

USO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO EM INSPEÇÕES DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO ATRAVÉS DA CORRELAÇÃO ENTRE CORPOS DE PROVAS MOLDADOS E O ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO.

AZAMBUJA, Eduardo Bicudo de Castro¹, SALVADOR, Ricardo²

¹ Instituto IDD, Mestre, e-mail: edazambuja@globocom.com

² Instituto IDD, Engenheiro Civil, e-mail: rsalvador.eng@gmail.com

RESUMO

A execução de ensaios não destrutivos em estruturas de concreto armado, realizados de uma maneira eficiente, permite coletar dados que caracterizam melhor a edificação, complementando as inspeções visuais preliminares. Estimar a resistência à compressão do concreto é uma necessidade em muitos trabalhos de inspeção de estruturas de concreto armado. Na inexistência dos projetos executivos e seguindo as prescrições estabelecidas pelas normas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas é possível obter essa informação através de extração de testemunho, técnica considerada destrutiva por causar danos às peças, e dois outros ensaios menos onerosos, a esclerometria e o ultrassom. O ensaio não destrutivo mais utilizado no Brasil é o da determinação do índice esclerométrico. Apesar do método se basear na medição da dureza superficial do concreto, fornecendo elementos para uma avaliação qualitativa do material, a NBR 7854:2012 permite a estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da correlação com a resistência de testemunhos extraídos. O presente trabalho tem como objetivo elaborar uma curva de correlação, com a realização de esclerometria em determinados pontos da estrutura inspecionada, associada aos valores obtidos em ensaios de ruptura de corpos de prova moldados com o concreto utilizado na obra. Foram efetuadas leituras horizontais em 24 pontos da estrutura analisada, utilizando-se um esclerômetro de reflexão tipo Original Schmidt N-34, da Proceq SA, em peças não esbeltas, realizadas em superfícies secas, limpas e planas de concreto com idades de 7 e 28 dias, sendo 12 em pilares e 12 em vigas, obtendo uma correlação satisfatória com a resistência à compressão do material. Os resultados obtidos permitiram concluir que a utilização do ensaio de esclerometria de maneira quantitativa, através do uso de curvas de correlações elaboradas a partir do concreto utilizado na obra inspecionada, é uma técnica adicional que evita a extração de quantidades exageradas de testemunhos, porém, não substitui os métodos destrutivos.

PALAVRAS CHAVE: ensaios não destrutivos, resistência do concreto, esclerometria.

1 Introdução

1.1 Revisão Bibliográfica

Uma inspeção preliminar tem por objetivo identificar possíveis danos estruturais e verificar se eles estão ou não estabilizados. Conclusivamente, o relatório deve orientar a necessidade de avaliações mais detalhadas e definir o planejamento das medidas de reabilitação a serem tomadas. A vistoria inicial é visual, mas pode ser auxiliada por equipamentos de fácil transporte e utilização, como escadas, binóculos, trenas, máquinas fotográficas e medidores de fissuras.

A inspeção inicial atua no levantamento das anomalias, podendo propor ações complementares que avaliem o estado de degradação da estrutura, as características de seus materiais e sua resistência mecânica. Durante essa primeira visita, busca-se levantar o histórico da construção através de seus projetos executivos e também por meio de informações obtidas com profissionais envolvidos com a obra inspecionada. Dados quanto ao uso da edificação, relacionados com o seu tipo de ocupação, alterações realizadas e ações de manutenção podem esclarecer a origem das manifestações registradas.

Segundo Santos (2008), a avaliação estrutural de uma obra contém duas fases: o diagnóstico preliminar, que apresenta o estado de conservação aparente, e o recálculo da obra, onde se pretende, através de um modelo numérico, representar realisticamente o comportamento da edificação, tornando-se necessário a caracterização dos parâmetros da estrutura.

A tensão resistente à compressão, isoladamente, é considerada o mais importante parâmetro para avaliação da qualidade e do comportamento das estruturas de concreto armado, sendo o principal objetivo do seu controle, a obtenção de um valor único, pertencente a um lote de material, que sirva de comparação com a resistência estabelecida em projeto (Vieira Filho, 2007).

De acordo com Medeiros (2012), estimar a resistência à compressão é uma necessidade em muitos trabalhos de inspeção de estruturas de concreto armado, sendo uma preocupação dos profissionais de engenharia a obtenção dessa característica do material sem danos a funcionalidade ou aparência da edificação. O ensaio mais utilizado no Brasil é o de compressão simples aos 28 dias em corpos de prova cilíndricos, porém, apesar da facilidade de execução, apresenta a limitação de ser elaborado antes da execução da obra, não permitindo avaliações em estruturas prontas.

A estimativa da resistência do concreto de uma estrutura pode também ser feita, diretamente, através do ensaio de compressão de testemunhos extraídos da estrutura. Contudo, em locais de concentração de armação, em concretos de baixa resistência ou fissurados, ou em elementos estruturais de dimensões insuficientes o método não se aplica. O ensaio também apresenta limitações quando as perfurações provocadas pela extração dos testemunhos diminuem a resistência das peças analisadas (Bottega, 2010).

Nas últimas décadas, outros métodos de ensaio foram desenvolvidos, os chamados ensaios não destrutivos, processos mais simples e econômicos, que permitem obter características do concreto e uma estimativa da resistência à compressão medida no local, eliminando a necessidade de extração de um número excessivo de testemunhos nas obras inspecionadas. As técnicas não destrutivas produzem pouco ou nenhum dano, podem ser executadas em estruturas em uso e a detecção dos problemas no estágio inicial (Medeiros, 2012).

Para Machado (2005), a necessidade de se avaliar a resistência em idades muito superiores à da execução da obra para se efetuar eventuais reparos ou reforços, tem incentivado o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de ensaios não destrutivos para avaliação da resistência à compressão do concreto. Oferecem vantagens quanto à velocidade de execução e custos, permitindo a realização de um maior número de leituras e a disponibilidade imediata dos resultados obtidos. Podem ser aplicados tanto em estruturas novas, como nas mais antigas, contudo, devem ser realizados seguindo procedimentos bem definidos, pois são afetados tanto por fatores relacionados a características do material ensaiado, como por outros inerentes ao próprio ensaio.

Segundo Medeiros (2012), a esclerometria é o ensaio não destrutivo mais utilizado na atualidade e baseia-se na medição da dureza superficial do concreto, possuindo como variável de resposta um índice de reflexão que pode ser usado para a estimativa da resistência à compressão do concreto.

Deve-se ao engenheiro suíço Ernesth Schmidt, em 1950, a partir do estudo do conceito de dureza “shore” para caracterização de metais, o desenvolvimento, do primeiro equipamento de esclerometria. Schmidt estabeleceu uma correspondência entre o índice esclerométrico e a resistência do concreto através de uma curva genérica de correlação, tornando de domínio técnico a aplicação do instrumento e a interpretação de seus resultados (Viera Filho, 2007).

O esclerômetro (**Figura 1**) é um aparelho portátil constituído por um tubo cilíndrico em cujo interior há uma mola, um êmbolo e uma massa. O ensaio é baseado no princípio de que a reflexão de uma massa elástica, lançada ortogonalmente, depende da dureza dessa superfície. No caso do esclerômetro de reflexão, a massa é impulsionada por uma mola, e se choca, através de uma haste com ponta em forma de calota esférica, contra a área de concreto ensaiada. A energia do impacto é consumida em parte por uma deformação plástica permanente, mas também é refletida elasticamente proporcionando o retorno do martelo. Quanto mais duro o concreto, menor a deformação permanente e maior o recuo do martelo (Vieira Filho, 2007).

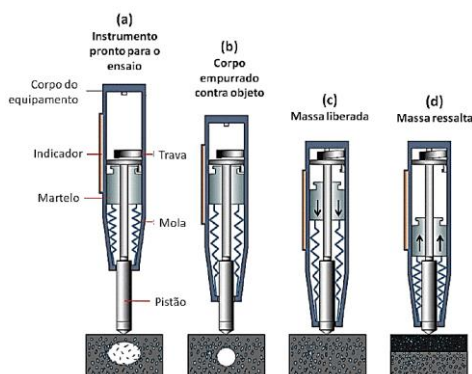


Figura 1 - Mecanismo de funcionamento do esclerômetro (Medeiros, 2012).

O índice esclerométrico é o valor obtido através do impacto do esclerômetro de reflexão sobre uma área de ensaio, fornecido diretamente pelo aparelho, proporcional ao recuo do martelo (ABNT NBR 7584:2012). Alguns fatores influenciam nos resultados do esclerômetro, tais como, o tipo de cimento e agregado, o estado da superfície e suas condições de umidade, a carbonatação do concreto e a sua idade, e a operação do esclerômetro, que segundo a ABNT NBR 7584:2012, deve ser operado por profissional qualificado. Devem ser evitados impactos sobre armaduras e áreas que não representem o concreto ensaiado.

O método esclerométrico fornece informações a respeito da dureza superficial do concreto a cerca de 20 mm de profundidade, para aparelhos com energia de percussão em torno de 2,25 Nm e deve ser considerado como um ensaio complementar, não substituto, e as correlações com outras propriedades precisam ser verificadas por medidas específicas (ABNT NBR 7584:2012).

A ABNT NBR 7584:2012 descreve que os métodos esclerométrico devem ser empregados em averiguação da uniformidade da dureza superficial do concreto, comparação de concretos com um referencial e em estimativas da resistência à compressão do concreto.

Para Medeiros (2012), o procedimento mais confiável para avaliação da resistência à compressão do concreto por esclerometria é feito através da associação do índice esclerométrico com os valores obtidos em ensaios de testemunhos extraídos na estrutura inspecionada. Não é uma prática recomendada, a utilização de curvas genéricas de correlação.

Clímaco e Nepomuceno (2006) recomendam a utilização, em obras novas, de correlações com outras partes da estrutura que possuam resistências conhecidas. Sempre que houver mudanças dos materiais envolvidos na confecção do concreto, uma nova curva de correlação deverá ser estabelecida. Erros consideráveis poderão ser cometidos na avaliação de f_c caso sejam utilizadas indiscriminadamente curvas de correlação fornecidas pelos fabricantes dos aparelhos utilizados nesses ensaios, uma vez que elas foram estabelecidas para condições de ensaio e materiais específicos (Malhotra, 1984, *apud* Machado, 2005).

1.2 Objetivo e Justificativa

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um método que permita elaborar uma curva de correlação confiável, para um determinado prédio, entre o índice esclerométrico medido em elementos estruturais, vigas e pilares de um prédio, e a resistência à compressão do concreto, obtida durante o controle tecnológico do material fornecido durante a execução da obra.

Para o desenvolvimento da metodologia foi escolhido o Edifício 7th Avenue, localizado na Avenida 7 de Setembro, Curitiba/PR, em construção pela Irtha Engenharia S/A e a justificativa do trabalho está relacionada com a possibilidade de se ter informações mais precisas quanto a resistência do concreto à compressão, através do uso de ensaios não destrutivos de esclerometria em inspeções preliminares.

2 Metodologia

2.1 Introdução

A norma brasileira ABNT NBR 7584:2012 não apresenta nenhum procedimento que relacione o índice esclerométrico com a resistência à compressão do concreto. Porém, recomenda que para uma avaliação direta da resistência, deva-se dispor de uma correlação confiável, efetuada com materiais locais e atentar para os fatores que influenciam nessas leituras. Ressalta ainda que as curvas constantes nos gráficos dos aparelhos de medição referem-se a concretos preparados em outros países, com materiais e condições diferentes das brasileiras.

Segundo o ACI 228.1R:2003 (*apud* Machado, 2005), na obtenção das curvas de correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão, devem ser efetuadas para cada idade do concreto 20 medições em 2 corpos de prova cilíndricos, 10 medições por corpo de prova, que devem estar fixados entre os pratos da prensa sob uma tensão de 3 MPa (**Figura 2**). Inicialmente, realiza-se o ensaio de esclerometria nos corpos de prova, na mesma direção em que ele será feito na estrutura e, em seguida, os corpos-de-prova devem ser submetidos à ruptura por compressão simples. Caso não seja possível realizar nos corpos de prova cilíndricos o ensaio na mesma direção da estrutura, devem ser empregados os coeficientes de correção propostos pelos fabricantes dos aparelhos.

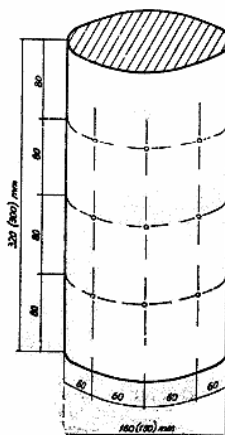


Figura 2 - Posicionamento dos pontos de medição do índice esclerométrico em corpos de prova cilíndricos (Machado, 2005).

A metodologia proposta nesse trabalho é a de utilizar os resultados dos ensaios de compressão dos corpos de prova, rompidos aos 7 e 28 dias, realizados durante o controle tecnológico da obra, e correlacionar com índices esclerométrico obtidos em campo, localizados em áreas de elementos estruturais do prédio, pilares e vigas, com a mesma idade e material dos corpos de prova ensaiados.

2.2 Acompanhamento tecnológico do concreto da obra

Os corpos de prova foram moldados na obra atendendo ao estabelecido na ABNT NBR 5738, mantidos em processo de cura úmida até a idade do ensaio.

Os ensaios de ruptura à compressão dos corpos de prova de referência foram realizados no laboratório da empresa Daher Tecnologia em Engenharia, responsável pelo controle tecnológico da obra, conforme as prescrições da ABNT NBR 5739:2007, com idades de 7, 14 e 28 dias, contados a partir da hora da moldagem.

2.3 Execução do Ensaio de Esclerometria

O esclerômetro deverá ser aferido antes de sua utilização ou a cada 300 impactos, com o uso de uma bigorna de aço com dureza Brinell de 5.000 MPa, apoiada em base rígida e nivelada, fornecendo após 10 impactos, índice esclerométrico médio superior a 75. Caso o equipamento não alcance esse valor de aferição, as medidas deverão ser multiplicadas por um coeficiente de correção “k” (ABNT NBR 7584:2012).

Além disso, durante as leituras, o índice esclerométrico de um ponto individual ensaiado obtido entre 10 impactos deve ter uma variação máxima de $[\pm 3,0]$ do índice esclerométrico médio e quando isso ocorrer, o aparelho não poderá mais ser empregado, devendo ser novamente calibrado (**Figura 3**).

O coeficiente de correção (k) do índice esclerométrico deve ser obtido a partir da equação (1):

$$k = \frac{IE_{nom}}{\frac{\sum_{i=1}^n IE_i}{n}} \dots (1)$$

Sendo:

- a) k: coeficiente de correção do índice esclerométrico;
- b) n: número de impactos realizados durante o processo de aferição;
- c) IE_{nom} : índice esclerométrico nominal na bigorna de aço, fornecido pelo fabricante do aparelho;
- d) IE_i : índice esclerométrico obtido em cada impacto do esclerômetro na bigorna de aço, durante o processo de aferição.

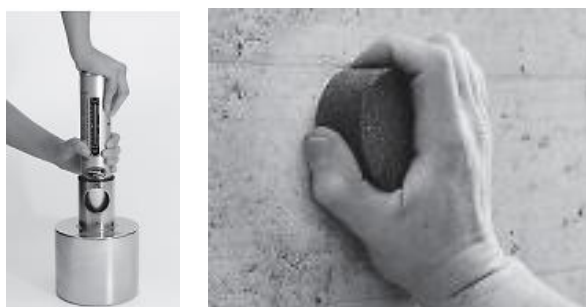


Figura 3 - Aferição do esclerômetro e preparo da superfície (Fonte: www.proceq.com, acesso em 10/12/2013).

A norma brasileira ABNT NBR 7584:2012 estabelece que a superfície do concreto ensaiado deva estar seca ao ar, limpa e ser preferencialmente plana. A área de ensaio deve seguir as seguintes prescrições normativas:

- a) Ser preparada por meio de polimento com prisma de carborundum, através de movimentos circulares (**Figura 3**);
- b) Localizar-se, preferencialmente, nas faces verticais dos elementos de concreto;
- c) Estar convenientemente afastada das regiões afetadas por segregação, exsudação, concentração excessiva de armaduras e juntas de concretagem. Evitar bases e topos de pilares e regiões de vigas próximas dos apoios, ou no meio dos vãos;
- d) Distar no mínimo 50 mm dos cantos e arestas dos elementos estruturais;
- e) Estar compreendida em uma área entre 8.000 mm² (90 mm x 90 mm) e 40.000 mm² (200 mm x 200 mm);
- f) Recomenda-se pelo menos uma área de ensaio por elemento de concreto pertencente à região de estudo.

Em cada área de ensaio, devem ser efetuados 16 impactos, uniformemente distribuídos na área vistoriada, não sendo permitido mais de um impacto sobre o mesmo ponto. A ABNT NBR 7584:2012 aconselha desenhar um reticulado e aplicar o esclerômetro nas áreas limitadas por ele, identificando a área ensaiada (**Figura 4**).

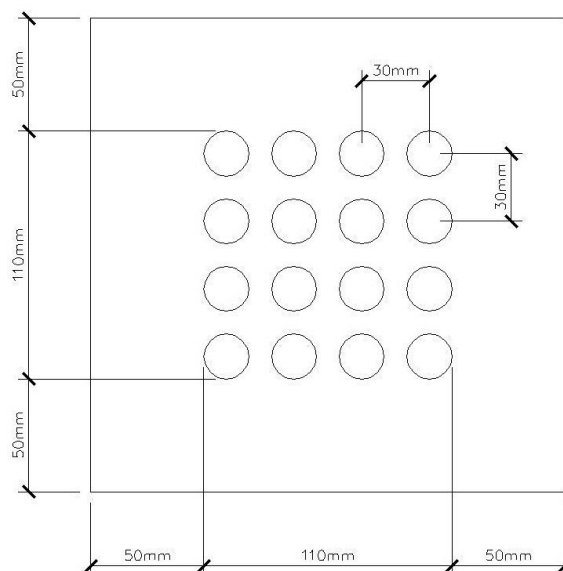


Figura 4 – Reticulado da área de ensaio e ponto de impacto (Fonte: Autores)

A distância mínima entre os centros de dois pontos de impacto deve ser de 30 mm e evitar impactos sobre armaduras, bolhas e áreas similares que não representem o concreto em avaliação.

O esclerômetro de reflexão deverá ser aplicado ortogonalmente à área de ensaio, preferencialmente, na posição horizontal sobre superfícies verticais. Sendo necessário aplicar em posições diversas, o índice esclerométrico deverá ser corrigido com os coeficientes fornecidos pelo fabricante do equipamento, conforme mostrado na **Figura 5** (ABNT NBR 7584:2012).

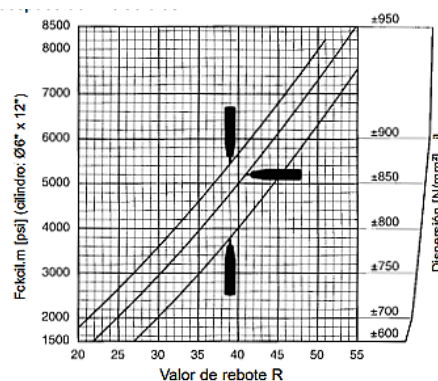


Figura 5 - Aplicação do esclerômetro de reflexão e gráfico de correção (Fonte: www.proceq.com, acesso em 10/12/2013).

A ABNT NBR 7584:2012 ressalta também que se deve evitar área de ensaio em elementos de concreto com dimensões inferiores a 100 mm na direção do impacto, por não serem suficientemente rígidos e provocarem a interferência de fenômenos de ressonância, vibração e dissipação de energia no resultado obtido. Sempre que possível o ensaio deve ser realizado na posição de maior inércia da peça (**Figura 6**).

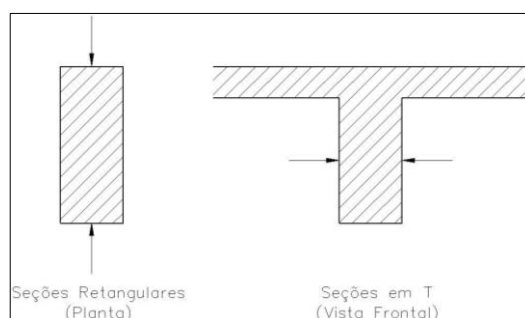


Figura 6 - Locais recomendáveis para aplicação do esclerômetro (Fonte: Autores).

O resultado de uma única área de ensaio será obtido pela média aritmética dos 16 valores individuais de índices esclerométrico obtidos no reticulado, devendo-se desprezar valores que estejam afastados em mais de 10% do valor médio obtido e calcular novamente. O índice esclerométrico médio (I_E) deve ser obtido com no mínimo 5 (cinco) valores individuais, caso isso não seja possível, essa área de ensaio deverá ser desprezada. O índice esclerométrico médio efetivo ($I_{E\alpha}$) é calculado através da multiplicação do índice esclerométrico médio (I_E) pelo fator de correção (k) obtido pelas aferições realizadas no equipamento, conforme dado pela equação (1) (ABNT NBR 7584:2012).

Assim, o cálculo do índice esclerométrico da área ensaiada pode ser definido da seguinte maneira:

$$I_E = \frac{\sum_{i=1}^{16} ie_{(i)}}{16} \text{ se, e somente se, } 90\% \times I_E \leq ie_{(i)} \leq 110\% \times I_E \text{ se, e somente se, } (i) \geq 5$$

$$I_{E\alpha} = k \times I_E \dots (2)$$

3 Resultados

3.1 Introdução

Foram efetuadas medidas em 24 (vinte e quatro) pontos, localizados em 2 (dois) trechos da estrutura de concreto armado do Edifício 7th Avenida, situado na Avenida 7 de Setembro, em Curitiba/PR, em construção pela Irtha SA, sendo 12 (doze) leituras em pilares e 12 (doze) em vigas

com tempo de concretagem de 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias. Todas as medidas foram realizadas na quarta-feira, dia 11/12/2013, no período entre 14h às 18h30.

O concreto da obra, dosado em central, foi fornecido pela empresa SuperMix, mistura e transporte, especificado com resistência característica à compressão (f_{ck}) de 35 MPa, uso de cimento CP V ARI RS e relação A/C de 0,639, conforme Nota Fiscal de fornecimento nº19911.

O ensaio foi feito com a utilização de um esclerômetro tipo ORIGINAL SCHMITDT N-34, fabricado pela Proceq AS Zurich (**Figura 7**), tendo como características uma faixa de medição entre 10 e 70 N/mm², e energia de impacto de 2,207 Nm. O fabricante recomenda o equipamento para detecção de pontos frágeis, controle de uniformidade e para medições não destrutivas da resistência à compressão do concreto. Os índices esclerométrico são lidos a partir de uma escala que varia de 10 a 100 com intervalos regulares de 2. Os valores de resistência à compressão propostos pelo fabricante do equipamento são apresentados em um diagrama de conversão (fonte: www.proceq.com, acesso em 10/12/2013).

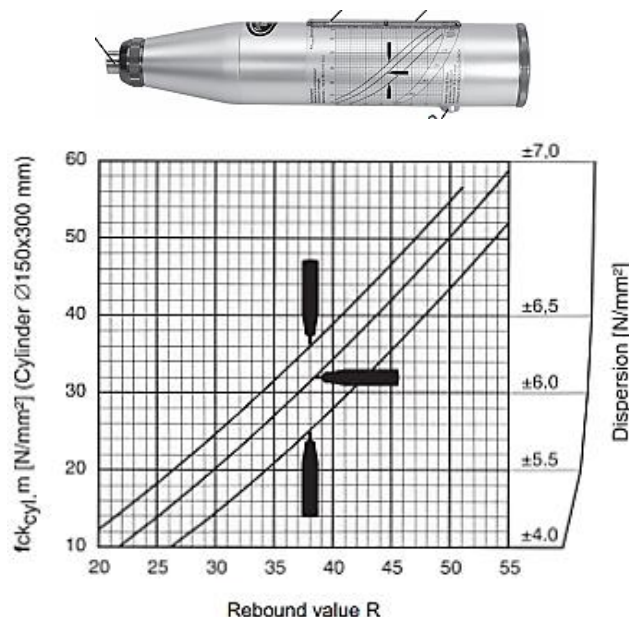


Figura 7 - Detalhe do equipamento e do diagrama de conversão proposto (Fonte: www.proceq.com, acesso em 10/12/2013).

O equipamento foi aferido pela empresa Concreteste, em Curitiba/PR, sendo obtido um valor para o coeficiente de correção $k=0,970$, assim:

$$I_{E\alpha} = k \times I_E$$

$$I_{E\alpha} = 0,970 \times I_E \dots (3)$$

Todas as leituras foram efetuadas na posição horizontal, em peças não esbeltas com espessura mínima de 200 mm, realizadas em superfícies secas, limpas e planas. Devido ao estágio da obra, já com elementos de vedação revestidos, não foi possível realizar todas as leituras na posição de maior inércia dos elementos estruturais, sendo seguido o critério facilidade de acesso e leitura.

As áreas de leitura foram, polidas através de movimentos circulares com lixas de carborundum nº60, e depois, removido todo pó superficial. Os locais de aplicação do esclerômetro foram demarcados através de um gabarito de madeira contendo uma malha de 4x4, totalizando 16 pontos, espaçados de 30 mm entre os seus eixos nas duas direções. Foram respeitadas as distâncias mínimas de 50 mm das bordas, porém, não foram utilizados detectores de armadura, sendo dada a preferência para as medidas localizadas nos centros geométricos das peças.

Os valores individuais do índice esclerométrico afastados em mais de 10% (dez por cento) do valor médio obtido para as 16 (dezesesseis) leituras, para cima e para baixo, foram desprezadas e a média recalculada. Não foram obtidas leituras com menos de 5 (cinco) valores individuais.

3.2 Leituras realizadas

O primeiro trecho analisado está localizado no 1º Subsolo do Setor 4 da estrutura do prédio, foi concretado no dia 4/12/2013, tendo, portanto, 7 dias de idade na data de leitura. Foram selecionadas as vigas V2a, V2b, V3a, V3b, V40c e V40d, e os pilares P30, P31, P33, P34, P39 e P41 (**Figura 8** e **Tabela 1**).

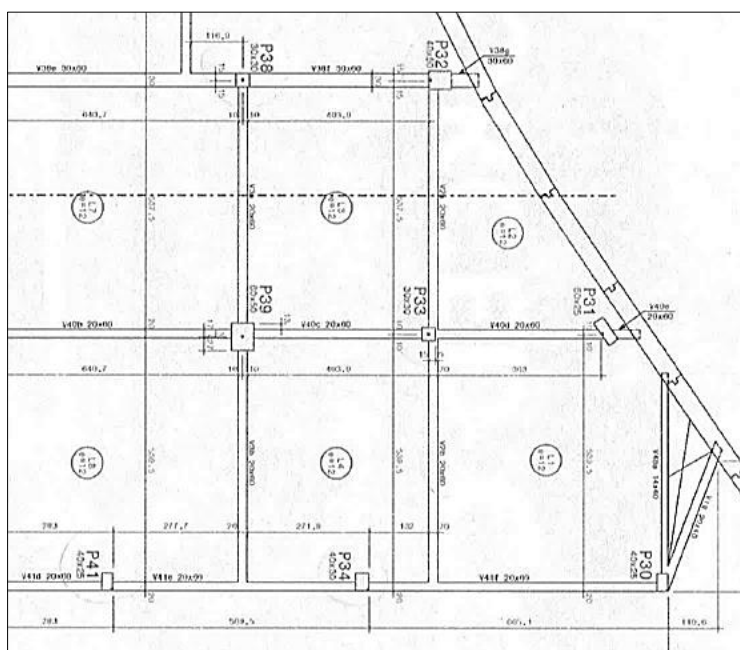


Figura 8 - Croqui do Trecho 1 de medição (Fonte: Thá Engenharia).

Tabela 1 - Valores dos Índices Esclerométricos do Trecho 1.

Elemento Vistoriado	Índice Esclerométrico Medido (IE)													k	0,970	Índice Esclerométrico Médio	Índice Esclerométrico Efetivo
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
V2 a	33	27	31	27	27	27	29	32	32	27	29	33	29	29	30	31	29,6
	-	27	31	27	27	27	29	32	32	27	29	-	29	29	30	31	29,1
V2 b	36	32	33	33	30	32	36	32	31	34	31	33	35	32	30	33	32,7
	-	32	33	33	30	32	-	32	31	34	31	33	35	32	30	33	32,3
V3 a	33	33	32	31	31	33	31	31	31	33	40	31	30	30	32	31	32,1
	33	33	32	31	31	33	31	31	31	33	-	31	30	30	32	31	31,6
V3 b	33	37	36	38	30	31	29	33	33	30	33	32	35	34	34	34	33,3
	33	-	36	-	30	31	-	33	33	30	33	32	35	34	34	34	33,0
V40 c	32	34	37	39	33	36	35	31	33	34	37	37	33	33	33	34	34,5
	32	34	37	-	33	36	35	-	33	34	37	37	33	33	33	34	34,4
V40 d	32	38	34	37	34	38	32	35	34	35	36	33	35	35	35	35	34,9
	32	38	34	37	34	38	32	35	34	35	36	33	35	35	35	35	34,9
P30	35	34	36	35	42	33	34	34	32	34	34	36	36	30	34	35	34,7
	35	34	36	35	-	33	34	34	32	34	34	36	36	-	34	35	34,5
P31	36	35	38	38	35	34	40	37	36	34	34	35	33	35	32	35	35,5
	36	35	38	38	35	34	-	37	36	34	34	35	33	35	32	35	35,2
P41	33	32	34	33	35	33	35	28	33	33	42	32	32	33	34	34	33,5
	33	32	34	33	35	33	35	-	33	33	-	32	32	33	34	34	33,3
P33	35	36	32	33	31	33	34	35	42	30	30	29	34	34	38	36	33,9
	35	36	32	33	31	33	34	35	-	-	-	-	34	34	-	36	34,0
P34	39	32	34	37	35	32	32	34	36	34	36	37	35	33	34	31	34,5
	-	32	34	37	35	32	32	34	36	34	36	37	35	33	34	-	34,4
P39	32	38	33	33	34	45	32	34	35	34	36	36	37	38	32	35	35,3
	32	38	33	33	34	-	32	34	35	34	36	36	37	38	32	35	34,6

Para segundo trecho medido, localizado no 4º Pavimento do Setor 1 da estrutura do prédio, concretado no dia 13/11/2013, tendo, portanto, 28 dias de idade na data de leitura, foram selecionadas as vigas V7a em dois pontos, V11a, V17a, V87d e V88d, e os pilares P60, P61, P120, P121, P136 e P137 (Figura 9).

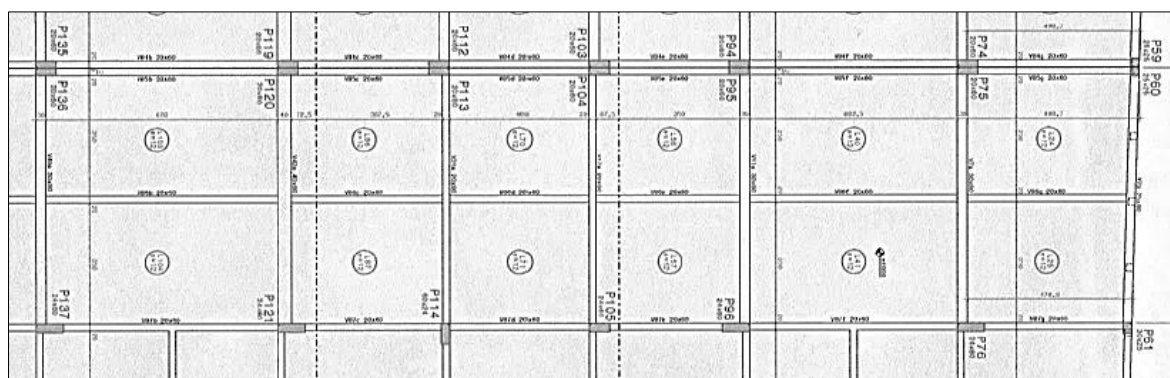


Tabela 2 - Valores dos Índices Esclerométricos do Trecho 2.

Elemento Vistoriado	Índice Esclerométrico Medido (IE)													k	0,970	Índice Esclerométrico Médio	Índice Esclerométrico Efetivo
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
V7 a (1)	42	33	35	41	33	39	30	48	36	32	39	40	34	35	36	38	37,0
	-	-	35	-	-	39	-	-	36	-	39	40	34	35	36	38	36,9
V7 a (2)	33	35	33	33	37	37	34	34	33	34	34	32	33	34	34	35	34,1
	33	35	33	33	37	37	34	34	33	34	34	32	33	34	34	35	34,1
V11 a	31	32	34	32	30	33	32	35	35	33	31	35	34	33	32	32	32,8
	31	32	34	32	30	33	32	35	35	33	31	35	34	33	32	32	32,8
V17 a	34	35	34	36	38	34	32	35	32	31	33	40	32	34	33	34	34,2
	34	35	34	36	-	34	32	35	32	31	33	-	32	34	33	34	33,5
V87 d	43	33	33	30	34	35	32	35	38	33	34	44	47	33	34	35	35,9
	-	33	33	-	34	35	-	35	38	33	34	-	-	33	34	35	34,3
V88 d	38	32	34	35	34	37	34	32	33	34	32	34	34	34	32	34	34,0
	-	32	34	35	34	37	34	32	33	34	32	34	34	34	32	34	33,7
P60	34	38	33	34	34	39	32	31	36	35	32	32	34	34	32	36	34,2
	34	-	33	34	34	-	32	31	36	35	32	32	34	34	32	36	33,5
P61	32	33	35	35	33	33	45	36	35	34	33	39	33	33	35	31	34,7
	32	33	35	35	33	33	-	36	35	34	33	-	33	33	35	-	33,9
P120	42	48	35	35	36	32	34	34	32	31	36	37	27	34	33	38	35,3
	-	-	35	35	36	32	34	34	32	-	36	37	-	34	33	38	34,7
P121	33	39	34	33	36	39	33	37	35	31	38	24	28	29	35	-	33,9
	33	-	34	33	36	-	33	37	35	31	38	-	-	-	-	35	34,4
P136	34	34	38	35	35	37	34	38	35	34	35	40	40	30	36	36	35,7
	34	34	38	35	35	37	34	38	35	34	35	-	-	-	36	36	35,5
P137	33	35	37	32	34	34	37	35	32	32	33	38	35	37	34	-	34,7
	33	35	37	32	34	34	37	35	32	32	33	38	35	37	34	-	34,7

3.3 Correlações Propostas

A **Tabela 3** apresenta os valores de resistência à compressão do concreto inspecionado, calculados a partir do diagrama de conversão apresentado pelo fabricante do equipamento. Os valores médios de f_{c7} e f_{c28} foram obtidos pela média aritmética das leituras individuais dos elementos.

Tabela 3 - Resistência do concreto obtida a partir do diagrama de conversão do fabricante equipamento.

Trecho 1 - 7 dias			Trecho 2 - 28 dias		
Elemento Vistoriado	Índice Esclerométrico Efetivo	f_{c1} (diagrama do fabricante) [MPa]	Elemento Vistoriado	Índice Esclerométrico Efetivo	f_{c1} (diagrama do fabricante) [MPa]
V2 a	29	19,0	V7 a (1)	37	30,0
V2 b	32	23,0	V7 a (2)	34	26,0
V3 a	32	23,0	V11 a	33	24,0
V3 b	33	24,0	V17 a	34	26,0
V40 c	34	26,0	V87 d	34	26,0
V40 d	35	27,0	V88 d	34	26,0
P30	34	26,0	P60	34	26,0
P31	35	27,0	P61	34	26,0
P41	33	24,0	P120	35	27,0
P33	34	26,0	P121	34	26,0
P34	34	26,0	P136	35	27,0
P39	35	27,0	P137	35	27,0
fc7 (médio)		24,8	fc28 (médio)		26,4

A partir dos valores resistência f_{c7} e f_{c28} obtidos através da ruptura dos corpos de prova moldados na data de concretagem dos elementos inspecionados, pode-se estabelecer uma correlação gráfica da resistência à compressão com o valor do índice esclerométrico efetivo medido nos elementos inspecionados do Trecho 1 com 7 dias e com 28 dias para as peças do Trecho 2 (**Tabela 4 e Gráfico 1**).

Tabela 4 – Índice esclerométrico efetivo e resistência f_{c7} e f_{c28} dos corpos de prova moldados.

Trecho 1 - 7 dias			Trecho 2 - 28 dias		
Elemento Vistoriado	Índice Esclerométrico Efetivo	Resistência CP $f_{c(7)}$ [MPa]	Elemento Vistoriado	Índice Esclerométrico Efetivo	Resistência CP $f_{c(28)}$ [MPa]
V2 a	28	30,0	V7 a (1)	36	31,0
V2 b	31	30,0	V7 a (2)	33	31,0
V3 a	31	36,0	V11 a	32	34,0
V3 b	32	37,0	V17 a	32	32,0
V40 c	33	37,0	V87 d	33	33,0
V40 d	34	30,0	V88 d	33	33,0
P30	33	34,0	P60	32	31,0
P31	34	34,0	P61	33	34,0
P41	32	37,0	P120	34	34,0
P33	33	30,0	P121	33	35,0
P34	33	37,0	P136	34	30,0
P39	34	37,0	P137	34	32,0

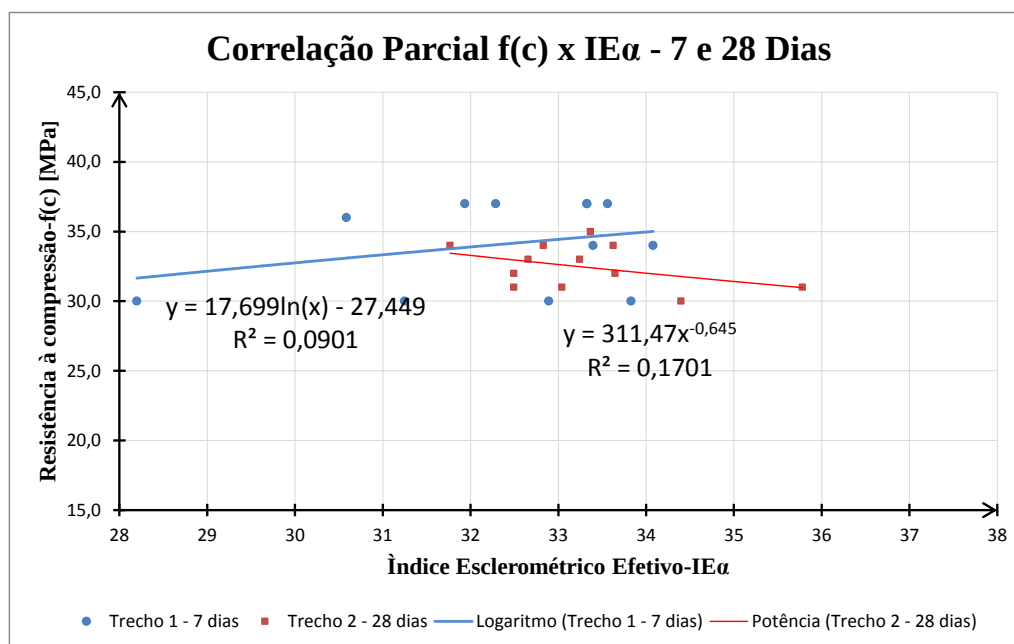


Gráfico 1 – Correlação do índice esclerométrico efetivo e resistência f_{c7} e f_{c28} dos corpos de prova moldados.

O gráfico final propõe uma correlação global que considera em uma mesma base de dados, tanto os elementos com 7 dias, inspecionados no Trecho 1, como os com 28 dias de concretagem, analisados no Trecho 2. São calculados também a equação da curva de tendência e o respectivo coeficiente de determinação R^2 (**Gráfico 2**).

A curva mostrada no **Gráfico 2** foi obtida a partir das características construtivas da obra, permitindo que se estime em qualquer elemento estrutural do prédio, através de um ensaio não destrutivo de esclerometria, a sua resistência à compressão.

Trecho 1 e 2		
Elemento Vistoriado	Índice Esclerométrico Efetivo	Resistência CP $f_c(7 \text{ e } 28)$ [MPa]
V2 a	28	30,0
V2 b	31	30,0
V3 a	31	36,0
V3 b	32	37,0
V40 c	33	37,0
V40 d	34	30,0
P30	33	34,0
P31	34	34,0
P41	32	37,0
P33	33	30,0
P34	33	37,0
P39	34	37,0
V7 a (1)	36	31,0
V7 a (2)	33	31,0
V11 a	32	34,0
V17 a	32	32,0
V87 d	33	33,0
V88 d	33	33,0
P60	32	31,0
P61	33	34,0
P120	34	34,0
P121	33	35,0
P136	34	30,0
P137	34	32,0

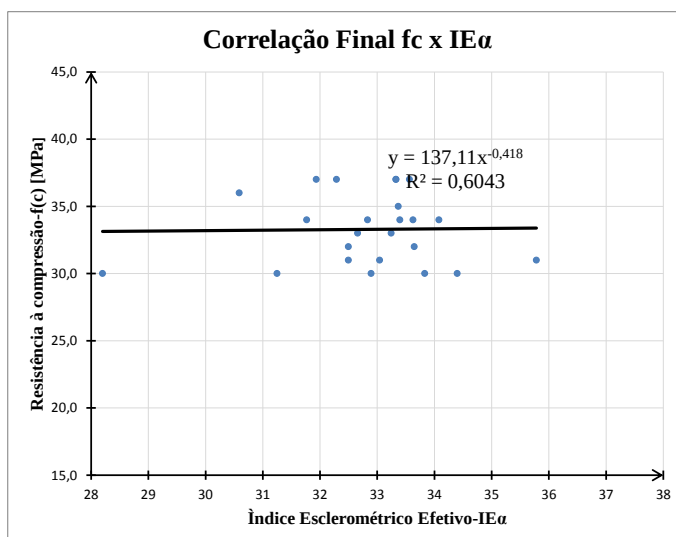


Gráfico 2 – Correlação da resistência (f_c) dos corpos de prova moldados com o índice esclerométrico efetivo.

A **Tabela 5** mostra os valores de resistência, aos 7 e 28 dias, obtidos em função do índice esclerométrico efetivo, através do diagrama de conversão do equipamento (f_{c1}) e pela curva de correlação proposta (f_{c2}) no **Gráfico 2**, a relação entre esses dois valores (f_{c2}/f_{c1}) em porcentagem e os respectivos resultados médios.

Tabela 5 – Relação entre os valores obtidos na curva do equipamento (f_{c1}) e na correlação proposta (f_{c2}).

Trecho 1 - 7 dias					Trecho 2 - 28 dias				
Elemento Vistoriado	Índice Esclerométrico Efetivo	fc 1 (diagrama do fabricante) [MPa]	fc 2 (correlação proposta) [MPa]	fc2/fc1	Elemento Vistoriado	Índice Esclerométrico Efetivo	fc 1 (diagrama do fabricante) [MPa]	fc 2 (correlação proposta) [MPa]	fc2/fc1
V2 a	28	19,0	34,0	178,7%	V7 a (1)	36	30,0	30,7	102,5%
V2 b	31	23,0	32,5	141,4%	V7 a (2)	33	26,0	31,8	122,2%
V3 a	31	23,0	32,8	142,7%	V11 a	32	24,0	32,3	134,6%
V3 b	32	24,0	32,2	134,3%	V17 a	32	26,0	32,0	123,1%
V40 c	33	26,0	31,7	121,8%	V87 d	33	26,0	31,7	121,9%
V40 d	34	27,0	31,5	116,5%	V88 d	33	26,0	31,9	122,8%
P30	33	26,0	31,6	121,7%	P60	32	26,0	32,0	123,1%
P31	34	27,0	31,4	116,2%	P61	33	26,0	31,9	122,5%
P41	32	24,0	32,1	133,7%	P120	34	27,0	31,5	116,8%
P33	33	26,0	31,8	122,4%	P121	33	26,0	31,6	121,7%
P34	33	26,0	31,7	121,8%	P136	34	27,0	31,2	115,7%
P39	34	27,0	31,6	116,9%	P137	34	27,0	31,5	116,8%
fc7 (médio)		24,8	32,1	129,1%	fc28 (médio)		26,4	31,7	120,0%

4 Discussões e Recomendações Finais

O ensaio não destrutivo de esclerometria não tem por objetivo eliminar a retirada de testemunhos da estrutura, mas atribuir correlações próprias, mais próximas da realidade da obra e que permitam uma diminuição do uso de técnicas que danifiquem o prédio.

A garantia do valor do índice esclerométrico (IE), obtido durante o ensaio, e da correspondente curva de correlação com a resistência do material está na precisão do equipamento. Para isso, são necessárias manutenções e aferições periódicas no aparelho que mantenham o grau de confiança das leituras realizadas.

O coeficiente de correção (k) deve estar sempre ajustado com a realidade do equipamento, além disso, sempre que a construção permitir, é interessante a aplicação do esclerômetro em elementos de maior inércia, de preferência com espessuras superiores a 300mm.

As correlações parciais obtidas separadamente para as idades de 7 e 28 dias mostraram baixos valores do coeficiente de determinação R^2 , respectivamente 0,0917 e 0,1701, a correlação final, porém, apresentou um índice mais significativo, com R^2 de 0,6043.

O comparativo entre a resistência estimada a partir da curva do esclerômetro utilizado e a obtida pelo gráfico de correlação da obra, mostrou uma variação de 129,1% na idade de 7 dias e 120,0% aos 28 dias, demonstrando que para se avaliar com maior precisão a resistência à compressão do concreto de uma estrutura, é interessante a elaboração de uma curva específica para o prédio.

O estudo mostrou que para se ter uma curva com maior coeficiente de determinação é necessário um aumento nas amostras. Sugere-se também um acompanhamento mais contínuo do material, através da elaboração de ensaios em elementos com 3 e 14 dias de concretagem.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento*. 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7584 – Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio*. 2012.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 228.1R-03, *In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*, Detroit: 2003.

BOTTEGA, Fábio. Análise do ensaio esclerométrico, um ensaio não destrutivo, nas estruturas de concreto. Trabalho de Conclusão de Curso, UNESC, Criciúma: 2010.

CLÍMACO, João Carlos Teatini de Souza; NEPOMUCENO, Antônio Alberto. *Patologia, Recuperação e Manutenção de Estruturas – Notas de Aula*, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

MACHADO, Maurício Dornellas. Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro: 2005.

MEDEIROS, Marcelo. H. F. *Ensaio de “Pull Off” para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v.5, nº 6, São Paulo: 2012.

SANTOS, José Manuel Martins Neto dos. *Avaliação da integridade estrutural de pontes de betão: o caso da Ponte Nossa Senhora da Guia*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto: 2008.

VIEIRA FILHO, José Orlando. *Avaliação da resistência à compressão do concreto através de testemunhos extraídos: contribuição à estimativa do coeficiente de correção devido aos efeitos broqueamento*. Tese de Doutorado, EPUSP, São Paulo: 2007.