

UHE SÃO SIMÃO

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO CONCRETO DA VIGA DE SUPORTE DO TRILHO DE MONTANTE DAS PONTES ROLANTES DA CASA DE FORÇA, PARA VERIFICAÇÃO DE EVENTUAL PERDA DE RESISTÊNCIA, EM DECORRÊNCIA DO INCÊNDIO NO TRANSFORMADOR ELEVADOR DA SAÍDA DE LINHA, DA UNIDADE GERADORA UG 05, EM 30/01/2019.

NOVEMBRO DE 2024

Índice

- 1- Histórico
- 2 – Incêndio no transformador da unidade geradora UG 05.
- 3 – Reclassificação das pontes rolantes.
- 4 – Avaliação da resistência do concreto velho da viga de montante da ponte rolante, no trecho correspondente à largura (distância entre as paredes corta-fogo) da baia do Transformador da unidade geradora UG 05.
 - 4.1 – Método direto, ou destrutivo – rompimento de corpos de prova.
 - 4.2 - Método indireto ou não destrutivo – medição da velocidade ultrassônica no concreto.
- 5 – Determinação da resistência do concreto das estruturas de suporte das pontes rolantes, atingido pelo incêndio de 30/01/2019.
 - 5.1 – Pelo Método Direto (destrutivo) – Ensaio de compressão axial em corpos de prova.
 - 5.2 – Pelo Método Indireto – Ensaios de propagação de ondas longitudinais por meio de pulsos ultrassônicos no concreto.
- 6 – Considerações finais.

1 – Introdução,

A Usina Hidrelétrica São Simão está localizada no Rio Paraíba, na divisa dos estados de Minas Gerais e Goiás, entre os municípios de São Simão, GO e Santa Vitória, MG.

A barragem tem altura máxima de 127,00 m, Casa de Força do tipo semi abrigada, com 06 (seis) unidades geradoras (UGs), totalizando 1710 MW de potência instalada.

A Usina poderá ser ampliada, com a instalação de mais 04(quatro) unidades geradoras iguais as que se encontram em operação. As estruturas de concreto das quatro Tomadas de Água foram construídas na primeira fase da obra, em meados da década de 1970 e se encontram tamponadas, com as comportas vagão baixadas. Parte da estrutura de concreto dos quatro blocos da Casa de Força, também foram concretados até o nível que permite a montagem dos quatro condutos forçados. A primeira etapa da concretagem da estrutura para montagem dos condutos, junto à Tomada de Água, também foi efetuada na primeira fase de implantação do empreendimento.

A Usina Hidrelétrica São Simão foi inaugurada em 1978 e operada pela CEMIG- Centrais Elétricas de Minas Gerais até 1917, quando foi adquirida pela chinesa SPIC Pacific Hydro, que assumiu o controle da Usina.

Uma das primeiras medidas adotadas pela SPIC foi o estudo de um Plano de Modernização da Usina, considerando a idade dos equipamentos em operação e o avanço tecnológico observado, decorridos mais de 40ans de operação. Desta forma o objetivo seria a redução do custo operacional, aumento da disponibilidade da Usina no sistema de distribuição de energia, o aumento da geração e consequentemente, o aumento do faturamento.

Em 2019 foi incrementado o Plano de modernização com a elaboração do Projeto Básico e contratação das obras, iniciadas efetivamente em julho de 2023.

2 – Incêndio no Transformador Elevador da unidade geradora UG 05.

Em 30 de janeiro de 2019 o transformado elevador da unidade geradora UG 05 foi atingido por incêndio de grandes proporções, que só foi debelado após três (3) horas de duração, com o acionamento automático do sistema anti- incêndio e a intervenção de bombeiros.

Grandes avarias nos equipamentos eletromecânicos foram contabilizadas, sendo necessária a substituição do transformador pelo reserva, no menor prazo possível, para evitar a indisponibilidade da unidade por um prazo muito grande.

As paredes corta-fogo, que protegem as unidades adjacentes (UG 04 e UG-06), construídas em concreto armado, também foram danificadas, com o deslocamento do concreto de cobertura e exposição da armadura em diversos pontos, tanto nas duas faces internas das paredes laterais da baia do Transformador avariado no incêndio, quanto na face externa da parede do fundo da baia, que é a parede de montante da Casa de Força (CF05), onde estão os pilares de sustentação da viga de apoio do trilho das duas pontes rolantes, cada uma com capacidade de movimentar carga de 185 toneladas, que podem ser utilizadas acopladas. Na primeira fase da construção, na década de 1970, as maiores cargas içadas foram o rotor da turbina com peso de 290 toneladas e o rotor do gerador com peso de 330 toneladas .

Considerando a necessidade premente de recolocar a Unidade UG 05 em operação, foi solicitada inspeção imediata do concreto submetido ao incêndio, por engenheiro especialista em tecnologia do

TOP MASTER

ENGENHARIA

TOP MASTER ENGENHARIA S/C LTDA

concreto, que recomendou a execução de reparos para o recobrimento da armadura, nos trechos danificados pelo incêndio, com argamassa de alto desempenho. Esses reparos foram efetuados em fevereiro de 1919 e tiveram por objetivo proteger a armação das estruturas (paredes, vigas e pilares) das anomalias identificadas na inspeção visual.

Considerando o tempo exíguo para a avaliação de eventual perda de resistência do concreto (F_{ck}) e de propriedades físicas (tração) e químicas do concreto, foi estabelecido que essa verificação deveria ser efetuada na Modernização da Usina.

3- Reclassificação das pontes rolantes.

Considerando que durante o período de modernização da Usina as pontes rolantes teriam que ser utilizadas para o içamento de peças com pesos superior a 330 toneladas (peso do rotor do gerador das unidades geradoras em operação) foi necessário reclassificar as duas pontes para 205 toneladas cada (410 toneladas quando acopladas).

Nos estudos efetuados, para avaliação da resistência residual mínima do concreto (F_{ck}), decorridos cerca de 45 anos do seu lançamento, resistência essa que deveria ser considerada para a absorção dos novos esforços aplicados na viga do trilhamento das pontes rolantes, o calculista efetuou a projeção da resistência de 15 MPa adotada no projeto inicial (década de 1970) para o final de dezembro de 2022. Sabe-se que a resistência característica à compressão do concreto aumenta com o a idade. No controle normal em obras, essa verificação é feita através do método destrutivo (NBR 5739) com rompimento de corpos de prova, moldados no canteiro. São moldados 5 (cinco) corpos de prova e rompidos decorridos 3; 7; 14 e 28 dias. A idade padrão normal é de 28 dias Em usinas hidrelétricas as especificações de projeto recomendam ruptura aos 90 dias no caso de necessidade de verificações, não como controle da qualidade.

A determinação da resistência característica do concreto à compressão (F_{ck}) também pode ser determinada pelo método indireto, não destrutivo, através da medição da velocidade de propagação de ondas longitudinais, por meio de pulsos ultrassônicos através de um elemento estrutural do concreto. Não é utilizada para o controle da qualidade do concreto em obras. Pode ser empregado como dupla checagem do F_{ck} em laudos periciais técnicos para dirimir dúvidas em acidentes em edificações. No item 4.2 será detalhado o emprego deste método.

O projeto original da viga do trilhamento das pontes rolantes indica $F_{ck} = 150 \text{ kg/cm}^2$ (15 Mpa) como resistência característica à compressão do concreto da viga. A projeção do aumento dessa resistência, entre a data do lançamento, na década de 1970, e o final de 2022, de acordo com os estudos iniciais de reclassificação da ponte, foi de 27%, ou $F_{ck} = 190 \text{ kg/cm}^2$ (19 MPa).

A verificação da estrutura para o novo valor do F_{ck} , de acordo com a Memória de Cálculo apresentada, suporta o novo carregamento de 205 tf da ponte(205 tf), exigido na fase de Modernização da Usina.

Entretanto a Memória de Cálculo, não considerou os efeitos deletérios que o incêndio de 30 /01/2019 poderiam ter causado nas estruturas (parede pilares e viga), conforme mencionado no item 2. Nesse caso a resistência do concreto poderia ter sido reduzida a valor inferior a $F_{ck} < 19 \text{ Mpa}$, inviabilizando o emprego da ponte rolante, no trecho da viga correspondente à largura da baía do Transformador Elevador da UG 05..

Nesse caso seria necessário efetuar a análise estrutural da viga, parede e pilares para avaliar se a resistência residual (F_{ck}) do concreto velho dessas estruturas, após o incêndio, fosse, no mínimo, igual à do concreto velho de outros locais, não atingidos pelo incêndio.

TOP MASTER

ENGENHARIA

TOP MASTER ENGENHARIA S/C LTDA

4- Avaliação da resistência do concreto velho da viga de montante das pontes rolante no trecho correspondente à largura da baía do Transformador da UG 05.

A determinação da resistência característica à compressão do concreto, passados cerca de 45 anos do seu lançamento, pode ser determinada por dois processos:

- Método direto, ou destrutivo, através do rompimento, por compressão axial, de corpos de prova (CPs), retirados da estrutura em locais selecionados.
- Método indireto, ou não destrutivo, através da medição da velocidade de propagação das ondas longitudinais, por meio de pulsos ultrassônicos, através da viga de concreto.

4.1 – Método direto ou destrutivo.

Esse método consiste no rompimento de corpo de prova cilíndrico retirado da estrutura, seguido de ensaios de compressão axial em prensa universal com célula carga, devidamente calibrada. A norma NBR 5739 – Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos, estabelece os procedimentos que deverão ser obedecidos no rompimento dos corpos de prova.

Os corpos de prova, retirados da estrutura, não poderão conter nenhum pedaço do aço da armadura da estrutura. Para isso é necessário identificar a posição das barras no interior do concreto e demarcar o ponto onde será posicionado o equipamento de extração para evitar a interceptação da onda ultrassônica com as barras da armadura do concreto

A identificação da posição das barras da armação no interior do concreto pode ser efetuada com o pacômetro.

Para concreto velho (concreto endurecido), o método direto, a extração de corpos de prova é o mais empregado para a determinação da resistência característica (F_{CK}), decorrido um período k (dias), após o lançamento do concreto.

No Método Indireto as medições das velocidades ultrassônicas podem ser efetuadas em corpos de prova ou diretamente na estrutura, Este é menos empregado, principalmente em concreto com alta taxa de armadura dada a dificuldade de mapear as barras com o pacômetro.

Nas obras, os corpos de prova são moldados nas frentes de lançamento, obedecendo às diretrizes estabelecidas na NBR 5738 – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. O rompimento de vários corpos de prova (amostragem), para uma dada idade (k), possibilita a determinação da resistência característica à compressão (F_{ck}) e sua avaliação em relação à estabelecida no projeto executivo da estrutura.

A resistência característica à compressão pode ser determinada de acordo com a NBR 5739 e avaliação com o emprego da Estatística, quando se dispuser de grandes amostras

No caso de pequenas amostras o tratamento estatístico pode ser feito com o emprego da NBR 12655 e o F_{ck} pode ser determinado pela equação:

$$F_{ck} = 2 \frac{F_1 + F_2 + \dots + F_{m-1}}{m - 1} - F_m \quad (1) \quad \text{onde}$$

$m = n/2$, desprezando-se o valor mais alto de n , se n for ímpar

n = quantidade de corpos de prova (CP_s) extraídos da estrutura

$F_1, F_2, F_3, \dots, F_m$ São os valores das resistências dos corpos de prova extraídos, em ordem crescente

4.2 – Método indireto ou não destrutivo (ultrassom).

A determinação da resistência característica do concreto (F_{CK}), decorrido um determinado tempo do seu lançamento (k dias) pode ser efetuada medindo-se a velocidade de propagação da onda ultrassônica no concreto, diretamente na estrutura ou em corpos de prova dela retirados em locais isentos de armadura.

De acordo com a NBR 8802- 2013, o ensaio de ultrassom é um método de avaliação qualitativa do concreto. Suas principais aplicações são de analisar a homogeneidade do concreto, detectar falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras anomalias.

Pela norma, a velocidade de propagação da onda ultrassônica é dada por:

$$V^2 = \frac{E_d(1-\mu)}{\gamma(1+\mu)(1-2\mu)} \quad \text{sendo}$$

V = velocidade de propagação do som no concreto (km/s).

γ = densidade do concreto.

μ = coeficiente de Poisson (para o concreto $\mu = 0,20$).

E_d = módulo de elasticidade **dinâmico** do concreto (Mpa)

Logo para $\mu = 0,2$ tem-se:

$$E_d = 0,9 \gamma V^2 \quad (1)$$

A NBR 6118, item 8.2.8, permite o cálculo do módulo de elasticidade **estático** do concreto pela expressão:

$$E_e = 5600 \sqrt{F_{ck}} \quad \text{onde:}$$

E_e = módulo de elasticidade **estático** do concreto (Mpa)

F_{CK} = resistência característica do concreto à compressão na idade k (dias), em Mpa.

Logo tem-se :

$$F_{ck} = \left[\frac{E_a}{5600} \right]^2 \quad (2)$$

Para concretos médios, $20 < F_{ck} < 40$ (Mpa), a relação entre o modulo de elasticidade **estático** e o módulo de elasticidade **dinâmico** é dado por

$$E_a = 0,70 E_d \quad (3)$$

Das equações 1, 2 e 3 resulta:

$$F_{ck} = \left[\frac{0,63\gamma V^2}{5600} \right]^2$$

Peso específico do concreto sem armação : $\gamma = 2400 \text{ kg/m}^3$. Logo:

$$F_{ck} = \left[\frac{0,63 \times 2400 \times V^2}{5600} \right]^2$$

$$F_{ck} = 0.073 V^4 \quad (4) \quad \text{onde/}$$

F_{ck} = resistência característica do concreto velho em **Mpa**

V = velocidade de propagação de onda ultrassônica pelo concreto em **m/s**

A equação (4) permite a determinação da resistência característica do concreto da viga das pontes rolantes, no trecho da baía do Transformador da UG 05, atingido pelo incêndio em 30/01/2019, medindo-se a velocidade de propagação da onda ultrassônica pelo concreto, decorrido um determinado período do seu lançamento (k dias)

5- Determinação da resistência característica do concreto das estruturas de suporte das pontes rolantes, no trecho atingido pelo incêndio de 30/01/2019.

5.1 – Pelo MÉTODO DIRETO (DESTRUTIVO) – Ensaio de compressão axial em corpos de prova.

Foram extraídos 7 (sete) corpos de prova cilíndricos, em locais pré-determinados, nas estruturas de sustentação das pontes rolantes (paredes, pilares e vigas), no trecho da baía do transformador atingido pelo incêndio.

Esses corpos de prova, designados por CP1 a CP 7, foram submetidos a ensaios de compressão axial, obtendo-se os seguintes valores de resistência (F_{cj})

CP N° Resist à compressão (Mpa)

1	34,3
2	29,5
3	44,8
4	73,5
5	38,2
6	31,6
7	35,6

A amostra é muito pequena (7 elementos). Nesse caso o tratamento estatístico deve ser de acordo com a NBR 12655.(ver item 4.1)

Resistências à compressão na ordem crescente:

N°	CP	Resistência à compressão (MPa)
F1	2	29,5
F2	6	31,6

TOP MASTER

ENGENHARIA

TOP MASTER ENGENHARIA S/C LTDA

F3	1	34,3
F	CP	Resistência à compressão (Mpa)
F4	7	35,6
F5	5	38,2
F6	3	44,8
F7	4	73,5

$$F_{ck} = 2 \frac{F_1 + F_2 + \dots + F_{m-1}}{m-1} - F_m$$

$$m = 7 - 1/2 = 3 \quad m-1 = 2$$

$$F_1 = 29,5 ; F_{m-1} = F_2 = 31,6 ; F_m = F_3 = 34,3$$

$$F_{ck} = 2 \frac{29,5 + 31,6}{2} - 34,3 = 26,8 \quad (\text{Mpa})$$

Resistência característica do concreto das estruturas suporte das vigas das pontes rolantes em maio de 2024 (decorridos aproximadamente 24 anos do lançamento):

$$F_{ck} = 27,0 \text{ MPa}$$

Considerando que o valor do F_{ck} do concreto das estruturas, lançado na década de 1970 e projetado para 2022, na reclassificação das pontes rolantes, foi de 19 Mpa, observou-se aumento de 42% na resistência do concreto em relação ao valor adotado nos estudos para reclassificação da ponte. Caso o incêndio tivesse causado algum dano estrutural no concreto, era de se esperar valor de F_{ck} inferior a 19 Mpa, e consequentemente inferior aos 15 Mpa do o concreto na época do lançamento. Outra hipótese, que pode ser levantada, é que o concreto lançado na época da construção estaria com resistência maior que 15 Mpa, especificada para o projeto inicial. Essa dúvida só poderia ser dirimida se tivessem sido disponibilizados os Relatórios de Controle da Qualidade, emitidos na época do lançamento do concreto.

De acordo com as considerações apresentadas no relatório de reclassificação das pontes, conclui-se que, face ao resultado obtido nos estudos aqui apresentados, as pontes rolantes poderão içar cargas maiores que as 185 tf do projeto, desde que essas novas cargas atuantes não ultrapassem o valor da carga na viga de concreto do trilhamento com resistência compressão, inferior a 27 Mpa (270 kg/cm²).

5.2 – Pelo Método Indireto- Ensaios de propagação de ondas longitudinais por meio de pulsos ultrassônicos no concreto

Neste item será efetuada a contraprova (dupla checagem), calculando-se o valor do F_{ck} do concreto através da determinação da velocidade de propagação de ondas longitudinais por meio de pulsos ultrassônicos através dos elementos estruturais de sustentação das pontes rolantes (v. item 4.2).

No item 4.2 foi detalhado o procedimento para determinação da resistência característica do concreto duro

TOP MASTER

ENGENHARIA

TOP MASTER ENGENHARIA S/C LTDA

A medida da velocidade das ondas ultrassônicas pode ser efetuada colocando-se os transdutores de emissão e recepção dos pulsos ultrassônicos diretamente na estrutura de concreto ou em corpos de prova retirados dessas estruturas. No primeiro caso deve-se primeiro identificar a posição das barras da armadura do concreto com o pacômetro, para evitar que os transdutores sejam colocados em locais onde as ondas longitudinais possam interferir com barras de aço (corpo estranho), Caso haja essa interferência a velocidades medidas serão atenuadas.

A eq.4 do item 4.2 permite o cálculo do Fck de concreto de peso específico 2400,00 kg/m³, médio (20 < Fck < 40 Mpa), e módulo de elasticidade estático 30% inferior ao módulo de elasticidade dinâmico (v. NBR 15630 e NBR 618)

$$F_{ck} = 0,073 V^4 \quad (4) \quad \text{v. item 4.2}$$

Dos 7 (sete) corpos de prova extraídos das estruturas foram selecionados 4 (quatro) para serem submetidos a ensaios de ultrassom, obtendo os de velocidades mostradas abaixo.

CP	Velocidade (m/s)
01	4227
02	4130
03	4662
04	4563

V _M	4395

Velocidade mínima esperada:

Conforme mencionado, na reclassificação das pontes foi adotado o Fck = 19 Mpa como resistência característica para o concreto velho. Para esse valor a velocidade ultrassônica mínima esperada a, ser medida seria:

$$V_{\min} = \left(\frac{F_{ck}}{0,073} \right)^{1/4} = \left(\frac{19}{0,073} \right)^{1/4} = 4,0166 \text{ km/s}$$

$$V_{\min} = 4.017 \text{ m/s}$$

Todas as velocidade medidas nos 4 (quatro) corpos de prova extraídos das estruturas de concreto, em maio de 2024, foram superiores ao valor mínimo (V_m = 4.017 m/s) esperado. Considerando que o Fck do concreto aumenta com a velocidade ultrassônica (v. eq. 4), todos os valores do Fck calculados com as 4 (quatro) as velocidades serão superiores à velocidade ultrassônica exigida no projeto de reclassificação das pontes.

Tomando - se a média das velocidades ultrassônicas medidas nos corpos de prova, o Fck do concreto da viga da ponte rolante, na região da baía do Transformador da UG-05, atingida pelo incêndio será:

$$F_{ck} = 0,073 \cdot V^4 = 0,073 \times 4,395^4 = 27,24 \text{ Mpa.}$$

$$F_{CK} = 27 \text{ MPa .}$$

TOP MASTER

ENGENHARIA

TOP MASTER ENGENHARIA S/C LTDA

Valor idêntico ao determinado pelo Método Indireto , ruptura por compressão axial dos corpos de prova.

Essa dupla checagem leva à conclusão que não há erro sistemático nos dois processos utilizados para de medição do parâmetro e que a análise do valor obtido permite concluir que o incêndio no Transformador elevador da unidade geradora UG 05 não danificou as estrutura de concreto nessa região

A resistência característica do concreto avaliada é cerca de 42% superior à resistência estimada nos estudos de reclassificação das duas pontes rolantes.

6 – Considerações finais

6.1- O objetivo deste laudo técnico é apresentar os resultados dos estudos para avaliação da resistência residual do concreto das paredes corta-fogo, do Transformador elevador unidade geradora UG05 da UHE São Simão, da Spic Pacific Hydro, empresa chinesa que opera essa usina hidrelétrica desde 2017. As paredes corta-fogo foram alvo de incêndio com duração de aproximadamente três horas em 30/01/2019 .

6.2 – A parede do fundo da baia (parede de montante da Casa de Força) teve sua face externa exposta ao incêndio, que produziu deslocamentos do concreto de recobrimento da armadura. Sobre essa parede, em nível pouco acima das paredes laterais, foi construída a viga do trilhamento das pontes (2), rolantes da Casa de Força ,e engastada em três pilares no trecho corresponde à largura da baia . O concreto das faces externas, dessas estruturas , principalmente paredes e pilares, foi bastante danificado no incêndio. A viga, aparentemente, foi menos avariada pelas chamas.

6.3 – Cada ponte rolante tem capacidade nominal para içar e transladar cargas de até 185tf. Na fase da construção da usina as duas pontes operaram com carga máxima de 300 tf (rotor do gerador).

6.4 – Na modernização da usina o projeto previu o içamento e transporte de equipamentos com peso maior que o da capacidade das duas pontes acopladas. Neste caso não seria suficiente efetuar apenas os reparos do concreto na parte externa do concreto atingido pelo incêndio realizado, com argamassa de grande desempenho, em 2019, após inspeção visual.

6.5 – Para o emprego das pontes rolantes com carga maiores que a do projeto executivo original, seria necessário reclassificar esse equipamento, começando pela avaliação estrutural do concreto da viga ponte rolante, no trecho da baia do Transformador, região (largura)atingida pelo incêndio, teoricamente local com menor resistência do concreto, após o incêndio, em relação às outras partes da viga.

6.6 – Para a determinação da resistência característica residual mínima do concreto em 2022 foi efetuado estudo estatístico, projetando o valor adotado no projeto original da viga na década de 1970 (15 Mpa), obtendo-se 19 MPa, sem considerar os efeitos do incêndio no concreto, portanto um aumento de resistência de 27% nesse período.

6.7 - Para avaliar os efeito deletérios no concreto, provocados pelo incêndio, optou –se pela retirada de alguns corpos de prova do concreto das estruturas impactadas pelo incêndio, e submete-los ao ensaio de compressão axial (NBR 5739 – Método direto) e, desta forma determinar a resistência característica do concreto (F_{ck}), esta forma considerando os eventuais problemas decorrentes do incêndio.

TOP MASTER

ENGENHARIA

TOP MASTER ENGENHARIA S/C LTDA

O valor encontrado foi $F_{ck} = 27,0$ Mpa, 42% superior ao valor projetado para o concreto velho antes do incêndio ($F_{ck} = 19$ Mpa).

Logo se deduz que as vigas das pontes rolantes não foram impactadas pelo incêndio e que podem receber cargas superiores a 330 tf, desde que a resistência característica do concreto, para o novo carregamento, não seja inferior $F_{ck} = 27$ Mpa. Os carregamentos são diretamente proporcionais à resistência característica do concreto.

6.8 – Para a verificação de eventuais anomalias ou patologias no concreto, que podessem resultar em diminuição na resistência do concreto, foram selecionados 4(quatro)corpos de prova extraídos da estrutura e submetidos a ensaios de ultrassom. A propagação da velocidade das ondas de ultrassom não indicaram possíveis anomalias no interior do concreto. Quanto menor a velocidade longitudinal da onda em relação à velocidade mínima maior a probabilidade da ocorrência de anomalias(fissuras, falta de adensamento, nichos com segregação do concreto, etc).

A menor velocidade ultrassônica esperada para o concreto, antes do incêndio ($F_{ck} = 19$ Mpa), é de 4.017 m/s. As velocidades de propagação das ondas, medidas no 4 (quatro) corpos de prova, foram todas superiores a esse valor. Logo, sendo todos os valores das resistências calculadas, com as velocidades medidas, superiores à mínima exigida, implica que não ocorreram anomalias no concreto, decorrente do incêndio.

Calculando- se a resistência característica do concreto, após o incêndio, com o valor da média das 4 velocidades medidas (Método Indireto), obtem-se o valor da resistência residual do concreto, após o incêndio, **$F_{ck} = 27$ MPa**, idêntico ao encontrado com o Método Direto (rompimento dos corpos de prova).

Os valores idênticos para a resistência do concreto, submetido ao incêndio, determinados por dupla checagem (Metodo Direto e Método Indireto) levam à conclusão que não houve erro sistemático nos processos de medição e que os critérios de cálculo apresentam alto grau de confiança.

Andradina, 18 de novembro de 2024

Luiz Fernando Cândido de Souza
Engenheiro Civil
CREA 1203212704.