



MÉTODO ADAPTADO DA ASTM E1461 PARA CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO

A method adopted from ASTM E1461 to characterize concrete thermal properties

Carlos Britez (1); Paulo Helene (2); Pedro Bilesky (3)

(1) Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PhD Engenharia. carlos.britez@concretophd.com.br

(2) Professor Titular da Universidade de São Paulo. PhD Engenharia. paulo.helene@concretophd.com.br

(3) PhD Engenharia. pedro.bilesky@concretophd.com.br

Resumo

Aspectos referentes ao comportamento do concreto em situação de incêndio devem ser cuidadosamente considerados e analisados nos projetos de engenharia, a partir de uma ampla visão da natureza do material (caracterização das propriedades térmicas iniciais¹ envolvidas) e não somente pela ótica da construtibilidade, da durabilidade e dos critérios exclusivos de dimensionamento estrutural. O conhecimento das propriedades térmicas (precedente ao cenário de incêndio, escopo desse artigo) é fundamental para a compreensão do desempenho do material concreto em situação de incêndio e indispensável para subsidiar modelagens matemáticas e análises térmicas, através de simulações em programas computacionais. Este artigo trata de um método inovador para caracterização de propriedades térmicas, inédito no Brasil, adaptado da ASTM E1461 “Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method”, envolvendo amostras (pastilhas padronizadas) procedentes do concreto de alta resistência empregado em pilares do edifício e-Tower, construído em 2002, na cidade de São Paulo, Brasil. A metodologia sugerida pode ser uma alternativa mais rápida e menos onerosa que os procedimentos normalizados vigentes para caracterização de propriedades térmicas, com algumas ressalvas. Os resultados demonstraram que o método inovador abre um precedente para realização desse tipo de ensaio em diversas áreas da tecnologia do concreto, principalmente, na área de concreto-massa, onde é muito importante o conhecimento prévio dessas propriedades.

Palavra-Chave: concreto com agregado basáltico; alta resistência; propriedades térmicas; método ensaio.

Abstract

Aspects regarding the behavior of concrete under fire situation shall be carefully considered and analyzed when developing engineering designs, having in mind an encompassing vision of the nature of the material (characterization of the initial thermal properties involved) and not only considering the constructability, durability and structural dimensioning criteria. The knowledge of thermal properties (prior to the fire scenario, scope of this paper) is fundamentally important to understand the concrete behavior under fire conditions, to develop mathematical models and thermal analysis by software simulations means. This paper presents, for the first time in Brazil, a method for thermal properties characterization, adopted from ASTM E 1461-07 “Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method”, involving samples (standard tablets) obtained from high resistance concrete used in e-Tower Building columns, built in 2002 at São Paulo City, Brazil. The suggested methodology could be faster and less expensive than the current standardized procedures for initial thermal properties, with some exceptions. The results show that this innovative method can be used in different fields of concrete technology, principally in mass concrete, where the previous knowledge of thermal properties is very important.

Keywords: Concrete with basaltic aggregate; high strength; thermal properties; test method.

¹ Precedente ao cenário de incêndio, caracterização das propriedades térmicas do concreto em temperatura ambiente (escopo desse artigo).

1 Introdução

Em 2002, o Brasil se destacou internacionalmente quando apresentou recorde em concreto de alta resistência, colorido, HSCC (*High Strength Colored Concrete*), empregado em vários tramos de pilares do edifício e-Tower, na cidade de São Paulo, região sudeste do país (HELENE; HARTMANN, 2003). Na época da construção do edifício e-Tower, três réplicas dos tramos de pilares foram construídas a título de protótipos no pátio do laboratório da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo EPUSP (figura 1) para futuros ensaios de desempenho mecânico, de durabilidade e de simulação de incêndio.

Em 2010, oito anos após, num desses protótipos, foi procedida uma simulação de incêndio, detalhada na tese de doutorado de Brites (2011), no forno do Laboratório de Segurança ao Fogo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo e, **precedente a essa simulação**, testemunhos foram estrategicamente extraídos em uma amostra de referência (remanescente) para caracterização de propriedades térmicas, através de um método adaptado da ASTM E1461 para amostras de concreto, como alternativa aos métodos nacionais normalizados vigentes (ABNT NBR 12817; ABNT NBR 12818 e ABNT NBR 12820). A adaptação do método poderia ser interessante, principalmente, por se obter uma resposta bem mais fácil e rápida que os procedimentos normalizados vigentes.

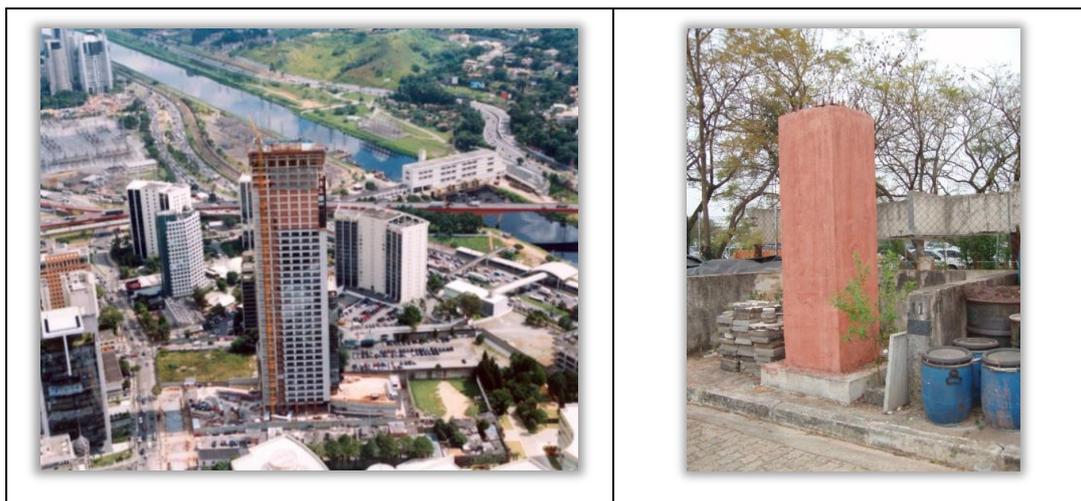


Figura 1- (a) Edifício e-Tower, 162m de altura; e (b) réplica protótipo do pilar de concreto colorido de alta resistência, HSCC moldado na parte externa do laboratório da Universidade de São Paulo.

2 Ação do fogo no concreto

O concreto, em geral, visto como um material, é reconhecido pela sua boa resistência em temperaturas elevadas em virtude de suas características térmicas, tais como: incombustibilidade e baixa condutividade térmica. Além disso, o concreto não exala gases tóxicos ao ser aquecido e os elementos apresentam maior massa e volume quando comparados com outros materiais como, por exemplo, os elementos de estruturas metálicas e de madeira, ou seja, potencialmente resistem por muito mais tempo (COSTA, 2008).



O *fib* Bulletin nº38 (2007) observa que tradicionalmente o concreto pode experimentar três problemas principais quando exposto ao fogo, sendo: (a) a redução de suas propriedades mecânicas; (b) os danos causados por deformações térmicas excessivas e (c) a ocorrência de deslocamento intenso; se cuidados na dosagem do material e no dimensionamento da estrutura não forem devidamente considerados. Geralmente, estes problemas podem ser correlacionados com: (a) o fluxo de calor procedente do incêndio, que depende basicamente da taxa de aquecimento, do nível máximo de temperatura e da duração do fogo e (b) a distribuição de temperatura no interior do elemento, que depende do tipo do cimento, **agregados** e adições, da geometria e tamanho da seção transversal, da massa específica, do teor de umidade, da idade, da relação água/cimento e da porosidade do elemento de concreto. Para o caso específico do concreto armado, estes problemas dependem, ainda, da espessura do cobrimento, do arranjo (configuração) da armadura (longitudinal e transversal) e da taxa de aço, determinadas no projeto estrutural.

As modificações nas propriedades do concreto, quando em situação de incêndio ocorrem, principalmente, pela formação de um significativo gradiente térmico, visto que o material não é um bom condutor de calor: o processo de propagação de calor no interior do concreto é lento, quando comparado com outros materiais como, por exemplo, o aço. Embora a condutividade térmica do concreto dependa de todos os seus componentes, esta é em grande parte² governada pelo **tipo de agregado** usado (aspectos litológicos), considerando, evidentemente, que o mesmo ocupe geralmente entre 60 e 80% do volume do concreto, o que costuma ser comum.

Apesar de o concreto possuir baixa condutividade térmica, o aquecimento do material em altas taxas de temperatura por um tempo determinado, como em uma situação de incêndio, pode provocar avarias nos elementos estruturais, por exemplo, a diminuição de suas propriedades mecânicas e, em alguns casos, a ocorrência do fenômeno de deslocamento (*spalling*). A intensidade do dano no elemento estrutural é, em parte, função dessa transferência de calor no interior da massa de concreto, a qual é governada por três **propriedades térmicas naturais (precedente ao cenário de incêndio)**: a condutividade, a difusividade e o calor específico.

Na ocorrência de incêndio, há uma combinação destes três mecanismos de transferência de calor, no entanto, no interior da massa de concreto há predominância do fluxo de calor por condução. Leonardo (2005) destaca que o calor se propaga através do concreto por condução, em virtude de um gradiente térmico significativo entre o núcleo da massa (temperatura fria) e a superfície da massa (temperatura quente oriunda do calor excessivo de um incêndio). Portanto, para elaboração de um dimensionamento preciso de estruturas de concreto em situação de incêndio, as propriedades térmicas do material precisam ser determinadas experimentalmente ou adotadas de literaturas, normas e códigos de prática especializados no assunto. As propriedades térmicas naturais do concreto influenciam no

² Outra influência importante, além do tipo de agregado, é o teor de umidade do concreto, pois a condutividade da água, apesar de baixa, é bem superior a do ar (*fib* Bulletin nº38, 2007). As proporções da mistura, bem como a quantidade absoluta de cimento também influenciam sobremaneira na condutividade térmica global do concreto, devido à disparidade significativa dos valores de condutividade entre a pasta de cimento e certos tipos de agregados. Conforme observado no *fib* Bulletin nº38, 2007, a pasta de cimento saturada pode possuir condutividade térmica até cinco vezes menor que a de alguns tipos de agregado.



comportamento em situação de incêndio. Essas propriedades térmicas são as de caracterização do concreto em temperatura normal / ambiente natural (escopo desse artigo) e dependem muito do tipo de agregado (litologia). No Brasil há extenso banco de dados em Furnas (1997).

O problema é que nem sempre existem dados suficientes sobre todos os materiais disponíveis, por exemplo, dados experimentais sobre concreto utilizando agregados graúdos basálticos, escopo do experimento apresentado nesse artigo, são escassos e pouco divulgados no meio técnico especializado, principalmente pelo fato deste tipo de agregado não ser frequentemente utilizado no exterior. Esse fato já havia sido bem destacado por Souza; Moreno Jr. & Bizzo (2005), além disso, tanto o ACI 216R (1989) e ACI 216.1-07/TMS-0216-07 (2007), quanto o Eurocode 2 (EN 1992-1-2:2004), sempre referenciam concretos em geral (normais e/ou de alta resistência) em apenas dois grupos bem definidos: dosados com agregados calcários e/ou silicosos. Agregado basáltico não é citado explicitamente nos principais códigos internacionais, apesar de ser comumente empregado no Brasil.

Em geral, nas pesquisas os autores não informam o tipo de agregado utilizado, cometendo-se erros ao generalizar os resultados obtidos, além de comparações equivocadas com outros experimentos. Infelizmente, é comum se deparar com situações onde autores, em eventos de simulação de incêndio, simplesmente ignoram as propriedades térmicas iniciais dos materiais e argumentam somente sobre o tamanho da seção transversal do elemento estrutural ou a intensidade de carregamento, desprezando a relação destes fatores com a natureza litológica do agregado, por exemplo.

É importante ressaltar que, de acordo com a vasta experiência nacional (FURNAS, 1997), o agregado de natureza basáltica, escopo do experimento apresentado nesse artigo, possui valor de difusividade térmica inferior ao da maioria dos agregados utilizados comumente nos concretos (quartzosos, graníticos, calcários e silicosos), da ordem³ de 0,08m²/dia e máximos⁴ de 0,111m²/dia, e, conseqüentemente, maior estabilidade térmica. Especificamente sobre este assunto (estabilidade térmica), segundo registrado no *fib* Bulletin nº38 (2007), os agregados basálticos possuem estabilidade térmica até aproximadamente 900°C.

3 Programa experimental

3.1 Amostras (testemunhos) procedentes do pilar protótipo e traço de concreto

O pilar protótipo envolvido no programa experimental desse artigo foi concebido sob as mesmas condições dos pilares da estrutura existente do edifício e-Tower, com uso de fôrma de madeira, sem quaisquer procedimentos especiais de cura e com o mesmo

³ Valores médios de agregados de origem basáltica (Grupo III – Rochas Magmáticas) de várias procedências espalhadas pelo Brasil (não condiz com a procedência dos agregados basálticos desse artigo, são apenas valores de referência de Furnas, 1997).

⁴ Valores máximos para temperatura de ensaio máxima de 60°C, da procedência de Tucuruí, conforme procedimentos normalizados vigentes (ABNT NBR 12818) (FURNAS, 1997).

concreto e operações de lançamento e de adensamento, inclusive destaca-se que o concreto lançado no protótipo foi procedente de caminhões betoneira da mesma usina de concreto responsável pelo fornecimento na obra, que, na época, foram estrategicamente desviados da obra durante as atividades normais de concretagem.

Durante oito anos, a réplica do pilar do edifício e-Tower permaneceu exposta às condições de exposição natural ao ambiente agressivo de São Paulo [atmosfera industrial e urbana; coordenadas: 23°32'S / 46°37'W e clima subtropical, tipo *Cfa*, segundo a classificação universal consagrada de *Köppen-Geiger* (KOTTEK *et al.*, 2006)], sem quaisquer cuidados adicionais, tratamentos corretivos ou proteções superficiais.

No início de 2010, **precedente ao programa experimental**, foram extraídos testemunhos cilíndricos na região da base do pilar protótipo em uma parte previamente planejada para se tornar remanescente (figura 2). Parte desses testemunhos foi rompida e obteve-se uma resistência característica à compressão de $f_{c,8anos}$ de 140MPa, como esperado um pouco superior à resistência à compressão obtida durante os moldados em 2002, de $f_{cm,28dias} = 125MPa$ (HELENE; HARTMANN, 2003). Outra parte foi reservada para os ensaios de propriedades térmicas⁵ e ensaios de ultrassonografia. A dosagem original deste concreto colorido de alta resistência aplicado no edifício e-Tower e replicada no pilar protótipo pode ser observada na tabela 1.

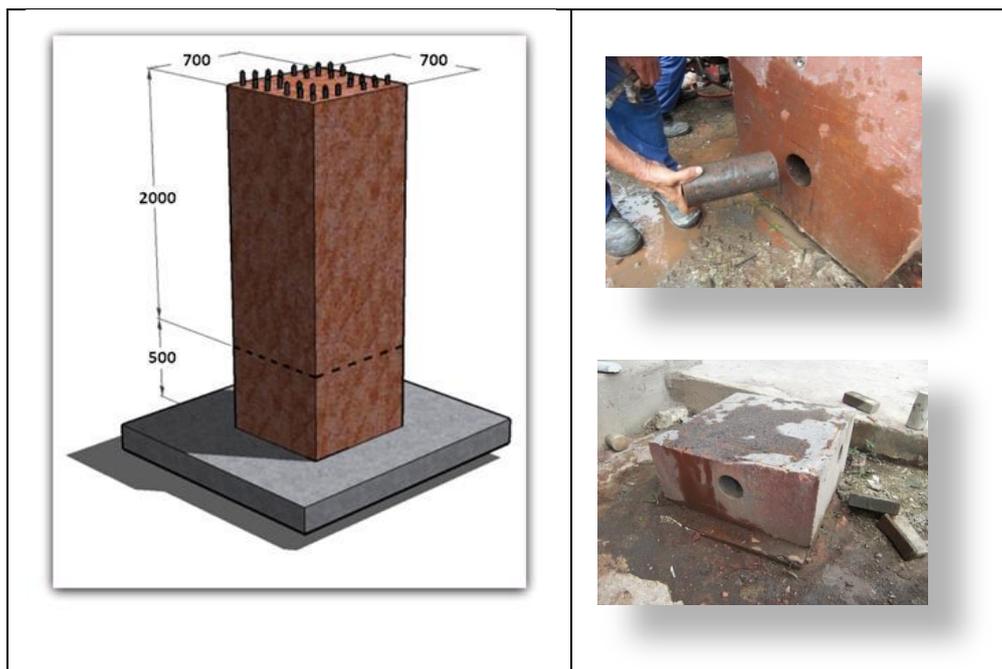


Figura 2- Indicação do corte na base do protótipo, extração do testemunho e detalhe da amostra remanescente após o corte.

⁵ O objetivo desse ensaio das propriedades térmicas foi de caracterizar o concreto em ambiente normal, que seria posteriormente submetido à simulação de incêndio, com o intuito de avaliar o quanto o concreto seria favorável (ou não) em condições excepcionais de incêndio em virtude da tipologia litológica do agregado graúdo (origem basáltica).



Tabela 1-Dosagem do concreto colorido de alta resistência

Materiais	Quantidades por m³
<i>Cimento (CP V - ARI + escória)</i>	<i>460kg cimento + 163kg escória</i>
<i>Sílica ativa ou metacaulim</i>	<i>93kg (15%)</i>
<i>Agregado miúdo (quartzo)</i>	<i>550kg</i>
<i>Agregado Graúdo (basalto)</i>	<i>1027kg</i>
<i>Pigmento inorgânico (óxido de ferro)</i>	<i>25kg (4 %)</i>
<i>Aditivo superplastificante (policarboxilato)</i>	<i>6,2kg (1 %)</i>
<i>Aditivo estabilizador de hidratação</i>	<i>3,2kg (0,5 %)</i>
<i>Água</i>	<i>135kg</i>
<i>Relação água-materiais cimentícios</i>	<i>0,19 (kg/kg)</i>

3.2 Apreciação petrográfica do agregado graúdo

Foi realizado um ensaio de *Apreciação Petrográfica de Materiais Naturais para Utilização como Agregado para Concreto*, conforme as prescrições da ABNT NBR 7389-2:2009 “*Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 2: Agregado graúdo*”, em uma amostra extraída da parte remanescente do pilar protótipo, sob os cuidados do Prof. Dr. Claudio Sbrighi Neto, através da cooperativa CPTI Tecnologia & Desenvolvimento.

De acordo com o ensaio realizado, pôde-se constatar que o agregado graúdo se caracteriza por ser uma pedra britada procedente de uma rocha pouco alterada, cor melanocrática, estrutura compacta e textura fanerítica fina, composto por feldspatos e pirorênio (como minerais essenciais) e máficos (como minerais acessórios). O tipo petrográfico foi classificado como rocha da família dos basaltos (diabásio) com propriedades físico-mecânicas de rocha coerente. Na amostra analisada a forma dos fragmentos/índice de forma se apresentou 20% lamelar, 70% cúbica e 10% alongada. Não foi encontrado no levantamento bibliográfico resultados de propriedades térmicas com agregados específicos dessa procedência.

Complementando as informações obtidas nos resultados da apreciação petrográfica, se observa que, segundo informações obtidas junto à empresa Engemix S. A., responsável pelo fornecimento do concreto na época, o agregado graúdo empregado no traço de concreto de alta resistência usado no edifício e-Tower foi procedente da empresa Pedreiras Basalto pertencente ao Grupo Estrutural, especificamente da unidade “Basalto 5 – Campinas I / Pedreira Usina Asfalto”, situada na Rodovia Campinas/Monte Mor, km 2,3 (SP-101) em Campinas, São Paulo.

3.3 Procedimento de ensaio (método adaptado da ASTM E1461) e resultados

Observa-se que quando da construção dos pilares protótipos não foram realizados os ensaios específicos de caracterização das propriedades térmicas do concreto, portanto, **precedente ao programa experimental** de simulação de incêndio (BRITEZ, 2011), extraíram-se testemunhos especialmente para esta finalidade. As propriedades térmicas determinadas experimentalmente em laboratório foram: a difusividade térmica, a condutividade térmica e o calor específico.

Nos ensaios das propriedades térmicas do concreto de alta resistência foi empregado um método adaptado da ASTM E1461 “*Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method*” em um equipamento *Thermal Diffusivity System* modelo *FlashLine™ 3000*, fabricado pela *Anter Corporation USA* (figura 3), nunca antes utilizado no Brasil para este tipo de procedimento envolvendo amostras do material concreto ou de base cimentícia. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Conforto Ambiental e Sustentabilidade do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), em São Paulo.



Figura 3 - Equipamento Thermal Diffusivity System modelo FlashLine™ 3000

Para a realização do ensaio, foram produzidas pastilhas procedentes de testemunhos extraídos na parte remanescente do pilar protótipo, situada no pátio do Laboratório de Concreto da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, com 3,17cm de diâmetro e 0,94cm de espessura. O acabamento final dessas pastilhas foi obtido com o uso de um torno mecânico fabricado pela *IMOR - "Flamatic", Flame Hardened Bedways*, modelo PRN 320V, provido de disco de desbaste diamantado de 3" de diâmetro e 1/2" de espessura, refrigerado a água. O detalhe do testemunho extraído da face superior da parte remanescente do pilar protótipo, bem como das pastilhas produzidas deste testemunho e utilizadas no ensaio de propriedades térmicas, pode ser observado na figura 4.



Figura 4 - Detalhe do testemunho extraído e das pastilhas de concreto produzidas para caracterização das propriedades térmicas

De acordo com o método proposto na ASTM E 1461, um pulso de luz de Xenônio é emitido em uma das faces da amostra⁶ (em toda a sua superfície) e a difusividade térmica é então mensurada, em função da espessura percorrida e do tempo despendido, para que este pulso, por transmissão de calor, alcance a face oposta. Os resultados obtidos no ensaio realizado podem ser observados na tabela 2. Na mesma tabela, notam-se os valores médios de referência de Furnas (1997) e da ABNT NBR 15200 (2012)⁷.

Tabela 2-Propriedades térmicas obtidas de acordo com o método adaptado da ASTM E1461 e valores de referência

Propriedades térmicas do concreto colorido de alta resistência (valores médios/duas amostras do experimento desse artigo) e valores comparativos			
	Experimento desse artigo	Furnas (1997) valores médios*	ABNT NBR 15200 (agregados silicosos)
Difusividade térmica (m ² /dia)	0,105	0,08	0,05 (valor calculado)***
Calor específico [J/ (kg. K)]	774,3	723**	1000
Condutividade térmica [W/ (m. K)]	2,36	2,01	1,3***

⁶ No caso, uma pastilha de concreto cilíndrica com diâmetro de 3,17cm e espessura de 0,94cm.

⁷ Observa-se quanto a esse aspecto que a ABNT NBR 15200:2012 fornece parâmetros dessas propriedades somente no contexto dos cenários de incêndio (não servem de referência), outrossim, não apresenta valores de referência para agregados de origem basáltica, somente para origem silicosa ou calcária (desfavoráveis ao concreto em situação de incêndio por possuírem valores de difusividade térmica comumente mais elevados que o basalto).



- * Os valores de Furnas (1997) corroboram os obtidos no experimento desse artigo, com algumas ressalvas discutidas adiante.
- ** Valor médio do material basalto, o concreto com agregado basáltico corresponde a um valor de 1005 J/(kg. K). Como a pastilha possuía diâmetro pequeno (3,17cm) houve predominância do calor específico do basalto (visto como um material, já esperado).
- *** Baseando-se nos valores de referência de calor de específico e principalmente de condutividade térmica da ABNT NBR 15200, o valor calculado da difusividade térmica é incoerente com a base de dados nacionais observado em Furnas (1997) para todos os tipos de agregado (exceto argila expandida), portanto, não serve como parâmetro comparativo do experimento realizado nesse artigo. Por sua vez, o valor de condutividade térmica de 1,3 W/m °C, de referência da norma brasileira, não condiz com nenhum concreto ou agregado da base de dados de Furnas (1997), sendo comum valores acima de 2 W/m °C. Valores da ordem da referência de norma são obtidos somente para o material cimento (muito diferente da amostra empregada nesse experimento).

4 Discussão dos resultados e do método adaptado

Observa-se que são escassos na literatura internacional dados sobre propriedades térmicas de concretos envolvendo agregado procedente de rocha da família dos basaltos, no entanto alguns trabalhos de referência nacional já foram desenvolvidos (FURNAS, 1997; SOUZA; MORENO Jr; BIZZO, 2005; TASHIMA *et al.*, 2004), embora as amostras, os procedimentos e os equipamentos foram bem diferentes daqueles utilizados nesta pesquisa, em virtude, evidentemente, do ineditismo e da adaptação do método internacional, conforme mencionado anteriormente.

Mesmo assim, nota-se que os resultados obtidos, em princípio, corroboram os resultados nacionais registrados em Furnas (1997) para esse tipo de agregado, conforme apresentado e comentado na Tabela 2. No entanto, salienta-se que sempre de uma inovação ou adaptação de uma tecnologia, deve-se se tomar cuidado, principalmente, com procedimentos relacionados com a parametrização de resultados obtidos ou eventuais fatores de correção aplicados a esses. Ressalta-se, neste contexto, que o método da ASTM E1461 é recomendado principalmente para materiais sólidos isotrópicos e homogêneos e necessariamente opacos (tipo aço, por exemplo), mas podendo ser aceitável seu uso para materiais de baixa porosidade, como o caso deste concreto (de alta resistência). Portanto, o método foi adaptado para o material concreto de alta resistência, evidentemente, com algumas ressalvas e limitações.

A principal ressalva consiste nas dimensões da amostra utilizada no ensaio. Em termos de determinação da difusividade térmica do material concreto, observa-se que principalmente o tamanho e o volume dos agregados presentes em uma amostra são fatores potencialmente influentes nos resultados de ensaio, independentemente do método aplicado (FURNAS, 1997).

No caso específico deste artigo observa-se, de fato, que as duas amostras ensaiadas podem não representar a importância efetiva do agregado graúdo na mistura de concreto, pois as pastilhas são de pequenas dimensões e podem conter pouco ou muito volume destes. Ademais, é possível que apenas haja uma película de agregado graúdo aparente (devido ao corte), mas no interior da pastilha uma grande quantidade de argamassa, por conseguinte, mascarando os resultados obtidos.



Há uma limitação, ainda, que diz respeito ao ensaio propriamente dito. Considera-se a possibilidade do calor, no interior da pastilha, posterior a emissão do pulso de luz de Xenônio, se transmitir por caminhos preferenciais, comprometendo os resultados obtidos, pois neste método a heterogeneidade e anisotropia do concreto são muito mais sensíveis e podem, realmente, influenciar diretamente nos resultados obtidos, mesmo que num concreto de alta resistência, onde seria menos provável que num concreto de resistência normal.

Sendo assim, pode ocorrer a necessidade de parametrização dos resultados obtidos ou até de aplicação de um fator de correção para comparação dos valores apresentados na Tabela 2 (realçados) com outras pesquisas, embora esse procedimento seja somente possível com a iniciativa de um extenso programa experimental temático interlaboratorial, envolvendo uma população de amostra mais representativa e pelo menos dois métodos de ensaios distintos.

Portanto, em princípio, recomenda-se que é prudente considerar a hipótese de realizar esse ensaio com pastilhas produzidas diretamente da rocha de onde o agregado é procedente, por exemplo, de rochas da família dos basaltos. Neste caso, o material é mais homogêneo e isotrópico e os resultados obtidos podem ser empregados como parâmetro suficiente para correlação com o material concreto e ainda essa situação é mais condizente com as premissas da ASTM E1461 (amostras de materiais sólidos isotrópicos e homogêneos).

5 Conclusões

1. Considera-se que, em casos específicos, o método adaptado da ASTM E1461, com as ressalvas e limitações apresentadas e vinculado a um extenso programa interlaboratorial, pode ser avaliado como uma boa alternativa futura, podendo ser mais rápida e menos onerosa, aos procedimentos prescritos na ABNT NBR 12817, ABNT NBR 12818 e ABNT NBR 12820, ou como uma metodologia agregada a estes procedimentos normalizados;
2. Considera-se também que este artigo possibilitou alertar o quanto o tipo de agregado de um concreto pode influenciar positiva ou negativamente os resultados obtidos em um programa experimental de simulação de incêndio e, conseqüentemente, em uma situação real de uma estrutura de concreto que sofreu ações térmicas procedentes de um cenário de incêndio;
3. Em outro aspecto, destaca-se a importância do conhecimento e da caracterização das propriedades térmicas do concreto, principalmente o de alta resistência, quando em situação de incêndio; deve se distinguir bem o concreto de alta resistência pelo tipo de agregado e não somente pela resistência característica à compressão, quando o assunto principal é o concreto submetido a elevadas temperaturas (em situação de incêndio), pois é bem razoável considerar que concretos com mesma classe de resistência, mas dosados com agregados de



litologia diferentes, podem apresentar comportamentos distintos quando expostos ao fogo;

4. Quando do uso em projeto do concreto de alta resistência, se possível, deve haver uma escala preferencial do uso de agregados, procurando-se evitar aqueles que possuam comportamento menos satisfatório frente ao calor. Nesse caso, agregados com natureza basáltica, procedente de rochas ígneas (magmáticas), torna-se um candidato em potencial. No entanto, esclarece-se que, no Brasil, essa escala não deve ser empregada equivocadamente como um critério prioritário de projeto, devendo somente ser considerada como uma provável recomendação, pois quando se trata do uso de agregados para dosagem de concretos, outros fatores relevantes estão envolvidos como, por exemplo, o uso do agregado disponível nas proximidades da obra e da usina responsável pelo fornecimento do concreto.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), em especial ao pesquisador Fís. Marcelo de Melo Aquilino do Laboratório de Segurança Ambiental e Sustentabilidade dos Edifícios pelo apoio irrefutável e pelo desafio de realizar, em condição de ineditismo, os ensaios de caracterização de propriedades térmicas do concreto de alta resistência estudado nesse artigo.

6 Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 216.1-07/TMS-0216-07: code requirements for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies. Michigan, 2007. 28 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 216R-89: guide for determining the fire endurance of concrete elements. Farmington Hills, Michigan, 1989. 48 p. Reapproved 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E 1461-11: Standard test method for thermal diffusivity by the flash method. W. Conshohocken, PA : ASTM International, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7389-2: agregados – análise petrográfica de agregado para concreto: parte 2: agregado graúdo. Rio de Janeiro, ABNT 2009. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12817: determinação do calor específico – método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT 2012. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12818: determinação da difusividade técnica – método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT 2012. 13p.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12820: determinação da condutividade térmica – método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT 2012. 10p.

BRITEZ, C. A. Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas. São Paulo: USP, 2011. 252 f. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

COSTA, C. N. Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio. 2008. 405 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Eurocode 2: design of concrete structures: part 1-2: general rules: structural fire design. prEN 1992-1-2. Brussels, Belgium, 2004. 106 p.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (*fib*). Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling – State-of-art report. Lausanne, *fib* 2007. 97p. (Bulletin d'information; 38).

FURNAS, Laboratório de Concreto; Andrade, W.P. (Ed.). Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades. São Paulo : Pini, 1997. 1v.
HELENE, P.R.L.; HARTMANN, C.T. HPC in Brazilian office tower. Concrete International, v.25, n.12, p. 64-68, Dec. 2003

KOTTEK, M.J. et al. World map of the Koppen-Geiger climate classification updated. Journal Meteorologische Zeitschrift, v.15, p.259-263, 2006. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.

LEONARDO Da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007. Handbook 5: design of buildings for the fire situation. Luxembourg: European Commission, 2005. Implementation of Eurocodes.

SOUZA, A A A; MORENO JR., A L.; BIZZO, L.B.P. Efeito do fogo no concreto: avaliação da influência do tipo de agregado e da rehidratação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Olinda, RE. Anais. São Paulo : IBRACON, 2005. P. 91-106.