Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

ESTUDO DE CASO DE INSPEÇÃO EM UMA ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DE ESCLEROMETRIA E ULTRASSOM

D. JESUS DE SOUZA
Engenheiro Civil
Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
diegojesusdesouza@hotmail.com

L. GHION ZORZAN
Estudante
Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
lucasghionzorzan@gmail.com

L.H. MARUCCO DE OLIVEIRA
Estudante
Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
lhmarucco@gmail.com

M.H.F. DE MEDEIROS
Professor Doutor
Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
medeiros.ufpr@gmail.com

RESUMO

O setor da construção civil, em esfera nacional, é sensivelmente oscilante junto à instabilidade econômica. Neste contexto torna-se comum o encontro de obras inacabadas no país, sejam elas públicas ou privadas. A presente pesquisa busca avaliar as condições estruturais de uma edificação destinada à serviços educacionais que se encontra interrompida e apenas com elementos estruturais, vigas, lajes e pilares, concluídos. Para tanto, ter-se conhecimento da durabilidade e da qualidade do concreto se faz necessário, logo a utilização de ensaios não destrutivos (END), os quais apresentam menores custos e dificuldade de realização, é uma boa opção para cumprimento deste objetivo. Neste sentido, o presente trabalho visa comparar a compatibilidade de dados obtidos através de dois ensaios não destrutivos, esclerometria e ultrassom, para avaliação da resistência do concreto e o estado de degradação do mesmo. Regido por normas da ABNT, cabe também a este estudo verificar a correlação entre os dados obtidos por ambos os ensaios, analisando sua confiabilidade enquanto substitutos da extração de testemunhos. Foi constatado que houve uma boa correlação entre os resultados dando confiabilidade à pesquisa, assim como observou-se também que há alguns pontos críticos na estrutura devido à elevada degradação do concreto provocada pela exposição às intempéries e a erros de execução.

Palavras-chave: Esclerometria, Ultrassom, Durabilidade do Concreto, Inspeção, Concreto Armado.

ABSTRACT

The civil construction sector, at a national level, is sensitively swinging due to the economic instability swinging by the economic instability. In this context, it has become common facing unfinished constructions, in the public or private sectors. This research seeks to evaluate the structural conditions of a building destined to educational services that has been interrupted and has only structural elements such as beams, slabs and pillars completed. In this purpose, to have knowledge of proprieties such as concrete's durability and quality it is necessary. Thereby, the use of non-destructive testing methods, which present lower costs and less performing difficulties, is a good option to accomplish this goal. In this regard, this study aims to analyze the compatibility of data acquired from two non-destructive testing methods, rebound hammer test and ultrasonic test, to evaluate concrete's resistance and its decay. Regulated by ABNT's rules, it's up to this study to verify the correlation between data acquired by both trials, analyzing its trustworthiness as a replacement for core extraction. The results showed that the methods were adequate, giving reliability to the research, as also noted that there are some critical points in the structure due to high specific degradation caused by exposure to adverse weather and execution errors.

Keywords: Rebound Hammer Test, Ultrasonic Test, Durability of Concrete, Inspection, Reinforced Concrete.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

Em geral, os estudos sobre durabilidade das estruturas de concreto se fazem recentes no país. Porém, tal campo de pesquisa deve sempre abranger o material da forma mais completa possível. Nada obstante, deve-se levar em consideração os aspectos relativos aos constituíntes dessa estrutura (agregado, cimento, aço, etc.) [1][2][3] e de sua mistura, como relação *a/c* uso de aditivos e adições, entre outros, ou então à sua construção (condições de cura, adensamento) [1][3]. Portanto, a durabilidade em serviço é determinada pela capacidade da estrutura em resistir a quaisquer processos de deterioração [4], o que requer a especificação dos materiais a serem utilizados na sua execução, de forma a estarem intrinsicamente relacionados à agressividade do entorno a que estará sujeito durante a vida útil. Processos químicos, eletroquímicos e físicos são algumas das variáveis envolvidas na função que define o estágio de degradação de uma estrutura de concreto – e que podem determinar por quanto tempo ela atenderá as necessidades para as quais foi executada [2][3].

Em âmbito geral, essa situação de degradação é agravada por dois fatores primordiais: a falta de critério na produção de estruturas de concreto e a escassez de estudos voltados a manifestações patológicas, as quais surgem ao longo do envelhecimento e deterioração das edificações. A análise da durabilidade é, portanto, complexa ao envolver a participação de diferentes profissionais, tecnologias, ensaios de laboratório, equipamentos e ao tratar diretamente com a questão da segurança de edificações [5].

A indústria nacional da construção civil vive um momento desafiador: intrinsecamente ligada ao desempenho econômico do país, oscila entre momentos promissores e de desaquecimento intenso. Assim, é comum encontrar obras inacabadas em todo o país, em especial no que tange ao setor público. Neste mesmo norte, a presente pesquisa busca avaliar as condições estruturais de uma edificação destinada a serviços educacionais que se encontra interrompida e apenas com elementos estruturais, vigas, lajes e pilares, concluídos. Logo, ter conhecimento dos parâmetros de durabilidade e qualidade do concreto são de grande importância. Desta forma, a utilização de ensaios não destrutivos (END), os quais apresentam menores custos e dificuldade de realização, são uma boa opção para realização do escopo da presente pesquisa.

São diversas as técnicas existentes para a quantificação do comportamento mecânico dos materiais. A mais tradicional e difundida é a extração de testemunhos cilíndricos de concreto *in loco* [6]. Embora permita resultados extremamente confiáveis, a técnica é destrutiva e danifica o material já executado. Neste cenário, o emprego de Ensaios não Destrutivos (END) apresenta uma alternativa viável quando não se pretende danificar o material de estudo [7]. Os ENDs incluem métodos capazes de fornecer dados importantes sobre a qualidade de certos componentes, tal como a resistência superficial do concreto, utilizando análises empíricas e teóricas. Tais ensaios possuem como vantagem a não perda na capacidade resistente do elemento [6]. Como elementos fundamentais para esses métodos de ensaio, destacam-se a necessidade de treinamento prévio dos realizadores do ensaio, equipamentos calibrados e procedimentos normatizados com padrões rígidos de qualidade [8][9][10].

Existe, ainda, uma dificuldade na correlação dos dados obtidos nos diferentes ENDs, devido ao fato de que cada método possui características e propriedades singulares [6][8]. Isto é, a esclerometria mede a dureza superficial do concreto baseado no princípio do ricochete do martelo de Schimdt [7] [11], enquanto o ultrassom mede a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas transversais [1][7], e a partir de ambas as medidas, é possível estimar a resistência do concreto. Por este motivo, este trabalho apresenta uma correlação entre os dados de resistência estimados dos dois ensaios por meio de ferramentas estatísticas como regressão polinomial, análise de variância (Anova) e análise comparativa entre médias. Além disso, ao final, o trabalho propõe um panorama geral do efeito dos agentes deletérios atuantes no local de estudo com base nos resultados da análise.

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do estudo foi elaborada uma metodologia de escolha dos pilares da edificação onde foram executados os ensaios de esclerometria e ultrassom, seguindo suas respectivas normas nacionais [12][13]. A partir da base de dados obtida com os ensaios, foi realizada a avaliação estatística segundo os valores de média com desvio relativo máximo de 15%, análise de variância e análise comparativa entre médias (teste de Tukey).

2.1 Critérios de escolha

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

A edificação analisada no presente trabalho encontra-se nesse cenário de descaso: consiste em um prédio público de três pavimentos, localizado na Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, com sua obra paralisada há seis anos no estágio de execução, sem qualquer revestimento ou vedação (Figura 1). A estrutura apresenta diversas falhas executivas e manifestações patológicas relacionadas, ao excesso de umidade e à fissuração, agravadas pelas intempéries.



Figura 64: Estrutura, objeto do estudo.

A estrutura analisada possui um total de 110 pilares no pavimento térreo e 1º piso e 104 pilares no 2º pavimento. Devido a esse grande número de elementos, foi definida uma metodologia de amostragem que contemplou pilares internos e externos de forma alternada. A seleção dos pilares levou em consideração o número de pilares presentes em linhas paralelas às faces laterais da edificação. Em linhas contendo 4 pilares, ensaiou-se nos dois elementos internos enquanto as fileiras com 5 pilares tiveram os dois externos e o interno central ensaiados. Dessa maneira, foram ensaiados 136 pilares do prédio, sendo que 44 (18 externos e 26 internos) pertencem ao pavimento térreo, 45 (23 externos e 22 internos) ao primeiro pavimento e 47 (27 externos e 20 internos) ao segundo. Outro fator que motivou a escolha desse método foi o fato de que alguns pilares encontravam-se consideravelmente danificados ou inacessíveis, o que inviabilizaria o processo de obtenção de dados.

2.2 Esclerometria

O método não destrutivo mais difundido para a avaliação de resistência *in loco* do concreto é o ensaio de esclerometria [6]. O ensaio consiste em impactar uma superfície de concreto, de maneira padrão, com determinada energia de impacto medindo a reflexão de uma massa após o impacto no elemento [3].

O ensaio foi executado conforme as orientações da NBR 7584:2012 [12]. Primeiramente, com o auxílio de um aparelho localizador de armaduras D-TECT 150 Professional da marca Bosch, foram detectadas as armaduras dos pilares, evitando que o esclerômetro fosse utilizado sobre as barras, conforme preconiza a referida norma.. A área em cuja superfície foram realizadas as leituras foi lixada com auxílio de pedra abrasiva, conforme sugere Qasrawi [14], para garantir a uniformidade da superfície. Por fim, foi realizado o ensaio, posicionando o esclerômetro ortogonalmente ao pilar, ou seja, as leituras foram realizadas horizontalmente (Figura 2 – A, B, C). O aparelho uitilizado, no primeiro pavimento e térreo, foi o esclerômetro digital SilverSchimdt, da marca PROCEQ, enquanto no segundo pavimento foi utilizado o esclerômetro analógico OriginalSchimdt, da mesma marca.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



Figura 65: Execução do ensaio de esclerômetria: (A) Localização de armaduras, (B) Uniformização da superficie com pedra abrasiva, (C) Uso do esclerômetro.

Para que houvesse homogeneidade nos resultados, o ensaio foi realizado sem a alteração do operador em um mesmo pavimento. Além disso, cada operador contava com um auxiliar, o qual assegurou que o equipamento estivesse posicionado ortogonalmente ao pilar. Através do ensaio de esclerometria realizado em campo obtiveram-se diversos valores de índice esclerométrico (Q) - tradução numérica do ricochete do impacto do equipamento na superfície do concreto. Uma vez determinada a média aritmética dos dezesseis valores de índice Q de cada pilar, estimou-se a resistência à compressão do concreto (f_c), através da Equação 1, fornecida pelo fabricante do aparelho.

$$fck = 2{,}77 \times e^{(0{,}048 \times Q)} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

- f_{ck} é a resistência à compressão do concreto;
- Q é o índice esclerométrico médio.

2.3 Ultrassom

O ensaio de ultrassom utiliza pulsos ultrassônicos para medir o tempo de percurso de ondas longitudinais ou transversais passando pelo concreto. Normatizado pela ABNT NBR 8802:1994 [13] e ASTM C 597 [15], o ensaio de ultrassom pode ser feito de maneira direta, indireta ou semi-direta para a obtenção da velocidade média de propagação da onda.

- Transmissão direta: é o arranjo mais recomendado pela ABNT NBR 8802:1994 [13]; nele, os transdutores posicionam-se em faces opostas;
- Transmissão indireta: utilizada quando só se possui acesso a uma das faces do elemento; é o arranjo que mais demanda estudos atualmente devido à sua facilidade de utilização (Figura 3);
- Transmissão semi-direta: utilizada em casos não contemplados pelos outros dois arranjos;

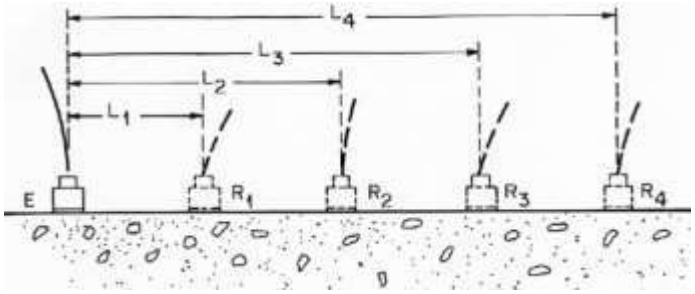

Figura 66: Método de transmissão indireta de ondas sonoras [13]

Para a execução do ensaio, é necessário um bom acoplamento acústico entre os transdutores do equipamento a fim de se obter valores confiáveis de velocidade. Tais valores podem ser, então, convertidos em parâmetros de resistência ou utilizados na avaliação do estágio de degradação do concreto a partir da quantidade de vazios presente nele.

Para a realização do ensaio de ultrassom através de pulsos ultrassônicos foi utilizado, neste trabalho, o equipamento Pundit PL-200PE, fabricado pela empresa PROCEQ, cuja medida da velocidade de propagação das ondas é feita de maneira indireta. A frequência dos transdutores do equipamento é de 50 KHz e as ondas transmitidas são do tipo transversais, com direção de vibração perpendicular à direção de propagação da onda. Para executar o ensaio, o equipamento foi calibrado de acordo com o prescrito no manual de uso, averiguando-se o funcionamento correto de todos os 18 transdutores (9 emissores e 9 receptores). O ensaio de ultrassom foi realizado nos mesmos pilares que a esclerometria, seguindo o mesmo critério de escolha dos elementos. Esta metodologia abrangeu os três pavimentos da edificação.

O equipamento utilizado para o ultrassom possui transdutores extremamente sensíveis à superfície de contato. Deste modo, é necessária a preparação e regularização da superfície onde o teste será realizado e marcação de barras e estribos visto a sensibilidade das ondas sonoras à presença de metal. Em cada pilar, foi aproveitada a preparação de superfície realizada no teste de esclerometria, para o qual a superfície foi lixada e as armaduras localizadas com equipamento próprio para este fim.

Neste processo, a não regularidade das superfícies de alguns pilares impediu a realização do ensaio, já que o equipamento não consegue efetuar as leituras nestes casos. O excesso de argamassa de reparo em alguns pilares foi um dos fatores que dificultou a preparação da superfície utilizando equipamentos manuais.

O equipamento utilizado emite ondas do tipo transversais, logo, pode-se correlacionar a velocidade de propagação destas com o módulo de elasticidade transversal G (ou módulo de cisalhamento) do material (Equação 2). Com isso, pode-se estimar a resistência à compressão do concreto por este método graças a diferenças de densidade do concreto, gerando discrepâncias consideráveis na velocidade de propagação de ondas [16].

$$V^2 = \frac{G}{\rho}$$

(Equação 2)

Onde:

- G = Módulo de elasticidade transversal do material (MPa);
- V = Velocidade de propagação do som no concreto (km/s);
- ρ = Densidade do material (kg/m³);

Após a obtenção do módulo de elasticidade transversal, fez-se a conversão do mesmo para módulo de elasticidade longitudinal conforme a Equação 3 provinda da mecânica dos materiais.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

(Equação 3)

Onde:

- G = Módulo de elasticidade transversal do material (MPa);
- E = Módulo de elasticidade longitudinal do material (MPa);
- ν = Coeficiente de Poisson;

Para esta análise, utilizaram-se parâmetros do material sugeridos pela ABNT NBR 6118:2014 [17] para dimensionamento de estruturas de concreto armado. A massa específica do concreto foi estipulada em 2500 kg/m³ e o coeficiente de Poisson, adimensional, em 0,2. Com a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico do concreto, fez-se uso, para alcance do f_{ck}, da formulação apresentada na referida norma, conforme Equação 4.

$$E = 5600 \times \sqrt{fck}$$

(Equação 4)

Onde:

- E = Módulo de elasticidade longitudinal do material (MPa);
- *fck* = Resistência característica do concreto (MPa);

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Após a transformação da velocidade de propagação em parâmetros de resistência do material, os dados divididos por pavimento foram avaliados estatisticamente.

Deve-se, por fim, evidenciar que a utilização de ambos os métodos não destrutivos, fez-se para a obtenção de uma estimativa de resistência dos concretos estrutudados. Com foco na análise da variabilidade entre os mesmos, podendo-se então, concluir a respeitos das diferenças comportamentais e deformáveis dos elementos estudados.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1 Análise da variação da resistência

Os resultados do ensaio de esclerometria indicam que alguns pilares apresentam variabilidade de dados, com valores de resistência fora do limite de 15% superior ou inferior da média aritmética, o que não deveria ocorrer, já que, por se tratar de um pavimento da mesma obra, espera-se homogeneidade de materiais utilizados e execução.Observa-se ainda, maior instabilidade de dados no térreo e segundo pavimento, onde a oscilação da resistência é sensivelmente maior. É possível analisar que 54 dos 136 pilares analisados da estrutura apresentaram valores discrepantes, o que indica que não atuam mecanicamente igual ou semelhante aos outros pilares da edificação, causando heterogeneidade no comportamento da estrutura, o que pode acarretar outros problemas, como fissuração.Supõe-se que a grande variação descrita seja decorrente das falhas de execução, uma vez que a obra inteira se encontra com nítidas indicações desse problema, como reparos e ninhos de concretagem, observados em inspeções visuais. Dada a atual situação da edificação, seria admissível pressupor estes problemas de execução nos próprios pontos de realização dos ensaios de esclerometria.

O tratamento dos dados obtidos através da velocidade de propagação da onda sonora do equipamento dentro do concreto obtida pelo ensaio de ultrassom proporcionou o cálculo do módulo de elasticidade (E). Este, por sua vez, permitiu a obtenção de valores para a resistência característica do concreto. Com os dados obtidos, pôde-se observar que, na maioria dos pilares, a variação da resistência à compressão encontra-se dentro dos limites estabelecidos de 15% de variação da média, para cima ou para baixo. Entretanto, em virtude das diversas manifestações patológicas existentes na edificação, do período em que esta permaneceu paralisada e dos erros executivo, é importante avaliar com atenção os valores discrepantes para analisar o comportamento geral da estrutura. Observa-se que 61 dos 136 pilares analisados em toda a estrutura apresentam valores de resistência discrepantes dos limites de 15% permitidos neste estudo, o que pode alterar significativamente o comportamento mecânico da edificação, o qual, inclusive, reflete a relação entre a resposta ou deformação da estrutura perante uma solicitação tanto externa quanto interna. A discrepância identificada fortalece o fato de que os pilares de um mesmo pavimento e do prédio como um todo resistem e deformam de maneiras diferentes quando solicitados pelas cargas a que a estrutura está submetida.

Como dito anteriormente, o mau dimensionamento e o detalhamento incorreto das peças de uma estrutura pode levar a fissurações excessivas que diminuem a vida útil da construção, então a diferença expressiva da resistência à compressão pode, de fato, ser uma das causas das fissurações que contribuíram para a penetração de agentes deletérios presentes no objeto de estudo deste trabalho, afetando, também, a durabilidade da edificação. Além disso, as deformações diferenciais entre os pilares podem, por si só, provocar o aumento da deformação da estrutura para um patamar não previsto em projeto. Este acréscimo de solicitação pode ainda comprometer a segurança e o uso do prédio. Como pôde-se observar, os resultados de resistência característica do concreto obtidos a partir do ultrassom variam ligeiramente mais do que os provindos da esclerometria. Em valores percentuais, 44,9% dos pilares possuem resistência discrepante em 15% da média segundo o ultrassom enquanto 39,7% encontram-se nesta situação segundo a esclerometria. De modo geral, o ensaio de ultrassom é influenciado pela quantidade de vazios presentes no concreto, visto que o som propaga-se de maneira mais lenta no ar do que em meio sólido. Corroborado por inspeções visuais, os erros executivos relacionados aos elementos estruturais sugerem a existência de vazios e até mesmo áreas segregadas no interior destes. Esse fato mostra que, embora com variação maior nos resultados em torno da média, o ultrassom apresenta-se como um ensaio mais correto ao avaliar a peça mais profundamente e não apenas na superfície como a esclerometria. Conclui-se, assim, que não é possível afirmar, baseado apenas na porcentagem de variação dos dados, qual ensaio é mais preciso quanto à avaliação da resistência.

A variação dos resultados segundo o ensaio de esclerometria também é considerável. Isso deve-se ao fato de que o experimento é mais sensível em sua execução, possuindo diversas variáveis que exigem o controle rígido do procedimento. Por se tratar de medidas superficiais, é profundamente alterado pela rugosidade da face do concreto, pela

presença de fissuras e por revestimentos em argamassa. Novamente, as inspeções visuais comprovam que estes fatores podem, de fato, ter alterado os resultados obtidos com o ensaio. Outro fator que pode alterar os valores de resistência obtidos com a esclerometria é a existência de frente de carbonatação do concreto. A carbonatação, processo natural, provoca colmatação dos poros do concreto aumentando consideravelmente sua resistência superficial. Devido ao tempo de exposição da obra ao ambiente em meio urbano, esta explicação torna-se viável para justificar a diferença numérica considerável existente dos valores de resistência obtidos entre o ultrassom e a esclerometria. O primeiro apresenta valores menores em virtude da não influência da camada carbonatada, mais rígida, enquanto o segundo é muito afetado por este fator.

3.2 Conformidade dos resultados com a Norma ABNT NBR 6118:2014 [10]



Figura 4: Variação e análise da conformidade da resistência à compressão do concreto segundo os ensaios de ultrassom e esclerometria, para os pilares do pavimento térreo.



Figura 67: Variação e análise da conformidade da resistência à compressão do concreto segundo os ensaios de ultrassom e esclerometria, para os pilares do primeiro pavimento.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



Figura 6: Variação e análise da conformidade da resistência à compressão do concreto segundo os ensaios de ultrassom e esclerometria, para os pilares do segundo pavimento.

A análise comparativa da variação da resistência por pavimento visa provar que ambos os ensaios possuem a mesma tendência de variação, embora não com valores idênticos. Como observado nas Figuras 4, 5 e 6, este fato se verifica e mostra que ambos os ensaios convergem para o mesmo resultado de avaliação da resistência à compressão. Essa conexão entre os valores de resistência obtidos usando ensaios diferentes traz credibilidade à utilização dos Ensaios não Destrutivos no diagnóstico e avaliação de estruturas. Com dados confiáveis de resistência do material, pode-se estabelecer panoramas corretos acerca do estágio de degradação do concreto, da qualidade da execução e da conformidade com o projeto de dimensionamento e a normatização.

O projeto de dimensionamento de estruturas de concreto leva em consideração critérios de uso e de segurança. A ABNT NBR 6118:2014 [17] estabelece que, para estruturas localizadas em ambiente urbano com classe II de agressividade, o valor de f_{ck} mínimo para projeto é de 25 MPa. Este valor reflete as condições mínimas de segurança para a edificação. No caso de não conformidade com a norma, a construção fica sujeita à problemas relacionados com o desempenho estrutural, a segurança no uso e a durabilidade. Para este estudo, visto o grande número de erros construtivos identificados através de inspeções visuais, é importante a verificação da integridade dos pilares quanto à resistência mínima.

Tabela 1– Quantidade de pilares com resistência aproximada inferior à 25 MPa

Pavimento	Esclerometria	Ultrassom	Total
Térreo	3	1	4
1º pavimento	3	6	9
2º pavimento	43	8	51
Total	49	15	

Constatou-se, de acordo com o contido na Tabela 1 e Figuras 4, 5 e 6, um total de 49 pilares com resistência à compressão inferior ao determinado em norma de acordo com a esclerometria, valor consideravelmente superior aos 15 pilares identificados através do ultrassom. Observa-se que a concentração de pilares com resistência baixa, segundo os ensaios mencionados, localiza-se no 2º pavimento. Isso reforça a presença do verificado em inspeções visuais acerca da grande quantidade de reparos em argamassa nos pilares desse pavimento e sua influência na medida da dureza superficial pela esclerometria. Logo, é possível estimar a resistência do concreto de melhor maneira com o ensaio de ultrassom, cuja influência da superfície é menor. Verificou-se, a partir desse fato, que o número de pilares com resistência inferior à 25 MPa é considerável – 11% da amostragem de 136 pilares –, demonstando a necessidade de um estudo mais aprofundado sobre a resistência estrutural da edificação.

3.3 Correlação através de regressão

A fim de obter uma correlação confiável entre os experimentos aqui tratados, realizou-se uma tentativa de regressão que define uma função relacionando esclerometria e ultrassom. A função polinomial de grau 2 foi a que apresentou mais

forte relação, ou seja, maior R^2, entre as variáveis em análise. Os gráficos de dispersão permitem visualizar a tendência da relação estabelecida, a função aproximada e o valor de R^2 ligado à regressão (Figuras 7, 8 e 9).
Dessa forma, conclui-se que é possível estabelecer uma correlação com confiabilidade de 38,8%, 48,2% e 35,4% para o pavimento térreo, 1º e 2º pavimentos, respectivamente, através de regressão polinomial de segundo grau. Esta porcentagem não torna a correlação confiável, dando suporte à necessidade de extração de testemunhos para construção de uma função que represente melhor a relação existente entre os dados obtidos com ambos os ensaios.



Figura 68: Regressão polinomial dos dados de ultrassom e esclerometria do pavimento térreo.



Figura 8: Regressão polinomial dos dados de ultrassom e esclerometria do primeiro pavimento.

3.4 Análise de variância



Figura 9: Regressão polinomial dos dados de ultrassom e esclerometria do segundo pavimento.

A análise de variância ANOVA realizada neste estudo verificou se a variação existente entre os parâmetros de resistência obtidos com os ensaios de esclerometria e ultrassom foi ou não significativa. Os dados, por pavimento, resultantes do teste de hipóteses constam nas Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2– Análise de variância (ANOVA) para o pavimento térreo

Fonte de variação	Soma de Quadrados (SQ)	Média Quadrada (MQ)	F	F crítico
Entre grupos	22,581	22,581	0,432	3,952
Dentro dos grupos	4491,010	52,221		
Total	4513,591			

Tabela 3 – Análise de variância (ANOVA) para o primeiro pavimento

Fonte de variação	Soma de Quadrados (SQ)	Média Quadrada (MQ)	F	F crítico
Entre grupos	244,325	244,325	5,041	3,949
Dentro dos grupos	4265,284	48,469		
Total	4509,609			

Tabela 4 – Análise de variância (ANOVA) para o segundo pavimento

Fonte de variação	Soma de Quadrados (SQ)	Média Quadrada (MQ)	F	F crítico
Entre grupos	3255,880	3255,880	122,540	3,945
Dentro dos grupos	2444,431	26,570		
Total	5700,311			

A análise dos valores de F permite analisar a validade ou não da hipótese inicial de que não existe variação entre os valores de resistência obtidos com os dois ensaios. Para o pavimento térreo, verifica-se que $F < F_{crítico}$. Dessa forma, conclui-se que, a um nível de significância de 5%, não existe diferença estatística entre os dados de resistência estimados por esclerometria e por ultrassom. Essa análise estatística confirma que há compatibilidade entre os resultados obtidos com os dois ensaios.

Não se observa, todavia, o mesmo para os dois pavimentos superiores. O valor F foi substancialmente superior a $F_{crítico}$ em ambos os casos, em especial no 2º pavimento. Esse fato reflete que há divergências numéricas significativas de resistência entre os dois ensaios. Ou seja, não há uma correspondência em valor absoluto para este parâmetro. Entretanto, reforça-se que, embora não haja correspondência exata no valor, a tendência de variação da resistência segue a mesma linha para ambos ensaios. As diferenças numéricas são resultantes, portanto, das variáveis envolvidas na realização dos ensaios. As inspeções visuais verificaram que a quantidade de reparos realizados em argamassa nos pilares é muito superior nos últimos dois pavimentos; este revestimento com material não estrutural diminui o valor obtido da resistência com a esclerometria e com o ultrassom, aumentando a variância dos parâmetros mensurados. Aliado a isso, comprova-se que no pavimento térreo a quantidade de reparos não é significativa e não afeta de maneira expressiva o valor da resistência medida. Esta constatação justifica o fato de os dados obtidos terem sido mais variáveis nos pavimentos superiores, como mostrado pelas Figuras 4, 5 e 6**.**

Visto que é estatisticamente comprovado que a discrepância numérica dos valores de resistência do concreto é significativa no 1º e 2º pavimentos, conclui-se que a realização de apenas Ensaios não Destrutivos não é suficiente para obtenção de valores confiáveis e seguros. Esse fato sugere, portanto, que para casos análogos sejam realizados ensaios destrutivos, tal como a extração de testemunhos, oferecendo critérios fundamentados na experimentação do concreto utilizado *in loco.*

4. Conclusão

Com base no estudo realizado, pode-se concluir que é possível estabelecer e identificar uma relação entre os valores de resistência característica do concreto (*fck*) obtidos por dois ensaios não-destrutivos diferentes, a esclerometria e o ultrassom. Verificou-se, também, que a tendência de variação na aferição de resultados é semelhante em ambos os experimentos para o mesmo pilar, embora existam diferenças numéricas significativas entre eles. Embora o ensaio de esclerometria exija que o pilar seja ensaiado com a superfície de concreto exposta, mostrou-se inviável o preparo da superfície de tal maneira visto o grande número de reparos existentes. Neste sentido, através de análises estatísticas confiáveis, observou-se que as discrepâncias numéricas entre os ensaios resultam apenas da aleatoriedade da amostragem quando não há revestimento de superfície de concreto com argamassa inadequada decorrente de erros do processo executivo. Para os casos não contemplados – o 1º e o 2º pavimentos do objeto de estudo – pela análise

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

proposta pelos ensaios em questão, mostra-se necessária a realização da extração de testemunhos que corroborem e forneçam parâmetros de verificação aos ENDs.

A análise da variação da resistência por pavimento deixa claro que a porcentagem de pilares cuja resistência é discrepante em 15% ou mais da média é significativa. Esse fato reforça a hipótese de que as deformações e respostas diferenciadas dos pilares de um mesmo pavimento às solicitações de cargas podem originar problemas de fissuração na estrutura, facilitando a penetração de agentes agressivos no concreto. Além disso, uma porcentagem média de 42,3% de pilares discrepantes segundo os dois ensaios, em relação a todos os pilares da estrutura, reitera a possibilidade de que houve erros executivos que afetaram a resistência dos pilares.

As correlações construídas através da regressão provaram que há, sem dúvidas, necessidade de extração de testemunhos para se estabelecer uma função por regressão com confiabilidade aceitável.

Os resultados obtidos neste trabalho condizem com o que era esperado do estudo e traduzem a significância de técnicas alternativas no diagnóstico de manifestações patológicas como um meio confiável de se obter parâmetros importantes na recuperação de elementos. Os dados traduziram a confiabilidade dos ensaios quando realizados segundo a normatização, mesmo com as restrições e dificuldades impostas pelo equipamento e pelo treinamento necessário aos operadores. O balanço qualitativo dos resultados indicou que os ensaios aqui estudados estão de acordo ao estabelecer os mesmos parâmetros para os pilares da edificação, explicitados na variação da resistência. Isso apontou, inclusive, que os resultados são confiáveis pois, através de dois ensaios diferentes, chegou-se na mesma conclusão. A avaliação da conformidade com o valor de f_{ck} previsto em norma possibilitou contabilizar o número de pilares com resistência à compressão, segundo os ensaios aqui estudados, inferiores ao mínimo necessário. As análises aqui feitas permitiram, também, a identificação de diversos pontos críticos no que diz respeito à resistência devido à ação de agentes deletérios e aos erros construtivos mencionados. Esses parâmetros podem ser decisivos no processo de escolha de pilares indicados para a extração de testemunhos em estudos posteriores ligado à edificação.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Ministério da Educação pelas bolsas concedidas no Programa de Educação Tutorial (PET) e no Mestrado. Além disso, agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento dos equipamentos que deram suporte aos trabalhos de campo.

5. REFERÊNCIAS

[1] ISAIA, G. C. Concreto: ciência e tecnologia. v. 1 e 2. São Paulo: IBRACON, 2011.
[2] NEVILLE, A.; BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
[3] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto – Microestrutura, propriedades e materiais. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
[4] GLASSER, F. P.; MARCHAND, J.; SAMSON, E.; "Durability of concrete – Degradation phenomena involving detrimetal chemical reactions". Montreal, Canada, 2007.
[5] HELENE, P. "Análise da Resistência do Concreto em Estruturas Existentes para fins de Avaliação da Segurança". São Paulo, 2011.
[6] SOUZA, D. J.; MUÑOZ, E.; KOSLOSKI, F.; SILVESTRO, L.; LEME, L. B. P.; MEDEIROS, M. H. F.; "Obtenção da resistência à compressão do concreto de viadutos localizados na região de Curitiba por métodos de ensaios não destrutíveis: esclerometria e ultrassom". Foz do Iguaçu, PR, 2015.
[7] EVANGELISTA, A.C.J. "Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaios Não Destrutivos" Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2012.
[8] REHMAN, S. K. U.; IBRAHIM, Z.; MEMON, S. A.; JAMEEL, M.; "Nondestructive test methods for concrete bridges: A review". Construction and Building Materials, vol. 107, pages 58-86, 2015.
[9] GORZELANCZYK, T.; HOLA, J.; SADOWSKI, L.; SCHABOWICZ, K.; "Non-descructive identification of cracks in unilaterally accessible massive concrete walls in hydroeletric power plant". Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 16, pages 413-421, 2009.
[10] PUCINOTTI, R.; "Reinforced concrete structure: Non destructive in situ strength assessment of concrete". Construction and Building Materials, vol. 75, pages 331-341, 2015.
[11] OUYANG, W.; CHEN, J.; JIANG, M.; "Evolution of surface hardness of concrete under sulfate attack". Construction and Building Materials, vol. 53, pages 419-424, 2014.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7584, 2012 "Concreto Endurecido - Avaliação da Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão - Método de Ensaio". Rio de Janeiro, 2012.
[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802, 1994 "Concreto Endurecido - Determinação da Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica". Rio de Janeiro, 1994.[14] QASRAWI, H.Y. "Concrete Strength by Combined Non Destructive Methods Simply and Reliably Predicted". Cement and Concret Reasearch 30, 2000, p. 739-746.
[15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 597, 1997 "Standart Test Method for Pulse Velocity Through Concret". West Conshohocken, PA, 1997.
[16] MALHOTRA, V.; CARINO, N. "Handbook on nondestructive testing of concrete". 2 ed. United States of America: CRC Press LLC, 2004.
[17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6118: "Projeto de estruturas de concreto – Procedimento". Rio de Janeiro, 2014.