



XIX COBREAP | Foz do Iguaçu

INOVAÇÕES CIENTÍFICAS E TECNOLÓGICAS

**CONGRESSO BRASILEIRO DE
ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS**

21 a 25 agosto de 2017

Hotel Mabu Thermas Grand Resort
Foz do Iguaçu / PR / Brasil

**INSPEÇÃO PREDIAL E AVALIAÇÃO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DO SUBSOLO EM
EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL LOCALIZADA NO DISTRITO FEDERAL – ESTUDO DE CASO
CONDOMÍNIO RESIDENCIAL 116 NORTE**

JORGE ANTONIO DA CUNHA OLIVEIRA

RAÍSSA SOARES DO NASCIMENTO

BÁRBARA CICUTO GONÇALVES PEREIRA

AMANDA ROSA TEIXEIRA

ÉRICA SILVA DA NÓBREGA



O Conteúdo dos trabalhos técnicos apresentados no COBREAP é de inteira responsabilidade dos seus autores.



Resumo

A ocorrência de manifestações patológicas de corrosão de armadura, deslocamento da camada de revestimento do concreto, fissuras, trincas e infiltrações se apresentam como um risco à segurança dos usuários da edificação, comprometem a estética do local, proporcionam ambiente favorável ao agravamento da deterioração já instalada, além de comprometerem a estabilidade estrutural da edificação. Justifica-se então a inspeção da estrutura a fim de estabelecer o correto diagnóstico para a então escolha e execução da manutenção corretiva mais adequada ao caso. Após análise visual e mediante registros fotográficos, ensaios de avaliação da penetração de frente de carbonatação, esclerometria, ultrassonografia e pacometria que as espessuras dos revestimentos da armadura é a principal inconformidade responsável pelas manifestações patológicas.

1. Exposição

A edificação em estudo é um prédio residencial situado em Brasília – DF composta de um bloco único, possui pilotis, 6 pavimentos, 4 entradas, 48 apartamentos e 1 subsolo, que é o local de estudo deste presente trabalho.

Inicialmente, foi realizada uma inspeção preliminar com o objetivo de verificar as condições da estrutura do subsolo, detectando as principais manifestações patológicas presentes no local por meio de análise visual e registros fotográficos. Esses procedimentos conduziram a realização dos ensaios posteriores e permitiram uma breve verificação do grau de deterioração da estrutura.

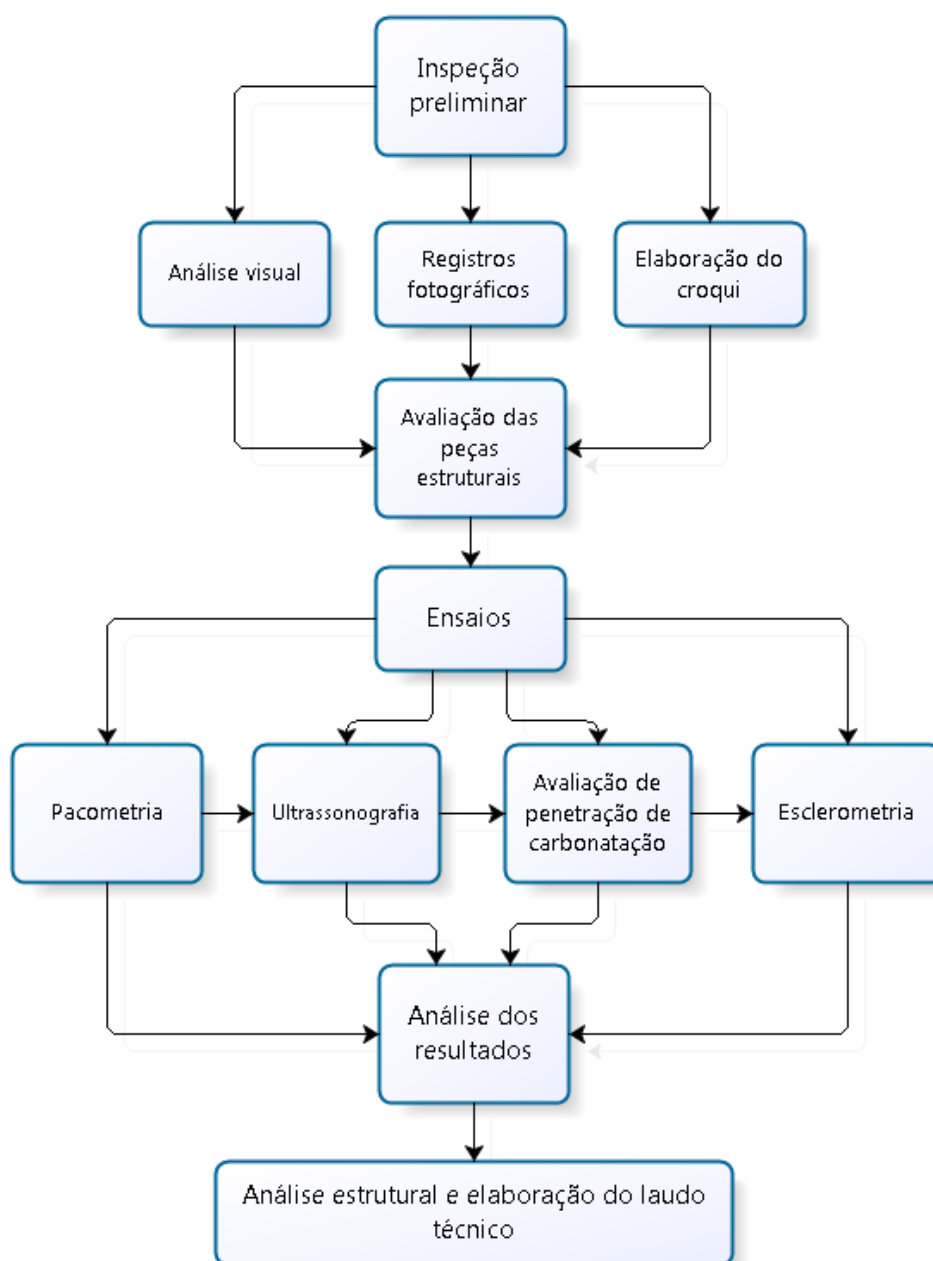
Por meio da análise visual observou-se o deslocamento da camada de revestimento argamassado aplicada sob a manta de impermeabilização nas calhas dos poços de ventilação do subsolo.

As principais manifestações patológicas observadas durante a inspeção preliminar foram abertura de fissuras, trincas e rachaduras nos elementos de concreto, corrosão e exposição da armadura da estrutura, deslocamento do concreto de cobertura, além de alguns pontos com sinais de infiltração.

Foram observados vários pontos de exposição da armadura nas peças estruturais do subsolo, principalmente nas vigas de bordo dos poços de ventilação e nas lajes de avanço, o que indica que o aço se encontra em estado evoluído de corrosão, apresentando despassivação da armadura.

2. Metodologia

Para fins diagnósticos, foi elaborada uma metodologia especial das atividades a serem desenvolvidas na inspeção do subsolo. A representação esquemática da metodologia adotada é apresentada no Organograma 01.



Organograma 01: Metodologia adotada para as atividades de inspeção

3 Manifestações Patológicas Observadas

3.1 Corrosão e Exposição Da Armadura/ Deslocamento Do Concreto De Cobrimento

A natureza fortemente alcalina do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) - pH em torno de 13 - previne a corrosão da armadura no concreto pela formação de uma fina camada protetora na superfície do metal, denominada passivação (NEVILLE, 2013).

O concreto de cobrimento é o que confere essa proteção ao aço e impede a formação de células eletroquímicas, através da proteção química (reserva alcalina) e da proteção física (estanqueidade), dificultando a penetração de agentes agressivos, como o dióxido de carbono (CO_2), e reduzindo a presença de água e oxigênio, elementos necessários para a ocorrência da corrosão eletroquímica.

No entanto, nas situações em que o concreto de cobrimento é insuficiente ou de má qualidade, o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera age na superfície das estruturas, podendo ocorrer a reação de carbonatação, em que há a formação de carbonato de cálcio (CaCO_3). Esse fenômeno provoca a redução do pH da solução do poro contida na pasta de cimento, causando a despassivação da armadura e induzindo a corrosão do aço na estrutura de concreto armado (ISAIA et al., 2011).

A corrosão pode ocorrer devido à um processo eletroquímico que se inicia quando a diferença de potencial entre pontos gera uma corrente, que através da água presente no concreto, que atua como eletrólito, causa a formação e a movimentação de partículas com carga elétrica, denominadas cátodos e ânodos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O desenvolvimento metodológico deste trabalho se deu por meio de um estudo diagnóstico das manifestações patológicas de corrosão da armadura e deslocamento do concreto de cobrimento. Para tanto, o objeto de estudo

local em estudo é um subsolo com função de garagem para veículos, o que intensifica a emissão e a ação de dióxido de carbono (CO_2) nos elementos de concreto. Além disso, conforme verificado, a camada de cobrimento das vigas e das lajes de avanço é insuficiente para proteger a armadura.

Esses fatores são responsáveis por tornar a estrutura do subsolo mais vulnerável ao processo de carbonatação, provocando a corrosão e exposição da armadura das vigas e lajes de avanço, observadas durante a inspeção.

O deslocamento do concreto de cobrimento, observado em vários pontos da estrutura do subsolo, é decorrente do processo de expansão da armadura que ocorre devido à corrosão as barras de aço. Na medida em que a armadura perde a proteção conferida pelo concreto de cobrimento, as barras de aço ficam mais vulneráveis à ação da carbonatação e o processo de corrosão se agrava.

Os pontos de deslocamento do concreto de cobrimento e corrosão e exposição da armadura são apresentados nas Figuras 01 a 15.



(a) (b)
 Figura 01: Deslocamento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída. (a) Laje de avanço na vaga 407; (b) Viga de bordo na vaga 406.



(a) (b)
 Figura 02 (a) e (b): Deslocamento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída na viga de bordo na vaga 607.



(a) (b)
 Figura 03 (a) e (b): Deslocamento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída na laje de avanço na vaga 607.



Figura 04: Deslocamento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída. (a) Laje de avanço na vaga 405; (b) Viga de bordo na vaga 405



Figura 05 (a) e (b): Deslocamento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída na vaga 305.



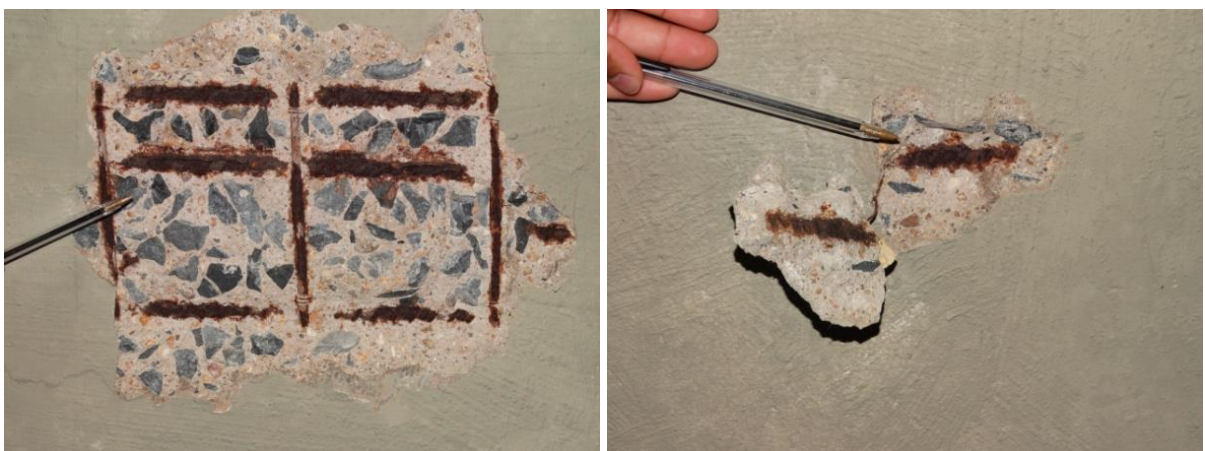
Figura 06: Deslocamento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída. (a) Viga de bordo na laje 604; (b) Viga de bordo entre as vagas 604 e 605.



(a) (b)
Figura 07 (a) e (b): Deslocamento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída da viga de bordo na vaga 504.



(a) (b)
Figura 08: Deslocamento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída. (a) Viga de bordo na vaga 404; (b) Laje de avanço na vaga 404.



(a) (b)
Figura 09 (a) e (b): Deslocamento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída da laje de avanço na vaga 608.



(a)

(b)

Figura 10: Desplacimento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída. (a) viga de bordo na vaga 503; (b) laje de avanço na vaga 603.



(a)

(b)

Figura 11 (a) e (b): Desplacimento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída da viga de bordo na vaga 402.



(a)

(b)

Figura 12: Desplacimento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída. (a) Laje de avanço na vaga 302; (b) Laje de avanço na vaga 301



(a)

(b)

Figura 13 :Desplacamento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída (a) viga de bordo na vaga 401; (b) laje de avanço na vaga 401.



(a)

(b)

Figura 14 :Desplacamento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída (a) laje de avanço na vaga 401; (b) viga de bordo na vaga 401.



(a)

(b)

Figura 15 :Desplacamento da camada de cobrimento e exposição de armadura corroída da laje do subsolo (a) região próxima à vaga 201; (b) região entre as vagas 202 e 203.

3.2 Trincas, Fissuras E Rachaduras

As principais causas da ocorrência de trincas, fissuras e rachaduras nas construções são as movimentações provocadas por variações térmicas e de umidade, a atuação de sobrecargas ou concentração de tensões, a deformabilidade excessiva das estruturas, os recalques diferenciados das fundações, a retração de produtos à base de aglomerantes hidráulicos e as alterações químicas dos materiais de construção (Thomaz, 2014).

Essas manifestações patológicas são classificadas conforme a espessura da abertura, como apresentado na Tabela 01:

Tabela 01: Classificação de anomalias quanto à espessura das aberturas

ANOMALIAS	ABERTURAS (mm)
Fissura	Até 0,5
Trinca	De 0,5 a 1,5
Rachadura	De 1,5 a 5,0
Fenda	De 5,0 a 10,0
Brecha	Acima de 10,0

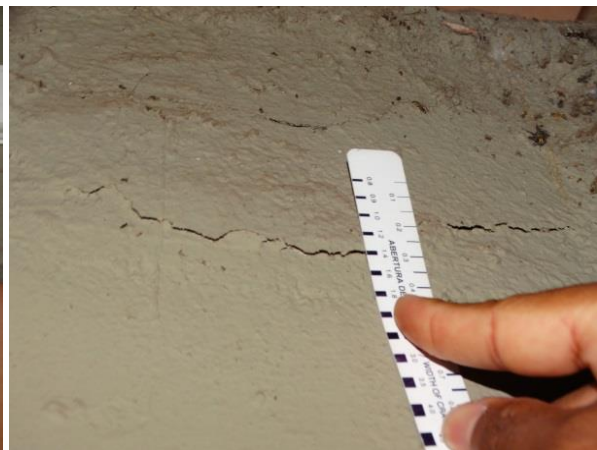
As reações de corrosão da armadura produzem óxido de ferro, cujo volume é consideravelmente superior ao original do metal, provocando o aumento de seção das barras de aço. Essa expansão causa a abertura de trincas, fissuras e rachaduras nas peças de concreto em regiões próximas à armadura (Thomaz, 2014).

As aberturas de trincas, fissuras e rachaduras na estrutura do subsolo foram observadas sempre em regiões próximas à exposição de armadura, o que indica que este problema é decorrente das alterações químicas de carbonatação do concreto, e conseqüente corrosão da armadura. Quando possível, o fissurômetro foi utilizado para medir a espessura da abertura dessas anomalias.

Na Figura 16 são ilustradas as fissuras, trincas e rachaduras encontradas na área do subsolo.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 16 : Aberturas de fissuras, trincas e rachaduras detectadas na estrutura do subsolo.
(a) Rachadura de 3,0 mm na laje de avanço da vaga 02 do apartamento 608; (b) Trinca de 1,4 mm na laje de avanço da vaga 502; (c) Rachadura de 2,5 mm na laje de avanço da vaga 401; (d) Fissura na laje de avanço da vaga 603

Conforme verificado por meio de análise visual e com auxílio do fissurômetro, constatou-se que a maioria das anomalias observadas na estrutura do subsolo se classificam como trincas e rachaduras.

A abertura de trincas e rachaduras facilita a penetração de água, oxigênio e agentes agressivos, como o dióxido de carbono (CO_2), na estrutura de concreto armado, acelerando o processo de carbonatação do concreto e corrosão da armadura, o que compromete a estabilidade estrutural. Logo, devem ser executados reparos para a correção dessas anomalias a fim de evitar a ocorrência das manifestações patológicas de carbonatação e corrosão após a recuperação do concreto e da armadura.

3.3 Sinais de infiltração

As infiltrações são manifestações patológicas decorrentes da presença de umidade e da penetração de água nas áreas da edificação. A penetração de água é favorecida pelas frestas, aberturas de vãos, fissuras, falta de estanqueidade e de uma impermeabilização adequada, danos em instalações hidráulicas e pluviais, entre outros (Deutsch, 2013).

Os sinais de infiltração no subsolo foram observados em locais próximos as tubulações, o que indica falhas na impermeabilização em torno das tubulações devido à falta de manutenção. Além disso, verificou-se que as lajes de avanço do subsolo não possuem ralos para escoamento da água, o que também pode contribuir para a ocorrência de infiltração.

Os sinais de infiltração encontrados no subsolo são apresentados nas Figuras 17 e 18.



Figura 17: Sinais de infiltração detectados na estrutura do subsolo. (a) laje de avanço da vaga 305; (b) laje de avanço da vaga 608; (c) laje do subsolo na região próxima à saída da garagem (d) laje do subsolo na região próxima à vaga 602



Figura 18 (a) e (b): Sinais de infiltração detectados na laje de avanço entre as vagas 603 e 602

A infiltração de água na estrutura pode agravar o processo de corrosão das barras de aço, comprometendo o desempenho estrutural da armadura. Dessa forma, torna-se necessário realizar a manutenção da impermeabilização nas regiões das tubulações, garantindo que não voltem a surgir sinais de infiltração.

3.4 Deslocamento da Camada de Revestimento (Proteção Mecânica) sobre a Manta de Impermeabilização

Nos poços de ventilação do subsolo detectou-se que a camada de revestimento sobre a manta de impermeabilização estava em processo de deslocamento, conforme apresentado na Figura 19.



Figura 19 (a) e (b): Deslocamento do revestimento de argamassa aplicado sobre a manta de impermeabilização no poço de ventilação da vaga 503.

É possível observar que o poço de ventilação está em contato com o jardim externo da edificação. Neste sentido, pode-se apontar como prováveis causas do deslocamento a pressão negativa provocada pela infiltração de água no jardim além de vícios construtivos decorrentes do procedimento executivo de aplicação da manta.

A norma NBR 9574/2008: Execução de impermeabilização recomenda, no item 4.3.13.3., a execução de proteção mecânica estruturada com tela de fios de arame galvanizado ou plásticos nas áreas verticais.

A camada de proteção mecânica consiste em um estrato com a função de absorver e dissipar os esforços estáticos ou dinâmicos atuantes por sobre a camada impermeável, de modo a protegê-la contra a ação deletéria desses esforços. A proteção mecânica estruturada com telas metálicas proporciona o ancoramento do revestimento, melhorando a aderência entre essa camada e a manta.

Nas áreas verticais dos poços de ventilação do subsolo observou-se a aplicação de revestimento argamassado sobre a manta de impermeabilização, atuando como camada de proteção mecânica. Entretanto, após algumas verificações, constatou-se que este revestimento não foi executado com a utilização de telas metálicas, o que reduz sua aderência com a manta, causando o deslocamento observado e danificando o sistema de impermeabilização.

4 Ensaios Realizados

A metodologia adotada para a análise estrutural do subsolo abrange a realização de ensaios tecnológicos não destrutivos com o objetivo de identificar a origem e as causas das principais manifestações patológicas observadas e avaliar o desempenho e o grau de deterioração da estrutura.

4.1 Ensaio de Pacometria

O ensaio de pacometria apresenta a função de determinação da posição, espessura e cobertura do aço, sendo esse realizado com o uso do pacômetro a partir do princípio da indução magnética.

Durante a análise visual observou-se que a espessura do revestimento das barras de aço era insuficiente, o que pode facilitar o processo de corrosão da armadura. Dessa forma, fez-se necessário medir a espessura do revestimento, em alguns pontos do subsolo, através do ensaio de pacometria.

O objetivo secundário deste ensaio foi detectar a posição das barras de aço nas áreas da estrutura escolhidas para a realização do ensaio de esclerometria.

A realização do ensaio de pacometria nas vigas de bordo dos poços de ventilação, a fim de determinar o revestimento da armadura, é apresentada nas Figuras 20 e 21.

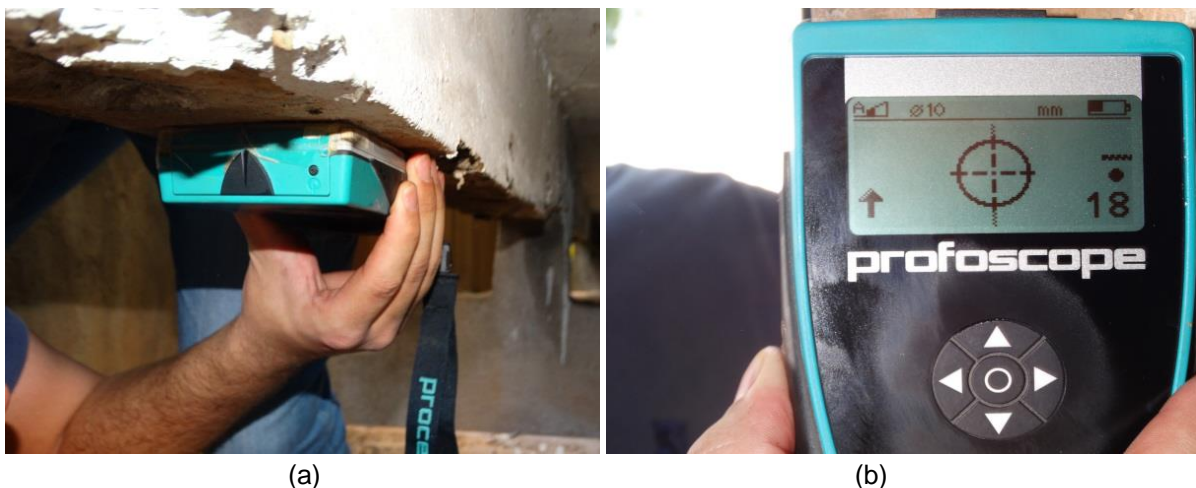


Figura 20 (a) e (b): Ensaio de pacometria realizado na viga do poço de inspeção da vaga 604



Figura 21 (a) e (b): Ensaio de pacometria realizado na viga do poço de inspeção da vaga 407

O ensaio de pacometria foi realizado em algumas vigas de bordo dos poços de ventilação, pois foram os locais em que se observou maior grau de corrosão e exposição da armadura. Em geral, os valores de cobrimento obtidos para estas vigas ficaram abaixo de 25 mm, e alguns abaixo de 10 mm.

A norma 6118/2014: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, no item 7.4., estabelece as espessuras mínimas de cobrimento da armadura conforme a classe de agressividade ambiental, o tipo de estrutura e o elemento estrutural.

O subsolo da edificação é um local com maior exposição à ação do dióxido de carbono (CO_2), logo, considera-se classe de agressividade ambiental II por apresentar maior risco de deterioração da estrutura.

A norma estabelece um cobrimento nominal de 25 mm em lajes e 30 mm em vigas e pilares, para estruturas de concreto armado, em um local com classe de agressividade ambiental II, tal como o subsolo em estudo.

A partir dos valores de cobrimento obtidos no ensaio de pacometria, verificou-se que a espessura do cobrimento da estrutura do subsolo, em geral, não se adequa

as especificações da NBR 6118: 2014. E ainda, os valores de diâmetro das barras de aço lidos no equipamento indicam que houve aumento da seção das barras devido à corrosão, o que compromete o desempenho estrutural da armadura.

4.2 Ensaio de Esclerometria

Este ensaio é executado seguindo os procedimentos prescritos na NBR 7584/2013: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão- Método de ensaio.

O método de ensaio é baseado no princípio do ricochete e consiste em realizar impactos na superfície da estrutura e medir o retorno da força aplicada após o impacto para fins de determinar a dureza superficial do concreto endurecido e avaliar sua qualidade, estabelecendo uma correlação com a resistência.

As áreas de ensaio foram definidas com base nos critérios estabelecidos por norma e foram devidamente preparadas por meio de polimento enérgico com disco de carborundum, através de movimentos circulares. Vale ressaltar que em todas as áreas foram feitas marcações da posição do aço, detectada com a utilização do pacômetro, a fim de evitar as regiões com concentração excessiva de armadura, conforme apresentado na Figura 22.



(a) (b)
Figura 22 (a) e (b): Ensaio de pacometria para detecção da posição da armadura

A Tabela 02 apresenta os locais onde foram realizados os ensaios de esclerometria:

Tabela 02: Locais do ensaio de esclerometria

Ponto	Local ensaiado
1	Lateral da viga da vaga 307
2	Pilar entre as vagas 607/606
3	Laje de avanço da vaga 506
4	Pilar entre as vagas 205/105
5	Laje de avanço da vaga 404
6	Pilar entre as vagas 401/501
7	Laje de avanço da vaga 403
8	Pilar entre as vagas 603/602
9	Laje de avanço da vaga 301

Vale ressaltar que foram realizados alguns ensaios de esclerometria em áreas próximas à pontos de exposição da armadura a fim de atestar a influência da carbonatação nos resultados obtidos, pois a formação do carbonato de cálcio (CaCO_3) no concreto confere maiores valores da resistência ao impacto.

As Figuras 23 e 24 apresentam o ensaio de esclerometria sendo realizado em algumas áreas do subsolo.

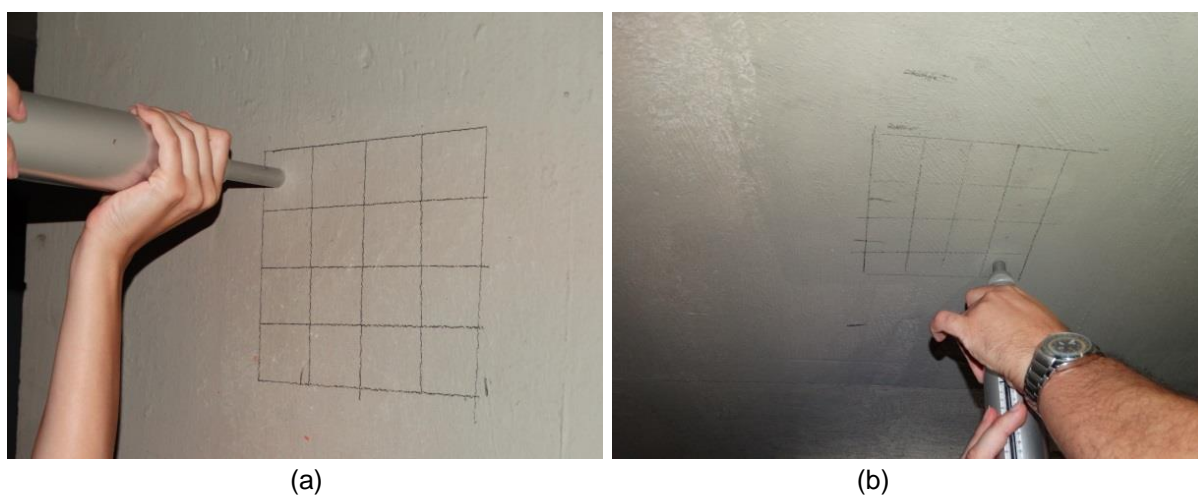


Figura 23: Ensaio de pacometria para detecção da posição da armadura. (a) Pilar entre as vagas 607/606; (b) Laje de avanço da vaga 506



Figura 24: Ensaio de pacometria para detecção da posição da armadura. (a) laje de avanço da vaga 301; (b) Aparelho esclerômetro de Schimidt utilizado no ensaio

Com base nos critérios estabelecidos pela NBR 7584/2013, o índice esclerométrico médio efetivo foi calculado para cada área de ensaio. Na Tabela 03 são apresentados os valores de índices esclerométricos obtidos para cada ponto ensaiado. Os índices esclerométricos que se afastaram em mais de 10% do primeiro valor de média obtido foram desprezados no cálculo da média final, conforme recomenda a norma.

Na Tabela 03 apresentam-se os resultados da média dos índices esclerométricos calculada para cada ponto e a resistência média correspondente.

Tabela 03: Resultados do ensaio de esclerometria

Ponto	Média dos índices esclerométricos	Resistência média (MPa)
1	32,3	39,0
2	40,4	41,0
3	43,0	39,0
4	42,3	44,0
5	42,5	44,5
6	34,6	32,0
7	40,7	41,0
8	39,1	39,0
9	48,2	56,0

4.3 Determinação da Penetração de Frente de Carbonatação

Os produtos da reação de hidratação do cimento conferem ao concreto um pH em torno de 13 à 14. Essa elevada alcalinidade da solução dos poros do concreto é responsável pela formação da película passivadora, que protege o aço contra a corrosão.

A penetração do dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera provoca a reação de carbonatação do concreto, que reduz seu pH a níveis insuficientes para manter o estado passivo das armaduras, podendo causar a corrosão do aço.

Para medir a frente de carbonatação nos elementos de concreto adotou-se o método de avaliação visual da alteração do pH do concreto de cobertura, por meio da aspersão de um indicador. Para este caso foi utilizada uma solução de fenolftaleína, substância que reage com os produtos das reações de hidratação do cimento. Ao aplicar fenolftaleína na superfície de concreto, a região não carbonatada (pH entre 8,3 e 9,5) assume uma coloração rosa, enquanto a região carbonatada (pH inferior a 8,3) se mantém incolor.

Em seguida, são feitas as medidas da frente de carbonatação, considerando a espessura do concreto de cobertura.

Nas Figuras 25 e 26 apresentam-se os ensaios para determinação da penetração de frente de carbonatação nos elementos de concreto do subsolo.



Figura 25: Ensaio de determinação da penetração de frente de carbonatação na viga de bordo da vaga 608; (a) Aspersão de fenolftaleína na superfície de ensaio; (b) Área ensaiada sem alteração na coloração.



Figura 26: Ensaio de determinação da penetração de frente de carbonatação na viga de bordo da vaga 604; (a) Aspersão de fenolftaleína na superfície de ensaio; (b) Área ensaiada sem alteração na coloração.

É possível observar que durante a realização do ensaio, todas as regiões ensaiadas nas vigas de bordo mantiveram-se incolor após a aplicação de fenolftaleína, o que indica que o concreto da estrutura do subsolo encontra-se em estado generalizado de carbonatação.

4.4 Ensaio de Ultrassonografia

Este ensaio foi realizado conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 8802/2013: Concreto endurecido – Determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica. O método consiste em determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um componente de concreto e tem como principais aplicações:

- a) Avaliação da resistência à compressão do concreto;
- b) Verificação de homogeneidade do concreto;
- c) Detecção de eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições;
- d) Monitoramento de variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes de agressividade do meio (ataque químico), principalmente pela ação de sulfatos.

Os pontos a serem ensaiados foram escolhidos conforme os critérios estabelecidos pela norma e de forma a representar toda a área danificada do subsolo.

O ensaio de ultrassonografia foi realizado em algumas vigas de bordo dos poços de ventilação e em alguns pilares do subsolo. Com o auxílio do pacômetro,

aparelho que detecta a posição do aço na estrutura, evitaram-se áreas com concentração excessiva de armadura.

A Tabela 04 apresenta os locais onde foram realizados os ensaios de ultrassonografia.

Tabela 04: Locais do ensaio de ultrassonografia

Ponto	Local ensaiado
1	Viga de bordo da vaga 608
2	Viga de bordo da vaga 307
3	Viga de bordo da vaga 506
4	Viga de bordo da vaga 604
5	Viga de bordo da vaga 603
6	Viga de bordo da vaga 401
7	Pilar da vaga 101
8	Pilar entre as vagas 103/203
9	Pilar entre as vagas 105/205
10	Pilar entre as vagas 207/107

Primeiramente, aplica-se uma fina camada de vaselina nas faces dos transdutores e na superfície da peça de concreto a ser ensaiada. A vaselina funciona como um acoplante que permite o contato contínuo entre as superfícies. Na Figura 27 é ilustrado a vaselina aplicada sobre a área a ser ensaiada.



Figura 27: Vaselina aplicada sobre a superfície de ensaio

A medida da distância entre os pontos onde devem ser acoplados os centros das faces os transdutores deve ser determinada com precisão de 1%, utilizando uma trena manual.

Em seguida, os transdutores são posicionados sob à superfície da peça de concreto e o circuito medidor de tempo indica o intervalo de tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção.

Nas Figuras 28 e 29 apresenta-se o ensaio de ultrassonografia sendo realizado em alguns elementos de concreto do subsolo:

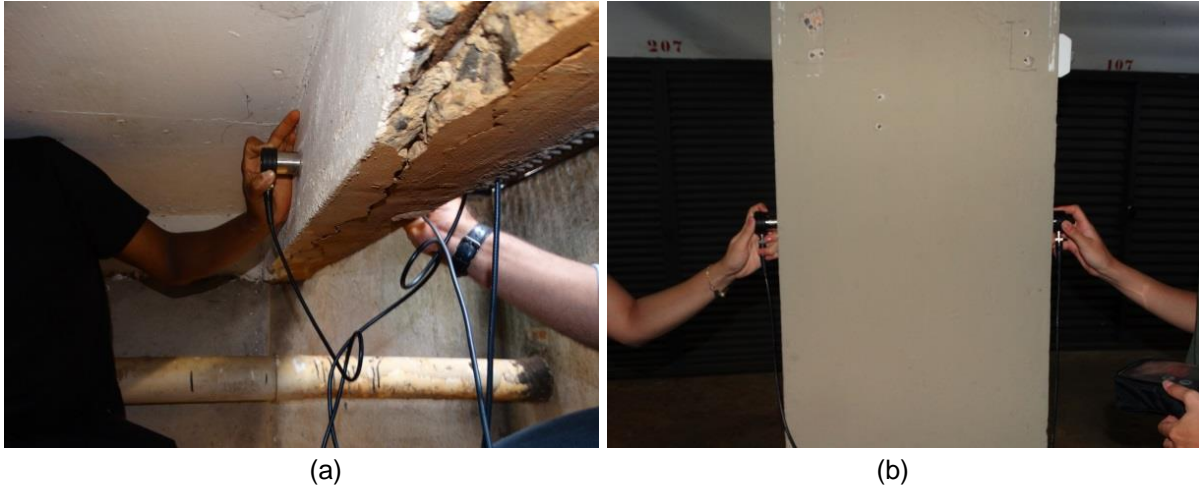


Figura 28: Ensaio de ultrassonografia. (a) viga de bordo da vaga 608; (b) pilar entre as vagas 207 e 107



Figura 29: Ensaio de ultrassonografia. (a) viga de bordo da vaga 604; (b) Leitura efetuada no circuito medidor do tempo de propagação da onda

Após a leitura de tempo realizada para cada ponto, calcula-se a velocidade de propagação das ondas, com intuito de avaliar a qualidade da peça de concreto.

A velocidade de propagação de ondas é calculada conforme a seguinte equação:

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{onde: } V = \textit{velocidade de propagação, expressa em metros porsegundo}$$

$L =$ distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores, expressa em metros

$t =$ tempo efetivo mínimo lido

Alguns autores propõe a avaliação da qualidade do concreto em relação à velocidade de propagação ultrassônica (VPU) de acordo com a Tabela 05 a seguir:

Tabela 05: Classificação da qualidade do concreto em relação à velocidade de propagação da onda

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO (m/s)	QUALIDADE DO CONCRETO ARMADO
> 4.500	Excelente
3.600 a 4.500	Bom
3.000 a 3.600	Aceitável
2.100 a 3.000	Má
< 2.100	Muito má

Conforme os valores de velocidade de propagação calculados para cada ponto ensaiado e os critérios de avaliação apresentados nessa tabela, foi determinada a qualidade do concreto de cada elemento ensaiado. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para cada ponto ensaiado e a correspondente qualidade do concreto do local.

Tabela 06: Resultados obtidos no ensaio de ultrassonografia

Pontos	Velocidade da onda	Qualidade do Concreto
1	3651,69	ÓTIMO/BOM
2	3735,63	ÓTIMO/BOM
3	3086,42	BOM/DUVIDOSO
4	4024,77	ÓTIMO/BOM
5	3624,63	ÓTIMO/BOM
6	3223,33	BOM/DUVIDOSO
7	3418,80	BOM/DUVIDOSO
8	3672,57	ÓTIMO/BOM
9	3706,97	ÓTIMO/BOM

5 Resultados e Discussão

Os ensaios realizados permitiram uma avaliação da homogeneidade e obtenção da resistência do concreto dos elementos da estrutura do subsolo, além de identificar as principais causas das manifestações patológicas observadas.

Foi verificado, por meio do ensaio de pacometria, que as espessuras dos cobrimentos da armadura nas vigas de bordo dos poços de ventilação e nas lajes de avanço das vagas são insuficientes e não se adéquam às especificações estabelecidas pela norma vigente NBR 6118: 2014. Essa inconformidade é a principal responsável pelas manifestações patológicas de carbonatação do concreto e, conseqüente, corrosão e exposição da armadura, que causa o deslocamento do cobrimento, observadas durante a inspeção predial.

Conforme verificado por meio da análise visual e dos ensaios realizados, as vigas de bordo dos poços de ventilação e as lajes de avanço do subsolo apresentam maior grau de deterioração, devido ao processo avançado de carbonatação do concreto de cobrimento e corrosão e exposição da armadura.

O ensaio de avaliação da penetração de frente de carbonatação indicou carbonatação avançada do concreto das vigas de bordo, e por meio da análise visual observou-se estado evoluído de corrosão da armadura nesses elementos.

Os resultados obtidos no ensaio de ultrassonografia e esclerometria realizados nos pilares do subsolo indicam que o concreto desses elementos apresentam boa qualidade e boa resistência.

Os resultados obtidos nos ensaios de ultrassonografia, em geral, foram satisfatórios, indicando que o concreto das vigas de bordo e dos pilares do subsolo apresentam boa qualidade. No entanto, constatou-se que as lajes de avanço das vagas apresentam estrutura de concreto armado não maciça ou tipo caixão, pois não se obteve nenhuma leitura na realização do ensaio neste local.

Apesar dos resultados de resistência obtidos no ensaio de esclerometria para as vigas de bordo e as lajes de avanço serem satisfatórios, a carbonatação do concreto influenciou nesses resultados, conferindo maiores valores aos índices esclerométricos. Logo, esses resultados não podem ser considerados válidos para uma avaliação apropriada da qualidade e resistência do concreto desses elementos.

6 Diagnóstico e Origem das Manifestações Patológicas Observadas

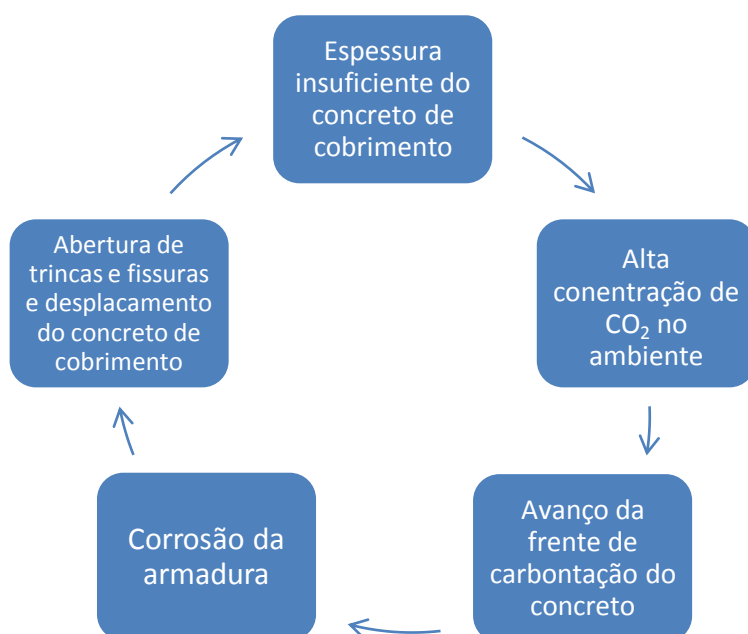
As causas das manifestações patológicas observadas no subsolo da edificação estão relacionadas aos seguintes fatores:

- avaliação crítica do projeto;
- compatibilidade com as especificações de normas;
- condições de exposição do local;
- qualidade dos materiais utilizados durante a construção;
- mão de obra empregada;
- manutenção periódica;

A espessura insuficiente do cobrimento da armadura, verificada nas vigas de bordo dos poços de ventilação e nas lajes de avanço do subsolo, é a principal responsável pela frente de carbonatação avançada do concreto. Como dito anteriormente, a redução da alcalinidade do concreto induz a corrosão da armadura. O processo de corrosão provoca o aumento de seção das barras de aço, causando a abertura de trincas, fissuras e rachaduras na estrutura e o deslocamento do concreto de cobrimento.

Vale ressaltar que as condições de exposição do subsolo, devido à circulação de veículos, contribuem significativamente na ocorrência das manifestações patológicas verificadas. A alta concentração de dióxido de carbono (CO_2) no ambiente e a inadequação do cobrimento das vigas e lajes intensificam o processo de carbonatação do concreto e corrosão da armadura nesses elementos.

O Organograma 2 apresenta um esquema explicativo das causas e do ciclo das manifestações patológicas observadas no subsolo.



Organograma 02: Esquema explicativo das manifestações patológicas observadas

7 Considerações Finais

Com base nas verificações efetuadas durante as atividades de inspeção predial desenvolvidas, conclui-se que a estrutura do subsolo não apresenta risco de colapso iminente. Entretanto, as manifestações patológicas observadas tendem a se agravar com o tempo, aumentando o risco de ruptura de alguns elementos e comprometendo a estabilidade da estrutura, conforme descrito no corpo do laudo.

Dessa forma, recomenda-se que sejam executados serviços de manutenção corretiva imediatamente a fim de recuperar o desempenho estrutural de todos os elementos deteriorados.

8 Manutenções Corretivas

Através das atividades de inspeção desenvolvidas e dos resultados obtidos nos ensaios realizados, verifica-se a necessidade de execução de serviços de manutenção corretiva e recuperação da estrutura do subsolo.

As vigas de bordo dos poços de ventilação e as lajes de avanço das vagas encontram-se, praticamente, em estado generalizado de deterioração por carbonatação do concreto e corrosão e exposição da armadura.

Para a recuperação do desempenho estrutural desses elementos, deverão ser executados os seguintes serviços de manutenção corretiva:

- Remoção e substituição das barras de aço corroídas;
- Recuperação do concreto por meio da aplicação de resinas epoxídicas e material estrutural tipo graute;
- Realcalização química do concreto;

Além disso, recomenda-se que seja realizada a manutenção corretiva do sistema de impermeabilização das calhas dos poços de ventilação, executando os seguintes serviços:

- Substituição da manta de impermeabilização existente;
- Aplicação do revestimento de proteção mecânica com tela metálica, conforme recomenda a norma;
- Instalação de ralos hemisféricos adicionais, se for possível à adequação das instalações de águas pluviais, nos poços de ventilação para escoamento da água da chuva;

9 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto** — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584: Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9574: Execução de impermeabilização**. Rio de Janeiro, 2008.

DEUTSCH, Simone F. **PERÍCIAS DE ENGENHARIA: A apuração dos fatos**. 2. Ed. São Paulo, LEUD, 2013.

ISAIA, Geraldo C. et al. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**. São Paulo, IBRACON, 2011.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo, IBRACON, 2014.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J.. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre, Bookman, 2013.

THOMAZ, Ercio. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. São Paulo, PINI, 1989.

ANEXOS

ANEXO I:
**CROQUI DE MAPEAMENTO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS
DETECTADAS NO SUBSOLO**

