

**INCÊNDIO EM ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO INSPEÇÃO IN
LOCO E ANÁLISES TÉCNICAS PARA CARACTERIZAR DANOS E
SUBSIDIAR MEDIDAS DE REABILITAÇÃO**

AUTOR

Luís Henrique Poy

REALIZAÇÃO

TRABALHO DE PERÍCIA EM ACIDENTES

Incêndio em estrutura de concreto armado: inspeção *in loco* e análises técnicas para caracterizar danos e subsidiar medidas de reabilitação

RESUMO

Trata-se de uma perícia extra judicial em estrutura de concreto armado moldado *in loco* que durante a execução fora atingida por incêndio, havendo combustão de formas, escoras, andaimes e outros elementos em madeira, presentes na área em análise. Sabido que a ação do fogo é potencialmente danosa ao concreto armado, seja pela alteração das propriedades/ redução das resistências mecânicas do aço ou do próprio concreto e visando subsidiar a mensuração destes danos e a definição de eventuais medidas de reabilitação necessárias, este trabalho teve por finalidade a avaliação do grau de sanidade do concreto, através da verificação do pH de testemunhos extraídos em locais diversos, analisados à luz da documentação técnica disponível e do referencial teórico adotado. Ao final restou a concluir que os danos foram de pequena monta e não comprometeram sensivelmente as propriedades do concreto armado, seja em termos de resistência ou durabilidade, dispensando a adoção de medidas de reabilitação mais complexas e onerosas.

Palavras-chave: Perícia, incêndio, concreto armado, danos.

ABSTRACT

This is a extra judicial expertise of a reinforced concrete structure that was affected by a fire during its construction. The fire resulted in the combustion of wooden forms, scaffolding, and other wooden elements present in the analyzed area. It is known that fire can potentially damage reinforced concrete by altering the properties and reducing the mechanical strength of the steel or the concrete itself. The purpose of this study was to assess the degree of soundness of the concrete by examining the pH of extracted samples taken from various locations and analyzing them based on technical documentation and on the adopted theoretical framework. In conclusion, the damages were minor and did not significantly compromise the properties of the reinforced concrete in terms of strength or durability. Therefore, more complex and costly rehabilitation measures are not required.

Keywords: Expertise, fire, reinforced concrete, damages.

1. INTRODUÇÃO

Em análise os efeitos de incêndio em uma estrutura em concreto armado moldado *in loco* (do tipo fosso/ porão), ainda em fase de execução e com profundidade de aprox. 6,5m em relação ao nível do piso interno da fábrica.

Tal estrutura dará suporte à denominada “cadeira zero”, um importante equipamento de produção, a ser posteriormente instalado, razão do rigor técnico demandado em relação à apuração e extensão dos danos havidos.

Em face do sinistro ocorrido, há dúvidas quanto ao comprometimento das resistências e redução da durabilidade da estrutura, o que demanda ensaios e testes de caracterização que embasarão uma posterior retro análise estrutural, visando definir eventuais medidas de reabilitação a serem implementadas.

Especificamente a este trabalho coube analisar as alterações sofridas, a partir da extração de testemunhos em vários pontos da estrutura, através de inspeção visual *in loco* e verificação do pH do concreto pós incêndio, estabelecendo conclusões segundo o referencial teórico apresentado.

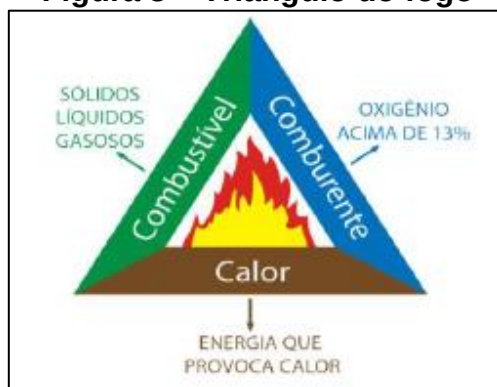
2. REFERENCIAL TEÓRICO

A ação do fogo sobre as estruturas de concreto armado pode gerar danos importantes, relacionados tanto à perda de resistência mecânica de seus componentes (aço e concreto) quanto ao comprometimento da vida útil desejada (por exemplo, dada corrosão precoce do aço, por desp passivação).

Sendo assim, sempre que o concreto for exposto à ação do fogo torna-se recomendável que sejam procedidos ensaios e testes de caracterização visando estabelecer o nível de dano presente, de modo a subsidiar a necessária retro análise estrutural para definição de eventuais intervenções necessárias, em atendimento ao que estabelece a norma técnica ABNT NBR 15200: *Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio*.

A figura 3, a seguir, representa os elementos básicos necessários para que ocorra um incêndio, os quais compõe o chamado “triângulo do fogo” (ou tetraedro, se considerada a reação em cadeia).

Figura 3 – Triângulo do fogo



Fonte: Simiano e Baumerl (2013) *apud* Santana (2019)¹

Dos três elementos acima representados, tem-se que o comburente é o que responde pela chamada “carga de incêndio”, sendo determinante quanto à duração, intensidade e temperatura atingidos. O quadro 1, a seguir, apresenta cargas de incêndio típicas, que podem ser assim classificadas:

- Risco leve – Carga de Incêndio de até 300MJ/m²;
- Risco Moderado – Carga de incêndio entre 300 e 1.200 MJ/m²;
- Risco Elevado – Carga de Incêndio acima de 1.200 MJ/m².

¹ SANTANA, Roberto Rosa de. Ranking de criticidade das manifestações patológicas de uma edificação submetida à ação de incêndio: um estudo de caso de Brasília. TCC, IESB, 2019.

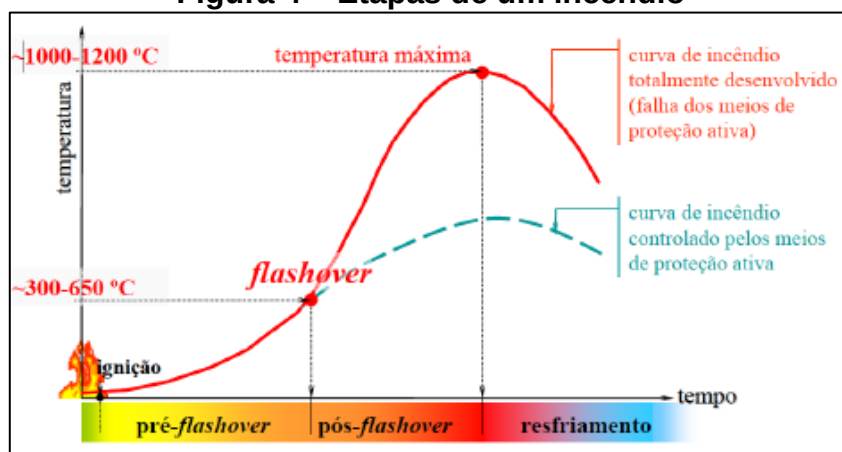
Quadro 1 – Cargas de incêndio

OCUPAÇÃO/USO	DESCRIÇÃO	CARGA EM MJ/m ²
Residencial	Apartamentos, Casas etc.	300
Serviços de hospedagem	Hotéis, Motéis	500
Comercial varejista	Aparelhos domésticos	300
	Calçados	500
	Livrarias	1000
	Lojas de departamento	600
	Verduras	1000
Serviços profissionais, pessoais e técnicos	Bancos	300
	Escritórios	700
Educacional e cultura física	Academias, Escolas	300
Locais de reunião de público	Bibliotecas	2000
	Restaurantes	300
	Cinemas	600
Serviços automotivos	Oficinas	300
Serviços de saúde e institucionais	Hospitais	300
Industrial	Plásticos	1000
	Vidros	700
	Caixotes, barris	1000
	Cereais	1700
	Espumas, Resinas	3000
	Tintas e solventes	4000
	Pneus	700
	Tratamento de madeira	3000

Fonte: Fernandes (2010) *apud* Santana (2019)¹

Importante entender a dinâmica do incêndio, como registrado na Figura 4, a seguir.

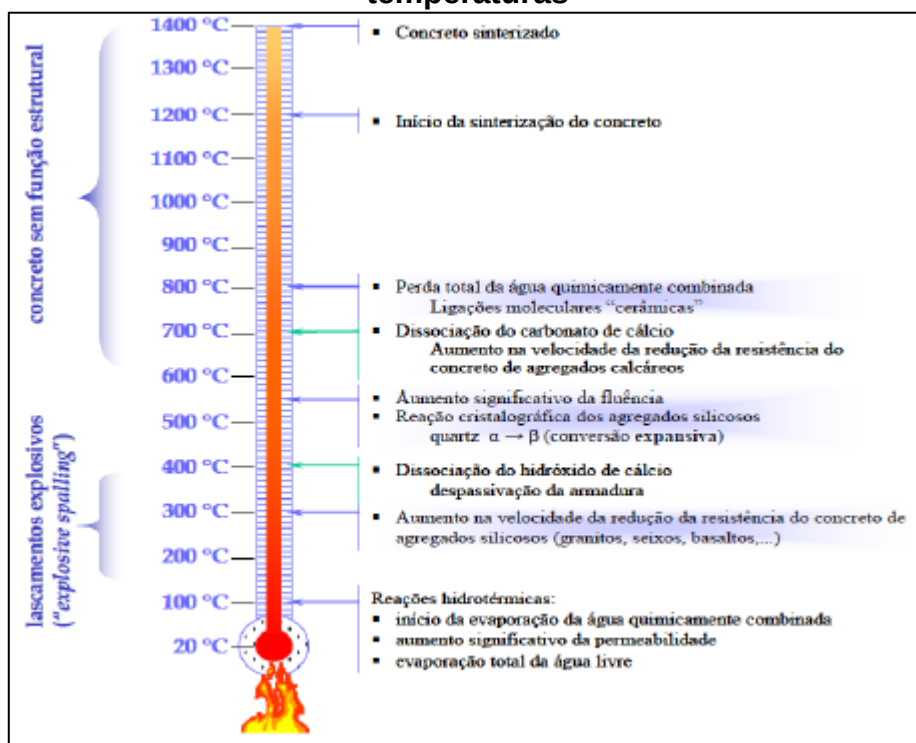
Figura 4 – Etapas de um incêndio



Fonte: Costa (2008) *apud* Santana (2019)¹

Já a partir dos 100°C o concreto começa a sofrer alterações físico-químicas importantes que comprometem suas propriedades, como representado na figura 5, a seguir.

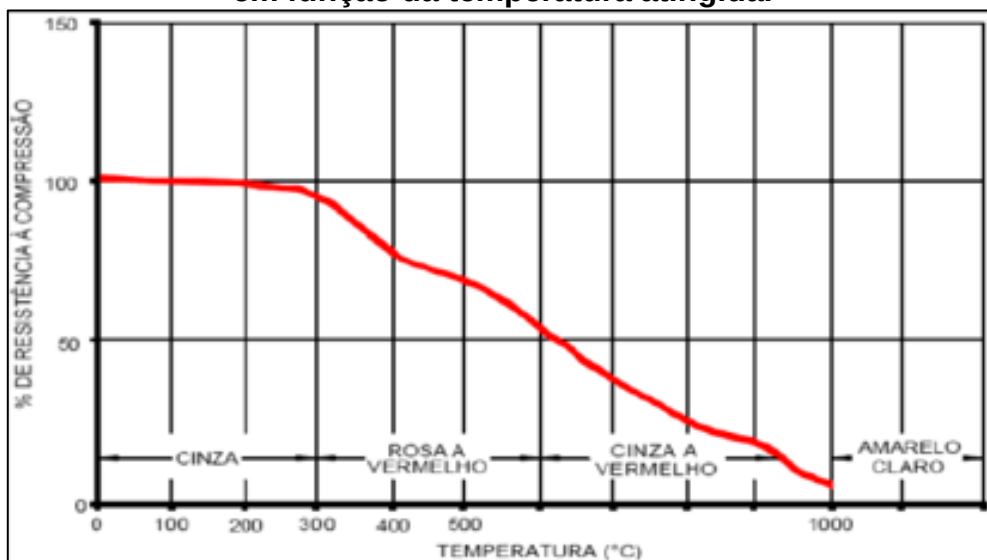
Figura 5 – Transformações físico-químicas do concreto exposto a altas temperaturas



Fonte: Costa (2008) *apud* Santana (2019)¹

Complementando o anteriormente discorrido, a figura 6, a seguir, exprime a variação de resistência à compressão do concreto em função da temperatura atingida.

Figura 6 – Variação da resistência à compressão e coloração do concreto, em função da temperatura atingida.



Fonte: Canovas (1988)²

A temperatura atingida durante o incêndio e a velocidade com que ocorreu o resfriamento influenciam diretamente no valor da resistência mecânica do concreto (com reduções da ordem de 10%), podendo surgir deformações e fissuras excessivas (Silva (2011) *apud* Santana (2019)).

Outrossim, as elevadas temperaturas promovem processo acelerado de carbonatação (pelas altas concentrações de dióxido de carbono - CO₂) e promove calcinação (transformação do calcário em óxido de cálcio, com queda na resistência mecânica), reduzindo a performance e a durabilidade do concreto.

Vários são os mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado e dentre estes, destaque especial merecerá a carbonatação, objeto de análise no presente trabalho técnico.

O quadro 2, a seguir apresentado, ilustra os principais mecanismos de deterioração do concreto.

² FERNANDEZ CÁNOVAS, Manuel. Patologia e terapia do concreto armado. Coordenação técnica L.A.Falcão Bauer. Tradução de M. Celeste Marcondes, Carlos Wagner F. dos Santos, Beatriz Cannabrava. São Paulo; Pini, 1998.

Quadro 2 – Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado

Agressividade do ambiente		Consequências sobre a estrutura	
Natureza do processo	Condições particulares	Alterações iniciais na superfície do concreto	Efeitos a longo prazo
Carbonatação	UR 60% a 85%	Imperceptível	Redução do pH, corrosão de armaduras, fissuração superficial
Lixiviação	Atmosfera ácida, águas puras	Eflorescências, manchas brancas	Redução do pH, corrosão de armaduras, desagregação superficial
Retração	Umedecimento e secagem, ausência de cura, UR baixa (<50%)	Fissuras	Fissuração, corrosão de armaduras
Fuligem	Partículas ácidas em suspensão na atmosfera urbana e industrial	Manchas escuras por deposição sobre a estrutura	Redução do pH, corrosão de armaduras
Fungos e mofo	Colônias ácidas em temperaturas (>20°C e <50°C) com UR >75%	Manchas escuras e esverdeadas	Redução do pH, desagregação superficial, corrosão de armaduras
Concentração salina, Cl ⁻	Atmosfera marinha e industrial	Imperceptível	Despassivação e corrosão de armaduras
Sulfatos	Esgoto e águas servidas	Fissuras	Expansão-fissuras, desagregação do concreto, corrosão de armaduras
Álcali-agregado	Composição do concreto, agregados reativos, umidade, UR>95%	Fissuras, gel ao redor do agregado gráúdo	Expansão-fissuras, desagregação do concreto, corrosão de armaduras

Fonte: adaptado de Tomazelli e Helene (2017)³

A carbonatação é um fenômeno natural que se dá ao longo do tempo, através da penetração do dióxido de carbono presente no ar (CO₂), a partir da superfície e para o interior do elemento (pilare, viga ou laje).

O avanço do CO₂ (tecnicamente denominado frente de carbonatação) promove a redução do pH do concreto e reduz/ elimina a camada passivadora que protege o aço, gerando condições propícias à instalação de processo de corrosão das armaduras.

É sabido que o alcance e a velocidade da carbonatação dependem fundamentalmente de alguns fatores, sendo particularmente importantes:

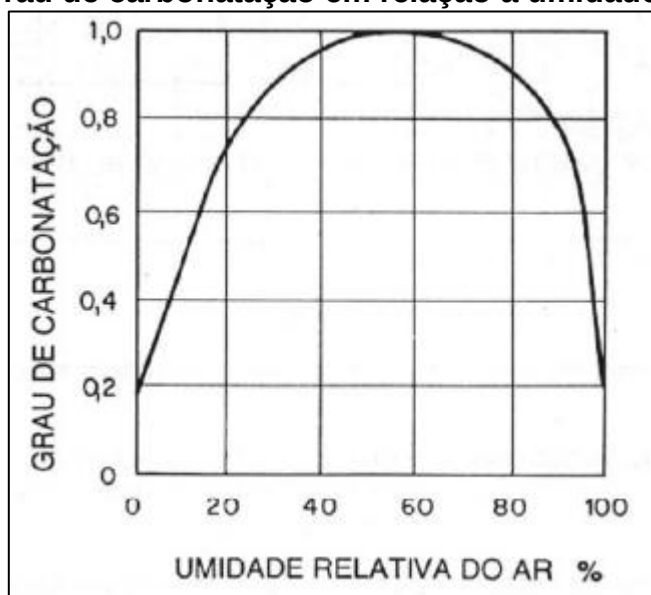
³ TOMAZELI, Alexandre e HELENE, Paulo. Diretrizes para inspeção, análise e aceitação de concreto em estruturas de edifícios habitacionais com obras paralisadas. CONPAR 2017 – Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas. Recife-PE, 2017.

a) A concentração de CO_2 , presente no ar: que pode variar de 0,03 a 0,05% (atmosferas rurais) podendo atingir valores entre 1,2% (loais de tráfego pesado) a 1,8% (ambientes viciados, tais como silos e outros) (HELENE, 1986)⁴;

b) A porosidade do concreto, que depende fundamentalmente da baixa relação água/ cimento (a/c, que se reflete diretamente no fck) e da boa execução (compacidade e cura);

c) A umidade relativa do ar, sendo que existe uma faixa onde o fenômeno se intensifica, como expressa o gráfico 1, a seguir apresentado:

Gráfico 1 – Grau de carbonatação em relação à umidade relativa do ar



Fonte: Cánovas (1988)²

Vários pesquisadores ao redor do mundo estudaram o fenômeno da carbonatação, tendo sido elaborados diversos modelos de previsão que permitem estimar o seu alcance, ao longo do tempo e a depender dos fatores anteriormente elencados.

⁴ HELENE, Paulo R.. Corrosão em armaduras de concreto armado. São Paulo: Pini: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986.

Dentre estes vários modelos, tem-se o desenvolvido por Helene (1997) *apud* Carmona (2005)⁵, que a seguir se reproduz:

$$e = k_{CO_2} \sqrt{t}$$

Onde:

e = espessura carbonatada (mm)
k_{co2} = Coeficiente de carbonatação (mm/ano^{1/2})
t = tempo transcorrido (em anos)

Sendo:

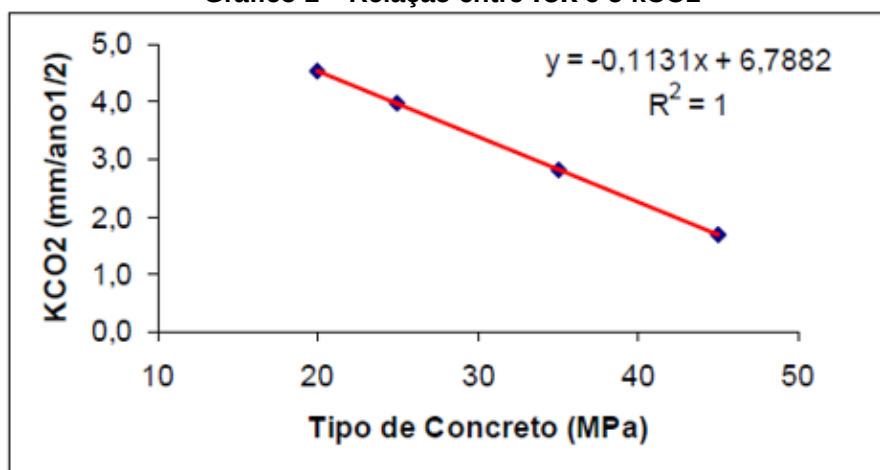
$$k_{CO_2} = (6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck}) \cdot \frac{\sqrt{C_s}}{\sqrt{0,1}}$$

C_s = Concentração ambiente de CO₂ (% em volume)

(*) *NOTA: Para cimento AF e POZ, multiplicar o k_{co2} por 1,2 e 1,1 (respectivamente).*

O gráfico 02, a seguir, representa a relação entre o fck e o k_{co2}.

Gráfico 2 – Relação entre fck e o kCO2



Fonte: Helene (1997) *apud* Carmona (2005)⁵

⁵ CARMONA, Thomas Garcia. Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação. Dissertação. USP, 2005.

3. INSPEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

A inspeção se deu no dia 15/12/22 quando se procedeu a vistoria da região de interesse. Nos locais indicados (L2, L4, L5 e L6) foram extraídos novos testemunhos do concreto e imediatamente realizada a aplicação de indicador químico (fenolftaleína a 1%).

Tal indicador permite identificar visualmente as regiões onde o concreto sofreu redução de pH e, conseqüentemente, determinar o avanço da chamada frente de carbonatação.

A figura 7, a seguir, indica o comportamento típico da fenolftaleína.

Figura 7 – Comportamento típico do indicador fenolftaleína.

Fenolftaleína (indicador de pH)		
pH abaixo de 8	pH entre 8,0 e 10,0	pH entre 10,0 e 12,0
Ácido	Neutro	Base
incolor	⇌ rosa	⇌ carmim ou roxo

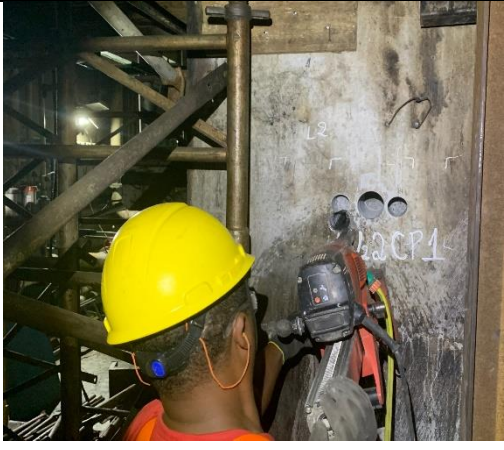
Fonte: Wikipedia (2022)⁶

3.1 Situação observada

As imagens apresentadas, na figura 8, a seguir, ilustram e registram os principais e mais relevantes aspectos observados *in loco*.

⁶ Acessível em www.wikipedia.org

Figura 8 - Aspectos observados *in loco*.

A – L2. Extração de testemunho	B – L2. Mensuração de testemunho recém extraído (10cm – L2CP1)
	
C – L2. Aplicação de indicador químico (fenolftaleína a 1% - L2CP1)	D – L2. Observar coloração carmim, ao longo de toda extensão (L2CP1, pH >10)
	

F – L2. Processo de eliminação de detritos (LPCP2 – testemunho extraído anteriormente)



G – L2. Aplicação de indicador químico (fenolftaleína a 1% - L2CP2, testemunho extraído anteriormente)



H – L2. Observar coloração rosacarmim (pH > 10 - L2CP2, testemunho extraído anteriormente)



I – L4. Extração de novo testemunho



J – L4. Limpeza do testemunho (L4CP1)	K – L4. Aplicação de indicador químico (fenolftaleína a 1% - L4CP1)
	
L – L4. Mensuração da Frente de Carbonatação (aprox. 30mm) (L4CP1)	M – L4. Mensuração da Frente de Carbonatação (aprox. 30mm) (L4CP1)
	

N – L4. Limpeza do testemunho (L4CP1*)



O – L4. Aplicação de indicador químico (fenolftaleína a 1% - L4CP1*)



P – L4. Mensuração da Frente de Carbonatação (aprox. 25mm – L4CP1*)



Q – Mensuração da Frente de Carbonatação (aprox. 25mm – L4CP1*)



R – L5. Extração de novo testemunho



S – L5. Limpeza do testemunho (L5CP1)



T – L5. Aplicação de indicador químico (fenolftaleína a 1% - L5CP1)



U – L5. Observar coloração carmim, ao longo de toda extensão (pH > 10, L5CP1)



V – L6. Extração de novo testemunho (L6CP1)	X – L6. Observar aspecto carmim, uniforme ao longo de toda extensão (pH > 10 - L6CP1)
	
W – L6. Observar aspecto carmim, uniforme ao longo de toda extensão (pH > 10 - L6CP1)	Y – L6. Observar aspecto carmim, uniforme ao longo de toda extensão (pH > 10 - L6CP1)
	

Fonte: O Autor.

3.2 Documentação técnica disponibilizada e analisada

Foram analisados os ensaios de compressão axial realizados pelo Laboratório, relativamente aos testemunhos anteriormente extraídos, quais se encontram a seguir reproduzidos, restando grifadas as resistências mecânicas obtidas:

Quadro 03 – Resultado das rupturas dos testemunhos extraídos

Nº Amostra	Diâmetro	Altura	Data Extração	Data Ruptura	Resistência Encontrada (fci, ext, inicial)	Coeficientes de correção				Resistênc. Corrigida (fci, ext)	Observações
						k1	k2	k3	k4		
L2 CP1	54,0 mm	149,0 mm	13/12/22	14/12/22	37,76 MPa	0	0,115	0,05	-0,04	42,49 MPa	
L2 CP2	54,8 mm	134,9 mm	13/12/22	14/12/22	37,16 MPa	0	0,114	0,05	-0,04	41,78 MPa	
L4 CP1	54,9 mm	149,5 mm	13/12/22	14/12/22	57,48 MPa	0	0,114	0,05	-0,04	64,62 MPa	
L4 CP1	54,3 mm	144,6 mm	13/12/22	14/12/22	41,05 MPa	0	0,115	0,05	-0,04	46,18 MPa	
L4 CP2	54,5 mm	149,4 mm	13/12/22	14/12/22	38,79 MPa	0	0,115	0,05	-0,04	43,63 MPa	P1 superfície
L4 CP2	55,2 mm	148,1 mm	13/12/22	14/12/22	44,51 MPa	0	0,114	0,05	-0,04	50,02 MPa	P2 fundo
L6 CP1	53,8 mm	150,4 mm	13/12/22	14/12/22	32,76 MPa	0	0,115	0,00	-0,04	35,23 MPa	Teto - concreto aplicado no dia 18/11
L6 CP1	54,2 mm	148,1 mm	13/12/22	14/12/22	32,13 MPa	0	0,115	0,00	-0,04	34,54 MPa	Teto - concreto aplicado no dia 18/11
L6 CP2	54,3 mm	147,6 mm	13/12/22	14/12/22	27,74 MPa	0	0,115	0,00	-0,04	29,81 MPa	Teto - concreto aplicado no dia 18/11
L6 CP2	54,6 mm	149,8 mm	13/12/22	14/12/22	26,52 MPa	0	0,115	0,00	-0,04	28,50 MPa	Teto - concreto aplicado no dia 18/11

Fonte: reproduzido e adaptado de Laboratório (2022)

Quadro 04 – Resultado das rupturas dos testemunhos extraídos

Nº Amostra	Diâmetro	Altura	Data Extração	Data Ruptura	Resistência Encontrada (fci, ext, inicial)	Coeficientes de correção				Resistênc. Corrigida (fci, ext)	Observações
						k1	k2	k3	k4		
L1-1	72,9 mm	154,3 mm	30/11/22	02/12/22	24,08 MPa	0	0,093	0,05	-0,04	26,55 MPa	Ferragem na amostra
L1-2	73,3 mm	154,8 mm	30/11/22	02/12/22	39,86 MPa	0	0,092	0,05	-0,04	43,93 MPa	
L2-2	73,1 mm	166,6 mm	30/11/22	02/12/22	30,00 MPa	0	0,092	0,05	-0,04	33,06 MPa	
L2-2	73,4 mm	155,2 mm	30/11/22	02/12/22	23,17 MPa	0	0,092	0,05	-0,04	25,53 MPa	Ferragem na amostra
L3-1	72,7 mm	150,5 mm	30/11/22	02/12/22	31,51 MPa	0	0,093	0,05	-0,04	34,75 MPa	
L4-3	72,3 mm	109,3 mm	30/11/22	02/12/22	25,03 MPa	-0,039	0,093	0,05	-0,04	26,63 MPa	Ferragem na amostra
L5-2	72,7 mm	159,8 mm	30/11/22	02/12/22	25,04 MPa	0	0,093	0,05	-0,04	27,61 MPa	
L5-3	72,3 mm	157,5 mm	08/12/22	12/12/22	28,16 MPa	0	0,093	0,05	-0,04	31,06 MPa	Ferragem na amostra
L6-2	72,4 mm	165,2 mm	30/11/22	02/12/22	20,58 MPa	0	0,093	0,00	-0,04	21,67 MPa	
L7-2	73,1 mm	162,8 mm	30/11/22	02/12/22	45,31 MPa	0	0,092	0,00	-0,04	47,68 MPa	
L7-2	73,5 mm	152,0 mm	30/11/22	02/12/22	38,69 MPa	0	0,092	0,00	-0,04	40,69 MPa	
L8-1	72,3 mm	154,4 mm	08/12/22	12/12/22	35,97 MPa	0	0,093	0,05	-0,04	39,69 MPa	

Fonte: reproduzido e adaptado de Laboratório (2022)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizadas todas as observações e análises relatadas, tem-se a concluir que:

a) Os testemunhos recém extraídos e analisados no presente trabalho se apresentaram com boa reserva alcalina ($\text{pH} > 10$), o que indica que a frente de carbonatação ainda é incipiente, tendo o concreto apresentado pH satisfatório, com exceção dos testemunhos L4 (cp1 e cp1*), até uma profundidade de cerca de 30mm, conforme demonstra a figura 9, esta última, a seguir apresentada:

Figura 9 – identificação dos testemunhos analisados, pós aplicação de indicador químico (fenolftaleína a 1%)



Fonte: o autor (2022)

b) Ainda que os testemunhos L4 (cp1 e cp1*) tenham sido atingidos pela frente de carbonatação até uma profundidade de cerca de 30mm, tem-se que grande parte senão a totalidade deste valor se deva à carbonatação natural do concreto, estimada em valor superior que 30 mm, por uso de modelo de predição (vide 2. Referencial teórico, retro apresentado) e em se considerando os seguintes parâmetros:

- $f_{ck} = 25\text{mpa}$ (dado de projeto)
- $T = 20$ anos (concretagem no ano de 2002)
- C_s (concentração de CO_2) $> 0,3\%$ (ambiente confinado/ industrial)

c) Em análise visual *in loco* se pode perceber o bom aspecto superficial do concreto nas regiões analisadas (L2, L4, L5 e L6), sem alterações de coloração, fissuras ou lascamentos;

d) Finalizando, diante de todo o decorrido e contemporizando os resultados de pH obtidos, o bom aspecto superficial do concreto e as resistências aferidas no ensaio de ruptura à compressão (vide Quadro 03 e Quadro 04, retro apresentados) resta concluir que o concreto não sofreu alterações importantes e significativas relacionadas ao incêndio ocorrido, apresentando nível baixo de dano, o que dispensaria a adoção de medidas de reabilitação mais complexas e onerosas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13752 – Perícias de engenharia na construção civil**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996;

_____, **NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012;

CARMONA, Thomas Garcia. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**. Dissertação. USP, 2005;

FERNANDEZ CÁNOVAS, Manuel. **Patologia e terapia do concreto armado**. Coordenação técnica L.A.Falcão Bauer. Tradução de M. Celeste Marcondes, Carlos Wagner F. dos Santos, Beatriz Cannabrava. São Paulo; Pini, 1998;

HELENE, Paulo R. **Corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo: Pini: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986;

SANTANA, Roberto Rosa de. **Ranking de criticidade das manifestações patológicas de uma edificação submetida à ação de incêndio: um estudo de caso de Brasília**. TCC, IESB, 2019;

TOMAZELI, Alexandre e HELENE, Paulo. **Diretrizes para inspeção, análise e aceitação de concreto em estruturas de edifícios habitacionais com obras paralisadas**. CONPAR 2017 – Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas. Recife-PE, 2017.