

INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURA DE CONCRETO PRÉ-FABRICADO – ESTUDO DE CASO.



Rachel MORAIS

Tecg.^a Const. Civil
PhD Engenharia
São Paulo; Brasil
rachel.morais@concretophd.com.br



Douglas COUTO

Engenheiro Civil
PhD Engenharia
São Paulo; Brasil
douglas.couto@concretophd.com.br



Paulo HELENE

Prof. Titular
Universidade de São Paulo
São Paulo, Brasil
paulo.helene@concretophd.com.br

RESUMO

Este artigo apresenta a inspeção, análise e diagnóstico de uma estrutura de concreto pré-fabricado, inicializada em 2007, com problemas de projeto estrutural e execução. A estrutura de concreto pré-fabricado, hoje com cinco anos de idade, situa-se numa área urbana e litorânea, e desde o primeiro ano de uso vem apresentando deficiências referentes ao desempenho estrutural e manifestações patológicas. Durante o estudo e análise da estrutura foram realizadas inspeções visuais preliminares e detalhadas, verificação do projeto estrutural, ensaios físicos e químicos em amostras do concreto, concluindo-se por um projeto de intervenção corretiva, trabalhosa e onerosa.

Palavras-Chave: Projeto estrutural; Patologias, Inspeção; Diagnóstico; Reabilitação estrutural.

1. INTRODUÇÃO

Este estudo consiste de um trabalho de inspeção, onde foram realizados ensaios físicos e químicos detalhados, além da análise de projeto estrutural, para assim proceder com o diagnóstico conclusivo, referente a ocorrência de diversas manifestações patológicas em uma estrutura de concreto pré-fabricado, construída em uma área urbana e litorânea do Brasil. O objetivo principal deste trabalho foi a avaliação dos parâmetros de estabilidade, durabilidade e vida útil desta estrutura.

A estrutura em questão está inserida em uma atmosfera classificada, em seu macroclima (fachada e partes externas), de acordo com a normalização brasileira, como Classe de Agressividade III (agressividade forte, urbana e marinha), Classe II nos interiores abertos e Classe I nos ambientes internos e climatizados conforme classificação da *Tabela 6.4.2* da ABNT NBR 6118:2014 [1], apresentada na Tabela 1.1.

De acordo com os relatos dos usuários, os problemas estruturais iniciaram no primeiro ano de uso da edificação, onde detectou-se o aparecimento de fissuras com diversas medidas de abertura, excesso de vibração nas lajes, deformações nos caixilhos e esquadrias de madeira, entre outros. Essas ocorrências e percepções levaram, em um primeiro momento, à execução de reparos paliativos e intermitentes.

Essas medidas, realizadas durante os cinco anos de uso do edifício não foram suficientes, em virtude de que não se tinha um diagnóstico adequado da estrutura, sendo então impossível corrigir a real causa dos problemas patológicos, que neste caso, como visto adiante, trata-se de problemas patológicos congênitos de projeto, e outros adquiridos ao longo dos anos, devido ao desempenho insatisfatório.

Tabela 1.1 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 2)}	Elevado
		Respingo de maré ^{1), 3)}	

¹⁾ Pode-se admitir um micro clima com classe de agressividade um nível mais branda para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviços de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade um nível mais branda em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes das estruturas protegidas de chuvas em ambientes predominantemente secos ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazém de fertilizantes, indústrias químicas.

Tendo em vista que, diversas partes da estrutura apresentavam deficiências em seu desempenho em serviço, as verificações e análises foram realizadas segundo as respectivas normas técnicas, neste caso, a ABNT NBR 6118:2014 [1] e ABNT NBR 9062:2006 [2], entre outros documentos normativos nacionais e internacionais, admitidos como complementares a estas normas.

Diante do exposto, este trabalho explana os aspectos compreendidos na avaliação de uma estrutura de concreto, neste caso pré-fabricado, que expõe diversos tipos de manifestações patológicas, ocasionadas em parte, devido à insuficiência de especificações e detalhamentos no projeto estrutural, aliadas a execução inadequada. Também são enfatizadas as etapas de avaliação, ensaios e métodos de análise que guiaram este diagnóstico.

2. DESCRIÇÃO SUSCINTA DA ESTRUTURA

A estrutura, situada em um terreno de 10.746,52m² consta de um único bloco, composto de um edifício administrativo e um galpão de depósito, sem juntas de dilatação, totalizando uma área construída de 5.649,90m², subdividida conforme descrito abaixo. A fachada principal do edifício está ilustrada na Figura 2.1.

- Térreo;
- 1º Pavimento;
- 2º Pavimento;
- Cobertura;
- Casa de Máquinas;
- Fundo do Reservatório Superior;
- Tampa do Reservatório Superior.

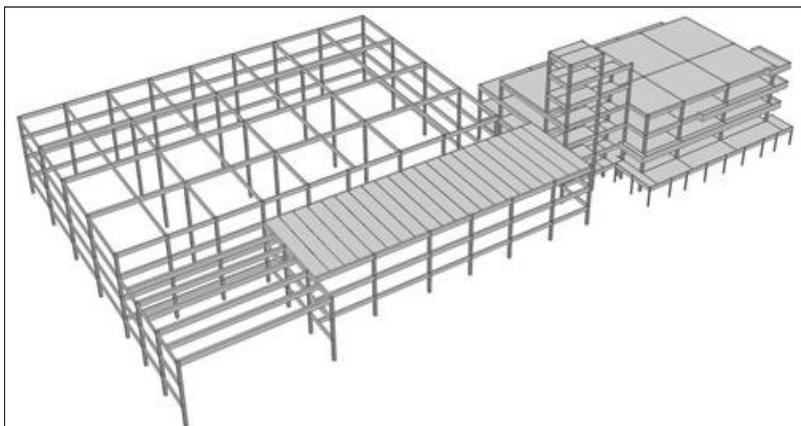


Figura 2.1: Modelo 3D da estrutura de concreto pré-fabricado.

O sistema estrutural foi concebido de vigas e pilares pré-fabricados, além de lajes compostas por vigotas pré-fabricadas, unidirecionais, com enchimento de poliestireno expandido (EPS) e vãos livres da ordem de 9,0m de comprimento.

As possíveis ações ambientais sobre a estrutura de concreto estão diretamente relacionadas com os ambientes onde a mesma está inserida, dando origem aos chamados macro e microclimas. Neste caso, a edificação em questão está localizada a aproximadamente 600m de uma baía e a 2,5km da costa do mar aberto, conforme ilustrado na Figura 2.2.



Figura 2.2: Distância do edifício em relação ao mar.

Fonte: (Google Earth).

A região em questão apresenta elevadas temperaturas, com média climatológica mensal nos últimos 12 meses, variando entre 23°C e 30°C de acordo com dados coletados no CPTEC/INPE [3]. Outro ponto observado está associado à alta salinidade (elevada concentração de cloretos na atmosfera), devido à proximidade ao mar, e, considerando ainda que a umidade relativa média mensal nos últimos 12 meses variou de 65% a 75%, configura um ambiente com agressividade forte e grande risco de deterioração para estruturas de concreto armado e protendido, conforme proposição do CEB (1992).

3. INSPEÇÃO DETALHADA

A inspeção detalhada consistiu preliminarmente na análise dos projetos existentes (arquitetônico e estrutural), visita ao local para conhecimento dos problemas, e sequencialmente foram especificados ensaios de campo e de laboratório. Os locais da estrutura, escolhidos para realização dos ensaios, foram selecionados visando obter a melhor representatividade do todo, considerando tanto regiões de baixo risco como regiões potencialmente de maior risco de ocorrência de manifestações patológicas. Em todas as regiões selecionadas foram realizadas inspeções visuais e ensaios localizados (destrutivos e não destrutivos), para comprovação das hipóteses de trabalho, definidas na inspeção preliminar e na análise dos projetos.

3.1 Análise do projeto (verificação estrutural)

Inicialmente na estrutura, é fundamental ter conhecimento da resistência do concreto à compressão. Sobre como avaliar e julgar essa resistência, conforme ou não, deve-se tomar como referência a norma ABNT NBR 6118:2014 [1], complementada pelas normas ABNT NBR 7680:2007 [4], ABNT NBR 8681:2003 [5], e também pela ABNT NBR 12655:2006 [6]. Considerando a complexidade do tema o assunto foi complementado com o uso dos documentos internacionais amplamente reconhecidos como o EUROCODE 2-2005, *fib Model Code* 2010 e ACI 318-14.

A verificação propriamente dita foi feita com auxílio de modelos computacionais específicos, onde os parâmetros de verificação foram calibrados com critérios da ABNT NBR 6118:2014 [1] e ABNT NBR 9062:2006 [2], e que também serviu de base para elaboração posterior, do projeto de intervenção corretiva.

3.2 Métodos de ensaio

3.2.1 Cobrimento das armaduras

O cobrimento foi medido através do ensaio de pacometria e por prospecção *in loco*. Para os ensaios de pacometria foi utilizado o aparelho portátil “HILTI-Ferroscon”, representado na Figura 3.1, para determinar a espessura de cobrimento da armadura em pilares, conforme método adaptado de normas internacionais como: BS 1881 204:1988, ACI 228.2R-21 2004, entre outras. Ressalta-se que ainda não há método brasileiro normalizado sobre este ensaio.



Figura 3.1: Procedimento realizado para detectar o posicionamento das armaduras utilizando o pacômetro “HILTI-Ferroskan”.

3.2.2 Medição da profundidade de carbonatação

A velocidade de carbonatação e sua profundidade dependem de inúmeros fatores, desde aspectos ligados ao próprio material, como porosidade e reserva alcalina, a aspectos ligados ao clima, como umidade relativa do ar, temperatura, ocorrência de chuvas ácidas, teor de CO_2 no ambiente e incidência e duração de ciclos de umedecimento e secagem.

Para a determinação da profundidade de carbonatação, podem-se utilizar indicadores químicos e colorimétricos, do tipo solução alcoólica de fenolftaleína e/ou timolftaleína, aplicada por *spray* sobre uma prospecção recém-fraturada. As determinações foram feitas segundo o método CPC-18 da RILEM, utilizando solução alcóolica de fenolftaleína a 1%.

A medida da profundidade de carbonatação foi realizada em superfície recém-fraturada do concreto, coletando em cada medida a profundidade mínima e máxima da frente de carbonatação, registrando a média de avanço dessa frente. Na Figura 3.2 está ilustrado o procedimento do ensaio.



Figura 3.2: Aspersão de solução de fenolftaleína para medição da profundidade de carbonatação e verificação das espessuras carbonatadas.

3.2.3 Contaminação por íons cloreto

O teor de íons cloreto é uma medida importante para orientar um programa de manutenção e proteção superficial da estrutura, visto que as peças estruturais por eles contaminadas apresentam uma velocidade de corrosão da armadura maior do que quando os cloretos não estão presentes.

O procedimento empregado em campo envolveu a coleta do material (pó) para ser ensaiado no laboratório, conforme disposto na ASTM C 1152, considerando também os conceitos do procedimento expresso na ASTM C 1202. Na Figura 3.3 pode-se observar o referido ensaio, realizado com uma perfuratriz.



Figura 3.3: Coleta do material utilizando uma perfuratriz para detectar a contaminação de cloretos.

3.2.4 Resistividade elétrica

Trata-se de método de ensaio para determinação da resistividade elétrica do concreto, considerada um dos parâmetros decisivos no controle da velocidade da reação de corrosão das armaduras. A resistividade elétrica controla o fluxo de íons que difundem no concreto através da solução aquosa presente nos seus poros, sendo altamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio e à temperatura do concreto, reduzindo-se com o aumento desta (HELENE, 1993) [7].

Conforme Escalate e Andrade, para determinações de campo ou para acompanhamento tipo monitoramento de estruturas, pode ser adaptada a metodologia proposta por Wenner para medida da resistividade de solos pelo sistema dos quatro eletrodos, ou seja, o método ASTM G57-06.

3.2.5 Medição do potencial de corrosão

Este ensaio consiste no método padrão, normalizado pela ASTM C 876, que através de um eletrodo de referência (o mais comum é o de cobre/sulfato de cobre), é possível medir a diferença de potencial de eletrodo do sistema armadura-concreto (semi-pilha) comparativamente ao potencial do eletrodo de referência secundário, em regiões próximas ao ponto de aplicação do eletrodo de referência na superfície do concreto (HELENE, 1993) [7].

Um voltímetro de alta impedância ($\geq 10M\Omega$), para reduzir os efeitos de polarização, é conectado entre a armadura e o eletrodo de referência que fica apoiado sobre a superfície do componente estrutural. O resultado obtido é também conhecido por potencial eletroquímico ou potencial de corrosão da armadura no concreto.

Para o ensaio do potencial de corrosão foi utilizado um milivoltímetro de alta impedância, equipado com um eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre ($Cu + CuSO_4$).

3.2.6 Medida da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

Este método de ensaio não destrutivo determina a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos. O objetivo deste ensaio foi de verificar a homogeneidade do concreto e eventuais vazios internos (ninhos) nos elementos estruturais, em conformidade com a ABNT NBR 8802:2006 [8].

Para realização do ensaio foi utilizado um equipamento de ultrassom modelo Pundit Lab, fabricado pela *Proceq*. Na Figura 3.4 podem ser observados respectivamente os transdutores posicionados em faces opostas e o procedimento do ensaio.

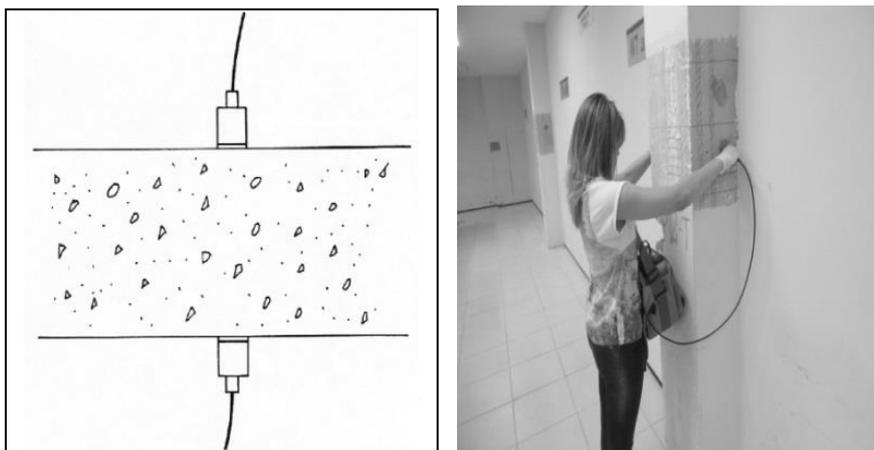


Figura 3.4: Transdutores posicionados em faces opostas e realização do ensaio.

3.2.7 Avaliação da dureza superficial do concreto

Para o ensaio de avaliação da dureza superficial do concreto foi adotado o método da ABNT NBR 7584:2013 [9] empregando-se para obtenção do índice esclerométrico médio, uma malha de dezesseis pontos para cada local de ensaio. Os resultados são apresentados como média aproveitável de cada local de ensaio, em porcentagem de reflexão, conforme ABNT NBR 7584:2013 [9].

Para as medidas *in loco*, foi utilizado esclerômetro de energia de impacto de 2,25N.m (tipo N), fazendo a média aproveitável das dezesseis percussões do pistão do aparelho, sendo que os pontos de impactos foram uniformemente distribuídos, obedecendo sempre a distância mínima de 30mm entre os centros dos pontos, conforme recomenda a norma.

O resultado deste método é chamado de índice esclerométrico médio, que guarda uma relação com a resistência à compressão do concreto, propriedade de muita importância para avaliação do material do ponto de vista do comportamento mecânico, da homogeneidade da execução da estrutura e da durabilidade.

3.2.8 Extração de testemunhos

Para avaliação da resistência do concreto à compressão, foram realizadas extrações de testemunhos de concreto conforme procedimento da ABNT NBR 7680:2007 [10]. Com o uso de um detector de barras de aço (pacômetro) procedeu-se no local uma investigação minuciosa do posicionamento das armaduras longitudinais e transversais para evitar o corte das mesmas.

Para realização das extrações foram escolhidos 10 pilares, de forma representativa, e o diâmetro indicado do cálice para as extrações foi de \varnothing 75mm, com objetivo de agredir o mínimo possível a estrutura de concreto. Sequencialmente às extrações, foram realizados os preenchimentos dos óculos resultantes da retirada dos testemunhos.

3.2.9 Apreciação petrográfica

Os procedimentos recomendados para execução de apreciação petrográfica em materiais naturais são destinados para direcionar a utilização dos agregados no concreto. São métodos de ensaio normalizados pela ASTM C 856 e ABNT NBR 7389:2010 [11].

Para realização do ensaio foram examinadas visualmente e com lupa estereoscópica as superfícies íntegras dos testemunhos de sondagem denominados EC-127 03 e EC-127 08, extraídos de dois pilares distintos. Foram também examinados os agregados graúdos e miúdos retirados dos testemunhos por impacto e tratados quimicamente para separá-los do cimento.

4. RESULTADOS

Tendo em vista os ensaios acima descritos e realizados tanto em campo como em laboratório, apresentam-se nas figuras 4.1 a 4.6, os resultados obtidos nos respectivos ensaios.

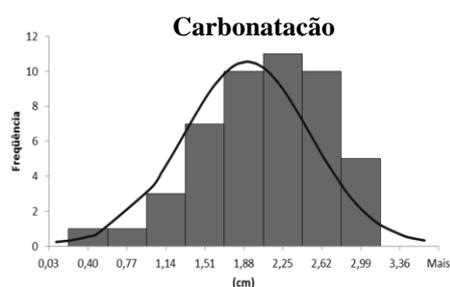


Figura 4.1: Distribuição normal dos resultados de profundidade de carbonatação média.

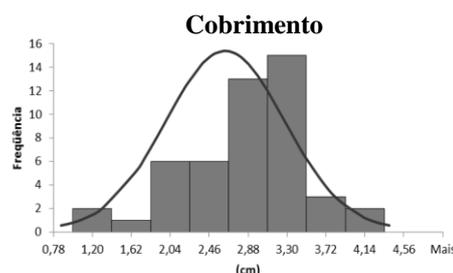


Figura 4.2: Distribuição normal dos resultados de espessura média de cobrimento das armaduras.

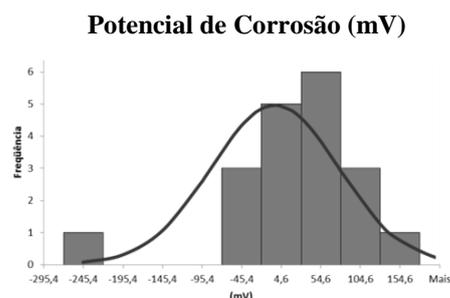


Figura 4.3: Distribuição dos resultados de potencial de corrosão.

Resistividade Elétrica (kΩ.cm)

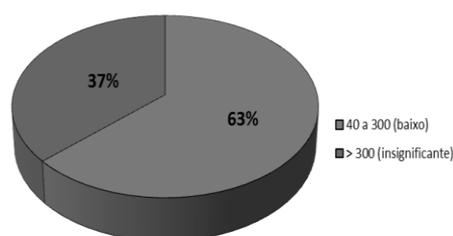


Figura 4.4: Resistividade elétrica.

Verifica-se na comparação dos resultados de ensaio de carbonatação e verificação do cobrimento, que em mais de 50% das amostras a frente de carbonatação atinge ou supera o cobrimento medido. Nos ensaios de resistividade elétrica e potencial de corrosão, pôde-se observar que, a maior parte das amostras apresenta nível baixo ou insignificante de probabilidade de início de processo de corrosão.

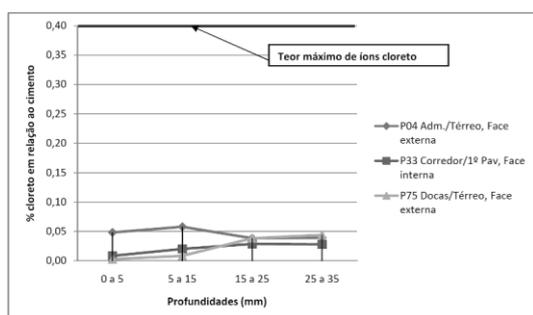


Figura 4.5: Teores de íons de cloreto.

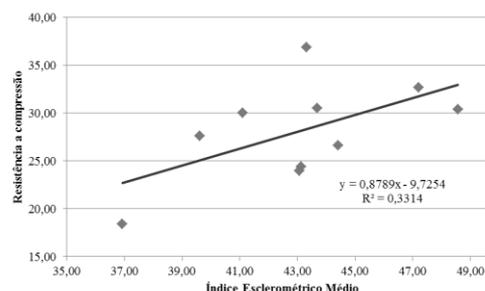


Figura 4.6: Correlação entre o índice esclerométrico médio e resistência à compressão axial.

Observa-se que os teores de íons cloreto obtidos nos ensaios (Fig. 4.5) não excedem o limite de 0,4% conforme estabelecido na Tabela 5 da ABNT NBR 12655:2006 [6], ou seja, são insuficientes para desencadear e acelerar a corrosão do aço das armaduras.

Conforme se observa na Figura 4.6, os resultados obtidos comprovaram uma correlação fraca, pois o coeficiente de correlação de Pearson (R^2) não atingiu 0,50. Essa dispersão exagerada dos resultados se deve ao fato de, possivelmente, a estrutura estar carbonatada e com alto grau de umidade, além de fatores ligados as operações de manuseio e de adensamento do concreto e variabilidade intrínseca do método esclerométrico. Em suma, foram utilizados como referência os resultados obtidos no ensaio de compressão axial de testemunhos, por estes serem mais representativos.

Tratando-se da análise do ensaio de apreciação petrográfica, verificou-se que os agregados graúdos extraídos dos corpos de prova, são originados por cominuição de rocha granítica, cujas feições micro e macroscópicas indicam potencialidade inócua quanto à reação álcali-agregado. O agregado miúdo foi identificado como areia detrítica natural sem indícios de potencial reativamente alcalino.

O ensaio de ultrassom apresentou resultados com média de 4421m/s, desvio padrão de 130m/s e coeficiente de variação de 2,9%. Esses resultados mostram que o concreto se apresenta em boas condições, do ponto de vista de continuidade e adensamento.

Já os resultados de resistência a compressão de testemunhos extraídos apresentaram resistência média de 28,6MPa, desvio padrão de 5,2MPa e coeficiente de variação de 18%. Embora a maior parte dos resultados tenha atendido ao especificado no projeto estrutural, e os valores do desvio padrão e coeficiente de variação estejam em um patamar aceitável, nota-se que a resistência obtida e especificada no projeto estrutural é inadequada à classe de agressividade ambiental.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos ensaios realizados em campo e em laboratório conduziram à elaboração de um projeto de intervenção corretiva, com o intuito de garantir a durabilidade e desempenho estrutural adequado desta estrutura. A intervenção, com vistas à durabilidade, prevê a aplicação de proteção superficial, com o objetivo de compensar a deficiência do material e de cobrimento, bem como desacelerar o processo de carbonatação, já bastante adiantado nessa estrutura.

Os problemas de ordem estrutural, encontrados através de avaliação específica, foram analisados e corrigidos através de projeto de reabilitação estrutural, elaborado em conjunto com as recomendações de durabilidade mencionadas neste artigo, entretanto, não foi objetivo dos autores tratar dos aspectos estruturais neste documento, pois se considera tema para um trabalho futuro e mais específico.

Diante das análises realizadas nas alvenarias, houve a necessidade de demolir todas as alvenarias internas e externas, substituindo as paredes internas por placas de gesso acartonado, e as paredes externas por painéis de placa cimentícia. Após a análise estrutural realizada, o projeto de intervenção contemplou a redução dos vãos de determinadas lajes, inserindo vigas metálicas transversais às vigotas, diminuindo assim o desconforto aos usuários causado pelas vibrações excessivas.

Por fim, observados os problemas e análises realizadas, constatou-se que se medidas simples de projeto e boas práticas de construção tivessem sido empregadas neste empreendimento, todas as manifestações patológicas verificadas nessa inspeção, poderiam ter sido mitigadas.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “ABNT NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto. Procedimento”. Rio de Janeiro, 2014.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “ABNT NBR 9062. Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado”. Rio de Janeiro, 2006.
- [3] CPTEC – “Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climatológicos” / INPE – “Instituto Nacional de Pesquisa Espacial”, site: www.cptec.inpe.br consultado no dia 22 agosto de 2014.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “ABNT NBR 7680. Concreto – Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto”. Rio de Janeiro, 2007.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “ABNT NBR 8681. Ações e segurança nas estruturas – Procedimento”. Rio de Janeiro, 2003.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “ABNT NBR 12655. Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento”. Rio de Janeiro, 2006.
- [7] HELENE, P. R. L. “Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado”. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “ABNT NBR 8802. Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica”. Rio de Janeiro, 2013.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “ABNT NBR 7584. Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio”. Rio de Janeiro, 2013.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “ABNT NBR 7680. Concreto – Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto”. Rio de Janeiro, 2007.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “ABNT NBR 7389. Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado para concreto”. Rio de Janeiro, 2010.