Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

ANÁLISE DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE UMA EDIFICAÇÃO DE 28 ANOS NÃO CONCLUÍDA NA CIDADE DE PATOS DE MINAS - MG

T. ARAÚJO
Estudante
Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM)
Minas Gerais; Brasil
tayrinne_eng_civil@live.com

S. VIEIRA
Estudante
Universidade de Brasília (UnB)
Minas Gerais; Brasil
sheilapv@unipam.edu.br

T. RIBEIRO
Professor
Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM)
Minas Gerais; Brasil
thiagoribeiro@unipam.edu.br

RESUMO

Fatores como durabilidade e desempenho deve ser a linha guia na concepção de quaisquer edificações, pois a maioria das manifestações patológicas que acometem as construções está relacionada às etapas construtivas, desde a elaboração do projeto até a plena utilização da estrutura, influenciando drasticamente o tempo de vida útil do sistema. A presente pesquisa tem como principal objetivo diagnosticar as manifestações patológicas das estruturas de concreto armado correntes no meio urbano, através de um estudo de caso. As inspeções foram realizadas em uma edificação anônima não concluída localizada na cidade de Patos de Minas (MG), com idade estimada de 28 anos. Foi realizado o diagnóstico das principais manifestações patológicas e prognóstico do sistema analisado. Usou-se de inspeções em campo – visuais e detalhadas – e ensaios em laboratório, como: ultrassom, pacometria, esclerometria, resistência à compressão direta, resistência à compressão diametral, absorção capilar e carbonatação por fenolftaleína. As manifestações patológicas encontradas na estrutura de concreto analisada foram fissuração, desplacamento, carbonatação e corrosão das armaduras. O índice esclerométrico e velocidade do pulso ultrassônico obtidos foram relativamente altos (rebote em torno de 58 e velocidade de 4000 m/s), devido à carbonatação avançada (com frente média de 30 mm). Já absorção capilar encontrada em laboratório foi altíssima (no intervalo de 6.105,17 a 30.181,64 g/m²). Devido ao elevado grau de deterioração da estrutura, medidas corretivas ou de recuperação não são aplicáveis.
Palavras-chave: manifestações patológicas, ensaios não destrutivos, estruturas de concreto.

ABSTRACT

Factors such as durability and performance must be the guideline in the design of any building, since most of the pathological manifestations that affect the buildings is associated with construction stages, from project design to use of the structure, severely influencing the useful life of structure. This work aims to diagnose the pathological manifestations of the current reinforced concrete structures in the urban environment, through a case study. The inspections were carried out in an anonymous non-completed building in Patos de Minas (MG), with an estimated age of 28 years. It was carried out the diagnosis of the main pathological manifestations and prognosis of the analyzed system. It used to inspections in the field - visual and detailed - and laboratory tests, such as measurement of propagation velocity of ultrasonic waves, reinforcement locate (scan), rebound hammer test, compressive strength test, Brazilian disk test, capillary water absorption test and carbonation depth measurement test. The pathological manifestations found in the concrete structure analyzed were cracking, peeling, carbonation and reinforcement corrosion. The value of rebound and ultrasonic pulse velocity obtained were relatively high (around 58 rebound and velocity of 4000 m/s), due to advanced carbonation (average across 30 mm). Already water absorption by capillarity found in the laboratory was high too (in the range from 6105.17 to 30181.64 g/m²). Due to the high degree of deterioration, corrective or recovery measures are not applicable.
Keywords: pathological manifestations, nondestructive method, concrete structures.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações ao se projetar estruturas de concreto armado é a durabilidade, e, consequentemente, a vida útil que estas virão a ter. Apesar do controle tecnológico exigido e empregado nos processos de dosagem, lançamento e cura do material, ainda sim há possibilidade de ocorrer deterioração prematura do sistema, devido à ação ambiental, condições de uso não previstas em projeto; além de ocorrências excepcionais, como acidentes, colapsos estruturais devido a recalques provocados por construções vizinhas, entre outros [1].

Geralmente, espera-se que as estruturas atendam as incumbências que as foram destinadas, jamais desconsiderando a segurança e a economia, além do desempenho do sistema aos seus usuários. Contudo, diversos fatores podem influenciar principalmente a segurança e o desempenho que essa estrutura irá proporcionar àqueles que irão dela usufruir. Exceto pelas catástrofes naturais, que solicitam a estrutura muito além do que foi projetada a suportar; as manifestações patológicas são originadas sumariamente da falha humana, geralmente nas quatro fases fundamentais da vida útil da estrutura de concreto armado: concepção e projeto, controle tecnológico dos materiais, a execução propriamente dita da estrutura, e por fim, o uso e a manutenção da mesma [2].

São utilizados os ensaios não destrutivos com a finalidade de se diagnosticar causas e origens manifestações patológicas e averiguar a qualidade do material que as compõe ou mesmo necessidade de manutenção do sistema, Devido ao fato de o concreto possuir relativa heterogeneidade, composições variadas e diferentes matérias-primas, esses ensaios não são comumente utilizados neste campo. Mesmo que haja os inconvenientes citados anteriormente, de forma progressiva, os métodos não destrutivos para concreto têm sido desenvolvidos e padronizados, permitindo avaliação adequada das estruturas sem que seja necessário recorrer, ou mesmo minorando, à ação semidestrutiva para diagnóstico [1].

Pode-se, através dos ensaios não estrutivos, obter informações valiosas para avaliação da integridade estrutural e manutenção de uma estrutura já existente, uma vez que avaliar o desempenho, a durabilidade de determinada estrutura exige, na maior parte dos casos, ultrapassar a subjetividade da inspeção visual. Inspeções visuais são de caráter sumariamente qualitativo, enquanto, na maior parte das vezes, para um diagnóstico completo e um possível prognóstico, são necessários dados mensuráveis. Ao se mensurar uma manifestação patológica, é possível chegar à conclusão de qual alternativa é mais viável optar: reforço, recuperação, limitação de utilização, ou mesmo, a demolição da estrutura [2].

Esta pesquisa tem como principal intuito compreender as manifestações patológicas das estruturas de concreto armado, através de um estudo de caso. Para tanto, Foi empregado omo objeto uma edificação anônima não concluída localizada na cidade de Patos de Minas (MG), a fim de se verificar a integridade estrutural do sistema, possibilitando seu diagnóstico e prognóstico.

De forma específica, possui como diretrizes: a análise do estado da estrutura frente às condições ambientais e de utilização; a avaliação visual da estrutura, bem como utilizar desse método para estimar sua integridade estrutural; a identificação das principais manifestações patológicas presentes na estrutura; a busca por evidências que comprovem as hipóteses levantadas, levando a um diagnóstico, além do fornecimento de um parecer técnico acerca do grau de deterioração da estrutura e possível evolução das manifestações patológicas, caso não haja intervenção. Para que todo o estudo fosse possível, foram empregados principalmente ensaios não-destrutivos, determinados de forma prévia através de uma análise inicial do sistema.

2. PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS

O estudo de caso foi desenvolvido em dois ambientes distintos: em campo e no Laboratório de Análises Tecnológicas de Materiais do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM). Na estrutura propriamente dita, realizou-se a análise visual referente ao subsolo e ao térreo, além de ensaios não destrutivos no subsolo (pilares e paredes-diafragma). Já em laboratório, realizaram-se ensaios não-destrutivos com os corpos-de-prova da estrutura, a fim de corrigir possíveis equívocos nos dados dos ensaios em campo. A Figura 1 resume todo o processo metodológico adotado para análise da integridade estrutural do objeto.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



Figura 1: Processo metodológico adotado para análise da estrutura

2.1. Elementos de estudo

Para análise em campo, utilizaram-se elementos estruturais principalmente do subsolo, por estarem menos deteriorados que as esperas do térreo. A Figura 2 ilustra parte do arranjo estrutural analisado.

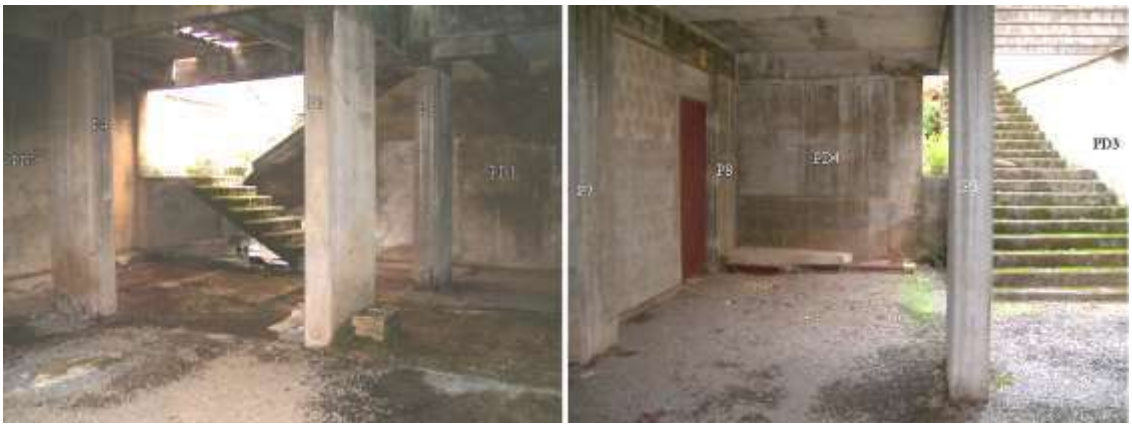
Figura 2: Elementos estruturais utilizados para análise

As áreas de ensaio foram distribuídas conforme a dimensão do elemento estrutural analisado, sendo assim, quanto maior o elemento, mais áreas de ensaio foram necessárias para representar o material em estudo. A maior quantidade de áreas também permite a verificação da homogeneidade do material. Foram analisados oito pilares, com dimensões que variam de 25 cm a 60 cm de espessura e 80 a 102,5 cm de largura; além de três paredes-diafragmas de larguras variáveis.

Em laboratório, foram utilizados corpos-de-prova moldados da estrutura, datados no intervalo de 01/12/1987 a 12/03/1988, encontratos na obra, trata-se de uma situação bastante delicada afirmar que estes corpo de provas realmente pertence estrutura. Porém em conversas com o construtor e proprietário parcial da edificação para averiguação de informações sobre estes corpos de provas, afirmou que tratava-se sim deste edificio. Os dados que identifica a obra e sua localização não foram divulgados devido-se este artigo tratar de um documento publico, a importancia deste trabalho resume se a iniciação cientifica de alunos com objetivos estritamente didatico-pedagógico e estes datos não poderão ser levados em consideração pelos proprietaros visto que não houve uma prestação de serviço, projetos estruturais não foram encontratos e houve ordens expressas para não retirada de testemunhos desta obra parcial, que atualemente pertence a diverso proprietados com interesses imobiliarios distintos e conflitantes, que poderia levar a litigio. Diante disso, foi necessário recorrer a aceotação que os corpos-de-prova seria da estrutura analisada para desta forma obter um estudo mais aprimorado das manifestações patológicas identificadas. Foram utilizados 17 elementos

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

com 15 cm de diâmetro e 30 cm de comprimento. Afirma-se que são representativos, já que estavam expostos ao mesmo ambiente que a estrutura. Isso, porque estavam sujeitos à mesma umidade, agentes agressivos e microclima que a obra, pois foram deixados no local desde então.

Os corpos-de-prova foram divididos aleatoriamente em quatro grupos. O primeiro e quarto grupos contemplaram os ensaios de esclerometria, ultrassom e compressão uniaxial. Nos elementos do segundo grupo de teste, usou-se dos ensaios de absorção por capilaridade e, como ensaio auxiliar, compressão diametral. Já o terceiro tratamento teve por principal intuito a avaliação da carbonatação de forma qualitativa.

2.2. Métodos utilizados

2.2.1 Análise visual

A análise visual foi realizada a fim se de formular hipóteses acerca das possíveis causas do surgimento das manifestações patológicas. Para iniciar a análise do arranjo estrutural, iniciou-se a busca por manifestações patológicas visíveis. Apesar de subjetiva e qualitativa, esta fase permitiu a escolha dos elementos mais representativos do sistema. Primeiramente, analisaram-se as lajes e vigas para caracterização visual, depois se prosseguiu para a análise dos pilares, tanto do térreo quanto do subsolo. Além da análise visual, recorreu-se também a mensuração de fissuras e trincas, através da utilização do fissurômetro de comparação. Com a análise preliminar finalizada, foram determinados quais elementos seriam alvos dos ensaios não-destrutivos.

2.2.2. Esclerometria

O ensaio de esclerometria permite aferir a dureza superficial do material, baseando-se no princípio da reflexão. A esclerometria possui caráter quali-quantitativo, já que permite averiguar, respectivamente, a qualidade e potencial homogeneidade do concreto e, através de curvas de correlação, a resistência à compressão. Entretanto, diversos fatores interferem na relação rebote e resistência à compressão, entre eles, a idade do concreto, devido à carbonatação, e presença de agregados próximos à superfície de impacto [3].

Devido à idade avançada do objeto de estudo, optou-se por construir uma curva característica do material analisado, usando-se os corpos-de-prova da estrutura. Utilizou-se em todas as etapas do estudo, o esclerômetro digital tipo RN. Foram feitos ensaios tanto nos elementos em campo, quanto nos corpos-de-prova em laboratório para composição da nova curva de calibragem do esclerômetro.

2.2.3. Ensaio ultrassônico

O ensaio ultrassônico consiste na avaliação da velocidade de propagação de pulsos de ultrassom através de dois pontos pré-determinados. Alguns fatores influenciam os dados obtidos, como a presença de armaduras, a densidade do concreto, possíveis vazios ou falhas de concretagem, teor de umidade, idade do concreto, entre outros [4].

O ensaio permite três tipos de leituras em função da disposição adotada para os transdutores: transmissão direta (faces opostas), semidireta (faces perpendiculares) e indireta (mesma face) [4]. Em todas as etapas, realizaram-se leituras do tipo diretas, já que os elementos eram de espessura média e dimensões razoáveis; além do fato de ser o tipo de leitura mais precisa para levantamento de dados. Para realizar as leituras, usou-se um aparelho de ultrassom na frequência de 220 kHz e gel acoplante do tipo graxa de silicone para aumentar a área de contato entre os transdutores e a superfície analisada. Enfatiza-se que a superfície foi regularizada com prisma de carborundum e limpa de resíduos pulverulentos.

Foram realizadas leituras diretas tanto nos elementos estruturais em campo, quanto nos corpos-de-prova, para verificação das propriedades dos mesmos a fim de reforçar a representatividade do lote. O ensaio de propagação de pulsos ultrassônicos dos corpos de prova da estrutura foi realizado na seção transversal dos mesmos [5]. Para tanto, realizou-se três medições diretas de cada corpo de prova, a fim de se chegar ao valor de tempo de propagação. Optou-se pelo menor valor de tempo [6], apesar de ser utilizada para argamassas de assentamento e revestimento, entretanto, oferece um roteiro com quantidade de leituras necessárias para alcançar certa representatividade de dados.

2.2.4. Pacometria

O ensaio de pacometria [7] permite a identificação das armaduras, usando como parâmetros, a sua localização, quantidade e diâmetro, além do cobrimento do concreto. Entretanto, há fatores limitantes, como o campo de medição não ser inferior a 120 mm, conhecer o diâmetro das barras e o espaçamento entre as mesmas ser superior a 100 mm [8].

Apesar de não haver projetos estruturais acessíveis para viés de comparação, este ensaio teve por principal objetivo mensurar o cobrimento das barras dos elementos, a fim de se verificar conformidade ou não à norma vigente da época [9].

O ensaio de pacometria permitiu aferir o diâmetro das barras dos elementos prospectados, bem como a espessura de cobrimento. Foram analisados os pilares P1, P2, P3 e P4, uma vez que possuíam todas as suas faces livres, permitindo o detalhamento do elemento.

2.2.5. Outros ensaios

Além dos ensaios de esclerometria, ultrassom e pacometria, também foram feitos três ensaios complementares nos corpos-de-prova: compressão uniaxial, avaliação da carbonatação e absorção capilar. O ensaio permite verificar a resistência à compressão que o material possui, além do formato da ruptura [10].

Já para a avaliação da carbonatação, usou-se do ensaio de compressão diametral de caráter auxiliar [11], para permitir a abertura longitudinal dos corpos-de-prova. Avaliar a profundidade da frente de carbonatação permite que se verifique se houve ou não a despassivação das armaduras. Caso haja a despassivação das barras, outros processos deteriorantes podem ocorrer, como a corrosão, e por fim, a fissuração e ruptura do elemento. Para aferir a frente carbonatada, usou-se fenolftaleína em solução de 1%, através da aspersão imediata após a ruptura dos elementos [12].

A absorção capilar é uma das propriedades que possuem grande influência no transporte de água e agentes nocivos para o interior do concreto, porquanto utiliza de sua rede de poros. Quanto maior o diâmetro dos capilares, menor é a profundidade de absorção e maior a quantidade total de água absorvida. Normalmente, concretos com relação água/cimento reduzida possuem capilares de menor diâmetro e, simultaneamente, esses capilares são menos intercomunicados. Este ensaio permite a determinação da absorção de água através da capilaridade. Apesar de não ser inicialmente destrutivo, o ensaio requer que seja realizada a ruptura diametral do corpo ao finalizar o processo, a fim de se verificar a rede de poros longitudinalmente [1], [13].

O ensaio de absorção capilar consistiu em deixar três corpos-de-prova 72 horas em estufa e, por conseguinte, deixá-los sobre uma lâmina d'água de 5 mm de profundidade para averiguar os mecanismos de transporte de fluidos por capilaridade. Após as 72 horas de semi-imersão, romperam-se os corpos por compressão diametral para averiguar a altura capilar nos corpos [13].

3. RESULTADOS

3.1. Análise Visual

3.1.1. Lajes

Inicialmente, percebeu-se que as lajes da estrutura, em sua maioria, apresentavam um problema comum nas execuções de estruturas de concreto armado: falta de espaçador para garantir cobrimento mínimo das armaduras. Nesse caso, as armaduras de distribuição permaneceram em diversas partes nuas ou com cobrimento insuficiente. Outro ponto que é necessário enfatizar é a ação da lixiviação e da umidade nesses elementos. Há formação de manchas no material, bem como formação de estalactites e eflorescências, resultante do transporte dos produtos de hidratação do concreto. Ambos os casos podem ser verificados na Figura 3.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



Figura 3: Lajes analisadas

Devido ao cobrimento insuficiente, percebe-se que a corrosão das armaduras atingiu de forma mais agressiva o material, promovendo a descamação do concreto que circunda a armadura. Percebe-se também que a nata de cimento, em diversos elementos estruturais, escorreu enquanto a estrutura estava sendo concretada, indicando formas sem estanqueidade e vedação.

3.1.2. Vigas

As vigas, em geral, apresentavam fissuração e desplacamento da camada de cobrimento, como pode ser visto na Figura 4.



Figura 4: Armadura exposta na viga

Apesar de em diversos pontos as armaduras estarem expostas, ainda sim, as vigas não chegaram ao ponto de deterioração que os pilares e as paredes-diafragma chegaram. A corrosão das armaduras que atingiu as vigas, a princípio, não permitiu a formação de produtos de corrosão quanto os demais elementos, a ponto de gerar a ruptura do concreto de cobrimento. É possível perceber que a camada de concreto que protege as armaduras sofreu a ação da carbonatação, perdendo assim a resistência mecânica, e devido às solicitações da estrutura, ao longo do tempo, houve o desplacamento do material.

3.1.3. Pilares

Inicialmente, foram analisados os pilares do térreo. Como poderá ser observado nas fotos da Figura 5, o concreto estava poroso e frágil. Pode-se perceber ao longo do registro fotográfico que houve a formação de compostos de cálcio na

superfície dos pilares (provenientes da lixiviação dos produtos da hidratação). Há também o ataque biológico nas esperas do térreo. Outra manifestação patológica que se propagou ao longo dos elementos construtivos foi a corrosão das armaduras. O grau de deterioração desses elementos está em estágio avançado, uma vez que houve o comprometimento da seção útil das barras.

Em outros pontos, é visível que a corrosão das armaduras chegou ao ponto das mesmas se curvarem, devido à tamanha formação de óxido de ferro na base das barras, gerando um aumento de volume. É interessante enfatizar que as barras possuem diâmetro de 25 mm, demonstrando a tensão gerada pela formação de produtos da corrosão para que uma barra de bitola maior pudesse sofrer curvatura. Ao formar produtos da oxidação em torno das armaduras, o concreto sofreu dilatação exacerbada, provocando a ruptura do cobrimento por tração, deixando-as ainda mais expostas as intempéries e agentes agressivos, como demonstra a Figura 5.



Figura 5: Armaduras expostas no térreo

À medida que a inspeção decorreu, iniciou-se a prospecção por mensurar em qual intervalo de fissuração a estrutura estava exposta. Para tanto, usou-se um fissurômetro por comparação. As fissuras mensuradas são de espessuras bastante variadas. Foram encontradas fissuras de 3 mm até 0,55 mm.

Já no subsolo, é possível perceber que a maior parte das manifestações patológicas se instalou na base dos pilares, como pode ser visto através da Figura 6; sendo bastante rara a presença de armaduras expostas na região médio-alta dos mesmos.



Figura 6: Desplacamento do cobrimento basal dos pilares e armadura exposta

3.1.4. Considerações acerca da análise visual

A inspeção visual permitiu inferir que a estrutura do térreo está com maior grau de deterioração que a estrutura do subsolo. Isso pode ser proveniente de vários fatores, como:

- A estrutura do térreo está submetida, há aproximadamente 28 anos, a ciclos de molhagem e secagem, oscilações térmicas e, obviamente, a radiação solar;
- Concretagem ineficiente, com o cobrimento das barras das esperas menor do que o necessário por falta de espaçadores (daí a necessidade da utilização de uma camada de argamassa para aumentar esse cobrimento ou uma tentativa frustrada de se corrigir os primeiros indícios de corrosão de maneira leiga);
- Concreto com alta relação água/cimento, gerando maior porosidade no material.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Devido às intempéries e à radiação solar, os elementos constituintes do térreo se tornaram mais porosos, frágeis e, sendo assim, mais suscetíveis à lixiviação e à carbonatação. Devido ao grau de deterioração da estrutura térrea, optou-se por não realizar nenhum ensaio não destrutivo. Como a parte do subsolo estava em um grau de deterioração mediano, decidiu-se realizar os ensaios para verificação do quanto as manifestações patológicas afetaram seus elementos.

Em campo, realizou-se esclerometria nos pilares e paredes-diafragma, ultrassom nos pilares e pacometria. Enfatizou-se a análise dos pilares, já que se mostraram mais acessíveis e suscetíveis às manifestações patológicas. Já os demais elementos – lajes e vigas – puderam ser avaliados e diagnosticados visualmente.

3.2. Ensaios Não Destrutivos em campo

3.2.1. Esclerometria

Os valores do índice de reflexão foram determinados segundo o critério de cálculo preconizado pela norma [3]. Os valores que se afastaram em 10% da média não foram considerados no valor final do índice esclerométrico. Ao descartar esses valores, recalculou-se a média com os valores considerados válidos. O resumo dos dados aferidos nos pilares encontra-se na Tabela 1:

Tabela 1 – Índice esclerométrico médio dos pilares – Data: 11/08/2015

Elemento	Área	$IE_{efetivo}$	C.V. (%)	Elemento	Área	$IE_{efetivo}$	C.V. (%)
P1	A1	58,9	6%	P2	A1	58,4	4%
	A2	60,8	4%		A2	56,8	4%
	A3	59,3	4%		A3	54,8	5%
	A4	56,8	4%		A4	58,4	5%
P3	A1	59,3	7%	P4	A1	65,9	5%
	A2	57,8	7%		A2	61,9	5%
	A3	61,8	4%		A3	59,9	5%
	A4	59,8	5%		A4	55,6	5%
P5	A1	55,2	3%	P6	A1	66,5	4%
	A2	56,0	5%		A2	68,1	3%
P7	A1	60,0	3%	P8	A1	57,4	5%
	A2	61,3	6%		A2	62,7	5%
	A3	60,1	4%	**Média global**		**59,7**	
	A4	58,0	5%	**C. V. global**		**5,60%**	

Quanto às paredes-diafragma, pode-se perceber que os valores das áreas de impacto não variaram em função da distância, uma vez que visualmente as paredes estavam menos atingidas pelas manifestações patológicas (em toda a sua superfície) que os pilares e possuiram valores de índice esclerométrico em torno de 54,20; um pouco abaixo da média obtida nos pilares.

Trata-se de uma hipotese a explicação dos valores dos índices de reflexão, como eles possuem baixa variação em relação à média obtida, indicando certa homogeneidade do estado do material na superficie. E de se suspeitar, como pode ser visto, os índices esclerométricos estão consideravelmente altos, uma vez que o aço para calibragem do esclerômetro possui dureza 80, demonstrando a alta rigidez da superfície do material, indicando que está severamente carbonatada.

3.2.2 Ensaio ultrassônico

Os resultados da VPU para os pilares foram apurados nas áreas delimitadas pelas barras longitudinais e estribos, a fim de se evitar interferência do metal na mensuração da velocidade. Foram obtidos os tempos relativos à propagação da onda por ultrassonografia pelo método direto nos pilares. A partir da mensuração do tempo de difusão e da distância entre transdutores, obteve-se a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Através da velocidade média obtida nos ensaios, pode-se categorizar o concreto, conforme Tabela 2:

Tabela 2 – Correlação entre velocidade de propagação e qualidade do concreto [8]

Velocidade da onda ultrassônica (m/s)	Qualidade do concreto
V > 4500	Excelente
3500 < V < 4500	Ótimo
3000 < V < 3500	Bom
2000 < V < 3000	Regular
V < 2000	Ruim

A Tabela 3 dispõe os tempos de transmissão obtidos e as suas respectivas distâncias. A faixa M se refere a região mediana do pilar (aproximadamente 1,30 m) e a faixa B, a região baixa (aprox. 0,90 m).

Tabela 3 – Tempo de transmissão médio nos pilares – Data: 21/08/2015

Elemento	Faixa	Distância (cm)	Tempo (µs)	Velocidade média (m/s)	Qualidade	C. V. (%)
P1	M	25,50	61,58	4.153,96	Ótimo	6%
P2	M	26,00	61,11	4.262,84	Ótimo	5%
	B	26,00	59,63	4.366,01	Ótimo	5%
P3	M	25,00	61,55	4.080,88	Ótimo	8%
	B	25,00	61,80	4.046,85	Ótimo	2%
P4	M	26,00	62,85	4.139,20	Ótimo	3%
	B	26,00	70,83	3.691,13	Ótimo	9%

Como pode ser observado, o concreto analisado é considerado de ótima qualidade. Uma das hipóteses levantadas quanto a isso, se deve ao fato da carbonatação preencher os poros do concreto com os sais resultantes da reação de neutralização que a caracteriza, deixando-o mais denso.

3.2.3. Pacometria

Sistematizou-se o detalhamento, conforme poderá ser visto abaixo, enumerando as barras prospectadas e seus respectivos cobrimentos. Os cobrimentos dos pilares prospectados variaram de 23 a 49 mm. A Figura 7 ilustra o arranjo do pilar P1:

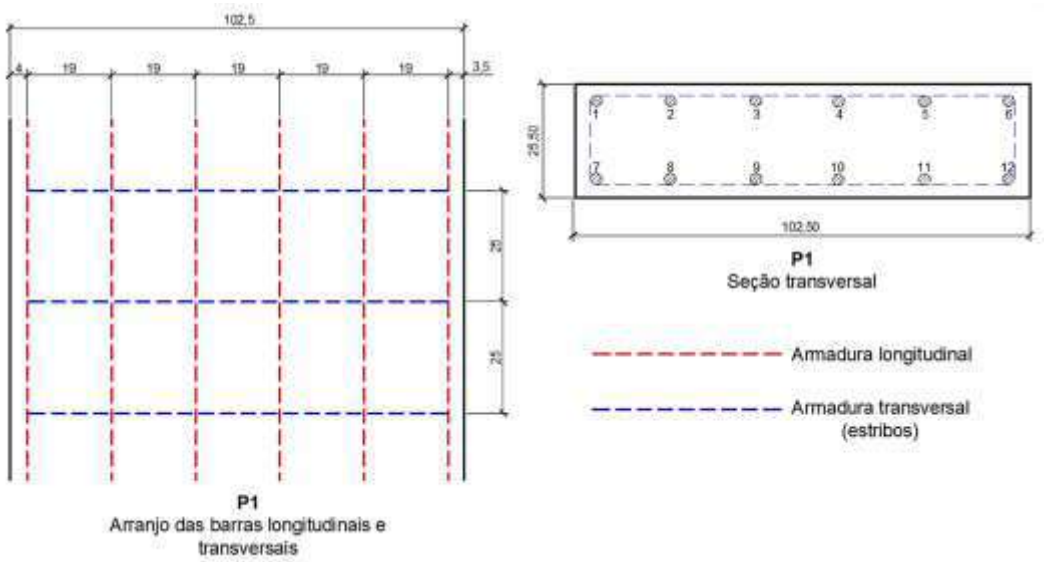

Figura 7: Detalhamento das barras do pilar P1

3.3. Ensaios em laboratório

3.2.1. Esclerometria

Os valores obtidos são representativos para composição da curva resistência à compressão versus índice de reflexão, a fim de corrigir os dados diante da ação da carbonatação, para uma correlação válida entre fck e índice esclerométrico, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Relação entre Fck e IE

Item	Fck (MPa)	$IE_{efetivo}$	C. V. (%)	Item	Fck (MPa)	$IE_{efetivo}$	C. V. (%)
CP 1	14,3	50,09	4%	CP 6*	5,8	45,69	6%
CP 2*	15,9	58,34	6%	CP 7*	16,9	57,44	4%
CP 3	22,2	58,23	4%	CP 15	20,1	60,07	3%
CP 4	13,6	46,41	5%	CP 16	19,0	55,12	5%
CP 5	18,9	51,91	4%	CP 17	17,1	53,50	5%

* não faz parte da composição da curva

A Figura 8 ilustra a relação gráfica e matemática entre essas duas propriedades, segundo os dados obtidos no ensaio em laboratório.

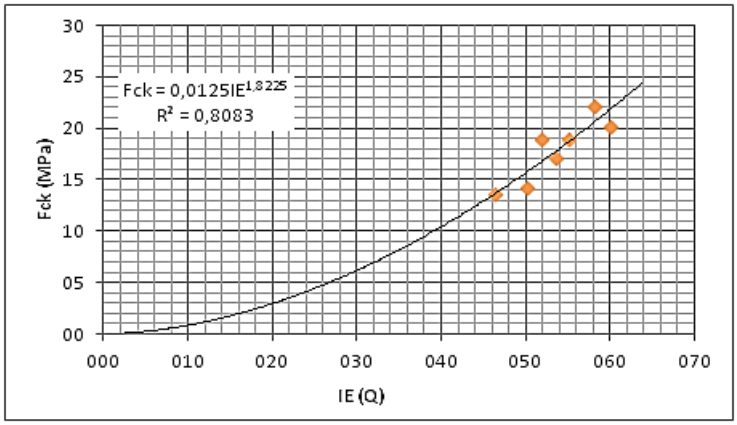

Figura 8: Curva de correlação entre resistência característica (fck) e índice de reflexão (IE)

Optou-se por utilizar esta curva potencial, uma vez que se a resistência mecânica for zero, a dureza superficial também será zero. Pode-se inferir também que quão maior a resistência mecânica, maior será também a relação resistência e dureza superficial, indicando que: quanto maior for o fck, menor será o índice esclerométrico, uma vez que o material em tratamento está altamente carbonatado.

A resistência à compressão do concreto analisado, usando a curva fck x IE construída a partir dos ensaios em corpos-de-prova, variou de 17 a 26,1 MPa para pilares, e, 14,3 a 20,7 MPa para paredes-diafragma, o que para padrões da época em que foi construído é um bom resultado, apesar de o material estar sujeito à carbonatação severa.

3.2.2. Ensaio Ultrassônico

Os valores obtidos no ensaio de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos-de-prova variaram de 4013 a 4684 m/s, sendo assim, considerados com qualidade ótima. Enfatiza-se também que o coeficiente de variação do ensaio é considerado baixo (5%), demonstrando que o material prospectado possui características similares.

3.2.3. Avaliação da Carbonatação

A Figura 9 ilustra os corpos de prova rompidos por compressão diametral e aspergidos por uma solução 1% de fenolftaleína.

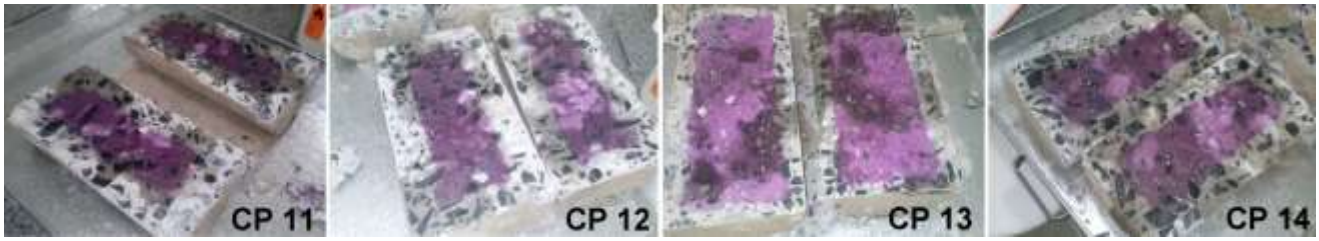

Figura 9 – Corpos de prova expostos à fenolftaleína

A frente de carbonatação observada foi quantificada para correlação com o cobrimento das armaduras dos pilares investigados. Apesar de se apresentarem variados, pode-se inferir através de todos os dados levantados que a frente de carbonatação atingiu as amostras em um intervalo de 14,78 a 41,96 mm de profundidade.

3.2.4. Ensaio de Absorção Capilar

Como pode ser visto na Figura 10, há uma grande dissonância entre o CP 8 e os demais, demonstrando que possui maior absorção capilar que os outros averiguados, além de possuir maior resistência. Percebe-se que, apesar do deslocamento do CP 8 dos demais, os seus dados possuem variabilidade próxima.

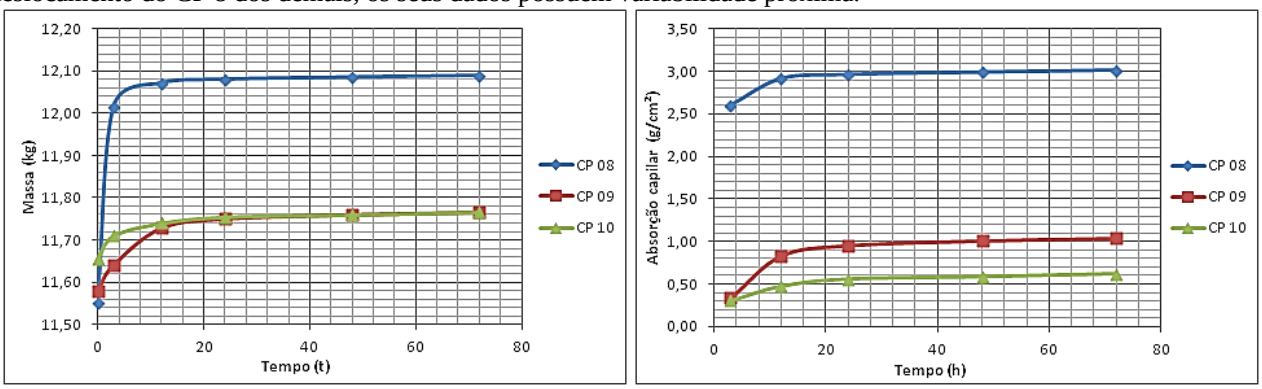

Figura 10: Evolução da massa x tempo e absorção capilar x tempo

Acerca das características dos corpos-de-prova, comparando-os entre si, algumas hipóteses podem ser formuladas:

a) O CP 8 possui maior porosidade que os demais, uma vez que tem absorção capilar alta (3,01 g/cm²) em comparação com CP 10 (0,62 g/cm²). Possui também altura capilar considerável (32,8 mm), permitindo inferir que possui poros finos e interconectados, estando então mais suscetível ao processo de carbonatação. Possui também a maior resistência à tração (1,9 MPa) entre os corpos-de-prova analisados neste ensaio;
b) O CP 9, apesar de possuir a maior altura capilar (45,51 mm), possui a menor resistência (1,0 MPa). Isso permite inferir que seus poros são menores, bem interconectados, entretanto, algum fator influenciou na sua baixa resistência à tração, como relação água/cimento um pouco maior que dos demais, formação de nata de cimento, carbonatação em um grau mais elevado que os demais, etc.;
c) Já o CP 10, possui resistência à tração considerável (1,7 MPa), todavia, menor absorção capilar e altura capilar (8,12 mm). Isso permite inferir que seus poros são de diâmetros maiores e/ou pouco interconectados.

A Tabela 6 demonstra os resultados de absorção capilar:

Tabela 6 – Absorção capilar dos corpos de prova

Item	Tempo (h)	Absorção capilar (g/m²)	Altura média (mm)
CP 08	72	30.181,64	32,80
CP 09	72	10.637,78	45,51
CP 10	72	6.105,17	8,12

A literatura [14], [15] demonstra que concretos de 63 dias de idade possuem absorção capilar em torno de 1.200 g/m² (para concretos de resistência 30 e 60 MPa); enfatizando que a maior absorção capilar pode ser encontrada às 24 horas

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

(5.000 g/m²). Diante desses dados, pode-se perceber que a absorção capilar nos corpos-de-prova e, consequentemente, na estrutura, ainda sim é altíssima, levando em consideração a variabilidade dos dados.

4. CONCLUSÃO

Na inspeção visual , conforme exemplifica a Figura 6, verificou-se que a maioria das esperas do térreo já haviam se deteriorado completamente. Quanto ao subsolo, percebeu-se que está em um grau de deterioração inferior ao térreo, porquanto não está sujeito a intempéries e radiação solar diretamente. Também observou-se que a corrosão das armaduras destruiu a base dos pilares, região bastante crítica para reparos ou ações terapêuticas em um grau de deterioração visível e severa.

Quanto à inspeção detalhada, pode-se afirmar sobre o subsolo:

a) Mesmo que a norma em vigor na época da construção [9], não abordando os conceitos de classes de agressividade ambiental e considerando o cobrimento muito abaixo do preconizado pelas normas atuais [16], todos os cobrimentos atenderiam aos critérios desta uma vez que o cobrimento variou de 23 a 49 mm, conforme aferido pelo ensaio de pacometria;
b) A profundidade da frente de carbonatação mensurada em laboratório corroborou a corrosão das armaduras observadas em campo, uma vez que de acordo com o intervalo mensurado em laboratório, a frente atingiu as armaduras, despassivando-as, permitindo o início do processo de corrosão, como pôde ser visto durante a inspeção visual;
c) Esses fatos dão ainda mais respaldo à hipótese que o concreto usado, estando ou não de acordo com a norma vigente na época, não era suficientemente resistente à frente de carbonatação. Em alguns pontos, a norma permite (se o cobrimento for menor que o diâmetro) que se utilize cobrimentos da ordem de 15 mm (pilares internos) a 25 mm (para concreto aparente ao ar livre – condição mais agressiva se relacionada ao contexto de pilares);
d) A frente de carbonatação mensurada em laboratório demonstra que seria inviável se retirar a camada carbonatada em campo, porquanto deixaria as armaduras completamente sem proteção, sendo que as mesmas já estão com suas seções úteis comprometidas pelo intenso processo corrosivo;
e) Infere-se que o material analisado possua alta absorção capilar.. A partir disso, percebe-se o porquê da base dos pilares terem sofrido maior ação da corrosão de armaduras, porquanto recebeu agentes agressivos através da absorção capilar, já que esses elementos estavam em contato com umidade.

Contudo, para análise mais aprofundadas e parecer definitivo, seria necessário recorrer à retirada de testemunhos, analise de projeto, planilhas orçamentárias da época, e estudos de fundação seria bastante esclarecedores.

5. REFERÊNCIAS

[1] Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2014, 782 p.
[2] Souza, V. C.; Ripper, T. *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. São Paulo: PINI, 1998.
[3] Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 7584*: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
[4] _____. *NBR 8802*: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
[5] _____. *NBR 8802*: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
[6] _____.*NBR 15630*: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
[7] American Concrete Institute. *ACI - 228 - 2R - 98*, 1998, Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures, Detroit, 60 pp.
[8] CARMO, Marco Antônio do. *Estudo da deterioração de marquises de concreto armado nas cidades de Uberlândia e Bambuí*. 2009. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.
[9] Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 1980.
[10] _____.*NBR 5739*: Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
[11] _____. *NBR 7222*: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

[12] RILEM TC, "CPC18 measurement for hardened concrete carbonated depth, RILEM recommendations for the testing and use of construction materials RILEM," Bagneux, France, 1994.
[13] _____. *NBR 9779*: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
[14] REGATTIERI, C. E. X., SILVA, M. G. HELENE, P. et al. Influência do tipo de cimento na resistência, na absorção capilar e na difusão de cloretos dos concretos plásticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4., São Paulo, 1996. *Anais...* 4 v, v. 1, p. 37 – 56, São Paulo: ABCP, 1996.
[15] BAROGHEL-BOUNY, V., LARRAND, F. In place durability assessment for the next millenium-long-term study. In: MALHOTRA, V. M. (ed.) CANMET/ACI. International Conference on Durability of Concrete, 5th., Barcelona, 200. *Proceedings.* American Concrete Institute, 2 v., v. 1, p. 319- 338.
[16] Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.