

Avaliação experimental do concreto armado de alta resistência submetido a elevadas temperaturas (parte complementar)

CARLOS BRITZ – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
BRITZ CONSULTORIA | PhD ENGENHARIA

PAULO HELENE – PROFESSOR TITULAR DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PhD ENGENHARIA

I. INTRODUÇÃO E CONTEXTO

Este artigo apresenta e discute os resultados obtidos em diversos exames e ensaios residuais (pós-simulação de incêndio), sendo um complemento da primeira parte da pesquisa, aqui publicada em 2012, que abordou as avaliações preliminares¹ de um programa experimental pioneiro de simulação de incêndio realizado no Brasil em um pilar protótipo, concebido em concreto de alta resistência, colorido, armado, com idade de 8 anos e réplica do concreto empregado em vários tramos de pilares do edifício *e-Tower*, localizado na cidade de São Paulo.² O pilar protótipo, precedente ao programa experimental térmico, bem como suas condições pós-simulação de incêndio, podem ser observados na Fig. 1.

Britz³ destaca que o conhecimento do fato das propriedades serem modificadas quando o concreto



a



b

► Figura 1

(a) Pilar protótipo precedente à simulação;
e (b) pilar protótipo pós-simulação de incêndio

é exposto ao calor já está bem consolidado no meio técnico. Pesquisas precursoras já alertam que os concretos sofrem altos gradientes térmicos quando expostos ao fogo e há uma forte tendência das camadas quentes da superfície se separarem das camadas mais frias do interior do elemento por deslocamento (*spalling*). No entanto, esse mecanismo de falha por deslocamento explosivo, no caso do concreto de alta resistência, não deve ser equivocadamente generalizado no meio técnico, pois depende de alguns fatores intrínsecos, principalmente relacionados ao programa experimental e às amostras envolvidas nas pesquisas. Quando em elevadas temperaturas, a anisotropia e a heterogeneidade do material concreto se tornam cada vez mais evidentes e, em elementos estruturais do tipo pilar, por exemplo, o comportamento não pode ser considerado uniforme para toda seção transversal. Na realidade somente poucos centímetros do concreto exposto diretamente ao fogo sofre com as elevadas temperaturas⁴.

2. RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Ressalta-se como interessante neste artigo a diversidade de ensaios residuais procedidos no pilar protótipo pós-simulação de incêndio, bem como outras características intrínsecas à própria amostra, como a idade avançada do concreto envelhecido naturalmente ao ambiente agressivo local (8 anos) e a natureza litológica do agregado graúdo (basalto). Além disso, este artigo também discute a importante contribuição da pigmentação inorgânica do concreto, com uso de óxido de ferro (Fe_2O_3), como recurso útil na interpretação dos resultados obtidos na avaliação do concreto após



► **Figura 2**

Índice colorimétrico promovido no interior do pilar devido à transformação química de redução, ocorrida com o calor, do óxido de ferro (Fe_2O_3): escura no interior do centro das faces e alaranjada na superfície das faces e profundidade das arestas

incêndio, através da mudança de cor do concreto colorido (pigmentado).

3. RESUMO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

As informações detalhadas do programa experimental e da amostra (pilar protótipo) submetida ao experimento de simulação de incêndio estão contidas na primeira parte desse artigo¹, que trata das avaliações preliminares. Em resumo, o programa experimental foi realizado no forno do Laboratório de Segurança ao Fogo e a Explosões do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo, o qual possui um forno com dimensões compatíveis com o programa térmico planejado. Na oportunidade, foi estabelecido que o tempo de exposição ao fogo do pilar protótipo seria de 180min (3h), com ensaio de simulação de incêndio caracterizada pela curva padrão de aquecimento ISO 834. O pilar protótipo foi ensaiado sem carregamento e com exposição de três faces ao fogo, o que propiciou que uma das faces (onde os termopares estavam instalados) permanecesse de livre acesso durante a simulação de incêndio.

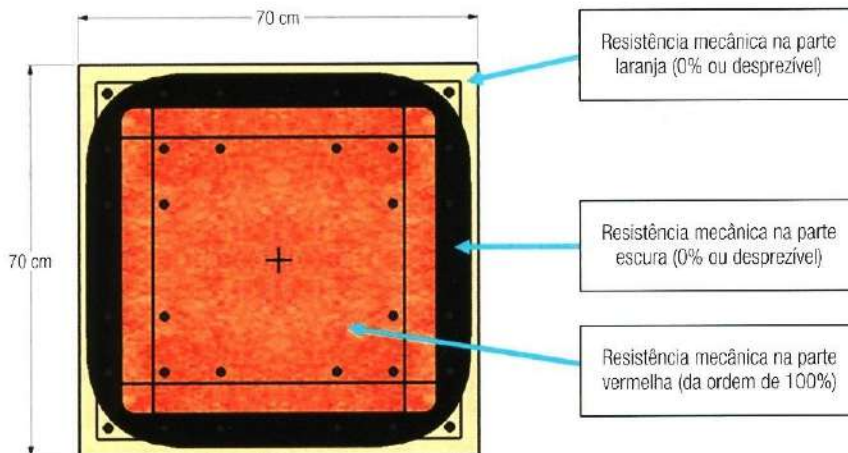
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO (PROPRIEDADE RESIDUAIS)

4.1 Indicador colorimétrico (pigmentação inorgânica com uso de óxido de ferro)

Devido ao uso de pigmentação inorgânica à base de óxido de ferro sintético (Fe_2O_3), incorporada na dosagem do concreto colorido de alta resistência (4% em relação à massa de cimento), foi possível avaliar mudanças de coloração ao longo (no interior) da seção transversal e na superfície do pilar pós-simulação de incêndio. Constatou-se que aproximadamente 55mm de profundidade da amostra apresentou coloração mais escura (ou negra), no meio das faces, e que também essa alteração de cor não foi tão evidente na superfície do pilar e na profundidade das arestas, onde a coloração se apresentou menos escura e somente um pouco “desbotada” (tipo alaranjada). Com base nesses indicadores observados, procedeu-se com diversas extrações de amostras, a fim de verificar a correlação da cor com as diferentes temperaturas obtidas no interior do elemento e as prováveis variações nas propriedades mecânicas,



► **Figura 3**
 Detalhe de algumas perfurações realizadas na extremidade do pilar e detalhe de um dos testemunhos extraídos (com \varnothing 75mm) para posterior ensaio de ruptura à compressão



► **Figura 4**
 Resistências mecânicas residuais à compressão do concreto, pós-simulação de incêndio (situação hipotética)

► **Tabela 1 – Resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão (residuais, pós-simulação de incêndio)**

Pós-fogo (cor vermelha, laranja e negra)		Pré-fogo (cor vermelha)
Localização do eixo da extração	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
3 mm da face (cor laranja)	desprezada (0,0%)	
25 mm da face (cor negra)	desprezada (0,0%)	
100 mm da face (cor vermelha)	139,0 (98,8%)	140,7 (100%)
200 mm da face (cor vermelha)	124,5 (88,5%)	
350 mm da face (cor vermelha)	136,1 (96,7%)	

térmicas e mineralógicas do concreto de alta resistência nessas regiões (Fig. 2).

4.2 Propriedades mecânicas residuais do concreto

Diversos testemunhos foram extraídos na direção ortogonal à seção transversal (óculos da Fig. 3), sendo essas extrações realizadas nas regiões coincidentes com as diferentes profundidades dos termopares [distribuídos ao longo da seção transversal, vide em Brites (2012) a locação dos termopares], exceto para os termopares na região do cobrimento médio (25mm), que teve sua resistência à compressão desprezada nessa região, em função da existência de concreto frível (cor escura). As extrações dos testemunhos foram realizadas pela equipe do Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT com uma perfuratriz elétrica provida de coroa diamantada, fabricada pela Tyrolit do Brasil, modelo HCCB 6 Hydrostress, sendo as respectivas rupturas realizadas em uma prensa hidráulica, marca Mohr & Federhaff – AG, com capacidade de 200t e resolução de 100kgf.

Os resultados obtidos demonstraram que a região escura (negra) não possui resistência mecânica significativa (considerada desprezível: concreto frível) e que a parte que preservou a cor avermelhada original (imediatamente após a coloração escura, distante ortogonalmente 55mm da face) manteve resistência mecânica residual muito similar à do núcleo do pilar, ou seja, a resistência mecânica original (precedente a simulação de incêndio, $f_{ck} = 140\text{MPa}$), conforme Tabela 1 e sumário de cores da Fig. 4 (situação hipotética).

O sumário de cores da Fig. 4 possui uma boa correlação com a pesquisa



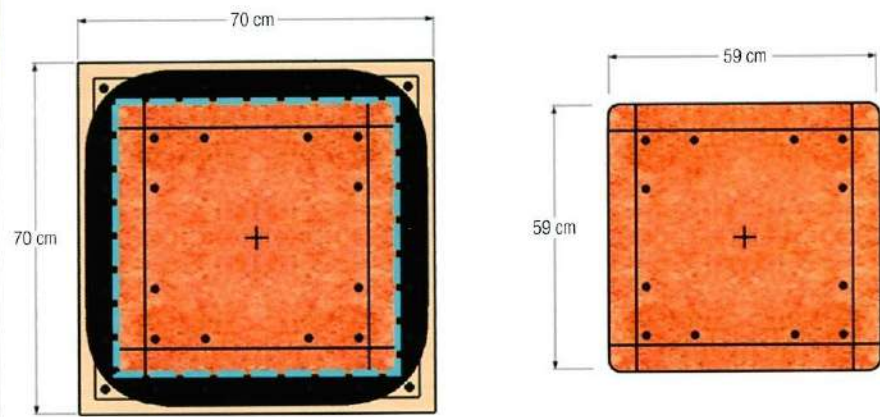
precursora desenvolvida por Anderberg (1978b) *apud* Purkiss (1996)⁵, popularmente conhecida como “Método dos 500°C”, especificamente com as premissas adotadas na aplicação do método, concerne ao desprezo (exclusão) de regiões periféricas da seção transversal (Fig. 5).

4.3 Propriedades mecânicas residuais do aço

No total, quatro amostras foram extraídas manualmente com comprimentos úteis equivalentes a 60cm (para cada amostra de barra de aço), através de prospecção superficial com auxílio de marreta, ponteiro, talhadeira e disco de corte especial para aço, sendo duas na região das arestas (longitudinais) e duas na região das faces (estribos). Para efeito comparativo, foi extraída também a amostra de uma barra longitudinal da região oposta ao fogo (protegida pela alvenaria de fechamento do forno), a qual foi identificada como “amostra de referência”. Exemplos de amostras extraídas podem ser observados na Fig. 6.

Os ensaios de tração nas amostras de barras de aço extraídas foram realizados no Laboratório de Equipamentos Mecânicos e Estruturas (LEME) do IPT em uma Máquina Universal de Ensaio tipo 03 (M.U.E. 03), fabricada pela Alfred J. Amsler & Co e os resultados podem ser observados na Tabela 2.

De acordo com os dados obtidos nos ensaios (Tabela 2) foi possível observar que as barras de aço longitudinais (\varnothing 16mm), alocadas nas arestas do pilar, após resfriamento lento “ao ar”, sofreram em média uma redução de sua resistência à tração da ordem de 25%, embora a tensão de escoamento tenha reduzido em aproximadamente 45%, quando comparadas com a amostra de



► **Figura 5**

Redução da seção transversal em função da resistência mecânica residual à compressão aferida posteriormente ao ensaio de simulação de incêndio (situação hipotética)

referência. No caso do centro das faces (armadura transversal \varnothing 8mm), observa-se uma redução bem menor, da ordem de 10% na resistência à tração e da ordem de 25% no valor da tensão de escoamento. Os resultados obtidos, possuem boa correlação com outros trabalhos experimentais^{5,6}, que são unânimes em apontar que as propriedades residuais de aços submetidos a temperaturas acima de aproximadamente 550°C sofrem perdas irreversíveis e que a partir dos 700°C essas se tornam bem mais evidentes, podendo superar perdas de 30%. Pesquisadores⁵ destacam, também, que quanto menor o diâmetro da barra, menor a magnitude de redução, sendo a redução mecânica mais evidente para barras de aço com maiores diâmetros,

principalmente, quando as amostras são “resfriadas ao ar”. O sumário de cores da Fig. 7 indica o local das extrações em comparação com as estimativas de temperatura e as reduções de resistência mecânica à tração do aço.

Observa-se, também, que os patamares de redução da tensão de escoamento das barras de aço amostradas, em virtude das altas temperaturas procedentes da exposição ao fogo, acompanham os valores de redução mecânica da resistência à tração, sendo válidas as mesmas observações referidas sobre os diâmetros das armaduras. Os patamares mais significativos da redução da tensão de escoamento do aço, observados na Tabela 2 (da ordem 45% para amostras de barras longitudinais



► **Figura 6**

Detalhe das amostras de barras de aço extraídas (longitudinais e transversais)

► Tabela 2 – Resultados obtidos nos ensaios realizados nas amostras de aço (armadura do pilar) comparados com a amostra de referência

Identificação	Amostras expostas ao fogo				Amostra de referência (concreto cor vermelha / temperatura ambiente de aproximadamente 25°C)
	Arestas expostas ao fogo (concreto cor laranja / temperatura bem acima de 600°C)		FACES expostas ao fogo (concreto cor negra / temperatura máxima inferior a 570°C)		
	Barras longitudinais Ø 16mm		Estribos Ø 8mm		"referência / original"
	A	B	C	D	
Tensão de escoamento (MPa)	354,0 ± 3 (56,8%)	343,0 ± 3 (55,1%)	464,0 ± 8 (74,5%)	460,0 ± 9 (73,8%)	623,0 ± 4 (100%)
Resistência à tração (MPa)	562,0 ± 4 (74,8%)	556,0 ± 4 (74,0%)	652,0 ± 10 (86,8%)	698,0 ± 11 (92,9%)	751,0 ± 4 (100%)

extraídas das arestas e de 25% para barras transversais extraídas dos centros das faces) estão diretamente relacionados, também, com as diferenças de temperatura nessas regiões, sendo que esses valores registrados corroboram as observações apontadas em outros trabalhos^{5,7}.

4.4 Caracterização mineralógica e análises térmicas

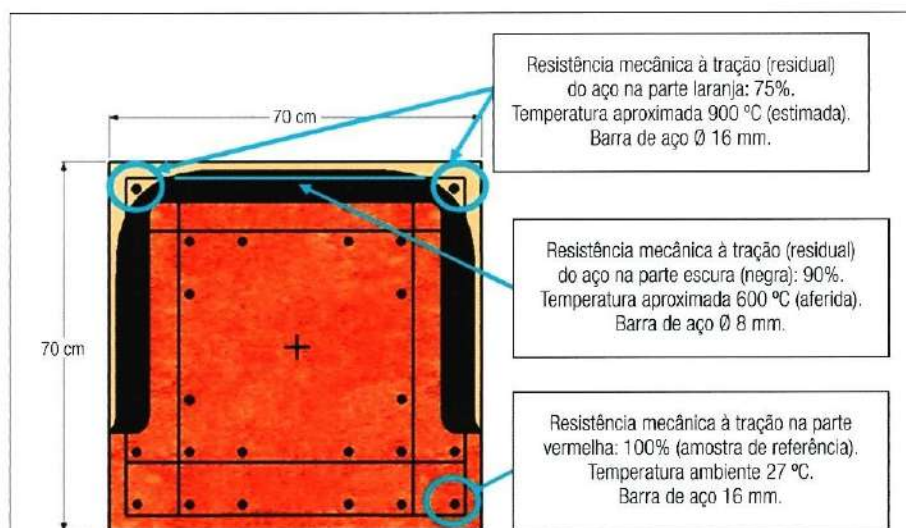
Tendo em vista a evidente diferença de coloração na parte superficial e interna do pilar protótipo após a simulação de incêndio, algumas amostras foram extraídas para caracterização mineralógi-

ca por difratometria de raios X e análises térmicas por ATD-TG (análises termodiferencial e termogravimétrica). Planejou-se que as caracterizações mineralógicas e as análises térmicas fossem procedidas em quatro amostras extraídas em regiões estratégicas do pilar protótipo experimentado, bem como em uma amostra extraída da parte remanescente que permaneceu no pátio do Laboratório de Materiais de Construção da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, totalizando-se ensaios em amostras selecionadas de cinco regiões.

Todos os exames de caracterização mineralógica, bem como as aná-

lises térmicas, foram realizados pela equipe do Laboratório de Mineralogia da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). As cinco amostras de concreto extraídas do pilar de concreto (precedentemente e posteriormente à exposição ao fogo) foram analisadas termicamente em um equipamento Rigaku modelo TAS 100.

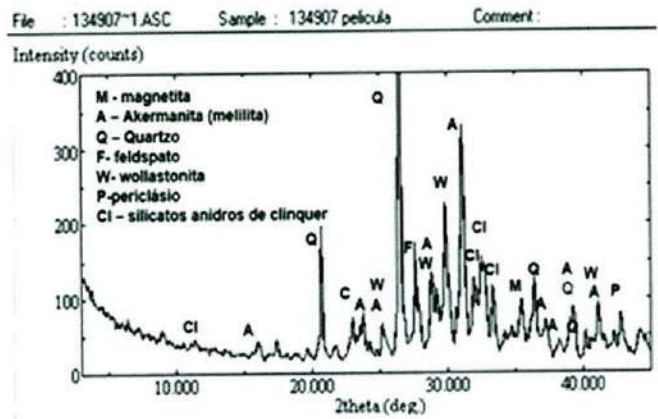
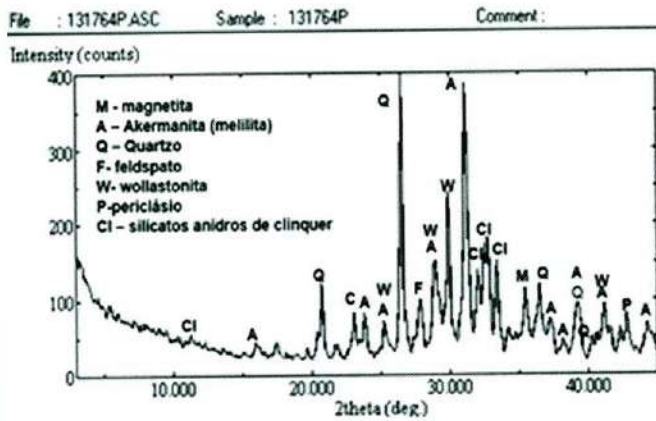
Nos resultados obtidos observou-se claramente a similaridade na composição mineralógica das Amostras 01 e 02 (remanescente USP e centro da face transição, cor vermelha), ambas com coloração vermelha. No entanto, destaca-se que uma delas (Amostra 02) foi exposta ao fogo e a outra não (Amostra 01). Nesse caso, as difrações de raios X realizadas permitiram inferir que, certamente, a amostra exposta ao fogo que preservou a coloração vermelha, similar à original, manteve as mesmas propriedades, inclusive mecânicas, do pilar de concreto de alta resistência nas condições precedentes à exposição ao fogo. No caso da Amostra 03 (centro da face transição, cor negra), foi possível verificar a presença de magnetita (Fe_3O_4), em substituição a hematita (Fe_2O_3), procedente da reação química de redução do óxido de ferro, a qual foi induzida por uma atmosfera levemente redutora na câmara do forno (caracterizada pela combustão incompleta do gás natural), pelas altas temperaturas e pelo tempo da de simulação de incêndio.



► Figura 7

Resistências mecânicas à tração do aço, posteriormente à simulação de incêndio





► **Figura 8**

Difratogramas das amostras 4 e 5: aresta intacta e película superficial – região alaranjada (com exposição ao fogo)

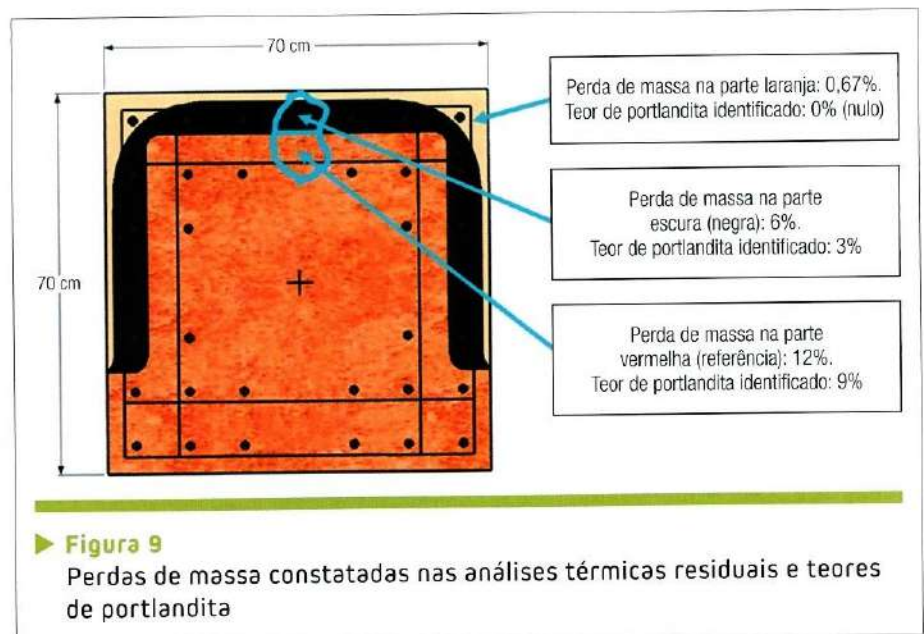
As Amostras 04 e 05 (aresta intacta e película superficial), ambas com coloração laranja, se destacaram por possuir uma mineralogia diferenciada, principalmente, por sintéticos neoformados similares aos minerais akermanita e wollastonita (Fig. 8). Observa-se que a presença desses compostos sintéticos, formados por sinterização, na região mais exposta ao fogo (cor alaranjada), pode indicar a presença de elevadas temperaturas, superiores a 900°C, necessárias para promover o surgimento desses minerais anidros a partir dos compostos hidratados^{9,9}. Nessas amostras nota-se, também, a presença de magnetita (Fe_3O_4), em substituição a hematita (Fe_2O_3).

Por sua vez, percebeu-se que as análises térmicas contribuíram potencialmente para indicar a real extensão da degradação do concreto, que foi muito mais evidente através da verificação da perda de massa nas amostras. Foi possível constatar que as amostras situadas na parte mais periférica do pilar protótipo perderam valores bem menos significativos de massa em relação à parte que manteve a coloração vermelha original. Na parte escura (negra) obteve-se uma perda de massa total da ordem de 6% e na parte laranja (região da aresta) uma perda de massa

total de somente 0,67%. Os teores de portlandita também sofreram reduções significativas nessas regiões, sendo nulos no caso das amostras extraídas da região das arestas (coloração laranja) e de 3% na região escura. Como base comparativa, a amostra extraída da parte que manteve a coloração vermelha teve uma perda de massa total da ordem de 12% e um teor identificado de portlandita da ordem de 9% (mesmo teor encontrado na amostra remanescente de referência que não foi exposta ao fogo), o que indicou a presença de compostos ainda hidratados nessas regiões (Fig. 9).

5. CONCLUSÕES

1. Independentemente dos ensaios para determinação da resistência mecânica à compressão dos testemunhos extraídos, já seria possível inferir, somente pelo índice colorimétrico, que a região do pilar onde conservou sua coloração avermelhada original praticamente não sofreu alterações significativas em suas propriedades mecânicas;
2. No caso da resistência mecânica residual à compressão do concreto exposto ao fogo, nota-se uma excelente correlação com as temperaturas mensuradas pelos termopares,



► **Figura 9**

Perdas de massa constatadas nas análises térmicas residuais e teores de portlandita

as quais, por sua vez, também, possuem boa correlação com as diferentes mudanças colorimétricas, ocasionadas pela presença do pigmento inorgânico base óxido de ferro. O pilar protótipo teve um bom desempenho quando exposto 180min (3h) ao fogo, mantendo sua integridade original preservada em uma seção transversal aproximada de 59cm x 59cm (dimensão original de 70cm x 70cm), onde a coloração vermelha se manteve (vide Fig. 5);

3. A redução das propriedades mecânicas residuais do aço foi mais significativa quanto maior a temperatura e quanto maior o diâmetro da barra de aço. Sendo mais evidente ainda, devido ao processo de têmpera empregado em sua fabricação, se o tipo de resfriamento da amostra for do tipo "ao ar", sem uso de jatos de água. Observou-se também que os resultados obtidos nos ensaios de propriedades residuais não podem ser considerados diretamente na avaliação do comportamento do material durante o evento de simulação de incêndio, pois parte de suas propriedades é de fato recuperada na etapa de resfriamento (pós-incên-

dio). O caso mais expressivo deste fenômeno está relacionado com as armaduras de aço que estão no interior do elemento de concreto armado: durante o incêndio, dependendo do posicionamento e da temperatura, podem perder da ordem de 75% ou mais de sua resistência mecânica à tração, a qual pode ser quase integralmente recuperada dependendo do método de resfriamento e da temperatura máxima atingida;

4. Quanto aos resultados obtidos nos ensaios residuais, observa-se que o emprego de exames de caracterização mineralógica e de análises térmicas pode contribuir potencialmente para avaliação de estruturas que sofreram intensa ação do calor, procedente de um cenário de incêndio, com a ressalva da interpretação correta dos resultados, no que tange principalmente a contaminação de água nas amostras extraídas. Foi possível constatar uma mineralogia diferenciada, além de uma redução menos significativa de massa, as quais foram condizentes com as partes mais degradadas do concreto, na região da periferia da seção transversal do pilar protótipo. Desta-

ca-se que essas regiões degradadas também coincidem com os índices colorimétricos e, por conseguinte, com as mais altas temperaturas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem especialmente ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) pelo apoio nos ensaios de simulação de incêndio e principalmente nos ensaios residuais do concreto e aço; às associações e institutos nacionais ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), ABECE (Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural), ABESCE (Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem) e IBTS (Instituto Brasileiro de Telas Soldadas), pelo apoio profissional e financeiro; às empresas BASF, ENGEMIX, TECNUM, GCP, VIAPOL, FRANÇA & ASSOCIADOS, RM SOLUÇÕES, EKIPE-C e PhD ENGENHARIA, pelo fornecimento de materiais, equipamentos especiais, mão de obra e suporte financeiro para o desenvolvimento e a realização de todo o programa experimental; e finalmente agradecem ao ilustre Dr. Venkatesh Kodur, que, em passagem pelo Brasil, acompanhou a pesquisa e trocou valiosas informações com estes pesquisadores. 

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRITZ, C. A.; HELENE, P.; BILESKEY, P.; BERTO, A. Avaliação experimental do concreto armado de alta resistência submetido a elevadas temperaturas. *Concreto & Construção*, v. 67, p. 90-99, 2012.
2. HELENE, P.R.L.; HARTMANN, C.T. HPC in Brazilian office tower. *Concrete International*, v.25, n.12, p. 64-68, Dec. 2003.
3. BRITZ, 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.
4. 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).
5. PURKISS, J. A. Fire safety engineering design of structures. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996. 369p.
6. CABRITA NEVES, I.; RODRIGUES, J. P. C.; LOUREIRO, A. P. Mechanical properties of reinforcing and prestressing steels after heating. *Journal of Materials in Civil Engineering*, p.189-194, Nov. 1996.
7. SUPRENTANT, B. Evaluating fire-damaged concrete: concrete and reinforcing steel properties can be compromised at elevated temperatures, *Fire Safety of Concrete Structures*, ACI SP-80. Michigan: American Concrete Institute, 1983.
8. JACOB, C. J. Bureau de Recherche Géologiques et Minières. Synthesis of wollastonite from natural materials without fusion. USA. US 3966884. 20 jun. 1974, 29 jun. 1976. United States Patent, 1976. Disponível em: <<http://www.freepatentsonline.com/3966884.pdf>> Acesso em: 25 nov.2010.
9. ROSENQVIST, T. Principles of extractive metallurgy. 2nd ed. Trondheim: Tapir Academic Press, c2004. 506p.

