)

Como o raio x é capaz de detectar micro fissuras e vazios, é possível acompanhar e identificar a RAA ainda em seus primeiros estágios, como demonstrado pela figura acima, sendo assim possível agir de maneira precoce e eficiente. Nesse sentido a avaliação através de raio x pode determinar o início da reação muito antes do processo avançar e provocar danos significativos.

CONCLUSÕES

O uso de Raios X iniciou-se com a análise de solos granulares nas décadas de 1980 e 1990 com o uso das fontes “SINCROTON” evoluindo hoje para poderosos scanners de laboratório e prensas computadorizadas acopladas a tomógrafos para ensaios de compressão tri axial. Os ensaios hoje realizados com a utilização de contrastes específicos permitem visualizar com precisão toda a mesoestrutura do concreto, volume e tamanho dos vazios, tipo de dispersão dos vazios na massa cimentícia . Através de uma correlação entre as imagens adquiridas e modelos matemáticos é possível determinar a resistência do concreto com bastante precisão. Cuidados especiais têm que ser tomados

principalmente na coleta de amostra coletadas “in Situ” pois as mesmas podem ser danificadas ou mesmo modificadas durante a operação de perfuração para retirada dos núcleos a serem ensaiados, fazendo-se necessário a coleta de várias amostras para termos um resultado mais confiável.

Portanto a utilização de Raios X para determinação das características de concreto vem se expandindo, pois trata-se de ensaio que consegue detectar com grande precisão o que se passa dentro da peça analisada, possibilitando inclusive medidas precoces de combate a patologias e situações de risco.

BIBLIOGRAFIA

- BAY, B.K., SMITH, T.S., FYHRIE, D.P., & SAAD, M. (1999). Digital volume correlation: three-dimensional strain mapping using X-ray tomography. *Experimental Mechanics*, 39, 217–226.
- BORNERT, M., DESRUES, J., PANNIER, Y., LENOIR, N., VIGGIANI, G., & BESUELLE, P. (2010). Discrete and continuum analysis of localized deformation in sand using X-ray μ CT and volumetric digital image correlation. *Geotechnique*, 60, 315–322.
- DUPRAY, F., MALECOT, Y., DAUDEVILLE, L., & BUZAUD, E. (2009). A mesoscopic model for the behavior of concrete under high confinement. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33, 1407–1423.
- GABET, T., MALECOT, Y., & DAUDEVILLE, L. (2008). Triaxial behavior of concrete under high stresses: Influence of the loading path on compaction and limit states. *Cement and Concrete Research*, 38, 403–412.
- GABET, T., Vu, X.H., MALECOT, Y., & DAUDEVILLE, L. (2006). A new experimental technique for the analysis of concrete under high triaxial loading. *Journal de Physique IV*(134), 635–644.
- GRUDEM, A. “Development of strength properties of hydrating cement pastes and their relation to structural features.” *Proc. Symp. on Some Recent Research on Cement Hydration*, Cembereu. 1975.

MALECOT, Y., DAUDEVILLE, L., DUPRAY, F., POINARD, C., & BUZAUD, E. (2010). Strength and damage of concrete under high triaxial loading. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 14, 777–803.

MEHTA, Povindar K. e Paulo JM MONTEIRO. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. Pini, 1994.

Mitsuhiro TAKEDA, Koji OTSUKA (2006) “Estimation of concrete strength by x-ray technique with contrast medium” *Japan society of civil engineers*, Vol.62, No.2, May, 2006, pp.376-384.

Mitsuhiro TAKEDA, Koji OTSUKA (2006) “Quantification of concrete degradation and evaluation of freeze-thaw resistance using x-ray technique with contrast medium”, *Japan society of civil engineers* Vol.62, No.4, November 2006, pp.728-738

NEVILLE; Adam M.. *Propriedades do Concreto (tradução)*, Editora Pini Ltda – SP, 1997.

SFER, D., CAROL, I., GETTU, R., & ETSE, G. (2002). Study of the behavior of concrete under triaxial compression. *Journal of Engineering Mechanics*, 128, 156–163.

VU, X.H., MALECOT, Y., DAUDEVILLE, L., & BUZAUD, E. (2009a). Experimental analysis of concrete behavior under high confinement: Effect of the saturation ratio. *International Journal of Solids and Structures*, 46, 1105–1120. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* s135