

Evaluation of the effect of varying the workability in concrete pore structure by using X-ray microtomography

Avaliação do efeito da variação da trabalhabilidade na estrutura de poros do concreto pelo uso da microtomografia de raios X



E. E. BERNARDES^a
elenbernardes@gmail.com

A. G. DE MAGALHÃES^a
aldom@ufmg.br

W. L. VASCONCELOS^b
wlv@demet.br

E. H. M. NUNES^b
eduardohmn@yahoo.com.br

Abstract

The useful life of concrete is associated with the penetrative ability of aggressive agents on their structures. Structural parameters such as porosity, pore distribution and connectivity have great influence on the properties of mass transport in porous solids. In the present study, the effect of varying the workability of concrete in fresh state, produced through the use of additives, on pore structure and on the mechanical compressive strength of hardened concrete was assessed. The pore structure was analyzed with the aid of X-ray microtomography, and the results obtained were compared to the total pore volume calculated from data derived from helium and mercury pycnometry tests. A good approximation between the porosity values obtained through the two techniques was observed, and it was found that, regardless of concrete consistency, the samples from the surface of the specimens showed a percentage of pores higher than those taken from the more inner layers.

Keywords: concrete, workability, porosity, X-ray microtomography.

Resumo

A vida útil dos concretos está associada à capacidade de penetração de agentes agressivos em suas estruturas. Parâmetros estruturais como porosidade, distribuição e conectividade de poros têm grande influência nas propriedades de transporte de massa em sólidos porosos. No presente estudo avaliou-se o efeito da variação da trabalhabilidade do concreto no estado fresco, produzida pelo uso de aditivos, na estrutura de poros e na resistência mecânica à compressão do concreto endurecido. A estrutura de poros foi analisada com o auxílio de um microtomógrafo de raios X, e os resultados obtidos foram comparados com o volume total de poros calculados a partir de dados provenientes de ensaios de picnometrias de hélio e mercúrio. Observou-se boa aproximação entre os valores de porosidade obtidos pelas duas técnicas, tendo-se constatado que, independente da consistência do concreto, as amostras provenientes da superfície dos corpos de prova apresentaram um percentual de poros superior do que aquelas retiradas de camadas mais internas.

Palavras-chave: concreto, trabalhabilidade, porosidade, microtomografia de raios X.

^a Universidade Federal de Minas Gerais, Department of Materials Engineering and Construction, Belo Horizonte, MG, Brasil 31270-901

^b Universidade Federal de Minas Gerais, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Belo Horizonte, MG, Brasil 31270-901

1. Introdução

No estudo da microestrutura do concreto, a porosidade tem especial destaque por influenciar muitas de suas propriedades como dureza, módulo de elasticidade, resistência à compressão e permeabilidade [1, 2].

O sistema de distribuição de poros do concreto é fortemente influenciado pelos seus fatores de produção, como dosagem [3] e cura. As infinitas variações no processo produtivo dificultam a criação de modelos precisos de predição de seu comportamento. Existem muitas técnicas consolidadas para mensuração e caracterização da estrutura de poros, a exemplo da porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), adsorção de nitrogênio e microscopia eletrônica de varredura (SEM). Contudo, a utilização destas técnicas de forma isolada não é capaz de promover uma compreensão mais apurada desta estrutura [2,4]. Além disto, cada técnica possui seu erro associado, sua faixa de análise e padrão de preparação da amostra, e estas variáveis podem se tornar um fator complicador durante a análise e comparação dos resultados. Neste sentido, o uso da microtomografia de raios X (μ -CT) tem contribuído de modo a facilitar o estudo da estrutura de poros dos materiais.

A μ -CT é uma técnica de imagiologia tridimensional que permite a obtenção de dados sobre a microestrutura interna de materiais (como densidade, estrutura de poros e porosidade), a qual não demanda preparação especial das amostras. Apesar de sua criação e utilização não serem recentes [5], somente na última década estudos envolvendo sua aplicação para investigação sobre a estrutura de poros de materiais cimentícios começaram a ser difundidos [1, 2, 4, 6, 7].

Tabela 1 – Propriedades do cimento CP III 40 utilizado

Propriedade	Valores
Resíduo na peneira ABNT 200 (%)	0,35
Superfície específica Blaine (cm^2/g)	4700
Massa específica real (g/cm^3)	2,98
Água de consistência normal (%)	32,8
Tempo de início de pega (horas)	3,12
Tempo de fim de pega (horas)	4,75
Perda ao fogo (%)	3,8
Anidrido sulfúrico – SO_3 (%)	2,5
Resíduo insolúvel (%)	0,8
Resistência à compressão-3 dias (MPa)	23,4
Resistência à compressão-7 dias (MPa)	35,2
Resistência à compressão-28 dias (MPa)	49,0

O presente trabalho buscou verificar o efeito da variação da trabalhabilidade do concreto no estado fresco, produzida pelo uso de aditivos, na estrutura de poros e na resistência mecânica à compressão do concreto endurecido. Na investigação sobre a estrutura de poros, foi utilizada a técnica de microtomografia de raios X (μ -CT). Para fins de comparação de resultados, as porosidades dos concretos também foram calculadas pela relação entre densidade aparente, obtida por picnometria de mercúrio, e densidade da fração sólida, obtida pelo ensaio de picnometria com gás hélio [8, 9].

Tabela 2 – Granulometria dos agregados utilizados

Diâmetro de partícula (mm)	Agregado miúdo		Agregado graúdo	
	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
25	-	-	-	0
19	-	-	7,8	8
12,5	-	-	56,6	64
9,5	-	-	27,6	92
6,3	0	0	7,1	99
4,75	0,6	1	-	99
2,36	2,1	3	-	99
1,18	8,5	11	-	99
0,6	24,1	35	-	99
0,3	49,5	85	-	99
0,15	12,9	98	-	99
< 0,15	2,3	100	0,6	100
Dimensão máxima característica (mm)	2,4		25	
Módulo de finura	2,32		6,96	

Tabela 3 – Caracterização dos agregados utilizados

Propriedade	Agregado	
	Miúdo	Graúdo
Massa específica (g/cm ³)	2,6	2,7
Massa unitária (g/cm ³)	1,3	1,4
Material pulverizado (%)	0,4	0,5
Teor de argila em torrões (%)	0,1	-
Impureza orgânica (ppm)	< 300	-

Foram produzidas duas misturas de concreto, denominadas concreto Tipo 1 e Tipo 2, concebidas para atingir trabalhabilidades distintas através da respectiva utilização de aditivos plastificantes à base de compostos hidrocarboxílicos modificados e polinaftaleno sulfonado, e mantendo-se as mesmas proporções dos constituintes sólidos e relação água/cimento (a/c). Ambos os concretos foram curados em câmara úmida até a idade de ruptura. O concreto Tipo 1 foi também submetido à cura submersa em água potável, no intuito de se averiguar a eficácia da cura em câmara úmida.

2. Materiais e programa experimental

2.1 Cimento

Para a dosagem dos concretos, foi utilizado um cimento brasileiro com adição de escória de alto forno (CP III 40), cujas especificações técnica encontram-se descritas na norma brasileira NBR 5735 [10]. Suas principais propriedades físicas, químicas e mecânicas são apresentadas na Tabela 1.

2.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural quartzosa, e o agregado graúdo foi obtido mediante britagem de rochas calcíneas.

Os resultados dos ensaios de granulometria e caracterização dos agregados podem ser vistos nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

2.3 Filler

Foi utilizado filler calcário com dimensão máxima de grão passando pela peneira com malha de 44 µm. A Tabela 4 apresenta as principais propriedades físicas e químicas do filler calcário utilizado nesse estudo.

Tabela 4 – Propriedades do filler calcário utilizado

Propriedade	Valor
Superfície específica Blaine (cm ² /g)	3.095
Massa específica (g/cm ³)	2,73
Diâmetro médio de partícula (µm)	90
Óxidos de Cálcio – CaO (%)	55,04
Perda ao fogo – PCC (%)	41,94
Outros óxidos (%)	3,02

2.4 Aditivos químicos

O concreto Tipo 1 foi preparado mediante utilização de plastificante à base de compostos hidrocarboxílicos modificados. Para a produção do concreto Tipo 2 foi utilizado um plastificante à base de polinaftaleno sulfonado.

2.5 Dosagem do concreto

Para a dosagem dos concretos Tipo 1 e Tipo 2, foi determinado um traço similar, diferenciado apenas pelo tipo e quantidade de aditivo plastificante utilizado para conferir as distintas trabalhabilidades.

A dosagem de aditivo utilizado em cada traço foi suficiente para conferir um abatimento de 60 mm para o concreto Tipo 1 e de 100 mm para o concreto Tipo 2 (ASTM C 143).

As especificações de dosagem dos concretos produzidos encontram-se descritas na Tabela 5, onde a proporção em peso dos componentes sólidos é apresentada no formato cimento/filler/areia/brita.

2.6 Moldagem e cura dos corpos de prova

Foi confeccionado um total de 14 corpos de prova cilíndricos de (100 x 200) mm, sendo 8 CPs produzidos com o concreto Tipo 1 e 6 CPs com o concreto Tipo 2, cujas respectivas desformas foram realizadas em 48 e 24 horas após a moldagem. A desforma do concreto Tipo 1 necessitou ser realizada com 48 horas pois o aditivo utilizado retardou o endurecimento do material.

Após a desforma, 6 corpos de prova de cada tipo de concreto foram mantidos em câmara úmida (cura úmida), com temperatura controlada em 23 ± 2 °C e umidade relativa (UR) maior que 95%, até o momento da realização dos ensaios mecânicos de resistência à compressão. Os 2 CPs restantes do concreto Tipo 1 foram mantido na câmara úmida por um período de 24 horas, sendo en-

Tabela 5 – Especificação de dosagem dos concretos

Mistura	Fração de cimento (kg/m ³)	Relação água/cimento	Proporção dos constituintes sólidos	Fração de aditivo (l/m ³)	Abatimento (mm)
Tipo 1	340	0,54	1 : 0,53 : 2,14 : 2,70	2,04	60
Tipo 2				1,36	100

Tabela 6 – Resistência à compressão dos concretos analisados

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)		
	Tipo 1 – Cura úmida	Tipo 1 – Cura submersa	Tipo 2 – Cura úmida
7	26,9	–	24,4
14	37,2	–	37,6
28	46,5	47,0	46,0

tão submergidos em água potável (cura submersa) até completarem a idade de 28 dias.

2.7 Ensaios de caracterização dos concretos

Resistência à compressão

Os ensaios de compressão foram realizados em pares de corpos de prova nas idades de 7, 14 e 28 dias para os CPs submetidos à cura úmida, e aos 28 dias para os 2 CPs submetidos à cura submersa. Os testes foram conduzidos com uma velocidade de carregamento constante de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s e os resultados das resistências foram obtidos dentro de um erro experimental de 5 %.

Obtenção de amostras

A caracterização da estrutura de poros, por microtomografia de raios X (μ -CT) e picnometrias de hélio e mercúrio, foi realizada em amostras extraídas de corpos de prova com idade de 28 dias [9, 11, 12], curados em câmara úmida e por submersão em água potável. As amostras foram extraídas do corpo de prova que apresentou maior resistência mecânica à compressão.

Para obtenção das amostras, cada corpo de prova foi cortado no sentido transversal, com o auxílio de uma serra circular, de modo a se obter fatias de aproximadamente 1 cm de espessura, sendo desprezados os primeiros 2 centímetros de cada extremidade. Fragmentos de argamassa, com dimensão média entre 0,5 cm e 1,0 cm, foram coletados da superfície e região interna das fatias dos corpos de prova. Este procedimento de fatiamento foi necessário para facilitar a extração seletiva dos fragmentos.

Picnometria de gás hélio

A densidade real dos materiais investigados foi obtida através da picnometria de gás hélio [8, 9], em equipamento Quantachrome modelo MVP-1.

Para cada situação de análise, a amostra foi preparada a partir de 70 gramas de fragmentos provenientes da superfície e de camadas interiores do corpo de prova, em proporção próxima a 50 %. O material foi pulverizado em moinho de panela até a obtenção de uma granulometria inferior a 75 μ m. Após a etapa de cominuição, cada amostra foi mantida em estufa a 80 °C por um período de 3 horas, sendo em seguida quarteada de modo a se obter uma fração de aproximadamente 3 gramas.

Após pesagem em balança analítica, o material fracionado foi transferido para o compartimento de amostras do equipamento onde sofreu um processo de desgaseificação por meio de repetidas purgas com gás hélio, para remoção de eventuais impurezas presentes. Em seguida, foram registradas cinco leituras consecutivas das pressões na câmara de medida antes e após a expansão do gás. Utilizando estes valores, a densidade real foi calculada com seu respectivo erro, obtido por meio do desvio padrão das leituras.

Picnometria de mercúrio

Para cada situação de análise, uma amostra de aproximadamente 6 g foi obtida a partir do quarteamento de 96 g de fragmentos extraídos da superfície e de camadas internas do corpo de prova, em proporção próxima a 50 %. As amostras foram mantidas em estufa a 80 °C por um período de 3 horas.

O ensaio foi realizado utilizando um frasco volumétrico de vidro com capacidade para 25 ml. Foi medido o volume de líquido deslocado após imersão da amostra no frasco preenchido com mercúrio e então calculada a densidade volumétrica de cada amostra analisada [8, 9], sendo o erro calculado a partir do desvio padrão de cinco pesagens consecutivas da amostra, recipiente vazio, recipiente cheio com Hg e recipiente com Hg com amostra introduzida.

Microtomografia de raios X

Para a realização das leituras no microtomógrafo SkyScan 1172, foi selecionado um fragmento de argamassa proveniente da su-

Tabela 7 – Resultados obtidos a partir dos ensaios de picnometria de hélio e mercúrio

Concreto	Densidade (g/cm^3)		Porosidade (%)
	Real	Volumétrica	
Tipo 1 – cura úmida	$2,66 \pm 0,04$	$2,04 \pm 0,03$	24 ± 1
Tipo 1 – cura submersa	$2,57 \pm 0,05$	$1,97 \pm 0,02$	23 ± 2
Tipo 2 – cura úmida	$2,58 \pm 0,03$	$2,02 \pm 0,06$	19 ± 1

Tabela 8 – Porosidade dos concretos obtidas por meio de μ -CT

Amostra	Porosidade (%)		
	Tipo 1 – Cura úmida	Tipo 1 – Cura submersa	Tipo 2 – Cura úmida
Interna	16,0 ± 0,5	18,6 ± 0,8	15,0 ± 0,4
Superfície	32,8 ± 0,4	33,2 ± 0,6	25,0 ± 1
Valor médio	24,4 ± 0,9	26,0 ± 1	20,0 ± 1

perfície e outro oriundo de camadas internas de cada corpo de prova analisado. Pelo fato desta técnica se basear na obtenção de projeções bidimensionais do objeto analisado enquanto ele é rotacionado, foi conveniente a seleção de fragmentos com geometria mais regular.

Cada fragmento foi posicionado no compartimento de amostras do equipamento e fixado com massa de modelar. As amostras investigadas foram rotacionadas em ângulos de até 180°, adotando-se um passo de 0,40°. Através das projeções adquiridas e dos softwares Nrecon e CTAn, foram obtidos parâmetros morfológicos, bem como representação tridimensional das estruturas escaneadas. Para o cálculo da porosidade média dos materiais estudados, foram consideradas cem seções bidimensionais ao longo do volume analisado.

3. Resultados

3.1 Resistência à compressão

A Tabela 6 apresenta os resultados de resistência à compressão dos CP's para as diferentes situações de análise propostas.

É observado que a variação da consistência dos concretos (Tipo 1 e Tipo 2) não interferiu na resistências à compressão dos corpos de prova. O mesmo é verificado para os corpos de prova submetidos à cura úmida e cura submersa do concreto Tipo 1.

3.2 Picnometrias de hélio e mercúrio

Na Tabela 7 são apresentadas as densidades real e volumétrica e porosidades das amostras analisadas.

Os resultados de porosidade para os distintos processos de cura do concreto Tipo 1 apresentaram valores muito próximos. Já o concreto Tipo 2, submetido à cura úmida, apresentou porosidade inferior ao do concreto Tipo 1 com mesma condição de cura.

Como as amostras analisadas são compostas por fragmentos provenientes tanto da superfície quanto de camadas internas dos corpos de prova, os dados obtidos retratam uma média global dos materiais estudados.

3.3 Microtomografia de raios X

Na Tabela 8 são apresentados os resultados de porosidade para as amostras internas e externas dos concretos analisados, bem como a média destes resultados.

A análise por μ -CT demonstrou percentuais médios de porosidade muito próximos para os dois processos de cura do concreto Tipo 1 e um percentual mais baixo para o concreto Tipo 2. Nas análises isoladas, as amostra extraídas da superfície dos corpos de prova apresentaram porosidade consideravelmente maior que as amostras retiradas do interior do CP.

Na Tabela 9 são apresentados dois parâmetros, acerca da estrutura de poros dos materiais analisados, gerados pelas μ -CT.

Os poros abertos afetam diretamente a permeabilidade de fluidos no material, enquanto sua resistência mecânica é influenciada pelos poros abertos e fechados [13]. Na análise sobre porosidade aberta, as leituras obtidas para as amostras internas foram desprezadas, uma vez que poros que a princípio eram fechados podem ter se tornado abertos durante a fragmentação do material, porém os mesmos não teriam efetiva contribuição na permeabilidade do sistema.

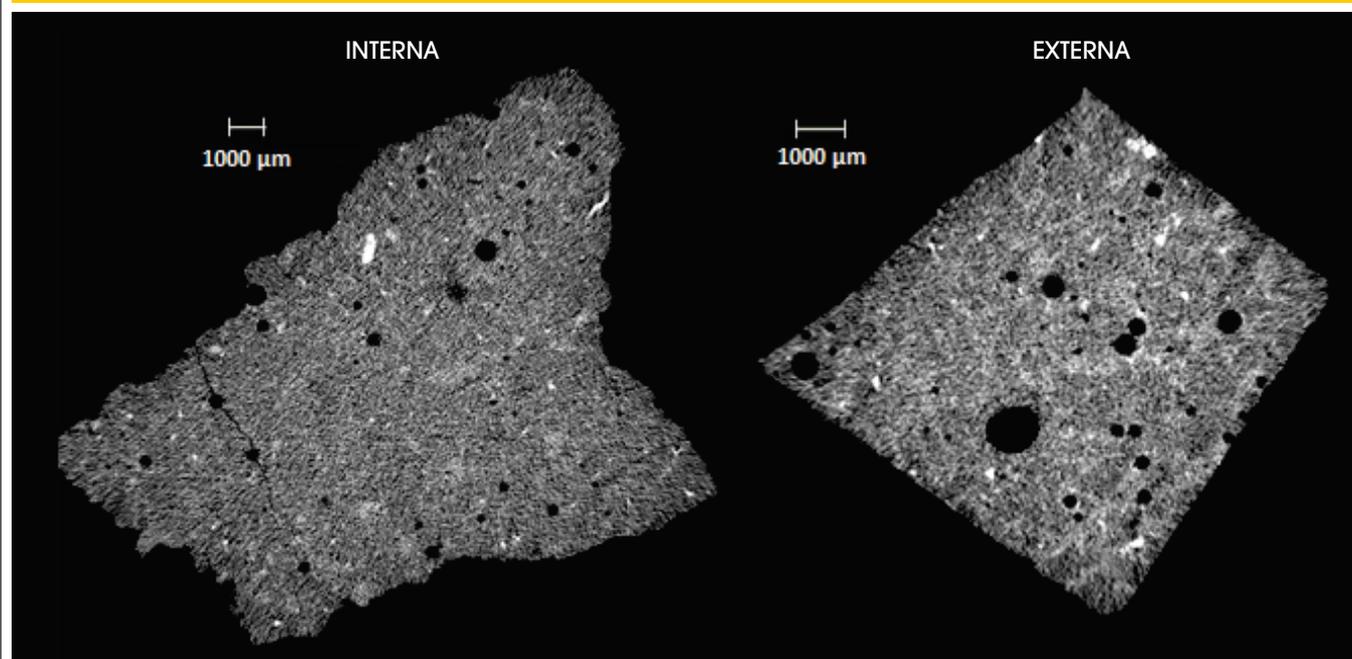
Para as amostras retiradas da superfície dos corpos de prova, os resultados mostram que o concreto Tipo 2 apresentou percentual de porosidade aberta um pouco maior que o do concreto Tipo 1, ambos submetidos à cura úmida. Para os dois tipos de cura do concreto Tipo 1, houve uma grande proximidade dos valores.

A fragmentação é caracterizada pela ruptura da conectividade. Quanto mais negativo for o índice de fragmentação (IF) maior será a conectividade dos poros, favorecendo a permeabilidade do sistema.

Tabela 9 – Parâmetros sobre estrutura de poros dos concretos por meio de μ -CT

Amostra		Porosidade aberta (%)	Índice de fragmentação dos poros (μm^{-1})
Tipo 1 cura úmida	Interna	-	0,02 ± 0,01
	Superfície	7,9 ± 0,4	- 0,02 ± 0,01
Tipo 1 cura submersa	Interna	-	0,011 ± 0,001
	Superfície	7,6 ± 0,6	- 0,013 ± 0,001
Tipo 2 cura úmida	Interna	-	0,02 ± 0,01
	Superfície	9,0 ± 2,0	0,01 ± 0,01

Figura 1 – Imagens geradas a partir de seções das amostras internas e externas do concreto Tipo 1



A porosidade, porosidade aberta e índice de fragmentação das amostras analisadas, foram obtidas por meio de processamento das imagens realizado pelos softwares Nrecon e CTAn.

Comparando os resultados dos concretos Tipo 1 e Tipo 2, submetidos à cura úmida, tem-se uma diferenciação de valor apenas para a amostra de superfície, sendo que o concreto Tipo 1 apresentou maior conectividade de poros. Para os distintos processos de cura do concreto Tipo 1, há uma maior conectividade para as amostras de superfície.

Além dos resultados quantitativos, a técnica permite uma análise qualitativa da estrutura de poros pela observação das imagens geradas.

O processo tomográfico consiste em girar o corpo de prova em passos de ângulos iguais até completar uma volta de 360°, enquanto o mesmo é submetido a um feixe de raios X. A cada passo, são adquiridos vários quadros gerando-se, no final, uma imagem. Após a captura das imagens as mesmas são reconstruídas, para que possa ser possível sua visualização 3D [14]. A Figura 1 nos mostra dois recortes de projeções bidimensionais obtidas para a amostra interna e externa do concreto Tipo 1, onde é possível observar que a imagem gerada a partir da amostra externa apresenta poros maiores que os presentes na amostra interna.

Os microtomógrafos computadorizados fazem a reconstrução completa da amostra na forma de uma imagem 3D a partir do empilhamento de sessões 2D [15]. Estas, por sua vez, são obtidas através de um algoritmo de reconstrução aplicado às projeções tomadas da amostra [14]. Para a reconstrução tridimensional e obtenção de dados sobre a microestrutura são utilizados softwares específicos de processamento de imagem, capazes de calcular diversos parâmetros morfométricos tais como os apresentados.

Na Figura 2 é apresentada a reconstrução tridimensional de uma das amostras de concreto.

4. Discussões

O método de amostragem aplicado aos ensaios de picnometria forneceu resultados de porosidade que caracterizam uma média global do corpo de prova analisado. Em contrapartida, o método aplicado ao ensaio de microtomografia promoveu uma análise isolada da porosidade da superfície e camadas internas do CP.

Ao se comparar os resultados globais de porosidade fornecidos pelas picnometrias com a média dos resultados da microtomografia, é observada uma proximidade de valores, conforme demonstrado na Figura 3. Esta proximidade mostra uma boa correlação entre as duas técnicas. Desta forma, para a determinação da porosidade, as técnicas de picnometria de hélio e mercúrio podem ser usadas conjuntamente com a μ -CT para validação dos resultados.

As duas técnicas demonstraram uma menor porosidade média para o concreto Tipo 2, em comparação ao concreto Tipo 1, ambos submetidos à cura úmida. Entretanto, os resultados da porosidade para as camadas internas dos dois concretos, obtidas pela μ -CT, se mostram dentro de uma mesma faixa de valor. Assim, a variação na porosidade média assumiu um valor mais alto para o concreto Tipo 1 devido a uma porosidade mais acentuada da camada superficial do corpo de prova.

Aparentemente, a diferença de consistência dos concretos Tipo 1 e Tipo 2 mostrou exercer influência na porosidade da superfície dos corpos de prova, ficando a porosidade interna e a resistência mecânica à compressão sem grandes variações de resultados. O fato de a resistência mecânica do concreto

ser significativamente afetada pela porosidade de sua estrutura interna [16], ajuda a explicar o motivo pelo qual a diferença de porosidade dos concretos não impactou nos resultados obtidos para a resistência à compressão dos corpos de prova, uma vez que normalmente são esperados valores mais baixos para concretos mais porosos.

As duas técnicas também forneceram percentuais muito próximos de porosidade média para os distintos processos de cura do concreto Tipo 1. A μ -CT demonstrou uma aproximação de valores para a porosidade da superfície dos concretos submetidos à cura úmida e submersa.

Determinar a porosidade total dos materiais não é suficiente para avaliar o nível de absorção do sistema, uma vez que esta porosidade engloba também poros isolados, sem interconectividade, os quais não contribuirão para penetração de agentes externos para o interior da massa. Desta forma, é importante avaliar, conjuntamente, os parâmetros de conectividade e percentual de porosidade aberta, ambos fornecidos pela μ -CT. A exemplo disto tem-se a amostra de superfície do concreto Tipo 2 que, apesar de apresentar uma porosidade média inferior a do concreto Tipo 1, apresentou maior percentual de poros abertos, entretanto com uma menor conectividade.

Contudo, para uma melhor avaliação sobre a permeabilidade e nível de absorção do sistema, seria indicada a realização de ensaios complementares específicos para estes fins.

5. Conclusões

Foi verificado que a resistência à compressão do concreto não foi afetada pela diferença de trabalhabilidade conferida ao material pela adição de aditivos plastificantes. Entretanto, esta diferença de plasticidade demonstrou produzir variações na porosidade do concreto endurecido, como foi demonstrado pelos ensaios de microtomografia de raios X e picnometrias. A maior plasticidade, conferida ao concreto Tipo 2, pode ter contribuído para um melhor adensamento do material, com conseqüente redução da porosidade.

Houve uma boa aproximação dos resultados de porosidade obtidos a partir dos ensaios de picnometria de hélio e mercúrio com os obtidos pela μ -CT. Desta forma, para a metodologia de amostragem adotada foi conveniente o uso das duas técnicas em conjunto, como forma de validação dos resultados.

A diferenciação do processo de cura aplicado ao concreto Tipo 1 não produziu influência significativa na resistência à compressão

Figura 2 – Representação tridimensional de amostra de concreto utilizada nesse estudo
Modelos 3D baseados nos testes de μ -CT

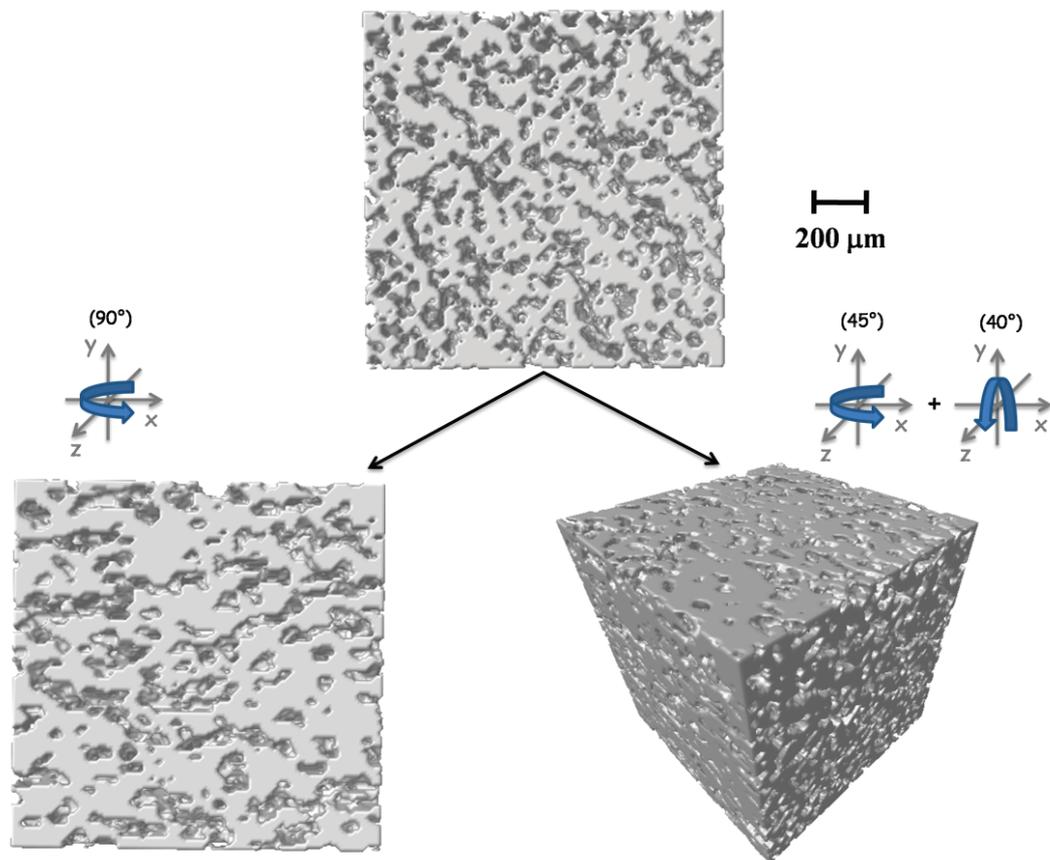
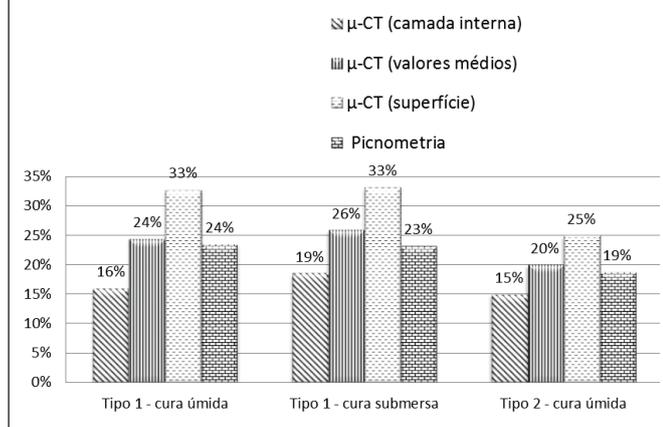


Figura 3 – Valores de porosidade obtidos por μ -CT e ensaios de picnometrias de hélio e mercúrio



dos corpos de prova na idade de 28 dias. O mesmo é observado para a porosidade.

De acordo com análises do μ -CT, foi constatado que as porosidades das camadas mais internas do concreto Tipo 1 e Tipo 2 apresentaram valores muito próximos e a porosidade da camada superficial foi maior para o concreto Tipo 1. Para ambos os concretos estudados, as amostras extraídas da superfície dos corpos de prova apresentaram maior porosidade que aquelas provenientes de camadas mais internas. Apesar do concreto Tipo 2 ter apresentado um percentual de porosidade aberta um pouco maior que o do concreto Tipo 1, sua conectividade de poros é bem menor, o que nos dá indícios de que o concreto Tipo 2 possa ser menos suscetível a penetração de agentes externos, corroborando para uma maior durabilidade do material. Entretanto, para comprovação desta teoria seriam necessários ensaios complementares.

6. Referências bibliográficas

- [01] U. Rattanasak, K. Kendall, Pore structure of cement/pozzolan composites by X-ray microtomography, *Cement and Concrete Research* 35 (4) (2005) 637-640.
- [02] S. Lu, E.N. Landis, D.T. Keane, X-ray microtomographic studies of pore structure and permeability in Portland cement concrete, *Materials and Structures* 39 (6) (2006) 611-620.
- [03] D.-J. Sun, K. Sisomphon, M.-H. Zhang, Effect of super plasticisers on adsorption, rate of cement hydration, and pore structure of cement pastes, *Advances in Cement Research* 21 (4) (2009) 159-167.
- [04] M.A.B. Promentilla, T. Sugiyama, T. Hitomi, N. Takeda, Characterizing the 3D pore structure of hardened cement paste with synchrotron microtomography, *Journal of Advanced Concrete Technology* 6 (2) (2008) 273-286.
- [05] B.P. Flannery, H.W. Deckman, K.L. D'Amico, Three-dimensional X-ray microtomography, *Science* 237 (1987) 1439-1444.
- [06] E. Gallucci, K. Scrivener, A. Groso, M. Stambanoni, G. Margaritondo, 3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography (μ CT), *Cement and Concrete Research* 37 (3) (2007) 360-368.
- [07] N. Burlion, D. Bernard, D. Chen, X-ray microtomography: Application to microstructure analysis of a cementitious material during leaching process, *Cement and Concrete Research* 36 (2) (2006) 346-357.
- [08] ALIGIZAKI, Kalliopi K, Pore structure of cement-based materials: testing interpretation and requirements. *Modern concrete technology series*; v. 12. London; New York Taylor & Francis, 2006.
- [09] MAGALHÃES, A.G. Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimento contendo escórias de alto-forno. Tese de doutorado. Departamento de estruturas, UFMG. Belo Horizonte, 2007.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland de Alto-forno - NBR 5735, Rio de Janeiro, 1991.
- [11] RIGO DA SILVA, C.A. Desenvolvimento e Aplicação de uma Metodologia para Caracterização e Análise Estrutural de Concretos de Cimento Portland. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas – Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, Brasil, 1998.
- [12] ARANHA, N. et al. Projeto e Construção de um Picnômetro a Ar para Caracterização de Insumos e Produtos Farmaceuticos. *Quimica Nova*, v. 1.33, nº 6, 1384-1388, 2010. ISSN 1678-7064 On-Line. <http://www.scielo.br/pdf/qn/v33n6/29.pdf> (acessado em 06/06/2011).
- [13] P. Colombo, In praise of pores, *Science* 322 (2008) 381-383.
- [14] APPOLONI, C.R. et al., Caracterização de Materiais Porosos Através da Microtomografia Computadorizada 3D. *ARC. Revista Brasileira de Archeometria Restauração Conservação. Edição Especial. Nº 1. Março 2006. AERPA Editora. Resumo do III Simpósio de Técnicas Avançadas em Conservação de Bens Culturais – Olinda 2006.*
- [15] LIMA, I.C.B., Caracterização de estruturas internas ósseas através das técnicas de microtomografia computadorizada tridimensional e fluorescência de raios X. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro 2006.
- [16] C. LIAN, Y. Zhuge, S. Beecham, The relationship between porosity and strength for porous concrete, *Construction and Building Materials* 25 (11) (2011) 4294-4298.