Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

PREVENÇÃO PATOLÓGICA: ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO POR MEIO DE RAIO X

A. ROMÁRIO ALVES CARVALHO
Engenheiro Civil
Faculdade Pitágoras de São Luís
Maranhão; Brasil
romario_engcivil@outlook.com

H. FRANÇA DA SILVA
Acadêmico de Engenharia Civil
Faculdade Pitágoras de São Luís
Maranhão; Brasil
hugo0288@outlook.com

G. TÚLIO FONSECA COELHO
Mestre em Engenharia Civil
Faculdade Pitágoras de São Luís
Maranhão; Brasil
glauber.coelho@pitagoras.com.br

D. ROCHA PEREIRA
Mestre em Energia e Ambiente
Faculdade Pitágoras de São Luís
Maranhão; Brasil
daniel.rocha.drp@gmail.com

RESUMO

Normalmente os testes que envolvem o concreto como material de estudo são de ordem destrutiva, porém verifica-se que esses ensaios apresentam incapacidade ou deficiência na caracterização da estrutura interna da peça de concreto, sendo impossível quantificar de forma adequada possíveis falhas na execução (fabricação) de peças de concreto. Os ensaios não destrutivos (END's) por sua vez conseguem ampliar a visão do estudo interno do concreto, permitindo a caracterização, identificação e quantificação de possíveis manifestações patológicas na estrutura, como: fissuração, trincas, bolhas de ar, possíveis corpos estranhos, assim como o volume de agregados, posição de armaduras, distância da superfície (recobrimento). Nesta pesquisa é evidenciado os END's por meio de raios X, fazendo uso de técnicas em 2D e 3D, ou respectivamente o raios X convencional e tomografia computadorizada permitindo que as características supracitadas sejam consideradas, no qual foi enfatizado a quantificação do número de vazios, densidade específica das peças, bem como a disposição dos agregados e aglomerante que compõe o material em estudo. Aplicou-se de forma direta a utilização de softwares para o auxílio desse estudo, onde tornou-se possível a análise quantitativa de resultados, provando que os END's já são uma realidade que vem ocupando seu espaço na engenharia, podendo assim garantir a qualidade dos componentes em conformidade com os requisitos das normas. O método de END por raios X desempenham um papel importante, segura e de forma insuperável na documentação da qualidade do produto inspecionado, pois, este projeta imagem interna da peça.

Palavras-chave: END's. Raios X. Tomografia Computadorizada. Corpo de Prova de Concreto

ABSTRACT

Usually the tests involving the concrete as a study material are destructive order, but it appears that such tests have disability or impairment characterization of the internal structure of the piece of concrete, it is impossible to quantify adequately potential failures in the implementation (fabrication) concrete parts. The nondestructive testing (NDT's) in turn can extend the vision of the internal concrete study, allowing the characterization, identification and quantification of possible disorders in the structure, such as: cracking, cracks, air bubbles, possible foreign bodies, as well as volume of aggregates, reinforcement position, away from the surface (covering). This search is highlighted the END's by means of X-rays by making use of techniques in 2D and 3D, or respectively the conventional X-rays and computed tomography allowing the aforementioned characteristics are considered, which was emphasized quantifying the void number density specific parts as well as the provision of aggregate and binder that makes up the material under study. Applied directly using software for the help of this study, which made possible the quantitative analysis results, proving that END's are already a reality that is occupying its space engineering and can thus guarantee the quality of components in accordance with the requirements of the standards. The NDE method for X-rays play an important role, safe and unsurpassed in the documentation of the quality of the inspected product, therefore this design internal part image, which no other test is able to display.

Keywords: D's. X-ray Computed Tomography. Body Concrete Proof

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, além de ser também um dos materiais de maior importância, o que torna imprescindíveis estudos sobre este material para a garantia e controle de qualidade. [1]

Em ensaios realizados em concreto, comumente as provas de resistência a compressão são feitas aos 28 dias de idade em Corpos de Prova (CP) cilíndricos ou prismáticos para verificar se o concreto está conforme determinado pelo projeto. Todavia, os CP's não são genuinamente representativos do concreto existente na estrutura, devido às diferentes condições de lançamento, condições de cura e compactação. [2]

Em meio às várias formas de analisar o concreto endurecido, a eficiência dos ensaios não destrutivos (END) vem ganhando cada vez mais espaço devido ao aperfeiçoamento das técnicas utilizadas. Existem diversas formas de END's que permitem a detecção de patologias sem comprometer o material. [3]

Nos últimos 40 anos têm sido feitas várias tentativas quanto ao desenvolvimento de métodos de ensaio *in situ* não destrutivos, para assegurar a qualidade do concreto na estrutura. Métodos onde são detectados posição e tamanho das armaduras, vazios, fissuras, falhas de concretagem, e teor de umidade do concreto *in loco*. Esses métodos são relevantes não só para o caso de estruturas executadas já há algum tempo, que apresentam manifestações patológicas e têm que ser reparadas e/ou reforçadas, mas também para o caso de estruturas novas ou em execução (ensaios de aceitação). [4]

Verifica-se grande aplicação dos ensaios em diversos países, bem como um enorme crescimento do número de pesquisas nesta área, almejando a obtenção de resultados mais seguros nas investigações das características do concreto das estruturas. O sucesso do emprego dos ensaios não destrutivos depende, além do conhecimento e da experiência do profissional que realiza os ensaios, da instrumentação, pois, necessita-se de estarem bem calibrados, com controle de qualidade apropriado, para correlacionar as medições do ensaio com as características do concreto. [5]

No Brasil, ainda são poucos os estudos sobre este tema e nem todos os ensaios não destrutivos empregados têm seus procedimentos de realização normatizados pela ABNT. Tem-se, portanto, uma grande necessidade de desenvolvimento de trabalhos e de formação de mão de obra qualificada nesta área, objetivando análise adequada das estruturas de concreto produzidas com os materiais disponíveis no mercado nacional. [6]

Com o passar do tempo as técnicas convencionais para avaliação das propriedades do concreto não apresentavam resultados satisfatórios em alguns aspectos, aspectos esses que foram solucionados a partir da evolução da análise de imagens e graças ao progresso na aquisição destas, assim como ao desenvolvimento de softwares e algoritmos de programação para medir essas interpretações. Esses resultados se tornaram importantes para garantir que as características entre as propriedades e a estrutura do concreto encontrem-se suficientemente bem estabelecidas e compreendidas, permitindo-se a previsão de seu comportamento. [7]

Após a verificação da eficiência da Tomografia Computadorizada (TC) de raios X na área da medicina, iniciaram-se numerosos estudos com a intenção de promover o procedimento no campo da engenharia para END's. Seria de grande importância para a engenharia que pudessem obter a TC exatamente no local onde se encontra a estrutura que se deseja estudar, porém ainda não existem equipamentos que possam ser usados *in situ*. [8]

Os ensaios não destrutivos (END's), por meio de Raio X, conseguem ampliar a visão do estudo interno do concreto, permitindo a caracterização, identificação e quantificação de possíveis patologias na estrutura, como: fissuração, trincas, bolhas de ar, possíveis corpos estranhos, assim como o volume de agregados, posição de armaduras, distância da superfície (recobrimento). [9]

A manifestação patológica conhecida como a reação álcali agregado, bem como todas as outras, ao ser previamente detectada e retificada, resulta na diminuição dos custos envolvidos no procedimento de correção e tratamento da manifestação patológica. A reação álcali agregado, RAA, pode resultar em problemas estruturais bem como operacionais, e é destacada pelas expansões intensas, que podem acontecer em diferentes momentos. Muito embora sendo um fenômeno bastante conhecido, ainda existem muitas dificuldades em entende-lo. [10]

Nesta pesquisa realizou-se END's por meio de raios X, com uso de técnicas em 2D e 3D, com o objetivo de prevenir o aparecimento de manifestações patológicas em estruturas de concreto, enfatizado a quantificação do número de vazios, densidade específica das peças, bem como a disposição dos agregados e aglomerante que compõe o material em estudo.

2. METODOLOGIA

Os CP's cilíndricos foram produzidos no laboratório da Faculdade Pitágoras de São Luís, e como recomenda a NBR 5738/2015 – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova de concreto, onde o corpo de prova deve ter a altura igual ao dobro do diâmetro, bem como os planos das bordas circulares extremas do molde devem ser perpendiculares ao eixo longitudinal do molde, com laterais e bases do molde de aço ou outro material não absorvente, evitando uma possível reação com o aglomerado, e com resistência suficiente para conservar a forma durante a operação de moldagem. [11]

Os ensaios por raios X e tomografia computadorizada levam em conta as densidades óticas que está diretamente ligada ao índice de absorção de radiação coexistente para cada material. A absorção diferenciada de radiação é detectada através de filmes ou detectores eletrônicos de radiação. A partir daí essa técnica indicará, entre outras coisas, a existência de falhas, defeitos e características do concreto. [12]

É a partir deste conceito que se tornou possível correlacionar avaliações visuais com estudos computacionais. Hoje os raios X permitem o estudo do comportamento de inúmeros materiais, sendo um deles o concreto simples e/ou armado.
O método dos raios X funciona baseado na lei de Beer-Lambert que relaciona a absorção de raios X à espessura do material e coeficiente de absorção identificando o número de fótons emitidos que atingem o material estudado, conhecidos como coeficiente global de atenuação linear. [6]

Os cuidados e recomendações utilizados nesse experimento foram baseados por normas internacionais, mas especificamente por normas britânicas, pela falta de normatização brasileira a respeito do assunto.

No centro de radiodiagnósticos os CP's foram submetidos primeiramente aos raios X (2D) em condições naturais dessa forma foram visualizadas deformações, bolhas de ar, disposições dos agregados e aglomerantes, possíveis manifestações patológicas, falhas causadas pela má produção advindas da falta de aplicação de técnicas necessárias para a produção e obtenção de resultados satisfatórios, em seguida os mesmos são imersos em substância contrastada (solução de ioxitalamato de meglumina) diluída em água destilada na proporção de 1:1,3 para comparação visual das imagens, pois, esta solução evidenciará de forma mais sucinta o índice de vazios e possíveis falhas existentes na amostra. Alguns CP's também foram submetidos ao ensaio em TC (3D), de forma íntegra, ou seja sem cortes físicos, e sem adição de contraste.

Nesse estudo foram utilizadas duas técnicas de produção de raios X, um com emissão de radiação convencional e TC adaptada para o estudo. Para radiografia convencional foi utilizado o aparelho de radiação móvel (VMI Aquilla Plus 500 S) com tensão máxima de 75 Kv e na TC (Siemens Somatom Emotion 16 canais) com tensão de 130 Kv com cortes axiais de 1-2mm de espessura, um leitor CR de ecrã receptor de exposição radiográfica, e contraste iodado Telebrix 30 meglutamina, de 300 mg/mL produzido pelo laboratório Guerbet.

2.1 Produção dos CP's

Os materiais escolhidos para este experimento foram: Cimento Portland CPII E32, Brita Nº 0 e areia fina. As amostras foram produzidas em laboratório com diferentes tipos de dosagens fornecidos seguindo o método de dosagem IPT/EPUSP, apresentado por Helene e Terzian na figura 1. [13]

Traços de concretos com cimento CP II-E-32.

Resistência de Dosagem Esperada (MPa) na Idade (dias)			TRAÇO EM MASSA									TRAÇO EM VOLUME								
			Para 1 kg de cimento				Para 1 metro cúbico					Para 1 kg de cimento				Para 1 metro cúbico				
3	7	28	Areia (kg)	Pedra (kg)	a/c	Aditivo (%)[1]	Cimento (kg)	Areia (kg)	Pedra (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)	Areia (ℓ)	Pedra (ℓ)	a/c	Aditivo (%)[1]	Cimento (kg)	Areia (ℓ)	Pedra (ℓ)	Água (ℓ)	Aditivo (ℓ)
4	7	15	3,85	3,66	0,85	1,5	239	919	874	203	3,6	2,65	2,30	0,85	1,5	239	634	550	203	3,0
6	10	20	3,39	3,31	0,73		269	912	891	196	4,0	2,34	2,08	0,73		269	629	560	196	3,4
8	14	25	3,10	3,10	0,65		292	906	904	190	4,4	2,14	1,95	0,65		292	625	569	190	3,7
10	16	30	2,85	2,90	0,58		317	903	920	184	4,8	1,96	1,83	0,58		317	623	579	184	4,0
13	20	35	2,59	2,71	0,54		344	891	932	186	5,2	1,79	1,70	0,54		344	614	586	186	4,4
16	23	40	2,42	2,58	0,51		365	883	942	186	5,5	1,67	1,62	0,51		365	609	592	186	4,6
20	28	45	2,25	2,45	0,48		387	870	949	186	5,8	1,55	1,54	0,48		387	600	597	186	4,9
23	34	50	2,08	2,32	0,45		412	856	957	185	6,2	1,43	1,46	0,45		412	590	602	185	5,2

Figura 1: traços e dosagens do concreto [13]

Para não influênciar no fator água/cimento os agregados foram inseridos em estufa para perda de umidade e o agregado miúdo (areia) foi analisado granulometricamente conforme determina a NBR NM 248/2003. [14]

2.2 Configuração dos CP's

No laboratório de concreto da Faculdade Pitágoras de São Luís foram fabricados 11 CP's cilíndricos, 10 com dimensões básicas de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura e 1 com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, dos quais 10 foram utilizados no estudo e um foi descartado por controle de qualidade. 9 CP's com a menor dimensão foram utilizados em ambos os testes, no 2D e 3D, já o de maior dimensão apenas o teste em três dimensões.

Os corpos de prova de menor dimensão podem repercutir resultados que possibilitam a confiabilidade no resultado dos ensaios. Nesse sentido é comprovado que é possível através da utilização de raios X o emprego de CP's realmente pequenos para a determinação das características do concreto. [9]

No primeiro dia de produção das amostras foi adotado um dos parâmetros de produção para a resistência de dosagem esperada (MPa) na idade (dias): que estima em 28 dias as peças chegarem a 45 MPa no segundo dia, a dosagem que estima para 28 dias 25 MPa, porém as peças fabricadas no primeiro dia, em toda a totalidade (5 peças de 5x10 cm) foram constituídas apenas por concreto simples, já a segunda remessa além de concreto simples (2 peças sendo uma 5x10 cm e outra 10x20 cm), também foram criada amostras com concreto armado (1 peça com 5x10 cm) e com poliestireno expandido (1 peça de 5x10 cm) adicionado na mistura do composto de concreto, com a intenção de se produzir uma peça, que ao ser exposta aos raios X, a mesma simule de forma visível a criação de bolhas de ar no interior da peça, aumentando o índice de vazios existentes na amostra, isso se dá pelo fato do EPS possuir uma densidade ótica muito próxima a do ar, o que o diferencia de toda a estrutura visual do CP.

O número de vazios está correlacionado diretamente a uma das principais características do concreto, a resistência a compressão, além disso os vazios ao mesmo tempo possuem grande importância para a determinação da vida útil das estruturas, uma vez que quanto maior a porosidade, maiores os detrimentos ocasionados pelo ambiente, pois desta maneira os agentes agressivos podem penetrar com maior facilidade na peça.

A presença de vazios diminui significativamente a resistência do concreto, sendo observado que a simples presença de apenas 5% de vazios geram decréscimos de até 30% na resistência. [15]

Nos testes realizados na configuração em 2D, foi utilizado o aparelho de radiação móvel, assim como as amostras produzidas em menores dimensões e com datas de fabricação distintas, bem como as suas resistências, algumas dessas amostras sofreram cortes axiais com espessura de 10mm, feitos com um aparelho de corte, com lâmina diamantada.



Figura 2: Amostra CP's

Alguns corpos de prova foram fatiados, assim como determinado nos trabalhos de Takeda e Otsuka, 2006, uma vez que ao se produzir quantidades de cortes significativos, pode-se chegar a um achado de proporcionalidade, podendo ser correlacionados com a peça na íntegra. [9]

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaio 2D

Os ensaios foram realizados sete dias após a produção das amostras, com a finalidade de se estimar nesse período a resistência das peças.

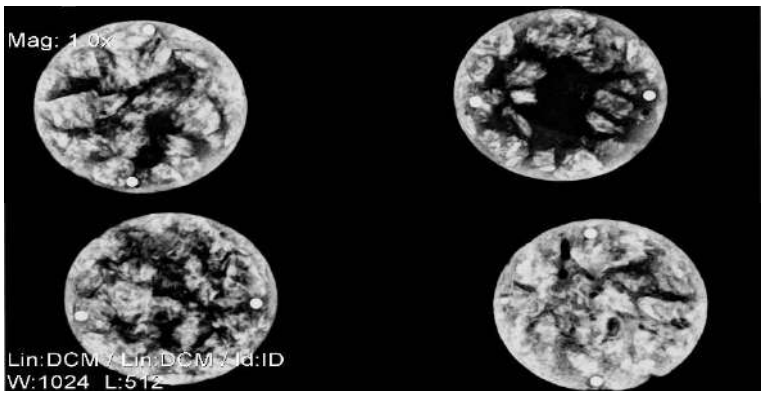

Figura 3: Peças laminadas de concreto (50mmϕ e 10mm de altura) sem contraste

Primeiramente foram realizados os ensaios utilizando o aparelho de raios X móvel, caracterizando dessa forma os testes em 2D, onde foi usado as peças de concreto fatiado. As peças de 50mm de diâmetro e 10mm de altura foram expostas a uma DFS (Distância Fonte Superfície) de 100 cm, permitindo uma abrangência de campo de radiação suficiente para a exposição de todas as peças, isso se dá pelo fator de divergência de propagação do campo radioativo.

As peças com dosagem distintas foram expostas a radiação no mesmo momento para a demonstração visual das imagens, fazendo com que estas possam ser diferenciadas através das características inerentes de cada amostra.

Amostras visualizadas com maior índice de vazios, assim como descreveu o estudo, são caracterizadas como as de menor resistência, ou seja, as produzidas com a dosagem de 25 MPa para os 28 dias, entretanto no dia do ensaio as peças estavam com 7 dias de fabricação, o que nos permite através da tabela de dosagem IPT/EPUSP, apresentado por Helene e Terzian [13], presumir que as amostras apresentavam resistência característica de 14 MPa. Já as peças com menor índice de vazios seriam as produzidas com a dosagem de 45 MPa para os 28 dias, onde segundo a tabela, estariam com 28 MPa.

Foram selecionadas algumas peças para a imersão em meios de contraste radiopaco, com a finalidade de se fazer um estudo de diferenciação visual da mesma peça, em estado natural e com contraste. Essa substância radiopaca por possuir viscosidade mais alta que a água, se tornaria impossível da mesma adentrar às estruturas da peça, dessa forma inviabilizando o teste com contraste, porém a substância composta por solução de ioxitalamato de meglumina, foi diluída em água destilada na proporção de 1:1,3 com a intenção de diminuir a sua viscosidade, tornando possível a realização do experimento.

As lâminas de concreto foram imersas no meio de contraste por 60 min, após esse tempo foram retiradas para a eliminação de excesso de superfície para a não propagação de possíveis artefatos de imagens. Esse tempo é o suficiente para que a substância impregne no interior da peça preenchendo os espaços vazios e evidenciando-os posteriormente após as exposições, assim como é relatado no estudo de Takeda e Otsuka. [9]

Assim como definiram os autores Takeda e Otsuka [9] no seu estudo, as imagens de raios-X recuperadas antes de depois da impregnação do meio contrastado, são utilizadas para a determinação da densidade por análise de imagem/software de medição. Em outras palavras, a dose transmitida é absorvida através dos espaços vazios, tais como bolhas de ar e rachaduras. A absorção de dose será diferenciada pela densidade do material absorvente, ou seja, na cor preta, os materiais de menor coeficiente linear de absorção, na cor branca, os de maior.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

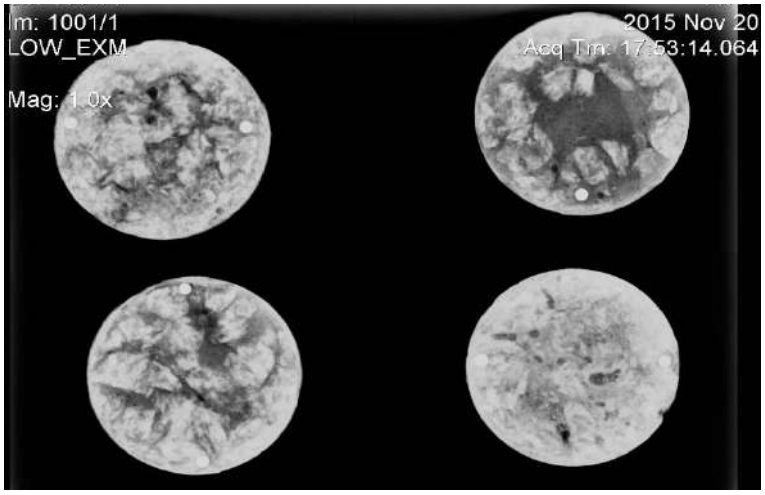

Figura 4: Peças laminadas de concreto (50mmϕ e 10mm de altura) com contraste

Para a avaliação de uma das peças com e sem o contraste, e demonstração das densidade foi utilizado uma amostra produzida com a dosagem especificada em 14 MPa, essa comprovação foi estabelecida através da comparação das imagem com e sem contraste captadas pelo software de manipulação de imagens (sinapse), posteriormente após o melhoramento, o programa responsável pela qua ntificação de dados da imagem (e-filme) que auxilia na comprovação das densidades estabelecidas para o material em estudo, no caso o concreto, criando valores de densidades expressos em números que condizem com escala de tons de cinza, através de cortes feitos da imagem (imagej), gerando posteriormente gráficos nos quais expressam essas informações baseados em curvas de tendências (qtiplot), que relacionam: a quantidade dos tons de cinza pelo comprimento do corte.

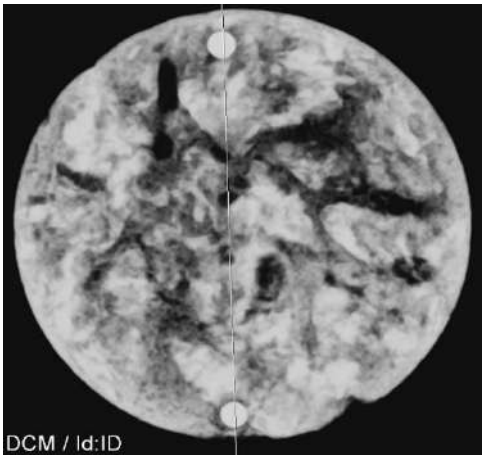

Figura 5: Peça de 5cm ϕ x 1cm de altura (sem contraste)

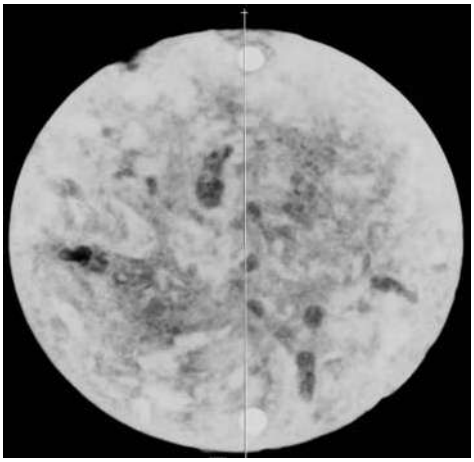

Figura 6: Peça de 5cm ϕ x 1cm de altura (com contraste)

Na figura 5, a peça sem contraste foi exposta, demarcada com esferas de chumbo, com a finalidade de identificação e referenciar o corte, pois, usa-se como padrão, dois valores extremos no corte na referida imagem: chumbo e o ar. Sendo o primeiro um material de maior densidade na imagem, e o segundo o de menor, como está representado no gráfico da figura 6:

No gráfico abaixo, está representado o corte realizado na imagem sem contraste, onde é explicitado em maiores valores de escala de cinza, as estruturas que possuem baixa densidade especifica, e menores, para as estruturas de maiores densidades. A exemplo dos valores que mostram especificamente o corte fora da peça (ar), o índice de vazios se comportam de forma semelhante (aproximada), já valores com alta densidade são expressos no gráfico quando o corte sobrepõe as peças de chumbo, e varia no interior da peça, pois, o concreto não se comporta de forma homogênea, pelo fato de sua composição englobar materiais com densidades diferentes.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

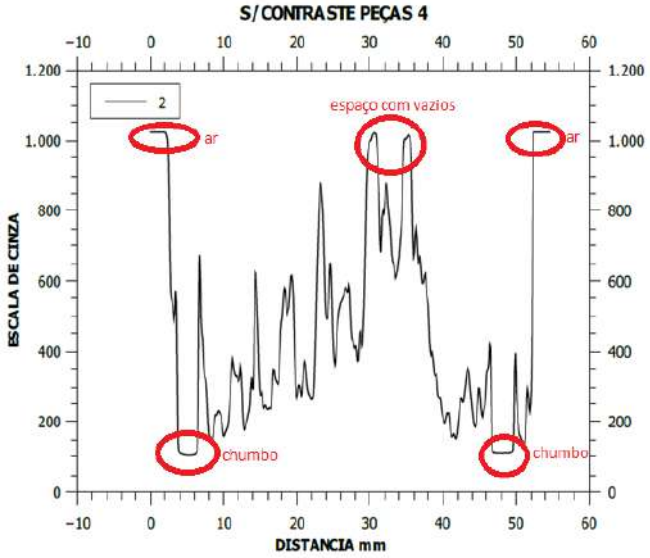

Figura 7: Gráfico escala de cinza x distância do corte (sem contraste).

Para comparação de resultados, após a imersão da mesma peça em meio de solução contrastada para a impregnação desta aos vazios da estrutura, foi realizada uma segunda exposição sem alteração da técnica previamente configurada no aparelho, onde é constatado que o número de vazios é reduzido visualmente, aumentando assim a densidade ótica da imagem, produzindo um gráfico com valores diferenciados aos do primeiro, como mostra as imagens a seguir:

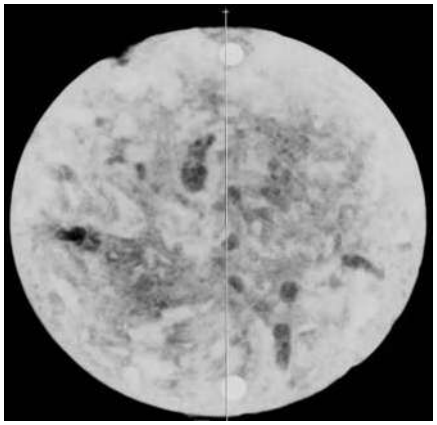

Figura 8: Peça de concreto 50mm ϕ x 10mm de altura (com contraste)

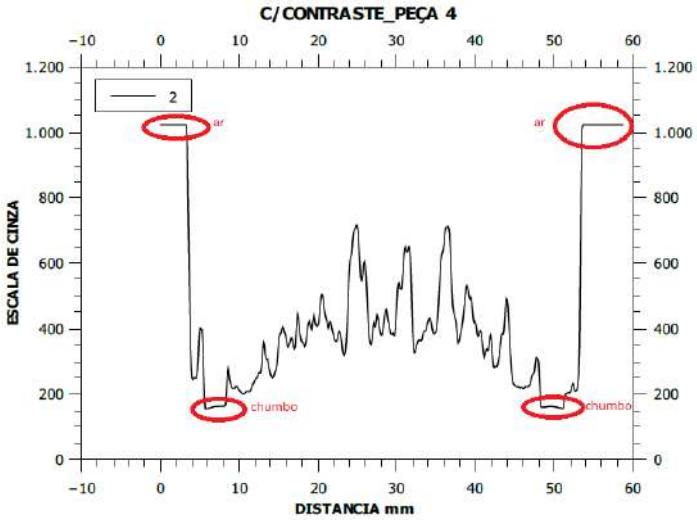

Figura 9: Gráfico escala de cinza x distância do corte (com contraste).

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Nota-se que no segundo estudo a linha de tendência do gráfico se torna mais homogênea ao ser comparada com a do primeiro, isso se dá pelo fato dos espaços vazios se apresentarem preenchidos ou parcialmente preenchidos pela solução contrastada de alta densidade. O corte na imagem foi realizado exatamente na mesma posição do corte anterior, tornando possível a diferenciação visual e computacional como mostra os resultados gerados pelo software. Nota-se que o ar e o chumbo permanecem com os mesmos valores, porém a área de interesse na peça muda drasticamente, formalizando um resultado sensível no que diz respeito a caracterização do índice de vazios.

3.2 Ensaio 3D

Adotou-se nesse ensaio um CP composto de concreto simples de dimensões: 100mm ϕ x 200mm altura (h) e três CP's, cada um na seguinte configuração: concreto armado, concreto simples e concreto misturado com EPS na sua composição, ambos de mesma dimensão: 50mm ϕ x 100mm (h). O CP de maior dimensão foi fabricado seguindo a dosagem que prevê 45 MPa aos 28 dias e os demais com dosagem de 25 MPa aos 28 dias.

Foram realizados cortes axiais com espessura de 1mm, adquirindo dessa maneira inúmeras imagens semelhantes visualmente, das quais foram escolhidas algumas para demonstração do experimento.

Os softwares dos tomógrafos em geral utilizam como resultados os valores obtidos relacionados diretamente com coeficiente de atenuação linear em questão, cuja a unidade de medida se resume a unidades Hounsfield ou NCT. Nesse espectro a água apresenta um valor igual a zero (0) e o ar o valor igual a menos mil (-1000), as demais estruturas possuem um valor específico de acordo com seu material sempre correlacionados com desvio padrão pra mais ou pra menos, isso se dá pela dependência e da não homogeneidade do material assim como a energia inicial aplicada na varredura.

Primeiramente o CP de 100 x 200 mm foi exposto a uma varredura na qual aplicou-se uma tensão de 130 Kv e uma corrente-tempo de exposição de 150 mAs. Essa imagem é obtida através de uma reconstrução computacional detalhada através do somatório de todos os cortes dos quais foi submetida a peça, produzindo assim uma visualização fiel da peça real.

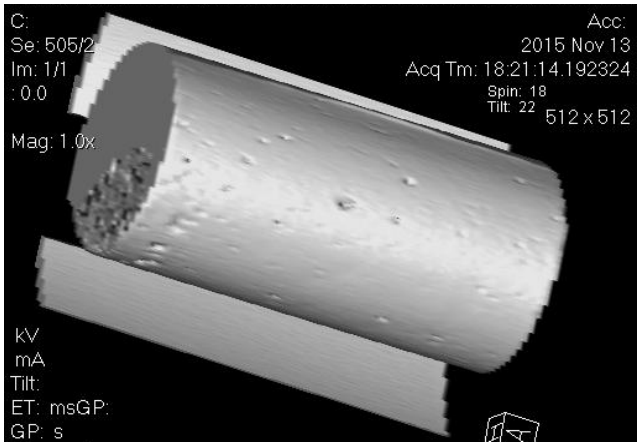

Figura 10: Reconstrução 3D (adição das imagens obtidas por cortes axiais).

Através desse experimento foi constatado e comprovado algumas características que dizem respeito a estrutura do material, como a disposição dos agregados, aglomerados e vazios, vistos na imagem.

Ao extrair testemunhos de um concreto e expô-los aos Raios X é possível obter uma imagem onde os vazios aparecem na cor preta, para obter apenas a porção dos vazios. 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. [8]

Através do método de reconstrução de imagens foi possível agrupar estas, permitindo que delas fossem subtraídas todas as estruturas de menor densidade, permanecendo apenas os agregados graúdos, pois são os de maior densidade, apresentando nesse sentido as disposições destes na reconstrução 3D, como mostra a figura 10.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

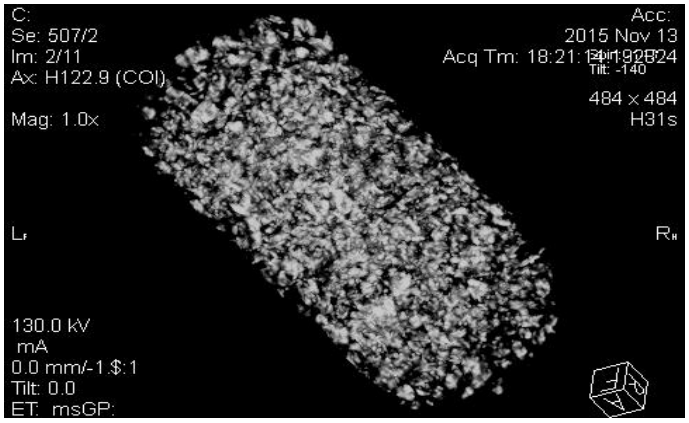

Figura 11: Disposição dos agregados graúdos

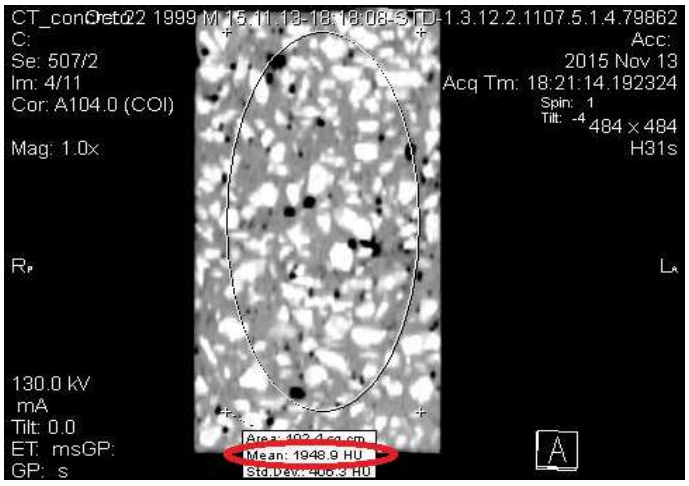

Figura 12: Corte longitudinal na peça de100mm ϕ x 200mm altura (h)

Através de um corte longitudinal (slice) na mesa peça, foi realizado o estudo de densidades do concreto simples, no qual foi constatado através do estudo da imagem e analise de área:

A área em destaque na imagem da peça mostra um resultado de NCT=1948,9 para o qual se destaca um ADS (desvio padrão médio) de ±450 por recomendação do fabricante do software.

A densidade específica da peça (KN/m³) pode ser encontrada através da equação:

$$\rho_t = \rho_a\,[1+0{,}001.NCT\,] \qquad \rho_t = 2{,}94\ KN/m^3$$

Com o desvio padrão é possível encontrar um valor corrigido da densidade específica do concreto simples de:

$$\rho_t \cong 2{,}49\ KN/m^3$$

Os corpos de prova de menor dimensão (50mm ϕ x 100mm (h)) também foram submetidos ao teste de TC. Três CP's foram alinhados com espaçamento de 10mm entre ambos na seguinte ordem: CP com concreto armado, CP com concreto simples e CP com concreto simples com adição de EPS.



Figura 13: Reconstrução 3D (adição das imagens obtidas por cortes axiais).

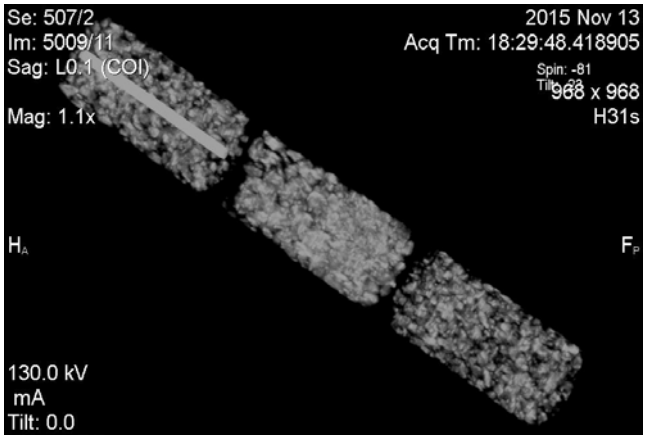

Figura 14: Reconstrução 3D, dos CP's de menor dimensão

O método de reconstrução e exploração de imagens através do somatório dos cortes feitos no ensaio permite a visualização do interior da peça dando ênfase aos materiais de maior ou menor densidade ótica, dessa maneira foi concebido imagens que possibilitam a identificação dos agregados graúdos, bem como a peça de aço do CP de concreto armado.

Foram selecionados cortes transversais individuais de cada CP's (50mm ϕ x 100mm (h)) para análise de densidade especifica, evidenciando dessa maneira as diferenças nos resultados assim como algum defeito interno visualizado através da imagem radiográfica.

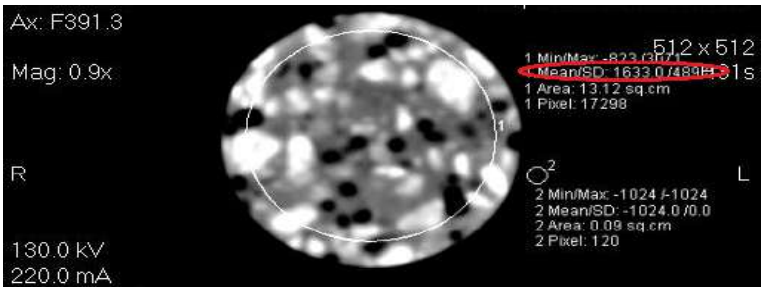

Figura 15: Corte de CP com EPS adicionado

Primeiramente foi analisado a imagem do CP cujo na sua composição existe EPS adicionado à mistura durante a produção, como mostra a imagem a baixo:

Nota-se na figura 14, áreas enegrecidas, demonstrando o acontece quando os raios X interagem com um material de baixíssima densidade, como o EPS. De uma forma didática será mostrado como esse enegrecimento altera o valor final da densidade específica da peça. Onde:

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

$$\rho_t = \rho_a\ [1+0{,}001.NCT\ ]$$

$$\rho_t \cong 2{,}63\ KN/m^3$$

Com o desvio padrão fornecido na própria imagem (em destaque) é possível encontrar um valor corrigido da densidade específica do concreto simples com EPS de:

$$\rho_t \cong 2{,}14\ KN/m^3$$

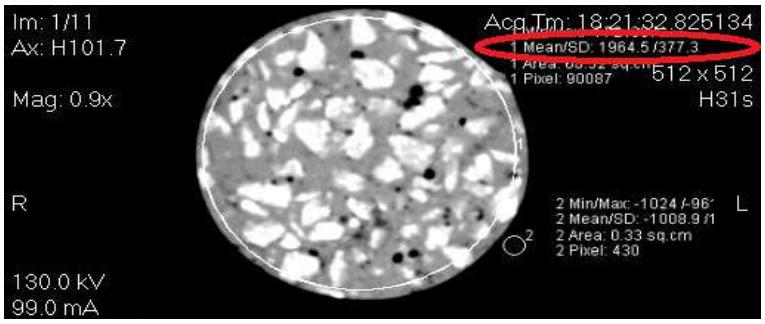

Figura 16: Analise do corte em CP concreto simples

Com o valor de NCT fornecido pelo software na imagem, correspondente a 1964.5 com SD de 337.3 podemos chegar diretamente com o valor corrigido pelo desvio padrão, onde:

$$\rho_t \cong 2{,}58\ KN/m^3$$

A peça de concreto armado, ao ser submetida ao estudo em 3D apresentou um resultado interessante, como se pode imaginar essa peça apresentaria uma densidade maior pois com a presença do aço esta seria mais elevada, porém foi escolhida um dos cortes em que se visualiza uma envoltória de ar adjacente a barra de aço, fazendo com que aquela porção da peça apresentasse um valor de densidade média menor do que a esperada. Esse estudo está sinalizado nas imagens abaixo.

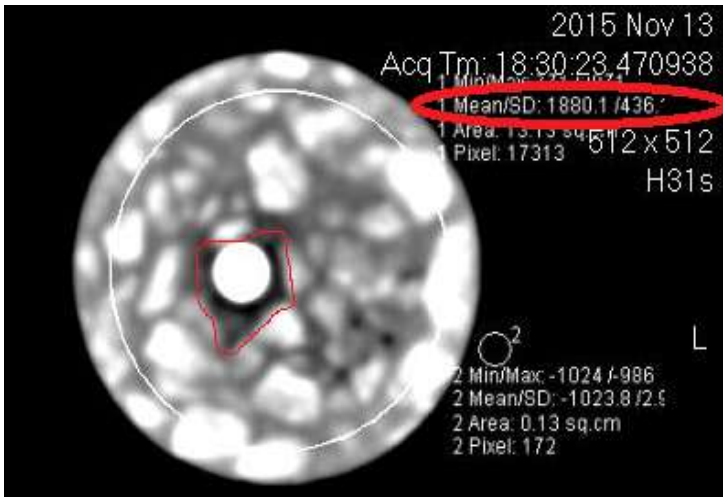

Figura 17: Analise CP de concreto armado

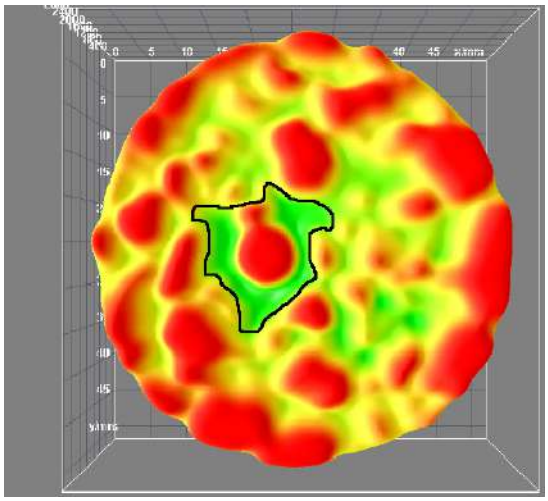

Figura 18:gráfico de superfície em visão térmica

Visualizando a figura 16, percebemos duas áreas em destaque, uma evidencia a zona de ar que envolve a barra de aço (apontado também do gráfico da figura 17, através de visão térmica) nessa porção da amostra, porção que foi determinante para a escolha dessa imagem, pois com essa característica a peça sofrerá um aumento no índice de vazios e na sua densidade especifica média, a outra evidencia o NCT e o SD medido pelo programa, respectivamente com valores de 1880.1 e 436. Informações necessárias para calcular a densidade especifica da porção do CP com concreto armado, onde:

$$\rho_t \cong 2{,}44\ KN/m^3$$

4. CONCLUSÃO

Com o uso do método de ensaio não destrutivo por meio de raios X os objetivos do experimento foram alcançados. O método mostrou-se eficiente na visualização e análise interna dos corpos de prova.

Os ensaios com finalidade de demonstrar a densidade especificas dos materiais mostrou-se plenamente satisfatória. Para a massa específica calculada com valores provenientes da tomografia computadorizada, o resultado encontrado apresentou uma diferença de +4% para o concreto simples e -2,4% para concreto armado em relação a métodos tradicionais.

Na análise em 2D conclui-se que o estudo em questão poderá vir a levar à quantificação de vazios, no entanto nesse estudo não foi possível em decorrência da pequena quantidade de amostras estudadas, consequentemente poucas classes de resistência impossibilitando subtrações de gráficos e assim a criação de um modelo matemático para este caso.

A visualização 3D das amostras, com a técnica de Tomografia Computadorizada mostrou-se eficiente para analisar o conteúdo volumétrico e vazios nos corpos de prova, uma vez que a diferença de densidades nos permite a análise individual de cada componente constituinte da peça, como agregados, aglomerantes e aço.

A maior contribuição deste experimento consistiu em uma nova proposta metodológica para a análise e visualização interna do concreto, obtenção do volume de agregados, de vazios, de possíveis falhas internas, a estrutura do concreto além da estimativa da massa específica do concreto utilizando a tomografia computadorizada como ferramenta de estudo. Os resultados alcançados permitem o emprego de materiais de reparo compatibilizados com os materiais da obra, permitindo à estrutura tempo de vida prolongado com ótimas condições de segurança.

Para identificar as causas das patologias do concreto é preciso observar suas manifestações que ocorrem normalmente nas partes externas das estruturas. No entanto, existem os componentes internos que impossibilitam a visualização de forma eficiente por meios convencionais, entretanto os ensaios por raios-x permitem a extração de informações detalhadas da estrutura, como exemplo da RAA que pode ser diagnosticada previamente por meio de raios-X proporcionando uma investigação detalhada sobre a estrutura para que as contramedidas sejam tomadas.

5. REFERÊNCIAS

[1] FREITAS JR. J. de Almendra. "*Materiais de Construção: A Estrutura do Concreto*". 2013.
[2] ALMEIDA, P. A. de Oliveira; VIEIRA, N. Yokoyama.; TOMO, F. da Cruz.; FUSCO, P. Brasiliense. "*Avaliação da Resistência dos Concretos com Cura em Ambientes com Vibrações Mecânicas Induzidas por Tráfego De Veículos*". 2010.
[3] EVANGELISTA, A. C. Jorge. "*Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaios Não Destrutivos*". 2002.
[4] MALHOTRA, V.M. and CARINO N.J. "*Handbook on Nondestructive Testing of Concrete Second Edition*". 2004
[5] SANTOS, Altair. *Ensaios Não Destrutivos Penetram Concreto a Dentro*. 2013. Disponível em: http://www.cimentoitambe.com.br/ensaios-nao-destrutivos-penetram-concreto-a-dentro. Acesso em: 15/10/15.
[6] MENDES, Roberto. "*A Tomografia Computadorizada De Raios X Como Método Não Destrutivo de Análise Volumétrica de Concreto: Estudo De Caso em Testemunho de Concreto da Usina Hidroelétrica Mourão*". 2010.
[7] TAKEDA, Mitsuhiro and OTSUKA, Koji. "*Presumption of Deterioration Concrete Strength by Small Size Core and Xray Technique with Contrast Médium*". 2009.
[8] ROSA, A. R. Oliveira; GONÇALVES, D. K. Carmo; OLIVEIRA, N. N. Custódio. "*Avaliação da Resistência a Compressão do Concreto Usando raios X"*. 2014.
[9] TAKEDA, Mitsuhiro and OTSUKA, Koji. "*Estimation of Concrete Strength by Contrast X-Ray*". 2006
[10] MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M."*Concreto, estrutura, propriedades, e materiais*" – PNI, São Paulo. 1994.
[11] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5738. "*Concreto - Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos de Prova*", Rio de Janeiro. 2015.
[12] SANTOS, E. Severino e NACIF, M. Souto. "*Manual de Técnicas em Tomografia Computadorizada*", Rio de Janeiro. 2009.
[13] HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo: PINI, 1992.
[14] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR NM 248. "*Agregados - Determinação da Composição Granulométrica*" Rio de Janeiro. 2003
[15] NEVILLE, A. M., *Propriedades do Concreto*, Editora Pini, 2° ed., pp.828, 1997.