ANÁLISE DO DANO DECORRENTE DA EXPOSIÇÃO DO CONCRETO ÀS ALTAS TEMPERATURAS ATRAVÉS DE MICROTOMOGRAFIA (*MICRO-CT*)

M. B. S. SOLLERO
Tecnóloga em Construção Civil, Esp.
CONCREMAT Engenharia e Tecnologia
São Paulo, Brasil
marcela.barros@concremat.com.br

L. V. PERDOMO
Físico, Me.
CONCREMAT Engenharia e Tecnologia
São Paulo, Brasil
leonardo.verbicaro@concremat.com.br

R.T. SANTOS
Engenheiro Civil, Me.
CONCREMAT Engenharia e Tecnologia
São Paulo, Brasil
rodrigo.tadeu@concremat.com.br

RESUMO

O concreto sofre transformações macro e microestruturais em função de sua exposição às altas temperaturas, como aumento da porosidade, redução de massa específica e fissuração, afetando suas propriedades mecânicas e sua durabilidade. A microtomografia computadorizada de raio x (*micro-CT*), técnica pouco estudada e explorada nacionalmente, pode ser aplicada para avaliação do dano causado por essas transformações. Com o propósito de avaliar a aplicação dessa técnica, foi desenvolvido um programa experimental utilizando amostras de concreto confeccionado com diferentes tipos de agregado graúdo, de resistência à compressão normal e alta. As amostras foram expostas às altas temperaturas em forno elétrico próprio para esse uso, conforme a curva ISO 834, ou expostas diretamente à chama com aquecimento heterogêneo.Foi realizada caracterização do material, análise termogravimétrica e modelagem por elementos finitos, além de *micro-CT*, antes e após o aquecimento. Dados obtidos através de *micro-CT* foram analisados qualitativa e quantitativamente. Como resultado, foi possível avaliar o grau e a profundidade do dano nas amostras, visualizando-se com grande nitidez as alterações sofridas. Analisou-se ainda a correlação entre os dados obtidos e à redução das propriedades mecânicas e da durabilidade do concreto, fornecendo dados de grande relevância a redução de custos das intervenções.
Palavras-chave: Concreto. Microtomografia. Micro-CT. Incêndio. Altas temperaturas.

ABSTRACT

High temperature exposure causes macro and microstructural transformations in concrete such as porosity increase, density reduction and cracking, affecting its mechanical properties and durability. The X-ray micro computed tomography (*micro-CT*), an understudied and hardly explored technique regarding civil engineering applications, especially in Brazil, can be applied to evaluate the damage caused by these. With the purpose of evaluating the application of the technique, an experimental program was developed, using concrete samples made with different types of coarse aggregate and compressive strengths class. The samples were exposed to high temperatures in an electric oven designed specifically for this purpose, according to the ISO 834 curve, or directly heterogeneously heated on flames. The material characterization, thermogravimetric analysis and finite element modeling, besides *micro-CT*, were performed before and after heating. The data obtained through *micro-CT* were analyzed qualitatively and quantitatively. As a result, it was possible to evaluate the degree and depth of the damage in the samples, visualizing with great clarity changes suffered by the mortar. The correlation between the obtained data, the durability of the concrete and the reduction of the mechanical properties was analyzed, providing great relevance data for technical specifications of structural recovery, aiming the best performance and reduction of the intervention costs.
Keywords: Concrete. Microtomography. Micro-CT. Fire. High temperatures

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto podem ser submetidas à ações térmicas previstas – como no caso de usinas siderúrgicas ou térmicas – ou acidentais, em decorrência de sinistros. Para que se possa projetar e avaliar a segurança dessas estruturas, de forma geral, é necessário conhecer suas propriedades em temperaturas que variam de 20° a, em alguns casos, mais de 1000°C (RILEM, 2007).
Mesmo sendo um material reconhecido por seu bom desempenho frente às ações térmicas quando comparado, por exemplo, ao aço, a exposição do concreto a altas temperaturas implica em alterações em sua microestrutura e em sua macroestrutura.

A redução das propriedades mecânicas do concreto, em particular sua resistência à compressão e seu módulo de elasticidade, são particularmente preocupantes por afetar diretamente a capacidade portante das estruturas, podendo implicar em seu colapso parcial ou total e comprometendo a segurança do patrimônio e dos usuários.

Dessa forma, a caracterização do concreto exposto às altas temperaturas, aliada à avaliação do grau e da profundidade do dano sofrido pelo material em decorrência desse fenômeno, é de fundamental importância para o projeto e para avaliação pós-incêndio de estruturas.

Entre os ensaios que podem ser realizados com tal propósito encontra-se a microtomografia computadorizada de raio x (*micro-CT*) do concreto. A técnica oferece a possibilidade não só de avaliar qualitativa e quantitativamente parâmetros relacionados ao dano, como sua profundidade, a ocorrência de fissuração e as alterações da porosidade do concreto, como de visualizar o interior e o exterior das amostras através de modelos tridimensionais com precisão nanométrica.

A aplicação da *micro-CT* do concreto com esse propósito, contudo, ainda é uma técnica pouco estudada e aplicada, especialmente no Brasil. Portanto, foi desenvolvido um programa experimental objetivando a avaliação do uso da *micro-CT* para a caracterização do concreto exposto às altas temperaturas, validada através de modelos numéricos e análises termogravimétricas.

Ao longo dos anos, a tomografia computadorizada tem evoluído. Hoje é possível a obtenção de imagens com resolução espacial em escala nanométrica, o que é indicado para a caracterização tridimensional de estruturas nessa escala ou superiores com o benefício de ser um método não-destrutivo ou semi-destrutivo.

A aplicação especifica na análise de concretos pode ser verificada em trabalhos como os de MARTZ et al (1993), DARMA, HENRY e SUGIYAMA (2013; 2014), PESSÔA et al (2014), KIM et al (2013), BELKEBIR e PICHOT (1998), MARINONI et al (2015), que estudaram fenômenos de patologia do concreto, porosidade, danos mecânicos e térmicos, entre outros temas.

1.1 Efeitos das altas temperaturas na microestrutura e nas propriedades do concreto

O concreto pode sofrer uma série de transformações físico-químicas em função da elevação da temperatura, decorrente de condições de operação ou sinistros. Pode-se destacar que a partir dos 100ºC, ocorre a evaporação da água livre e capilar, com aumento da permeabilidade; a perda de água capilar é completa entre os 200ºC e os 300ºC, sem alterações significativas em sua resistência mecânica. A partir de cerca de 300ºC, ocorre um aumento na redução da resistência à compressão de concreto confeccionado com agregados silicosos e pode ocorrer o lascamento explosivo do material. Entre 300 e 400ºC, percebe-se uma redução significativa da resistência do concreto e o aparecimento de fissuras superficiais. Próximo aos 400ºC, parte do hidróxido de cálcio sofre dissociação; próximo aos 600º, é iniciada a desagregação do concreto em função das diferentes alterações volumétricas da argamassa e do agregado graúdo, podendo ser agravada pela expansão experimentada por determinados agregados em função da transformação de quartzo α em β (CÁNOVAS, 1988; KHOURY, 2000).

Tais transformações implicam em alterações na micro e na macroestrutura do concreto. Entre as alterações ocasionadas na microestrutura do concreto, encontram-se a redução da massa específica, o aumento da porosidade e o surgimento de microfissuras na argamassa e na zona de transição entre a argamassa e os agregados graúdos, fatores que podem ser mensurados e/ou visualizados através da *micro-CT* do concreto.

A massa específica do concreto é reduzida principalmente em função da sua perda de água livre durante o aquecimento e pela expansão térmica de seus constituintes, como expõe COSTA (2006).

O aumento da porosidade em si se deve à decomposição das fases sólidas decorrente da desidratação, além das alterações de volume sofridas, e pela eventual perda de estabilidade de agregados. Em conjunto principalmente com a fissuração do material, o aumento da porosidade diminui a resistência mecânica do concreto e aumenta sua permeabilidade. A permeabilidade do concreto, relacionada principalmente aos poros de diâmetro superior a 50 nm, que tendem a ser interconectados com maior frequência, é uma propriedade-chave para a durabilidade do material.

No que se refere à fissuração do concreto em função das elevadas temperaturas, entende-se que sua evolução com a formação de planos de ruptura sob ação de cargas começa nos grandes vazios capilares e nas microfissuras. Os fatores mais influentes para a formação dessas microfissuras são as alterações volumétricas da pasta e dos agregados, cujo impacto é mais marcante, em um primeiro momento, na zona de transição entre os agregados graúdos e a argamassa. Trata-se da região mais frágil do concreto, responsável em grande parte pela resistência limite do material e de grande influência em seu módulo de elasticidade.

A maior fragilidade da zona de transição pode ser relacionada à porosidade mais intensa dessa região, principalmente nas primeiras idades, e à sua microfissuração prévia, a qual pode ocorrer mesmo sem aplicação de carga nos elementos ou amostras de concreto (LIMA, 2005; MEHTA, MONTEIRO, 2014).

De fato, como demonstram os itens apresentados, o dano sofrido pelas propriedades mecânicas do concreto em função das altas temperaturas pode ser atribuído às alterações físico-químicas sofridas pela pasta de cimento e pelos agregados, assim como pela incompatibilidade térmica entre o agregado e a pasta de cimento, e afetado por fatores como a temperatura atingida e a taxa de aquecimento, entre outros (KHOURY, 2000).

2. METODOLOGIA

2.1 Programa experimental

2.1.1 Preparação das amostras e exposição ao calor

Para a realização do programa experimental, foram utilizados três grupos de amostras com diferentes características, objetivando avaliar a aplicação da *micro-CT* em cenários variados e fornecer dados para a elaboração de futuros procedimentos.

O primeiro grupo (G1) integra um projeto piloto e é constituído por um testemunho cilíndrico (TRGR0) extraído com perfuratriz dotada de coroa diamantada de um corpo de prova de concreto, também cilíndrico, executado com granito como agregado graúdo. A exposição às altas temperaturas foi feita por contato direto com a chama de um Bico de Bunsen direcionada para uma das extremidades da amostra por 2 h.

Para a confecção do segundo grupo (G2), foi utilizado concreto de resistência normal (NSC, normal strength concrete) confeccionado com cimento Portland tipo CP III 40 RS, areia média e brita 1 granítica.

Moldaram-se corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) (CPGR1 e CPGR2) e prismáticos de 10 x 10 x 50 cm (largura x altura x comprimento). Os corpos de prova prismáticos foram cortados em peças de 10 cm de comprimento. Dessas, utilizaram-se apenas as duas correspondentes aos trechos centrais, de onde foram extraídos testemunhos de 32 mm de diâmetro (TGR1, TGR2 e TGR3) utilizando perfuratriz dotada de coroa diamantada e amostras de pó de concreto para determinação da perda ao fogo (PGR1).

Para a confecção do terceiro grupo (G3), foi utilizado concreto de alta resistência (HSC, high strength concrete) confeccionado com cimento Portland tipo CP II E 32, areia média e brita 1 basáltica.

Moldaram-se corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) (CPBA1 e CBPA2) e prismáticos de 15 x 15 x 50 cm (largura x altura x comprimento). Os corpos de prova prismáticos foram cortados em peças de 10 cm de comprimento. Dessas, utilizaram-se apenas as duas correspondentes aos trechos centrais.

A identificação das amostras, assim como os tipos de exposição às altas temperaturas e a ordem dos ensaios realizados, são sintetizados na Figura 1:

Figura 1 – Identificação das amostras.

Grupos	Composição do concreto	Amostra	Etapa 1 Ensaios	Etapa 2 Aquecimento	Etapa 3 Ensaios
G1	Granito	TGR0 Testemunho 20 mm (Ø)	Microtomografia	Bico de Bunsen Heterogêneo	Microtomografia
G2	Granito Traço 1:2:3 a/c 0,49	CPGR1 e CPGR2 10 x 20 cm (Ø x h)	Resistência à compressão	-	-
		TGR1 Testemunho 32 mm (Ø)	Microtomografia	-	-
		TGR2 Testemunho 32 mm (Ø)	-	Curva ISO 834	Perda ao Fogo
		TGR3 Testemunho 32 mm (Ø)	-	Curva ISO 834	Microtomografia
		PRGR1 Prisma 10 x 10 x 10 cm	Perda ao Fogo	-	-
G3	Basalto Traço 1:1,5:1,5 a/c 0,35 10% sílica ativa s.m.c. 1% aditivo superplastificante	CPBA1 e CPBA2 10 x 20 cm (Ø x h)	Resistência à compressão	-	-
		TBA1 Testemunho 32 mm (Ø)	Microtomografia	-	-
		TBA2 Testemunho 32 mm (Ø)	-	Curva ISO 834	Perda ao Fogo
		TBA3 Testemunho 32 mm (Ø)	-	Curva ISO 834	Microtomografia
		PRBA1 Prisma 15 x 15 x 10 cm	Perda ao Fogo	-	-
		TBA4 Testemunho 32 mm (Ø)	-	Curva ISO 834 Interrompido a 700°C Unidirecional	Microtomografia
		PRBA2 Prisma 15 x 15 x 10 cm	-	Curva ISO 834 Interrompido a 700°C Unidirecional	Perda ao Fogo 3 Camadas

s.m.c.: Sobre a massa de cimento

De um prisma, foram extraídos testemunhos de 32 mm de diâmetro (TBA1, TBA2 e TBA3) utilizando perfuratriz dotada de coroa diamantada. O outro prisma (PRBA2) foi aquecido acoplado à porta de um forno elétrico técnico próprio para esse uso, de forma que a face interna fosse exposta ao calor enquanto a face externa permanecia exposta à temperatura ambiente e as faces laterais eram protegidas por isolante à base de fibra cerâmica, antes da extração de um testemunho de 32 mm (TBA4) e da coleta de pó em 3 camadas (“Exterior” ao forno, “Intermediária” e “Interior” ao forno).

Durante a queima, foram utilizados 5 termopares em contato com a face interna do prisma (t1 a t5), 1 com a face externa (t6), 1 no interior do forno (tp), centralizado, e em um no ambiente externo (t). O termopar tp

atingiu a temperatura de 700ºC em 21 minutos, indicando uma variação levemente superior à normativa. Informa-se ainda que a amostra perdeu cerca de 1,5 a 2,0 cm de espessura por spalling.

Destaca-se ainda que as amostras dos grupos G1 e G2 foram ensaiadas logo após o prazo de 28 dias de cura após a moldagem, sem aquecimento prévio. Os procedimentos de cura seguiram a recomendação RILEM TC 129 MHT e todas as amostras sofreram resfriamento lento.

2.1.2 Aquisição de imagens

As imagens microtomográficas utilizadas nesse trabalho foram geradas no laboratório de microtomografia da CONCREMAT, o qual está equipado com um microtomógrafo da Bruker modelo SKYSCAN 1173, cujas especificações técnicas são apresentadas a seguir:

Tabela 1 – Especificações técnicas do microtomógrafo

Parâmetro	Especificação	Parâmetro	Especificação
Fonte de raio-X	Até 130kV	Opções de scanning	Direto, aleatório e espiral
Detector	5Mp flat livre de distorção	Ferramentas para metrologia	Em 2D e 3D
Tamanho máximo ob.	140 mm ϕ⧅φ, 200 mm h	Tamanhos típicos de imagem	512³, 1024³, 2048³ Voxel
Resolução	Até 4,9 µm 3D	Opções de scanning	Direto, aleatório e espiral

Em função da alta densidade do concreto e consequente alto coeficiente de atenuação da amostra, que poderia resultar na redução do contraste das imagens geradas, foi adotada modificação na configuração original do modelo SKYSCAN 1173 acrescentando um filtro físico adicional ao filtro de latão padrão. Esse procedimento é o mesmo que descrito em (PLUCENIO, PERDOMO, MANOEL, 2015)

A aquisição aplicado na geração de imagens utilizou os parâmetros apresentados na tabela a seguir:

Tabela 2 – Parâmetros de aquisição de imagens

Parâmetro		Especificação	
Pré-aquecimento da fonte de raios X		Mínimo de 15 minutos antes de iniciar qualquer análise	
Calibração do painel		Procedimento automático do equipamento “flat field panel for black and white flat field panel for black and white” antes de cada análise	
Posicionamento da amostra		Utilizado suporte padrão do equipamento com auxílio de adesivo termoplástico para estabilização da amostra	
Energia	130 kV	Número de aquisições	3 aquisições por imagem
Corrente	61 µA	Resolução	19,3, 23,9 e 40,0 µm
Tempo de aquisição	1600 ms	Movimentação aleatório	Não
Geometria de escaneamento		Rio cônico com deslocamento espiral	

2.1.3 Ensaios físico-químicos

Com o objetivo de caracterizar a classe de resistência das amostras, um dos parâmetros mais influentes no comportamento do concreto em situação de incêndio, foram realizados ensaio de determinação da resistência à compressão axial 28 dias após a moldagem.

A determinação da perda de massa ao fogo, ou perda ao fogo, do concreto é uma análise termogravimétrica simplificada. O ensaio é constituído pela exposição de amostras de concreto à temperaturas elevadas e preé-selecionadas em uma mufla, considerando-se que o concreto sofre uma série de reações de decomposição em temperaturas conhecidas, de forma gradativa.

Como expõe Bergamin, Sollero e Yoshida (2015), ao se realizar o ensaio de determinação da perda ao fogo em amostras de concreto sãs, obtém-se sua perda de massa ao fogo total face à temperatura de exposição. Se as amostras tiverem sofrido exposição à ação das altas temperaturas antes da realização desse ensaio, admite-se que elas devem ter sofrido perda de massa ao fogo prévia. Quanto maior a temperatura atingida

pelas amostras antes do ensaio, menor a perda durante sua execução. Trata-se, portanto, de uma análise qualitativa.

2.1.3 Modelagem numérica

Com a finalidade de avaliar numericamente o campo térmico do prisma PRBA2, que sofreu aquecimento unidirecional, foi elaborado um modelo matemático bidimensional de 15 cm de largura por 10 cm de altura. Para a criação do modelo matemático utilizou-se um software baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF).

Para a avaliação do campo térmico final, ou seja, após a aplicação da máxima temperatura no corpo de prova, foram utilizados os valores de temperatura obtidos experimentalmente com a utilização de termopares.

A aplicação da temperatura no modelo foi realizada com base nos resultados experimentais, ou seja, na face superior do modelo (face “Interna” do prisma, voltada ao interior do forno), foi aplicada a temperatura de 650°C, na face inferior (face Externa do prisma) foi aplicada a temperatura de 40°C, encontradas quando a temperatura do forno atingiu 700,9°C. Para a condutividade térmica foi considerado o valor simplificado de 1,3 W/m.°C, conforme norma ABNT NBR 15200:2012.

3. RESULTADOS

Com o objetivo de caracterizar a classe de resistência das amostras, foram realizados ensaio de determinação da resistência à compressão axial em corpos de prova dos grupos G2 e G3, obtendo-se os valores de 44,9 ± 0,1 MPa e 82,9 ± 0,1 MPa, respectivamente.

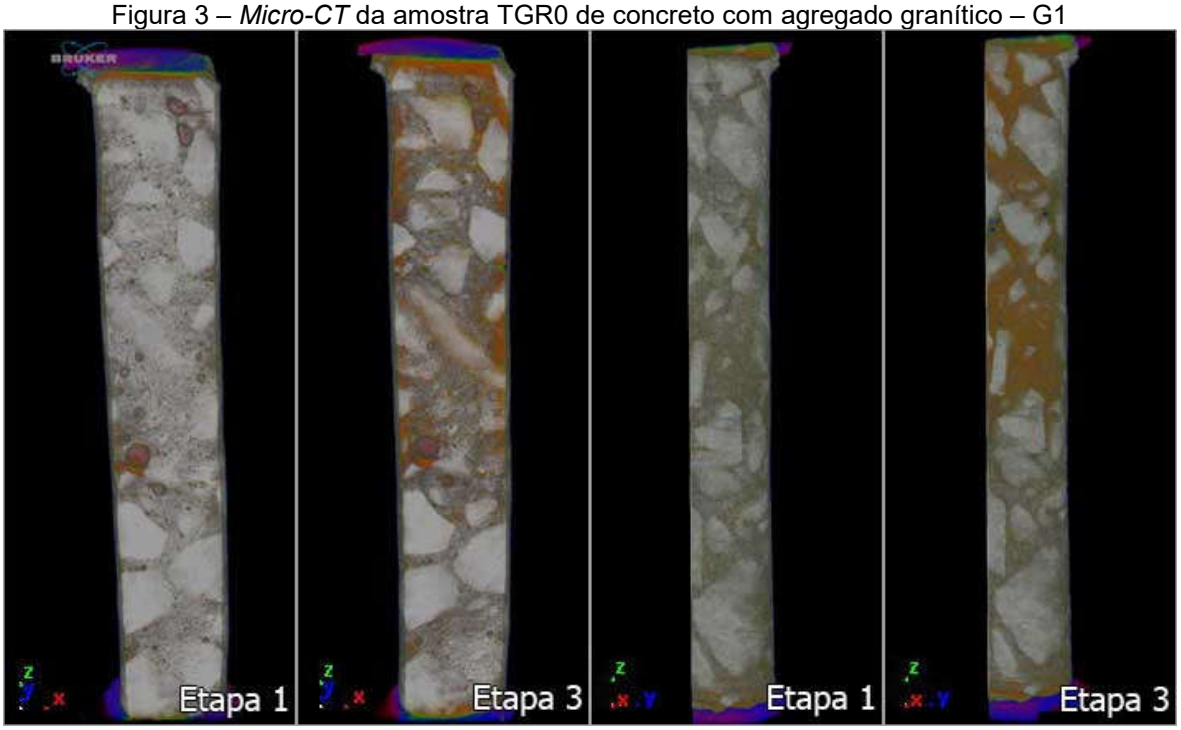
Algumas das imagens geradas através da *micro-CT* antes (Etapa 1) e após (Etapa 3) a exposição à chama da amostra TGR0 do grupo G1 são apresentadas nas Figuras 2 e 3, em diversos planos de corte.

A coloração amarronzada indica as áreas com menor densidade em decorrência da exposição.

Figura 2 – *Micro-CT* da amostra TGR0 de concreto com agregado granítico – G1



Figura 3 – *Micro-CT* da amostra TGR0 de concreto com agregado granítico – G1



Em função dos níveis de dano visualizados na amostra TGR0, foram definidos três pontos para análise computadorizada da macroporosidade, com base nos dados obtidos na *micro*-CT, localizados próximos à base, ao centro e ao topo da amostra (eixo z). As análises se limitaram a pequenos prismas de 2,5 a 3,5 mm de lado localizados junto a esses pontos, ainda que a técnica permita a avaliação da amostra integralmente. A Figura 4 ilustra a estrutura de poros dos planos do centro e do topo da amostra e a Figura 5 destaca a porosidade do plano proveniente do topo.

Figura 4 – *Micro-CT* da amostra TGR0 – planos de corte central (A e B) e do topo (C e D) da amostra destacando vazios antes (A e C) e após o aquecimento (B e D). O retângulo representa o prisma analisado.

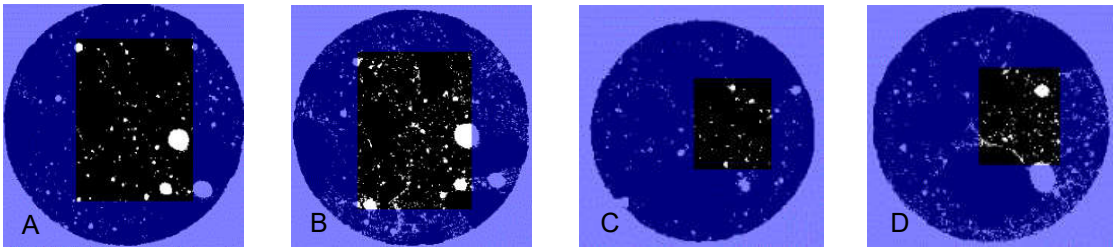
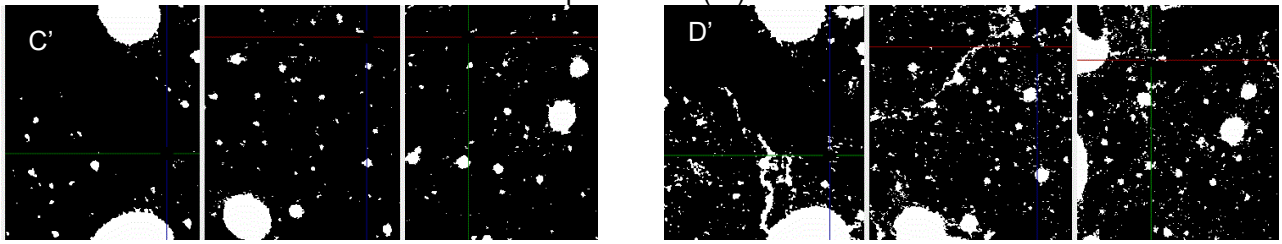


Figura 5 – *Micro-CT* da amostra TGR0 – Vazios locados no prisma do topo da amostra antes (C') e após o aquecimento (D')



Destaca-se o nítido aumento da macroporosidade na zona de transição do concreto. No plano proveniente da base de TGR0, a porosidade do concreto passou de 1,61% para 2,25%, sem intercomunicação com os poros localizados na face externa. No plano proveniente do centro, a porosidade evoluiu de 2,91% para 5,52%, também sem intercomunicação. No plano proveniente do topo, região de maior dano, a porosidade

evolui de 4,93% para 9,04%, apresentando 5,93% de poros com intercomunicação em relação à face externa do prisma, o que implica em aumento da permeabilidade nessa região. A técnica permite que a porosidade seja avaliada em qualquer profundidade da amostra digitalizada, assim como sua intercomunicabilidade e a densidade dos materiais. O tempo de processamento sofre pequenos acréscimos em função do aumento do prisma selecionado.

Algumas das imagens geradas através da microtomografia das amostras TGR1 (referência) e TGR3 (aquecido conforme curva ISO 834) do grupo G2 são apresentadas nas Figuras 6 e 7, em diversos planos de corte.

Figura 6 – *Micro-CT* das amostras de concreto com agregado granítico – G2

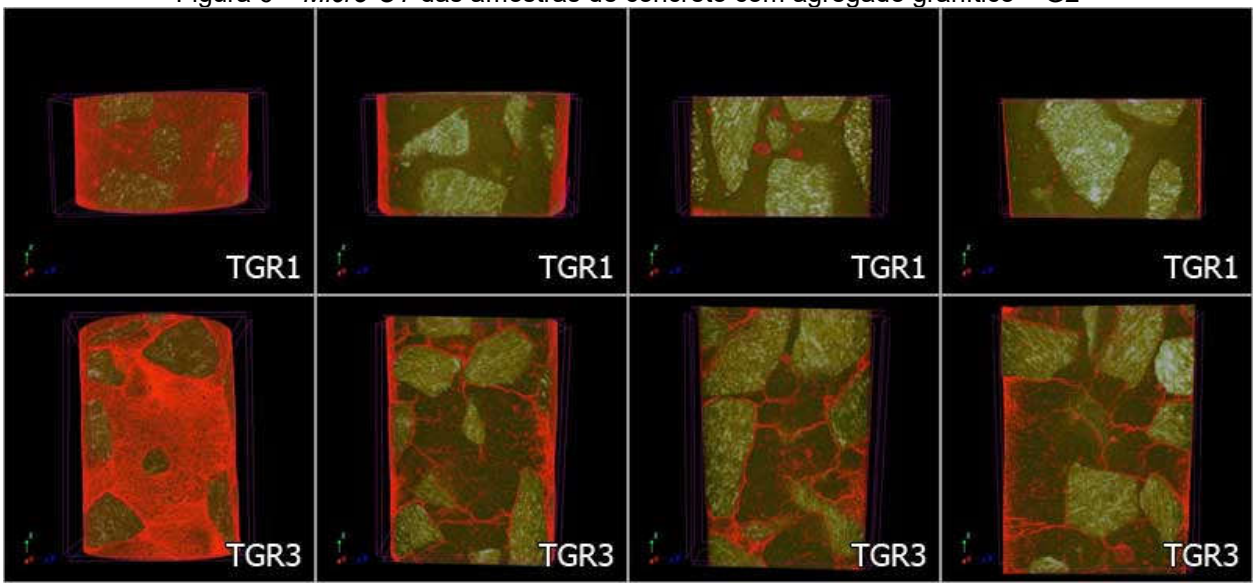
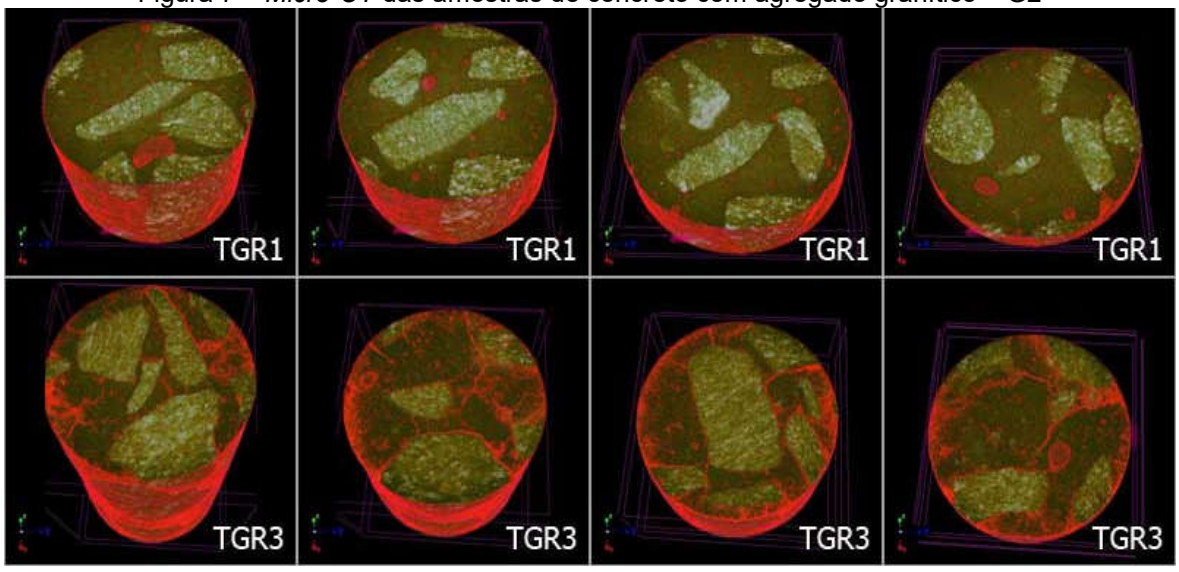


Figura 7 – *Micro-CT* das amostras de concreto com agregado granítico – G2



A coloração das imagens indica a densidade de cada região. A cor vermelha indica as áreas de densidade próxima a 0 g/cm³ – vazios e fissuras. As áreas mais densas apresentam-se em branco, concentrando-se principalmente nos agregados graúdos.

Algumas das imagens geradas através da microtomografia das amostras TBA1 (referência) e TBA3 (aquecido conforme curva ISO 834) do grupo G3 são apresentadas nas Figuras 8 e 9, em diversos planos de corte.

Figura 8 – *Micro-CT* das amostras de concreto com agregado basáltico – G3

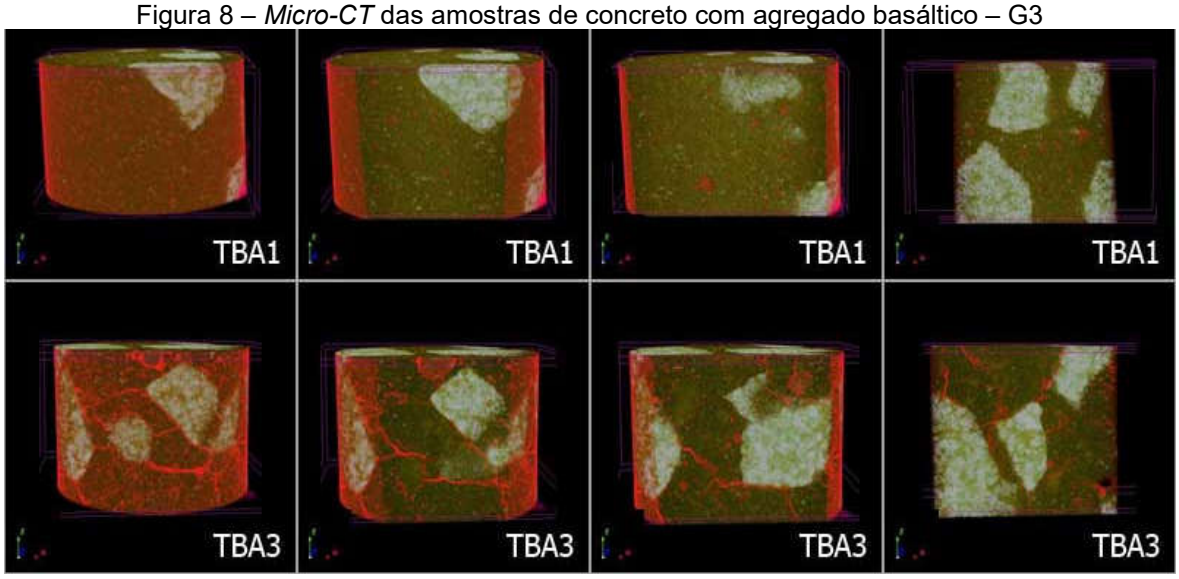
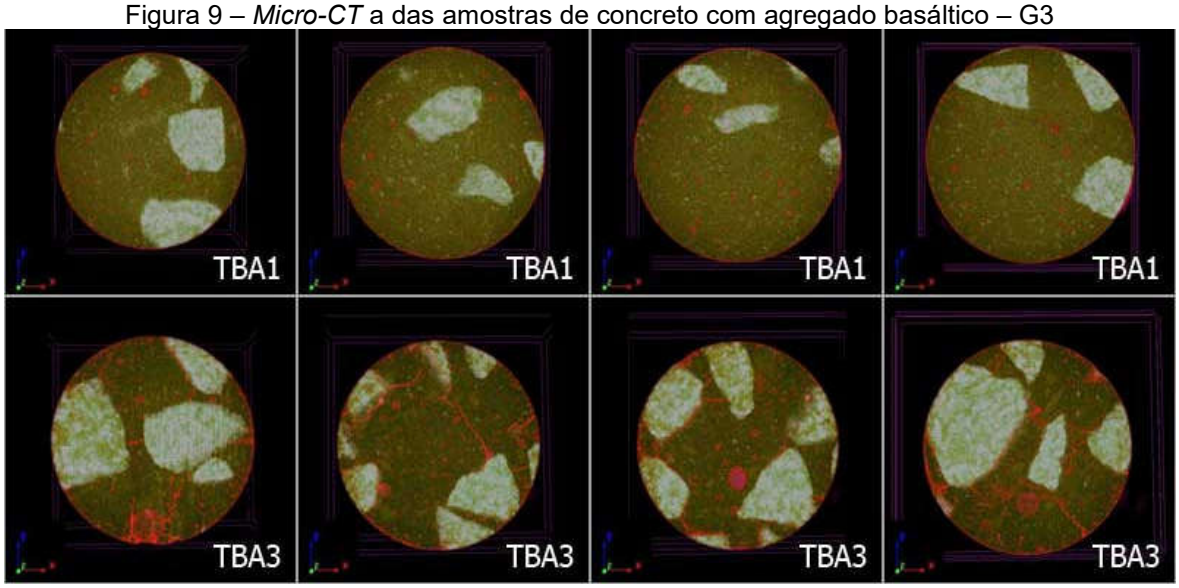
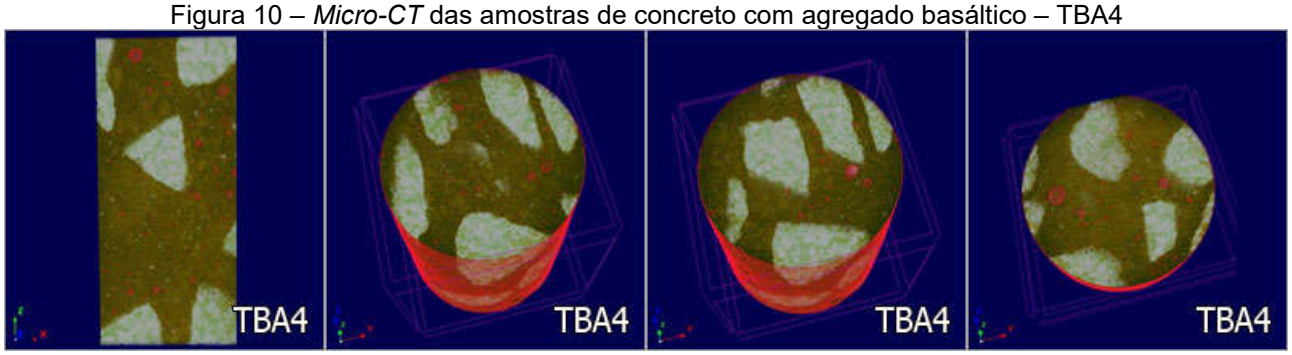


Figura 9 – *Micro-CT* a das amostras de concreto com agregado basáltico – G3



Na Figura 10, são expostas algumas das imagens geradas através da microtomografia da amostra TBA4 (aquecida conforme curva ISO 834, unidirecional) do grupo G3.

Figura 10 – *Micro-CT* das amostras de concreto com agregado basáltico – TBA4



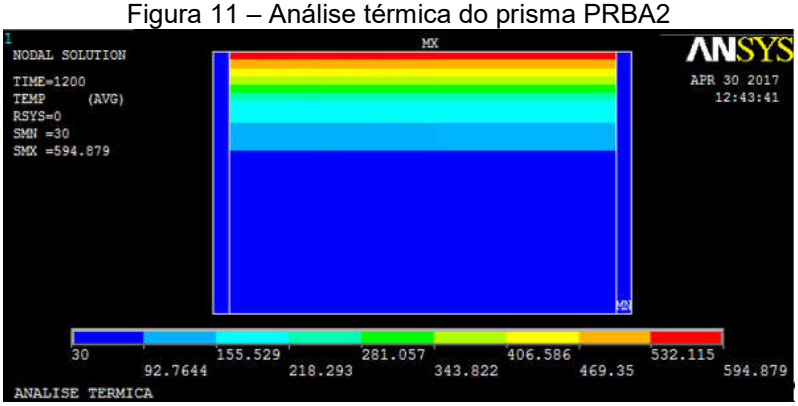
Os resultados dos ensaios de perda ao fogo são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Ensaio de perda ao fogo

Amostra			Perda ao fogo (%)					
Tipo	Identificação		600°C		900°C		1200°C	
			Total	Sobre referência	Total	Sobre referência	Total	Sobre referência
Referência	PRGR1		3,72	-	4,78	-	5,85	-
ISO 834	TGR2		0,15	4	0,19	4	0,20	3%
Referência	PRBA1		5,17	-	6,86	-	7,72	-
ISO 834 – 700°C	PRBA2	Camada Externa	3,95	86	5,64	82	6,21	80
		Camada Intermediária	2,53	49	4,31	63	4,88	63
		Camada Interna	3,01	58	4,72	69	5,36	69
ISO 834	TBA2		0,18	3	0,24	4	0,34	4

Na Figura 11 pode-se observar o resultado da simulação da distribuição de temperaturas dentro do prisma PRBA2 obtida através da modelagem numérica, desconsiderando-se a perda de massa por *spalling*.

Figura 11 – Análise térmica do prisma PRBA2



4. DISCUSSÃO

O presente trabalho preparou diferentes amostras e as expôs ao calor por exposição direta à chama, aquecimento unidirecional e aquecimento homogêneo. A variação de coloração das amostras nas imagens resultantes da microtomografia representa a alteração da densidade relativa do material, o que pode ser relacionado qualitativa e quantitativamente à variação de sua resistência mecânica ao se relacionar ensaios de caracterização do concreto em uma pequena quantidade de amostras.

A técnica de *micro*-CT foi eficaz, em todas as situações, na identificação das alterações resultantes da exposição ao calor, a qual gerou gradientes térmicos cujos efeitos são claramente discerníveis nas amostras, evidenciando ainda o padrão de fissuração desenvolvido.

Em destaque, no caso da amostra TGR0, exposta às altas temperaturas de forma não homogênea, foi possível identificar diferentes características entre a região diretamente exposta, a região intermediaria e a região mais distante da chama. Observou-se também o aumento de sua macroporosidade de 4,93% para 9,04% na região mais danificada, assim como o desenvolvimento de intercomunicabilidade entre os poros e a face externa do prisma analisado. Dessa forma, validou-se o uso da microtomografia para a identificação da profundidade do dano de amostras expostas às altas temperaturas.

As imagens permitem avaliar também a evolução da estrutura de poros do concreto das amostras dos grupos G2 e G3, principalmente nas bordas dos testemunhos, que sofreram a ação mais intensa da temperatura. Observa-se ainda a fissuração do concreto, partindo principalmente da zona de transição e propagando-se para o interior da pasta.

É notável, no entanto, a diferença no comportamento das amostras de resistência à compressão normal – G2 – e alta – G3. Apesar da fissuração superficial mais intensa, as amostras do grupo G3, que possuem maior resistência à tração, apresentaram fissuração interna significativamente menos acentuada. Deve-se considerar ainda a influência do coeficiente de dilatação térmica do basalto, o qual é inferior ao do granito, aplicando menor tensão na argamassa.

No caso da amostra TBA4, exposta às altas temperaturas de forma unidirecional, observou-se que através da microtomografia e da análise térmica que o trecho mais danificado do concreto foi expulso em função do *spalling* sofrido pela amostra.

Através do ensaio de perda ao fogo verificou-se uma alteração de reduzida ordem de grandeza na camada externa da amostra – compatível com a evaporação de uma pequena quantidade de água –, uma alteração maior na camada intermediária, indicando a ocorrência de dano sob temperatura inferior a 600ºC –, e uma alteração mais marcante na camada interna, mesmo desconsiderando-se a parte da amostra que sofreu spalling na análise, informações compatíveis com o quadro constatado com base no modelo numérico.

Portanto, como pode-se verificar através dos ensaios e da modelagem numérica, o tempo que o prisma permaneceu exposto às altas temperaturas foi o suficiente para elevar sua temperatura e causar danos principalmente superficiais, mas não para a perda de toda a água e para o avanço da dissociação química de seus componentes.

Tal efeito se deve às propriedades térmicas do concreto, reconhecidamente um mau condutor de calor, e à simulação de um incêndio de pequena duração.

4. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um programa experimental com o objetivo de avaliar qualitativamente a eficácia da *micro-CT* na caracterização de amostras de concreto expostas às altas temperaturas. Criaram-se diferentes cenários, variando-se o tipo de concreto, as características da amostra e da exposição ao calor.

Para verificação das informações obtidas, foram realizadas análises termogravimétricas e modelagem numérica, cujos resultados foram compatíveis com o quadro verificado através da *micro-CT*.

Dado que as imagens obtidas permitiram caracterizar o grau de dano sofrido pelas amostras, assim como visualizar sua profundidade, quando aplicável, entende-se que o programa experimental foi bem sucedido.
Com a confirmação da eficácia da técnica e da delimitação preliminar de sua eficiência na caracterização das alterações que a exposição ao calor provoca na microestrutura do concreto, esse trabalho indica a possibilidade da aplicação de um método quantitativo que, por meio das informações obtidas com a análise microtomográfica, posso determinar a perda de propriedades estruturais em amostras de estruturas expostas ao calor.

Associando-se os resultados obtidos a informações adquiridas através de ensaios como a determinação da resistência à compressão do concreto em um pequeno espaço amostral, mostrou-se viável no caso apresentado a avaliação quantitativa indireta da redução das propriedades mecânicas do concreto em estruturas expostas às altas temperaturas, possuindo como principais vantagens a possibilidade de visualização tridimensional das amostras e de sua parcela danificada, a fácil exibição e mensuração de fatores como a variação da densidade das amostras e a obtenção de dados qualitativos e quantitativos através de ensaios semi-destrutivos em amostras de pequenas dimensões

6. REFERÊNCIAS

BELKEBIR, K.; PICHOT, C. Y. **Computer tomography of reinforced concrete**. Chapter 12. Materials Science of Concrete. American Ceramics Society, 1998.

BERGAMIN E.E.Y., SOLLERO M.B.S., YOSHIDA R.K. **Análise da variação da perda de massa e da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas camadas superficiais de amostras de**

concreto submetidas à ação das altas temperaturas. *In:* XI CINPAR – Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas, 2015. Anais... São Leopoldo: CINPAR, 2015.

CÁNOVAS, M.F. **Patologia e terapia do concreto armado**. 522 p. Ed. PINI. São Paulo, 1988.

MARINONI, N., VOLTOLINI, M., BROEKMANS, M.A.T.M. *et al*. **A combined synchrotron radiation micro computed tomography and micro X-ray diffraction study on deleterious alkali-silica reaction**. **Journal of Materials Science, v. 50, i. 24, p 7985–7997. 2015.**

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 2 v. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. São Paulo, 2008.

DARMA, I. S.; HENRY, M.; SUGIYAMA, T**. Analysis of cracking in high-strength cementitious materials under heating and re-curing using X-ray CT**. *In*: Coventry University and The University of Wisconsin Milwaukee Centre for By-products Utilization - Conference Proceedings. Las Vegas, 2016.

DARMA, I. S.; HENRY, M.; SUGIYAMA, T**. Analysis of the effect of heating and re-curin on the microstructure of high-strength concrete using X-ray CT**. Construction and Building Materials, v. 67, Part A, p 37–46. 2014.

KHOURY, A. G. **Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures**. Progress in structural engineering and materials, 2000, 2, 429-447.

KIM, K. Y *et al*. **Evaluation of pore structures and cracking in cement paste exposed to elevated temperatures by X-ray computed tomography**. Cement and Concrete Research, v. 45, i. 16, p. 34-40. 2013.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevada**s. Tese - Doutorado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

MANTOVANI, I. F. **Microtomografia e nanotomografia de raios X aplicada à caracterização multiescalar de sistemas porosos carbonáticos**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Florianópolis, 2013.
MARTZ, H, E. *ET al*. **Computerized tomography analysis of reinforced concrete**. ACI Materials Journal, v. 90, n. 3, p. 259-264. 1993.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª. São Paulo, 2014.

PESSÔA, J. R. C *et al*. P**orosidade do concreto determinada por microtomografia com raio x e processamento de imagem**. Engenharia Estudo e Pesquisa - ABPE, v. 14, n. 2, p. 20-26. 2014.

PLUCENIO, D. M.; PERDOMO, L. V.; MANOEL, E.T, *et al***. Reservoir Characterization With Pore Network Extraction Applied To Presalt Analog Sample.** Proceedings of the XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE 2015. Rio de Janeiro, 2015.

RILEM**. Recommendation of RILEM TC 200-HTC**: Mechanical concrete properties at high temperatures—modelling and applications. Part 1: Introduction—General presentation. Materials and Structures nº 40, p. 841–853. 2007.