



ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO PÓS-INCÊNDIO COM ÊNFASE NOS AGREGADOS DE SERGIPE

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a pesquisa na área de estruturas danificadas de concreto pós-incêndio vem ganhando destaque entre os pesquisadores. Apesar do concreto ser conhecido como material resistente em elevadas temperaturas, é comum a existência de danos na degradação da resistência, além de ser propício ao surgimento de rachaduras (FERNANDES, 2017). Por esse motivo, a temática central deste trabalho gravita em torno da investigação a microestrutura do concreto pós fogo, dando ênfase aos agregados do estado de Sergipe.

O concreto é o material mais consumido na construção civil, quantificado em cerca de 19 bilhões de toneladas métricas ao ano. Esse consumo se deve às características positivas como a viabilidade em diferentes estruturas (forma e tamanho), boa resistência à água, baixo custo e disponibilidade dos materiais para fabricação (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

É importante ressaltar que o concreto é considerado mal condutor de calor ao sofrer danos exposto ao fogo. Na observação visual há mudança de cor, pois quando exposto a altas temperaturas encontra-se a cor rosa, indicando a perda significativa de resistência do concreto. Com investigações em microscopia óptica é possível detectar os reais problemas ocasionados pelo fogo (GEORGALI, TSAKIRIDIS, 2005).

Dando continuidade, Fernandes (2017) menciona dados que apresentam a presença de alterações físicas e químicas do concreto, quando existe exposição de altas temperaturas, gerando deterioração das características mecânicas nas estruturas, fissuração e deslocamento. Nesse sentido uma forma melhor de entender as propriedades do concreto pós-incêndio é por meio da análise da sua microestrutura, que está diretamente ligada à durabilidade e à resistência.

Nesse panorama, o comportamento do concreto exposto a altas temperaturas altera a microestrutura dos seus agregados, a incompatibilidade térmica e alterações físico-químicas na pasta do cimento (KHOURY, 2000). Diante dessa circunstância, ressalta-se a importância de utilizar técnicas laboratoriais para obter resultados sobre a degradação do material e a microestrutura (EHRENBRING, 2017).



Os equipamentos mais usuais utilizados na avaliação pós-incêndio, feita por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos, são: martelo, esclerometria, penetração de pino, ensaio CAPO, ensaio de fratura externa, técnicas especiais como velocidade do pulso ultrassônico, dentre outros. Nesse sentido, uma inspeção cuidadosa é indispensável para o diagnóstico da estrutura atingida pelo incêndio. Ao se tratar de estruturas de concreto armado, a inspeção deve englobar o concreto e a armadura (COLOMBO, 2007). Este trabalho foca apenas na estrutura de concreto, com base em ensaios não destrutivos.

O aprofundamento das análises do concreto também pode ser feito utilizando outro equipamento que fornece informações da morfologia do material, com resolução de 2 a 5nm e aumento visual de 10.000 vezes, chamado Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que possui capacidade de imagens com aparência tridimensional e auxilia na microanálise química do material (DAL MOLIN, 2010).

A par dessas considerações, este trabalho objetiva colaborar com estudos de concreto expostos a altas temperaturas, mediante a realização de uma revisão bibliográfica a respeito do tema e, em seguida, a condução de testes com corpos de provas em formato cilíndricos sem aquecimento e com aquecimento de 200° C e 800° C, com ênfase nos agregados do estado de Sergipe. Os resultados poderão dar suporte às perícias pós-incêndios, que utilizam os ensaios visuais com mais frequências, não obtendo resultados precisos, dentre as liberações tardias como interdição ou liberação da estrutura pós-fogo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Na fabricação do concreto é indispensável o uso de agregados, que são considerados matérias-primas conhecido como granulares com tamanho dos agregados graúdos, de 4,75 a 75 mm, e agregados miúdos, de 0,075 a 4,75 mm, utilizados em obras como pavimentação, ferrovias, obras geotécnicas, concretos, argamassas e construções no geral (ÂNGULO, 2000).

Em 2012, estudos sobre areia concluíram que 2.500 empresas se referem à sua extração, originando aproximadamente 50.000 empregos diretos. No caso, da areia natural extraído através de leito do rio representa 90% da produção nacional e os 10% restantes, de outras fontes. Com destaque, o maior produtor brasileiro é no estado de São Paulo, uma vez que 45% da areia produzida é proveniente de várzeas, 35% de leitos de rios, e o restante de outras fontes. O estado objeta 39% da produção nacional, seguido de



Rio de Janeiro (16%), Minas Gerais (12,5%), Paraná (6,5%), Rio Grande do Sul (4,2%) e Santa Catarina (3,5%) (ANEPAC).

A presente pesquisa estuda os agregados graúdos no estado de Sergipe que são abastecidos na região de Itabaiana, segundo a Companhia de Desenvolvimento Industrial e de Recursos Minerais de Sergipe (CODISE). Existe três pedreiras que produzem aproximadamente 420 mil m³ de brita por ano, contribuindo 90 empregos diretos registrados em 2009. Referindo-se aos ensaios tecnológicos com análise petrográfica, advertiram serem britas de granitoide por feldspato e quartzo, que são apropriadas para uso em concreto (Gonçalves et al., 2011).

2.1 Cimento

Considerado um pó fino com propriedades aglutinantes que endurece sob ação da água, também classificado como aglomerante hidráulico, não decompõe depois do contato com a água. Sendo considerado um material aglomerante. No que se refere às propriedades físico-químicas denomina-se pega quando a pasta se solidifique. Em seguida, após a pega o endurecimento aumenta a resistência e dureza. Exemplificando, um bloco de argamassa de cimento e areia, de traço 3:1 após 3 dias é igual a 80kg/cm², em 7 dias corresponde a 180 kg/cm², após 28 dias 250 kg/cm² temos a resistência. Conclui-se que a pega sofrer influência na baixa temperatura, e com presença de sulfato e cloretos de cálcio, acelera em altas temperaturas. É importante observar que a estocagem do cimento em longo prazo pode iniciar a pega devido à umidade da embalagem, recomenda-se o prazo máximo de estocagem em um mês. Na figura 1 abaixo, há a classificação do cimento Portland dividido em tipos comum, composto, alto-forno, pozolânico e ala resistência inicial (ARAUJO et al., op.cit, 2011).

Figura 1- Composição dos cimentos Portland.

Cimento Portland (ABNT)	Tipo	Clinker + Gesso (%)	Escória siderúrgica (%)	Material pozolânico (%)	Calcário (%)
CPI	Comum	100	-	-	-
CPI - S	Comum	95-99	1-5	1-5	1-5
CP II - E	Composto	56-94	6-34	-	0-10
CP II - Z	Composto	76-94	-	6-14	0-10
CP II - F	Composto	90-94	-	-	6-10
CP III	Alto-forno	25-65	35-70	-	0-5
CP IV	Pozolânico	45-85	-	15-50	0-5
CP V - ARI	Alta resistência inicial	95-100	-	-	0-5

Fonte: Araújo et al., 2011.



Na pesquisa em questão optou-se pelo uso do cimento para obras especiais, do tipo CP II F. No momento da escolha optou-se por esse tipo devido ser considerado os mais usuais nas construções de médio e grande porte, para ser mais próximo de simular o concreto pós- fogo.

2.2 Fogo

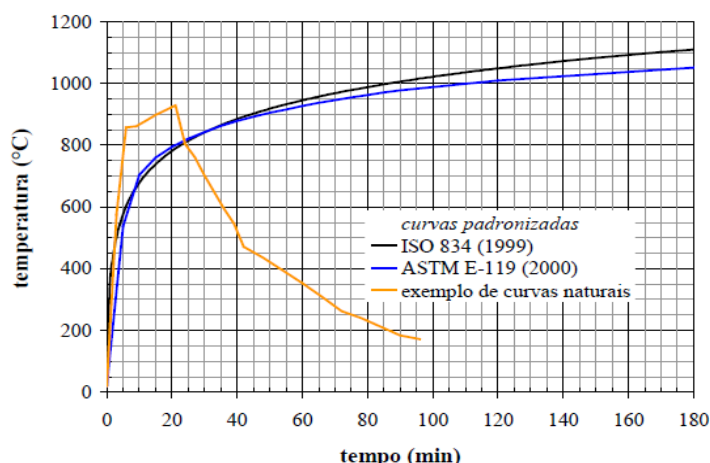
A intensidade e duração do fogo variam os danos na estrutura, atualmente existe pequeno números sobre os métodos analíticos (Mani, Lakshmanan, 1986). Em 2015 em Madrid a microestrutura do concreto foi ponderada e exposta ao fogo real. Na fase de investigação da análise térmica pós-fogo, o uso do equipamento de Difração de Raios-X e o MEV resultaram na obtenção de resultados em amostras de tamanhos 0-25 cm. Comprovando ausência de portlandita (CH) na superfície, além de microfissuras e alterações em C-S-H que são cristais pequenos e fibrilares (MENENDEZ, VEGA, 2018).

2.3 O Incêndio

A ação térmica que existe no incêndio pode ser apresentada através do fluxo calor radiativo e convectivo resultante das chamas dos gases quentes, a transmissão do fluxo de calor é conduzida de molécula a molécula no concreto (SILVA,2001). É importante mencionar as consequências causadas pela ação térmica elevada na estrutura de concreto, representado por três etapas no incêndio.

A curva-padrão tempo-temperatura ASTM E-119 conforme representa a figura 2 abaixo, refere-se o aumento da temperatura durante o incêndio, os testes realizados no dimensionamento de edifícios residenciais e comerciais relacionam a carga de incêndio aos materiais celulósicos. As normas brasileiras NBR 14432/2000 e NBR 5628/1980 sugerem a curva ISO-834 para expor o acréscimo padronizado de temperatura em função do tempo no projeto de dados construtivos (SILVA, 2001 e WALRAVEN, 1999). É interessante mencionar que o comportamento real do incêndio em estruturas não representa as curvas-padrão. Pois, são expressões seguidas por vários códigos normativos. Existem curvas naturais que descrevem a evolução da temperatura do incêndio no ambiente, assim como há a parte ascendente representada pela etapa de resfriamento do incêndio (SILVA, 2001).

Figura 2: Curvas temperatura-tempo padronizadas pelas principais normas internacionais e a forma típica das curvas naturais.



Fonte: SILVA, 2001 e WALRAVEN, 1999.

É interessante mencionar que o comportamento real do incêndio em estruturas não representa as curvas-padrão. Pois, são expressões seguidas por vários códigos normativos. Existem curvas naturais que descrevem a evolução da temperatura do incêndio no ambiente, que são interligadas com as características do compartimento em chamas, como a condição de ventilação, propriedades dos materiais combustíveis presente no ambiente. Existe também a parte ascendente representada pela etapa de resfriamento do incêndio (SILVA, 2001).

2.4 Efeito da ação térmica na pasta de cimento Portland

A água presente na pasta de cimento evapora no concreto, durante a fase de aquecimento. Em seguida, quando o concreto ultrapassa a faixa de aquecimento de 100 °C acontece a vaporização de toda umidade (METHA, 1994).

Em consequência da etapa da água evaporada, acontece a desidratação do silicato de cálcio hidratado, que é o responsável pela grande parte da resistência do concreto. Na faixa de 710 °C, os silicatos estão inteiramente eliminados. Devido à pressão interna do vapor na fase de aquecimento a porosidade diminui acontecendo o impedimento da massa de concreto em alto grau de compactação. No caso, da massa com grau de saturação elevada, ocorre o crescimento da pressão interna de vapor ultrapassando a disposição de liberação do vapor pelos poros. Nos primeiros 30 minutos de incêndio o “spalling” pode ser observado (ANDERBERG, 1997). A pressão de vapor, o fator água/cimento sofre influência da umidade livre e na permeabilidade (METHA, 1994).



2.5 Análise da microestrutura do concreto exposto à alta temperatura

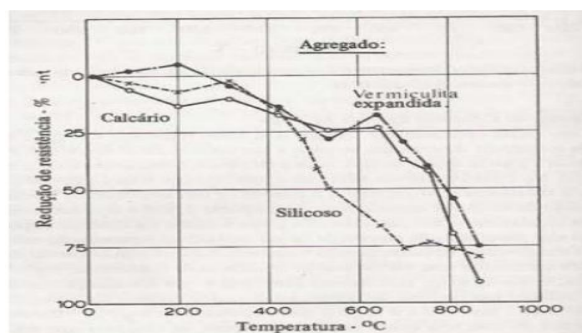
O concreto possui estrutura heterogênea e complexa com a presença de partículas de rochas com formas e tamanhos modificados, disseminadas por um meio ligante, composto de uma massa sucessiva de pasta endurecida (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Na análise em microscópicos o concreto é complexo por não ser uma estrutura homogênea. Por isso, em alguma situação pode-se encontrar uma fase densa, comparável ao agregado graúdo, e outra onde a pasta é porosa na qual prevalece os vazios capilares na estrutura. A presença de agregado graúdo tem o poder de gerar uma descontinuidade na pasta, gerando alterações no concreto. A fase entre a pasta do cimento e as partículas de agregado ocorre a presença da camada delgada denominada de zona de transição. Nessa fase da zona de transição existe uma menor resistência comparada com outras etapas do concreto, por existir o acúmulo de água (Lima et. al., 2004).

2.6 Efeito das altas temperaturas no agregado

Temperaturas inferiores a 500°C são consideradas desprezíveis no que se refere a perda de resistência à compressão, mas o tipo de agregado empregado na produção do concreto influencia na resistência porque existe a ação do fogo (XIAO e KONIG, 2004 apud OLIVEIRA 2006). A figura 3 exemplifica o comportamento da redução da resistência à compressão devido ao agregado adotado para fabricação do concreto.

Figura 3: Redução da resistência à compressão em função do tipo de agregado adotado.



Fonte: Neville, 1997.

2.7 Efeito das altas temperaturas sobre as propriedades mecânicas do concreto



Os métodos de ensaio, a taxa de aquecimento e resfriamento, os tipos de agregados, o tamanho do corpo de prova, o tipo de cura, a temperatura máxima de exposição, a umidade do concreto, a relação água/cimento, dentre outros, afetam no concreto devido a presença do fogo. Desta maneira, as propriedades mecânicas expostas em experimentos variam nos resultados dificultando uma melhor comparação (SOUSA, 2009).

2.8 Efeito das altas temperaturas sobre as propriedades térmicas do concreto

Um estudo interessante que merece ser ressaltado é a análise da microestrutura na condutividade térmica do concreto, comprando sua redução quando aumenta a porosidade do material. A condutividade afeta diretamente a orientação dos vazios de ar que são ligados aos agregados. A heterogeneidade e as propriedades térmicas variam nos agregados. Na prática, fatores que detectam os vazios, assim como porosidade necessitam serem estudados a partir do modelo conhecido como Finite-element (FE). (Finite- element (FE). (Wangb,a,b,b,Jiaqi Chen Hao, Pengyu Xie, Husam Najm (2019).

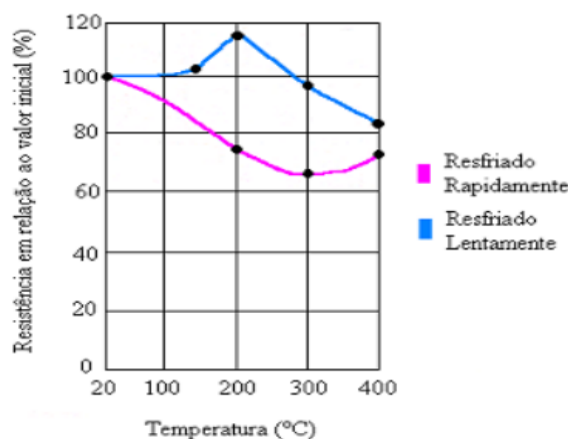
De acordo com as considerações supracitadas nota-se que o concreto ao entrar em contato com fogo passa por mudanças em suas propriedades térmicas. Portanto é fundamental o estudo da temperatura no concreto. Assim como o comportamento do concreto durante o resfriamento rápido e lento.

2.9 Efeitos dos modos de resfriamento no concreto

Os efeitos do resfriamento do concreto influenciam diretamente em sua resistência. Quando o concreto atinge uma temperatura de 400°C o resfriamento brusco ocasiona descimento na resistência. Essa etapa da perda é devido ao choque térmico quando submetido na água, formando fissuras. Logo após uma temperatura de 600°C a diferença pode ser desprezada (XIAO E KONIG (2004 apud OLIVEIRA, 2006). Há modificações no comportamento do concreto ao ser colocado em câmara de combustão proporciona pequeno prejuízo ao comparar com o ar livre, consequentemente a taxa de resfriamento reduz (Neville,1997).

É importante mencionar que na fase do resfriamento rápido a desagregação do concreto endurecido acontece devido a reidratação destrutiva da cal que sofre uma expansão na presença óxido de cálcio ao entrar em contato com a água (LIN et al. (1996); NEVILLE (1997)). A seguir na figura 4, pode-se observar o comportamento do concreto em resfriamento rápido e lento, durante modificações da temperatura x resistência.

Figura 4: Efeito da velocidade de resfriamento sobre a resistência do concreto preparado com agregado arenito.



Fonte: CÁNOVAS, 1988.

De acordo com a figura 5 o comportamento do concreto em temperatura de 300°C por meio do resfriamento lento ocorre um decréscimo aproximadamente 30% do seu valor inicial. Sendo assim, o mais comum em caso de incêndio o concreto sofrer resfriamento rápido (Cánovas,1988).

3. METODOLOGIA

Os ensaios serão conduzidos com cinco Corpos de Prova (CP's) em formato cilíndrico, com dimensão 100x200mm (Figura 3): sem aquecimentos, cinco com temperatura de 200° C e cinco a 800° C. Os CP's serão colocados em forno mufla, com idades de 90 dias e 120 dias. O volume total utilizado é aproximadamente de 50 litros, totalizando 30 CP's em período de tempo de 30, 60 e 90 minutos de aquecimento. O cimento utilizado é indicado para obras especiais, do tipo CP II F escolhido devido a ser usual em obras do estado sergipano. Além da escolha de resistência 30 Mpa ser a mais usual, com classe de agressividade ambiental no valor de 3 segundo a norma NBR 6118:2014. Avaliando a influência de diferentes picos de temperatura e a variação de tempo de exposição das amostras. Os materiais foram fornecidos por uma concreteira localizada no estado de Sergipe.

Figura 3- Amostra dos Corpos de Prova.



Fonte: Autores, 2019.

Serão utilizados equipamentos como o MEV e ultrassom, com o intuito de identificar e caracterizar os agregados do concreto do estado de Sergipe, além da microestrutura do concreto pós-fogo. Baseado em recomendação do RILEM TC249-ISC que aborda sobre os ensaios não destrutivos, avaliando a resistência in loco do concreto.

4.RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se que o trabalho possa contribuir com a perícia do estado de Sergipe, diagnosticar e auxiliar na indicação da recuperação ou perda da estrutura, encontrar dados das propriedades mecânicas da microestrutura, e em seguida ter capacidade de discutir os resultados mais relevantes referentes aos agregados.

5.CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de recursos tecnológicos para a análise da integridade estrutural tem vasto campo de aplicação na construção civil, inclusive para nortear decisões no caso de estruturas de concreto no pós-incêndio. A constatação de que os trabalhos de perícias pós-incêndio em estruturas de concreto no estado de Sergipe carecem de maiores recursos tecnológicos para subsidiar decisões relativas a interdição, a recuperação ou ao reforço das edificações submetidas ao sinistro, e de que não há procedimento padrão para esse fim no Brasil, fortalece a necessidade do desenvolvimento de estudos que objetivem suprir essa lacuna tecnológica.

A utilização de equipamentos e ensaios que possibilitem realizar a análise da microestrutura dos concretos preparados com os materiais locais após serem submetidos a elevadas temperaturas sob diferentes idades, condições de carregamento, tempo e temperaturas de aquecimento, possivelmente, de forma pioneira, produzirá resultados



COBENGE
2021

XLIX Congresso Brasileiro
de Educação em Engenharia
e IV Simpósio Internacional
de Educação em Engenharia
da ABENGE

28 a 30 de SETEMBRO

Evento Online

"Formação em Engenharia:
Tecnologia, Inovação e Sustentabilidade"

relevantes para o entendimento do comportamento dos concretos locais, e de seus constituintes, em condições de incêndios. O comportamento da ligação aço-concreto sob condições de temperaturas elevadas, em função do tipo de aço e dos tipos e cobrimentos de concreto, é mais um aspecto a ser observado no estudo.

Promoção:



Realização:



REFERÊNCIAS

_____. NBR 5739/2007. **Concreto – Ensaio de Compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, Brasil.

_____. NBR 5728/2001. **Componentes construtivos estruturais- Determinação da resistência ao fogo**, Rio de Janeiro, Brasil.

_____. NBR 7225/1993. **Materiais de pedra e agregados naturais**. Rio de Janeiro, Brasil.

_____. NBR 7211/2005. **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5738/2015. **Concreto- Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos de Prova**. Rio de Janeiro, Brasil.

CÁNOVAZ, Manuel Fernández. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988.

COLOMBO, M.; FELICETTI, R. **New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures**, Fire Safety Journal, v. 42, n. 6-7, 2007, p. 461-472

DAL MOLIN, D. C. C. **Técnicas Experimentais para o Estudo da Microestrutura**. In: ISAIA, G.C. (Ed.), **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, 2.ed., IBRACON, São Paulo , 2010: p. 862.

EHRENBRING, H. Z. et al., 2017," **Avaliação da resistência residual de lajes alveolares em concreto armado em uma edificação industrial após incêndio**."Revista Matéria, v.22, n. 3, pp. e11874.

FERNANDES, et al.2017, "**Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques**", IBRACON Structures and Materials Journal, v.10, n..4 (Aug), pp.838-863.

GEORGALI, B., TSAKIRIDIS, P.E., 2005,"**Microstructure of fire-damaged concrete. A case study**", **Cement & Concrete Composites** ,n. 27, pp. 255-259.

KHOURY, G.A., 2000, "Effect of fire on concrete and concrete structures". **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 2, n. 4, pp. 429–447.

LIMA R. C. A., KIRCHHOF L.D., CASONATO C.A., SILVA FILHO L. C. P.. **Efeito de Altas Temperaturas no Concreto**. Artigo - Grupo de Pesquisas LEME - UFRGS. In: II Seminário de patologia das Edificações. Porto Alegre, 2004.

LIMA, S.; MONDAL, P. **Micro- and nano-scale characterization to study the thermal degradation of cement-based materials**. Materials Characterization , v. 92, 2014, p. 15-25.



MEHTA, P. KUMA.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 3a ed., São Paulo, IBRACON, 2008.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo, SP. Ed. PINI, 1997.

OLIVEIRA, Tiago A. de C. P. de. **Gerenciamento de riscos de incêndio: Avaliação do impacto em estruturas de concreto armado através de uma análise experimental de vigas isostáticas**. 2006. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

SILVA, Daiane dos Santos da. **Propriedades mecânicas residuais após incêndio de concretos usados na construção civil na grande Florianópolis**. 2009. 102 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Programa de 51 Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

SOUSA, Moisés M, de. **Estudo experimental do comportamento mecânico e da microestrutura de um concreto convencional após simulação das condições de incêndio**. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

XIAO, J e KONIG, G. Study on concrete at high temperature in China – on overview. Fire Safety Journal. China, 2004.

ANALYSIS OF THE MICRO-STRUCTURE OF THE POST-FIRE CONCRETE WITH EMPHASIS ON THE AGGREGATES OF SERGIPE

ABSTRACT: *The objective of this study is to develop more grounded methodologies to support decision making regarding the type of action to be taken in the post-fire of reinforced concrete structures, using non-destructive techniques, and seeking to establish a correlation between field measurements and the results of studies developed in the microstructure of local concretes in the post-fire. Success in the results of the study will make it possible to: contribute to fill gaps in post-fire expertise procedures; contribute to greater agility in structural evaluations, making it possible in a shorter time for definitions of release or interdiction, or even repairs, of the structure in the post-fire; the development of new technologies; greater concrete proximity between research centers / universities and the demands of society in Sergipe, fulfilling the university's social mission; greater academic production of the program and greater possibility of cooperation aimed at regional development.*

KEYWORDS : *Post-fire structures. Structural integrity. Concrete.*