

INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS NOS RESULTADOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

INFLUENCE OF VARIABLES ON THE RESULTS OF NON-DESTRUCTIVE TESTS ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Turibio José da Silva¹, Gercindo Ferreira², João Fernando Dias³

¹Professor Associado da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, MG.
E-mail: tjsilva@ufu.br

²Mestre em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, MG. E-mail: gercindo@ufu.br

³Professor Associado da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, MG.
E-mail: jdias@ufu.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar o resultado da pesquisa sobre a influência que algumas variáveis exercem nos resultados dos ensaios de esclerometria e de velocidade do pulso ultrassônico (UPV), especificamente as seguintes variáveis: dimensão máxima característica dos agregados (DMA), a variação da umidade do concreto endurecido e da camada de concretagem nos resultados dos ensaios de esclerometria e de velocidade de pulso ultrassônico e a variação da distância entre os transdutores no ensaio de UPV. Os ensaios foram realizados em seis blocos de concreto com seis anos de idade e em dez vigas de concreto armado com dois anos. Nos blocos a relação água/cimento foi mantida e a DMA dos agregados foram 9,5 mm, 19,0 mm e 25,0 mm. Para as vigas foram mantidas todas as características. A variação da umidade no concreto foi obtida com a aspersão controlada de água. Pelos resultados de UPV concluiu-se que nos blocos com maior DMA, a UPV foi menor; a camada intermediária apresentou maior valor de UPV. Para blocos e vigas a UPV aumentou com o aumento do teor de umidade do concreto e diminuiu quando se aumentou a distância entre os transdutores. Foram obtidos os menores índices esclerométricos nos blocos contendo agregados com maior DMA. Para os blocos e vigas ocorreu um decréscimo do índice esclerométrico à medida que a umidade superficial aumentou.

Palavras-chave: Ensaios não destrutivos, velocidade de pulso ultrassônico, esclerometria.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present the result of a study of the influence of some variables on the results of nondestructive testing of concrete, sclerometry (rebound hammer) and ultrasonic pulse velocity (UPV), specially in: Aggregates' size (DMA), concrete's moisture, casting concrete, and transducers' space. Moisture in concrete was obtained by controlled sprinkling water. The tests were conducted on six years old concrete blocks, and two years old reinforced concrete beams. Water/cement ratio of concrete blocks was maintained and DMA of coarse aggregates were 9.5 mm, 19.0 mm and 25.0 mm. The results of UPV revealed that blocks with the biggest DMA had lower UPV, the middle concrete layer presented bigger value of UPV than others. The UPV increased when the surface was sprinkled or the transducers space increased, for blocks and beams. The smaller rebound index was on blocks containing aggregates with the biggest DMA. For blocks and beams, the rebound index decreased when superficial moisture increased.

Keywords: Nondestructive testing, ultrasonic pulse velocity, sclerometry (rebound hammer).

1 – INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo e durante muito tempo foi considerado imutável ao longo do tempo. Somente na segunda metade do século XX foi verificado que o concreto tinha uma vida útil limitada a menos de um século. Tal constatação levou o meio científico e tecnológico a considerar aspectos de durabilidade nos projetos de estruturas de concreto armado. Apesar das recomendações das normas surtirem efeitos benéficos, as falhas acabam ocorrendo em projetos, execução ou utilização levando à necessidade de inspeções e ensaios para avaliar o estado da estrutura. O avanço tecnológico recente tem proporcionado significativas contribuições para a engenharia civil, com destaque especial para os ensaios não destrutivos utilizados nas

estruturas de concreto armado, que podem ser realizados em qualquer idade do componente a ser avaliado, permitindo obter as informações atuais da propriedade analisada.

Na avaliação do comportamento e do desempenho de estruturas de concreto armado tem-se utilizado habitualmente ensaios para obtenção de informações sobre a resistência à compressão do concreto, empregando-se testemunhos extraídos da própria estrutura. A extração das amostras danifica o elemento estrutural, sendo por isso denominado ensaio destrutivo, podendo, se não for realizado com critério que considera os esforços atuantes, até mesmo vir a comprometer o desempenho ou ruptura do elemento estrutural.

Para as inspeções, análises e diagnósticos das condições das estruturas de concreto armado o emprego de

ensaios não destrutivos (END) pode ser considerado uma opção bem mais apropriada por proporcionar pouco ou nenhum dano à estrutura, além de possibilitar a aplicação com a estrutura em uso e permitir a detecção de anomalias em estágio inicial. Somando-se a isso, se tem que a evolução e a modernização dos métodos de ensaios não destrutivos contribuem, inclusive, para uma maior precisão nas análises.

Rotineiramente são veiculadas notícias sobre desabamento de edifícios, quedas de lajes, viadutos e problemas em diversas obras prontas ou ainda em execução. Destaca-se que fica cada vez mais evidenciada a necessidade indispensável de se adotarem medidas de inspeção periódica e manutenção preventiva nas estruturas a fim de ser garantida a vida útil dos elementos estruturais.

Neste caso, os ensaios não destrutivos, além de serem eficientes, se apresentam relativamente como uma alternativa de baixo custo, podendo ser empregados para a determinação da resistência à compressão do concreto; detectar e localizar defeitos e anomalias como trincas, rachaduras e vazios em elementos de concreto armado; localizar barras e especificar o seu diâmetro; verificar a possibilidade e a ocorrência corrosão de armaduras, inclusive com a sua localização, dentre outros.

Os ensaios não destrutivos aqui tratados, de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e de esclerometria para estimativa da resistência à compressão do concreto, têm-se mostrado cada vez mais importantes para a inspeção, daí, é grande o aumento no meio científico de estudos e pesquisas em laboratório que empregam esses métodos.

O grande problema dos ensaios realizados em laboratório quando são aplicados em campo é a diversidade de condições, tanto do concreto quanto do ambiente, o que pode influenciar nos resultados. Assim, torna-se imperativo a necessidade de se obter uma forma de correlacionar as variáveis para se efetuar os ajustes adequados.

A abordagem detalhada dos END é bastante ampla e não é possível realizá-la neste trabalho. Este trabalho está restrito ao estudo da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (UPV) e da dureza superficial do concreto (esclerometria), analisando a variação de alguns fatores, ou seja: da dimensão máxima característica dos agregados, da umidade do concreto, da camada de concretagem e da distância entre os transdutores de pulsos ultrassônicos. A expectativa com o estudo foi de se obter parâmetros que possam envolver as variáveis que exercem influência nos resultados desses ensaios não destrutivos, quantificar tais influências e procurar auferir uma correlação de ajuste para a aplicação prática em estruturas de concreto armado usuais na cidade de Uberlândia, MG.

Diversos estudos já foram realizados e na literatura é possível encontrar muitas análises e considerações sobre este tema. O diferencial desta pesquisa está no fato de ter sido realizada com concretos preparados com materiais da região e permitir uma melhor avaliação entre os resultados de laboratório e estruturas de concreto armado da região.

Outro ponto de destaque desta pesquisa é a idade dos elementos amostrais em estudo. Em grande parte das

outras pesquisas realizadas, os concretos ensaiados se apresentam nas primeiras idades, ou seja, estão com idades inferiores a sessenta dias, estando o cimento ainda em processo de hidratação, e os elementos ensaiados são corpos de prova, sendo que, na presente pesquisa, a idade das amostras é superior a um ano para as vigas e seis anos para os blocos.

Vários trabalhos publicados têm relatado estudos existentes sobre algumas das características físicas do concreto e as correlações dos resultados obtidos com o emprego de ensaios não destrutivos, existindo pontos comuns e discordantes entre as análises realizadas, conforme descrito em Bungey, Millard, Grantham (2006).

Em vários países existem normas técnicas assim como a ABNT NBR 7584, para a esclerometria, e a ABNT NBR 8802, para o pulso ultrassônico, porém, tem-se que a literatura internacional apresenta maior abrangência sobre o assunto dos ensaios não destrutivos do que a brasileira. Comparativamente, no Brasil ainda são poucos os estudos sobre este tema (EVANGELISTA, 2002).

2 – VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO

A utilização do método de propagação de ondas ultrassônicas na engenharia possui o mesmo princípio que o preconizado na medicina, estando a principal diferença na frequência de ressonância dos transdutores.

Existem dados e informações que apontam para a década de 1940, nos Estados Unidos, o surgimento dos primeiros estudos com ondas ultrassônicas. Atualmente é o método não destrutivo mais empregado devido à facilidade de sua realização, agilidade na execução, baixo investimento e da alta sensibilidade, podendo ser realizado, inclusive, com aparelhos portáteis, utilizando-se normalmente ondas com frequências que variam de 20 kHz a 150 kHz.

2.1 Considerações gerais

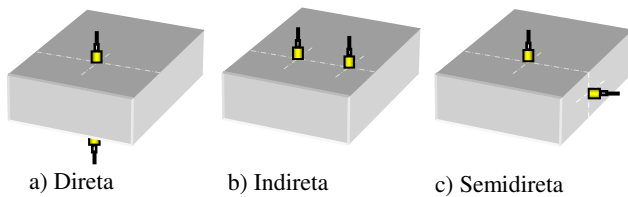
O equipamento de medida do pulso ultrassônico (UPV) é composto de uma fonte onde se conecta dois transdutores (transmissor e receptor). O transmissor transforma impulsos elétricos em ondas acústicas com frequência ultrassônica (acima do limite audível) que são transmitidas e se propagam para o interior do material avaliado, cujos sinais são captados pelo receptor e convertidos novamente em impulsos elétricos, registrados pelo equipamento. Tendo como referência a distância percorrida e o tempo gasto, calcula-se a velocidade de propagação da onda ultrassônica.

Os procedimentos para a realização do ensaio de UPV é consideravelmente simples e está prescrito na norma ABNT NBR 8802:2013, possibilitando a avaliação de propriedades mecânicas, elásticas, composição e danos de materiais como concreto ou madeira.

Existem três tipos de transmissão para a realização do ensaio de UPV: a direta, a indireta e a semidireta, conforme pode ser observado na Figura 1.

A velocidade de propagação da onda é maior em um material mais íntegro do que em um material que apresente descontinuidades internas.

Figura 1 – Tipos de transmissão no ensaio da UPV



No concreto, por ser um material muito heterogêneo, o tempo de propagação da onda ultrassônica no seu interior depende de diversos fatores. Na pesquisa objeto deste trabalho foram abordadas as seguintes variáveis: dimensão máxima do agregado, umidade do concreto, níveis de camada de concretagem e variação da distância entre os transdutores.

Segundo Naik, Malhotra, Popovics (2004), a velocidade de pulso para um concreto comum está entre 3.700 m/s a 4.200 m/s com 70 μ s a 85 μ s para percorrer 300 mm.

2.2 Fatores influentes nos resultados da UPV estudados e apresentados na literatura científica

As diversas normas que tratam da utilização da técnica de medida do pulso ultrassônico no concreto mencionam que diversos fatores podem influenciar nos resultados. Alguns pesquisadores também já se manifestaram sobre o tema.

Naik, Malhotra, Popovics (2004) mencionam que os fatores que afetam a velocidade de pulso podem ser divididos em dois grupos, sendo: (1) fatores resultantes diretamente das propriedades do concreto, como: tamanho, tipo e quantidade de agregado; tipo de cimento; relação água/cimento; aditivos; idade do concreto; e (2) outros fatores: contato entre os transdutores e superfície do concreto; temperatura, condições de umidade e de cura do concreto; comprimento de percurso; tamanho e forma da peça/amostra; nível de tensão na amostra; presença de armadura.

Como pode ser notada, a quantidade de fatores que influenciam é grande, assim serão abordados alguns que são possíveis de se detectar e controlar na prática.

2.2.1 Dimensão do agregado graúdo

Nos estudos realizados sobre a influência da dimensão máxima do agregado graúdo na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, Evangelista (2002) constatou que em uma série com concreto possuindo agregados com dimensão máxima característica (DMA) de 19 mm, as velocidades de propagação de ondas ultrassônicas (UPV) foram maiores cerca de 2,5 % a 11%, do que para a série com DMA = 9,5 mm. A proporção desses agregados nas séries dos concretos foi mantida, a fim de evitar qualquer interferência advinda da variação da quantidade do agregado. No mesmo sentido, Tomsett (1980) concluiu que

a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é menor no concreto com agregado de menor diâmetro máximo quando comparou concretos com agregados de diâmetro entre 10 mm e 20 mm.

2.2.2 Umidade do concreto

Sturup, Vecchio, Caratin (1984) realizaram pesquisas em pastas de argamassa e concretos em condições úmidas e secas e, por meio das relações entre velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos e resistência, apuraram que, para uma mesma resistência à compressão, a velocidade do pulso é maior na situação úmida do que na seca.

De acordo com os preceitos da ACI 228 (1989), a velocidade de pulso através do concreto saturado pode ser 5% mais alta do que no mesmo concreto na condição seca ao ar, embora esta influência seja menor para concretos de alta resistência do que para os de baixa resistência.

Diversas pesquisas atestam que a velocidade de pulso ultrassônico através do concreto saturado é maior do que na condição seca, destacando que Chung e Law (1983) chegaram a uma diferença da ordem de 2%. Na pesquisa de Berriman *et al.* (2004) foram preparadas várias amostras de concreto com uma relação água/cimento constante e proporção diferente de agregado (10 mm) sob condições de umidades diversas. Com base nos resultados percebe-se que há uma correlação direta entre a umidade e a velocidade de pulso ultrassônico, sendo que, para uma mudança na umidade de 30% para 70% ocorreu um acréscimo de 10% sobre o valor medido da velocidade do pulso ultrassônico.

2.2.3 Distância entre transdutores

De acordo com Bungey, Millard e Grantham (2006) o tempo de propagação ou o valor da velocidade sofre pouca interferência pela distância percorrida pela onda ultrassônica. As recomendações se referem a pequenas distâncias entre transdutores. O autor cita que, para variação da distância entre transdutores de 3 m para 6 m, foi verificado um decréscimo de 5% na velocidade de pulso ultrassônico.

A norma EN-ISO 8047 (1994) prescreve a necessidade de se manter distâncias mínimas entre os transdutores, com o intuito de se evitar erros nas leituras, sendo: 100 mm para concretos com agregados de dimensão máxima igual a 20 mm; de 150 mm para concretos com agregados de dimensão máxima entre 20 mm e 40 mm.

3 – ESCLEROMETRIA NO CONCRETO

O ensaio esclerométrico é utilizado para a avaliação da dureza superficial do concreto e consiste de um procedimento padronizado em impactar uma superfície de concreto com uma determinada energia de impacto e medir o rebote ou a reflexão de uma massa padrão após o impacto no concreto. O ensaio é realizado por meio do esclerômetro de reflexão tipo Schmidt, constituído por um

martelo controlado por mola que transmite uma carga a um êmbolo (Bungey, Millard, Grantham, 2006).

Dessa forma, o índice esclerométrico é um valor numérico da reflexão do martelo, registrado em uma escala de medida, gerado pelo recuo que a massa controlada sofre após o choque (reflexão ou rebote) sobre o êmbolo.

Malhotra (2004) afirma que em ensaios de laboratório, com um esclerômetro calibrado adequadamente, a precisão na estimativa da resistência do concreto é de ± 15 a 20%, enquanto que em uma estrutura de concreto é de $\pm 25\%$.

Na norma ABNT NBR 7584:2012 são apresentados os fatores que influenciam os resultados do ensaio de avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Em relação ao campo de aplicação citado pela norma, neste trabalho se aplicará somente a comparação entre os índices esclerométricos dos concretos dos corpos de prova.

A umidade da superfície do concreto afeta o resultado do índice esclerométrico. A capacidade de absorção da energia de impacto do concreto sofre um acréscimo com a ocorrência de umidade na sua superfície e nos poros mais superficiais devido à viscosidade deste líquido ali presente.

Na norma ABNT NBR 7584:2012 é mencionado que superfícies úmidas podem apresentar índices esclerométricos que indicam valores de resistência até 20% inferiores àqueles para o concreto seco equivalente, sendo que, em alguns tipos de concreto as discrepâncias podem ainda ser maiores.

4 – MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Na pesquisa foi utilizado um conjunto de corpos de prova já existente no laboratório da FECIV – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, composto por dois grupos de peças de concreto com idades variadas, sendo seis blocos prismáticos (Grupo 1) e dez vigas armadas (Grupo 2).

Na pesquisa foram abordados os ensaios de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (UPV), esclerometria, resistividade e potencial de corrosão, onde se buscou identificar e quantificar parâmetros sobre a influência que algumas variáveis exercem nos resultados desses ensaios não destrutivos. Em função da limitação deste trabalho, somente serão apresentados os resultados e procedimentos dos ensaios de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (UPV) e esclerometria.

Deve-se salientar que no planejamento experimental, se o número de amostras fosse determinado pela análise de variância, que é o procedimento normalmente indicado, levaria a um valor maior, mas isto não foi necessário, pois um dos objetivos foi de verificar qual a diferença em se realizar o ensaio em determinada posição de uma mesma amostra e não comparar os resultados de várias amostras. O intuito foi realizar vários ensaios em uma mesma amostra e compará-los entre si para cada uma das variáveis estudadas.

4.1 Materiais utilizados

A caracterização dos materiais foi realizada de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT nas versões existentes na época.

4.1.1 Blocos

Foram moldados seis blocos, sendo um par (B1-B2) com dimensão máxima característica dos agregados (DMA) de 9,5 mm (série 1), outro par (B3-B4) com DMA de 19,0 mm (série 2) e um terceiro par (B5-B6) com DMA de 25 mm (série 3), ilustrados na Figura 2. A série 3 continha 50% de agregado com DMA de 19,0 mm e 50% de agregado com DMA de 25,0 mm. Na época dos ensaios a idade era de, aproximadamente, seis anos.

Figura 2 – Vista dos blocos de concreto no laboratório



O cimento empregado foi o CP-III 32 RS, cujas características são indicadas na Tabela 1. As resistências normais à compressão médias foram de 20,79 MPa, 28,47 MPa e 38,94 MPa, aos 3 dias, 7 dias e 28 dias, respectivamente.

Tabela 1 – Características do cimento

Massa específica real (g/cm ³)	Área específica (m ² /kg)	Índice de finura	Consistência normal	Tempo de pega (min)	
				início	fim
2,931	354,74	0,08%	36%	153	242

Para os agregados graúdos foram empregadas britas de basalto, com dimensão máxima de 9,5 mm (brita 0), 19 mm (brita 1) e 25 mm (brita 2). O agregado miúdo foi a areia lavada de rio. Os resultados estão apresentados na Tabela 2. Utilizou-se água potável da rede de abastecimento.

Os concretos foram dosados variando-se a dimensão máxima do agregado graúdo (brita) e mantendo-se a relação água/cimento de 0,67, com traços de acordo com a Tabela 3. Foi adotada uma relação água/cimento que resultaria em valores de resistência à compressão aos 28 dias próximos à resistência de concretos de estruturas executadas na década de 80, ou seja, aproximadamente 15 MPa. Tal definição teve como objetivo a possibilidade do uso das correlações em inspeções de estruturas construídas na década mencionada.

Tabela 2 – Características físicas dos agregados

Agregado	Massa específica (kg/dm ³)	Massa unitária (kg/dm ³)		DMA (mm)	Mod. de Finura
		Estado solto	Estado compactado		
Brita 0	2,869	1,581	1,588	12,5	5,91
Brita 1	2,888	1,559	1,584	19,0	6,57
Brita 2	2,694	1,528	1,553	25,0	6,87
areia	2,632	1,520	-	2,4	2,05

Tabela 3 – Informações sobre o concreto dos blocos

Agreg. graúdo	Blocos	Traço 1:areia:brita a/c=0,67	Consumo de cimento	Abatim. médio (mm)	f _{c28} (MPa)
Brita 0	1 e 2	1:2,5:2,94	335	55	18,3
Brita 1	3 e 4	1:2,5:3,93	300	80	19,5
Britas 1+2	5 e 6	1:2,40:4,10	295	150	15,7

A concretagem foi realizada em três camadas horizontais, sendo lançadas e adensadas com vibrador de agulha, em espessuras iguais, constituindo-se assim, a camada inferior no fundo do bloco, a camada intermediária na meia altura e a camada superior a última lançada.

4.1.2 Vigas

As vigas foram confeccionadas com concreto usinado e foram ensaiadas com, aproximadamente, um ano de idade, possuindo as dimensões de 20 cm x 30 cm x 200 cm (Figura 3). As características de dosagem, cura úmida por 7 dias e armazenagem foram mantidas. Os materiais constituintes do concreto usinado das vigas são apresentados na Tabela 4.

Figura 3 – Amostragem das vigas de concreto armado



Tabela 4 – Informações sobre os materiais das vigas

Materiais	Características
Aglomerante	Cimento CP-II Z 32
Agregados	areia natural (fina e média) e brita basáltica 01
Aditivo	polifuncional 1,59 kg/m ³
Água	rede pública de abastecimento (tratada)
Traço (1:areia:brita:a/c)	1: 2,65 : 3,35 : 0,58 (C= 318 kg/m ³)
Abatimento de tronco de cone	entre 75 mm e 95 mm
Resistência à compressão	f _{c28} = 40 MPa
Armaduras (cobrimento nominal de 25 mm)	superior = 2 ø 10 mm e inferior = 3 ø 10 mm f _y = 590 MPa
Estribos	ø 5 mm cada 15 cm

4.2 Procedimento experimental

Os seis blocos foram identificados pela expressão Bi, sendo “i” a numeração sequencial das peças variando de 1 a 6, ou seja, B1 até B6. As dez vigas apresentam a mesma metodologia de identificação com o emprego da expressão Vi, variando de V1 até V10.

Nos blocos, os ensaios foram realizados em vários pontos considerando-se os níveis inferior, intermediário e superior, que correspondem efetivamente às camadas de concretagem quando da confecção.

Os ensaios de UPV nos blocos foram em 15 pontos em cada face, com tipo de transmissão indireta, sendo 5 pontos em cada uma das camadas (inferior, intermediária e superior). Nas vigas foram 21 pontos em cada lateral, sendo 7 pontos em cada uma das camadas.

A esclerometria nos blocos foi realizada em 12 pontos em cada face em uma malha de 9 impactos por ponto. O impacto foi realizado com o aparelho na posição horizontal, com uma distribuição de quatro pontos em cada uma das camadas (inferior, intermediária e superior). Nas vigas foram 12 pontos com 9 impactos por ponto.

4.2.1 Variáveis consideradas

Algumas variáveis estudadas estão relacionadas diretamente com as características intrínsecas do concreto,

enquanto que outras dizem respeito às condições técnicas para a realização dos ensaios.

As variáveis abordadas nos ensaios de determinação da velocidade de propagação ultrassônica foram a dimensão máxima dos agregados, camadas de concretagem, umidade superficial do concreto e a variação da distância entre os transdutores.

Para a esclerometria as variáveis foram a dimensão máxima dos agregados, camada de concretagem e a umidade superficial do concreto.

A variação da umidade superficial foi feita com a aspersão de água nas superfícies das amostras de maneira uniforme e controlada. Para o conjunto de blocos foi aspergida 80 g de água por molhada em uma área de 0,320 m² e nas vigas, 150 g em uma área de 0,600 m², a cada trinta minutos, num total de dez aplicações por face, tendo sido, portanto, realizadas dez medições em cada face.

À medida que a superfície estava sendo molhada, cumulativamente, o acompanhamento da umidade superficial era realizado com o medidor de umidade KETT Modelo HI-520, para as profundidades de 10 mm, 20 mm, 30 mm e 40 mm.

4.2.2 Velocidade do Pulso Ultrassônico (UPV)

Os ensaios de UPV foram realizados de acordo com os procedimentos da norma ABNT NBR 8802:2013. Ilustre-se, na Figura 4, o equipamento utilizado, Marca *Controls*, Modelo 58-E48, com transdutores (receptor e transmissor) de 50 mm de diâmetro e frequência de 54 kHz.

Figura 4 – Equipamento usado para medidas da UPV



Em relação ao posicionamento dos transdutores, para os blocos foram empregados dois métodos de ensaio, o direto e o indireto, enquanto que para as vigas empregou-se apenas o método indireto.

Nas faces dos blocos (laterais, superior e inferior) foram delimitadas malhas quadriculadas formando linhas e colunas que definiram os pontos de posicionamento dos transdutores, identificados por algarismos numéricos sequenciais em ordem crescente, com início no canto inferior esquerdo da face, seguindo horizontalmente pela direita e posteriormente em linha ascendente vertical, conforme Figuras 5 e 6.

Figura 5 – Indicação das faces dos blocos e pontos do ensaio da UPV (dimensões em centímetros)

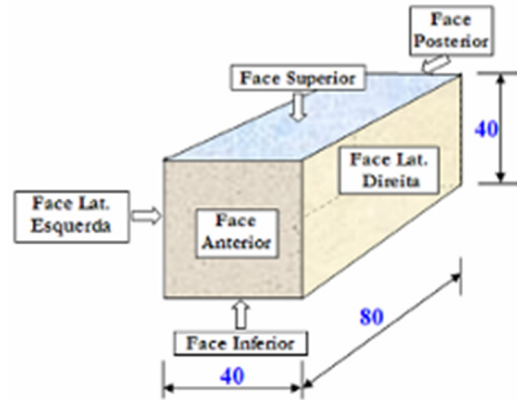
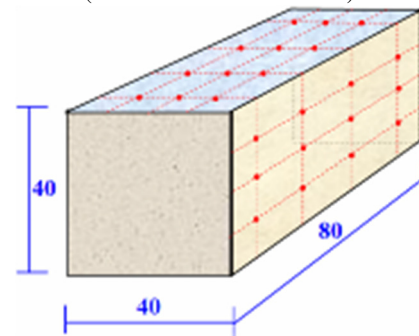
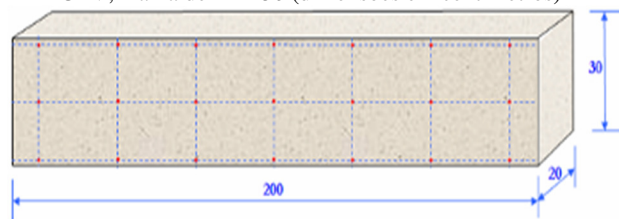


Figura 6 – Indicação dos pontos do ensaio da UPV nos blocos (dimensões em centímetros)



As faces laterais das vigas foram divididas em malhas com o mesmo critério adotado nos blocos, com os pontos de posicionamento dos transdutores identificados por algarismos numéricos sequenciais em ordem crescente, iniciando no canto inferior esquerdo da face, seguindo horizontalmente pela direita e posteriormente em linha ascendente vertical, conforme Figura 7.

Figura 7 – Indicação das faces das vigas e pontos do ensaio da UPV, malha de 12 x 30 (dimensões em centímetros)



4.2.3 Esclerometria

Os ensaios de esclerometria foram realizados de acordo com as prescrições normativas da ABNT NBR 7584 empregando o equipamento digital NDT *James Instruments INC*, Modelo *α - 700.DX*, S/N 86802, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Utilização do equipamento para obtenção do índice esclerométrico



Para cada área de ensaio foi determinado o índice esclerométrico médio efetivo dos nove impactos. A formação da malha e o posicionamento dos pontos de impacto para a esclerometria estão ilustrados nas Figuras 9 e 10 para os blocos e vigas, respectivamente.

Figura 9 – Áreas de ensaios nos blocos de concreto (dimensões em centímetros)

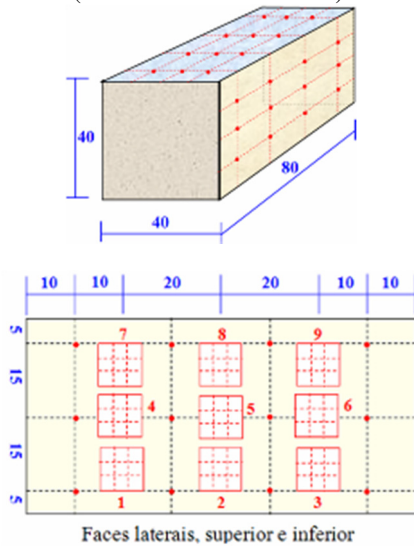
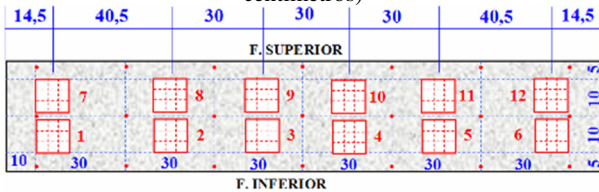


Figura 10 – Áreas de ensaios nas vigas (dimensões em centímetros)



5 – RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados dos ensaios são apresentados e analisados na forma gráfica, tendo sido utilizados todos os dados obtidos.

Para a análise da variação da umidade superficial em relação à profundidade, são apresentadas somente as curvas para a profundidade de 10 mm e 40 mm para melhor visualizar a diferença entre as amostras.

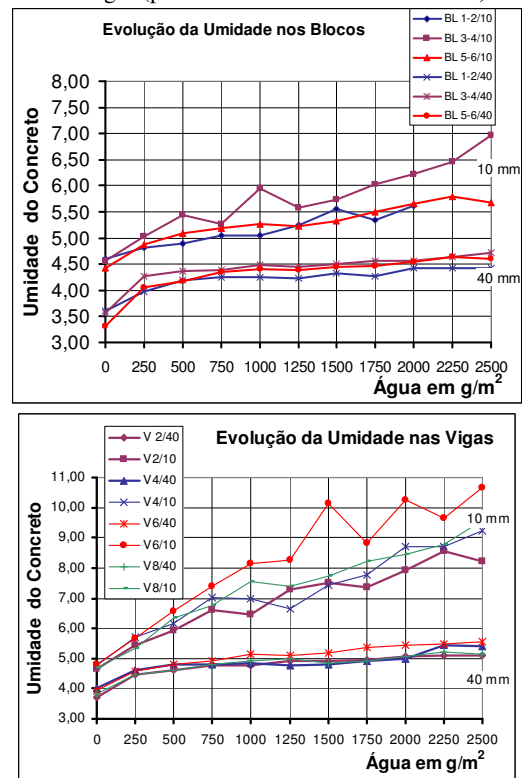
5.1 Umidade superficial nos blocos e vigas

Conforme descrito foram realizadas dez molhagens da superfície dos blocos e vigas. Após cada uma delas foram realizadas medições de umidade nas profundidades de 10

mm, 20 mm, 30 mm e 40 mm, em uma face lateral e na face inferior.

Na lateral dos blocos foram efetuadas 6 medições, sendo 3 na metade superior da face e 3 na metade inferior, enquanto que nas vigas foram 12 em cada face lateral, com 6 na metade superior e 6 na inferior. Com os valores foram obtidas as médias entre os dois blocos do mesmo grupo, mesma profundidade e mesma camada. Na Figura 11 são apresentados somente os gráficos para as profundidades de 10 mm e 40 mm porque os gráficos para as profundidades de 20 mm e 30 mm são intermediários e tem a mesma tendência. A medição inicial corresponde aos blocos em estado natural sem molhagem.

Figura 11 – Evolução da umidade dos blocos na região inferior e nas vigas (profundidades de 10 mm e 40 mm)



Verificou-se que, em todas as condições, a umidade aos 10 mm de profundidade é superior à de 40 mm. Durante os ensaios, a umidade relativa do ar variou de 49% a 77% e a temperatura teve uma variação máxima de 7°C. A variação da umidade para a profundidade de 40 mm é maior para a três primeiras molhagens com um pequeno aumento nas demais molhagens. Para a camada mais superficial, apesar da maior variação também nas primeiras molhagens, a umidade continua a aumentar de forma mais perceptível.

5.2 Análise da influência das variáveis na UPV

Para a análise da influência da dimensão máxima dos agregados e camada de concretagem, foi utilizada a média entre os dois blocos considerados de mesmo tipo. O tipo de transmissão que melhor identifica a influência dessas

variáveis foi a direta, pois capta uma região homogênea da amostra.

Na análise da umidade superficial, também foi empregada a média, porém o tipo de transmissão foi a indireta pelo fato da espessura úmida ser pequena comparada com as dimensões das amostras o que resultaria em diferenças que não permitiriam a análise.

A variação da distancia entre transdutores requer dimensões maiores, daí foram utilizadas as faces das amostras e o modo de transmissão indireta que permite a comparação entre os valores.

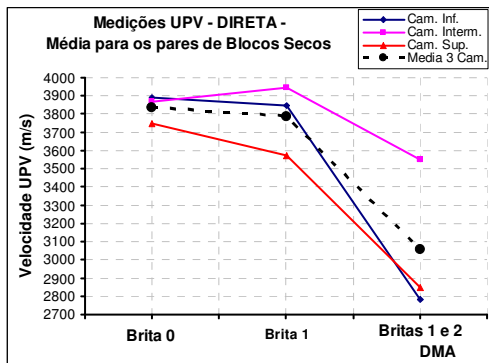
5.2.1 Dimensão máxima dos agregados e camada de concretagem

Os resultados da UPV para os blocos na condição seca e tipo de transmissão direta foram apurados nos pontos posicionados de acordo com as camadas de concretagem. Apurou-se a média dos valores da UPV para cada par de blocos do mesmo grupo, de conformidade com a dimensão máxima dos agregados constituintes do concreto, obtendo-se os gráficos ilustrados na Figura 12.

Verifica-se que para os blocos contendo agregados com maior dimensão máxima, a velocidade de propagação de pulso ultrassônico é menor em todas as camadas, chegando a atingir um patamar na ordem de 22% de redução para a média das três camadas.

Ainda ficou caracterizado que a camada intermediária apresentou valor de UPV maior que as demais, chegando a alcançar um valor aproximadamente 26% maior para a média dos blocos B5-B6 composto de britas 1+2. Porém, os blocos B1-B2 e B3-B4 (brita 0 e brita 1 respectivamente) apresentaram UPV maior que os B5-B6 e menor diferença de valores de UPV entre as camadas.

Figura 12 – Influência da DMA e camada de concretagem nos blocos na UPV

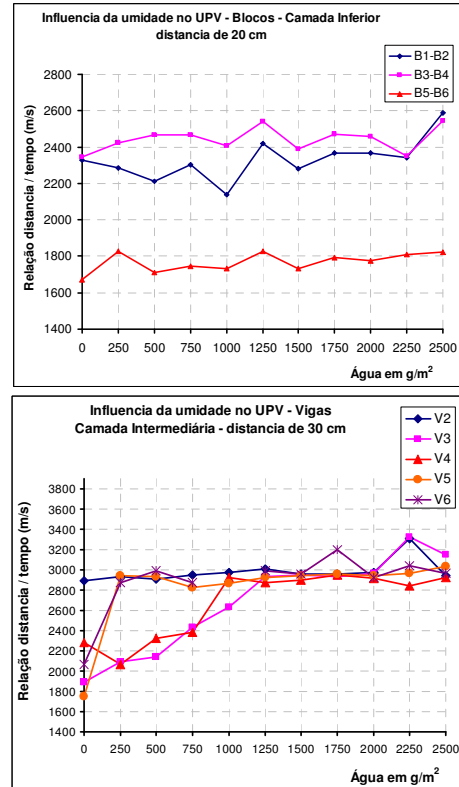


Apesar da manutenção da relação água/cimento nos três traços, nota-se que os blocos com brita 1-2 apresentaram abatimento de tronco de cone bem superior. Isto foi devido a quantidade de água de molhagem livre, pelo fato da brita 2 ter menor superfície específica, que propiciou uma pasta com mais água e, portanto, com maior quantidade de poros. Este fato refletiu também na UPV, pois a velocidade nos blocos B5 e B6 foi menor que nos demais.

5.2.2 Umidade superficial do concreto

Para o estudo da influência da umidade superficial do concreto foram considerados os resultados da UPV apurados nos blocos e vigas, na condição molhada e tipo de transmissão indireta aplicada nas faces laterais das peças. A leitura inicial se deu com as peças secas, Obteve-se a média dos valores da UPV para cada par de blocos do mesmo grupo (B1-B2, B3-B4 e B5-B6) e para seis vigas (V2, V3, V4, V5 e V6) em cada medição, resultando os gráficos ilustrados na Figura 13.

Figura 13 – Influência da umidade na UPV nos blocos e nas vigas



Verificou-se que, tanto para os blocos quanto para as vigas, a UPV aumentou à medida que se molhava a superfície. Porém, as maiores variações ocorreram nas primeiras aplicações.

Observou-se que nos blocos B1-B2 e B3-B4 (constituídos por agregados com dimensão máxima entre 9,5 mm e 19 mm) ocorreu um acréscimo da UPV na ordem de 13% da condição molhada em relação à seca, enquanto que para o par de blocos B5-B6 (agregado com dimensão máxima de 25 mm) o acréscimo foi em torno de 8%.

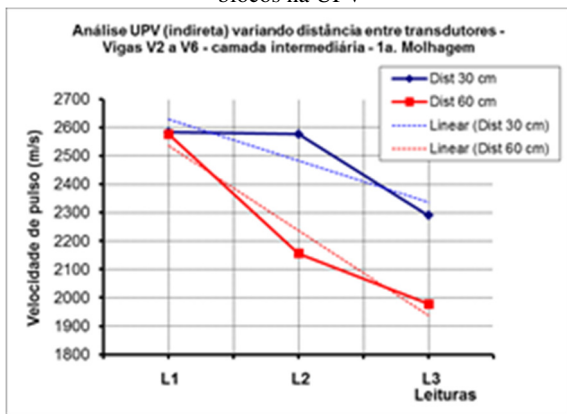
Em relação às vigas tem-se que o comportamento foi semelhante, com um acréscimo médio na ordem de 20% na décima medição (molhada) em relação à condição seca. O aumento se deu com maior intensidade até a quinta medição (1250 g/m²) chegando ao patamar próximo dos 17%, sendo que a partir daí o avanço foi bem mais suave.

5.2.3 Distância entre os transdutores

Para a avaliação da influência da distância entre os transdutores nos resultados da UPV foi considerada a

média dos resultados apurados para as vigas, conforme gráficos ilustrados na Figura 14, onde, no eixo das abscissas consta o número da leitura, portanto, L1 corresponde à 1ª leitura para cada distância, com 30 cm e 60 cm de distancia entre transdutores. Os resultados apresentados foram na condição de 1ª molhagem e tipo de transmissão indireta. A camada intermediária das vigas foi adotada para evitar interferência da presença de armaduras. Os blocos não foram analisados por terem dimensões que não permitem a variação adequada da distancia entre transdutores.

Figura 14 – Influência da DMA e camada de concretagem nos blocos na UPV



Conforme pode ser observado na Figura 14 houve uma redução da velocidade de pulso quando se aumentou a distância entre os transdutores. Nesse caso, quando a distância entre os transdutores na 3ª leitura foi de 90 cm para 180 cm, a velocidade de pulso ultrassônico sofreu uma redução na ordem de 13%. Também se pode notar que as leituras até 60 cm de distancia entre os transdutores não apresentaram diferenças significantes.

5.3 Análise da influência das variáveis na esclerometria

Os ensaios de esclerometria, bem como de UPV, estão relacionados com a uniformidade do concreto e podem ser considerados complementares entre si. Desta forma, as variáveis e faces ensaiadas, sempre que possível, foram as mesmas para os dois tipos de ensaios.

No caso da influência da dimensão máxima dos agregados e da camada de concretagem na esclerometria, somente foi possível ser realizado nos blocos, pois eles foram confeccionados para permitir a análise. Os resultados foram obtidos para a condição seca, visando eliminar a interferência das outras variáveis.

Para ilustrar a influência da umidade nos resultados dos blocos definiu-se utilizar a camada inferior das faces, embora as demais faces também apresentaram tendência semelhante. Nas vigas foi utilizada a região intermediária para eliminar a influência da presença das armaduras.

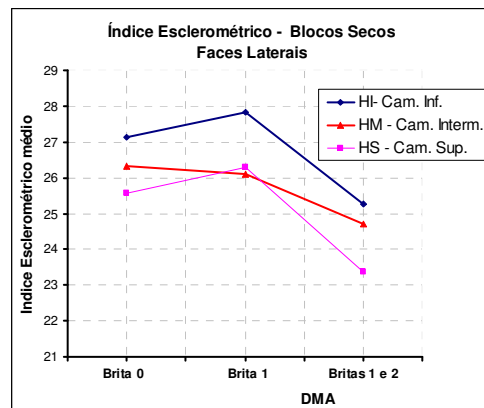
5.3.1 Dimensão máxima dos agregados

Para o estudo da influência da dimensão máxima dos agregados foi determinado o índice esclerométrico na

condição seca e aplicação horizontal do esclerômetro nas faces laterais para cada par de blocos do mesmo grupo de acordo com a DMA, ou seja, blocos B1-B2, B3-B4 e B5-B6, obtendo-se os gráficos ilustrados na Figura 15.

Constatou-se que para os blocos contendo agregados com maior DMA, os índices esclerométricos apresentaram valores menores em todas as camadas, chegando a atingir um patamar na ordem de 8,6% de redução para as camadas inferior e superior entre os blocos de brita 0 (B1-B2) e britas 1+2 (B5-B6). Para a camada intermediária a diferença foi menor, ocorrendo uma redução na ordem de 6,8% no índice esclerométrico do par de blocos com britas 1+2 em relação ao conjunto de blocos contendo brita 0.

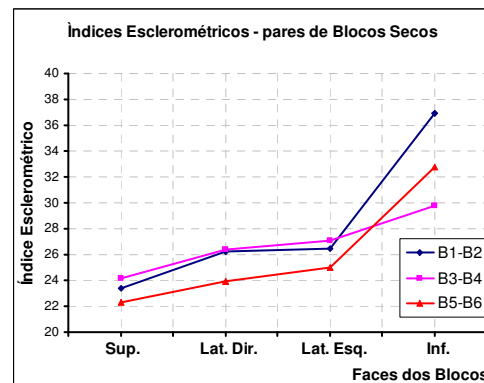
Figura 15 – Influência da DMA no índice esclerométrico nos blocos



5.3.2 Camada de concretagem

Na verificação da influência da camada de concretagem no índice esclerométrico foram considerados os resultados da esclerometria nos blocos na condição seca e aplicação horizontal do esclerômetro nas faces dos blocos, nos pontos posicionados de acordo com as camadas de concretagem nas faixas inferior, intermediária e superior das faces. Determinou-se o índice esclerométrico médio para cada bloco com base nas medições das faces laterais (direita e esquerda), e o índice para cada par de blocos B1-B2, B3-B4 e B5-B6, obtendo-se os gráficos ilustrados na Figura 16.

Figura 16 – Influência da camada de concretagem no índice esclerométrico nos blocos



Foi verificado que, de uma forma geral, o valor do índice esclerométrico decresce da camada inferior para a superior, com uma ordem em torno de 10%, cuja tendência atinge todas as faces dos blocos, inclusive na média dos resultados apurados para os pares de blocos de cada série. Tal comportamento se apresenta coerente com a progressão de adensamento realizado na concretagem, com a compacidade, teoricamente, aumentando de baixo para cima.

5.3.3 Umidade superficial do concreto

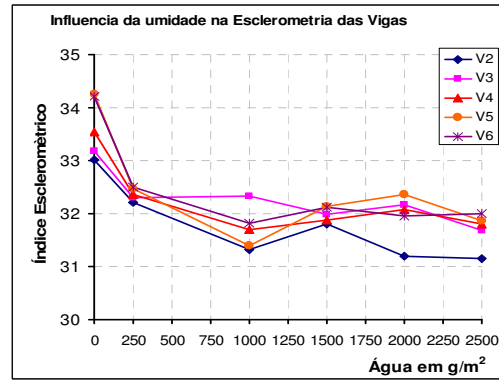
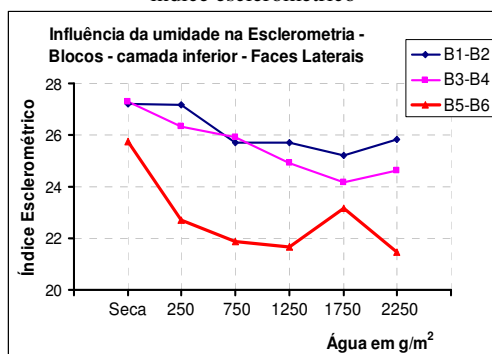
Foram realizadas dez molhagens da superfície dos blocos e vigas, com a leitura inicial com as peças secas e, na sequência, com medições de umidade nas profundidades de 10 mm, 20 mm, 30 mm e 40 mm em uma face lateral e na face inferior dos blocos e nas faces laterais das vigas. Conforme apresentado na seção 5.2 houve um aumento da umidade em todas as profundidades, com maior gradiente nas camadas superficiais.

A análise abordou o índice esclerométrico da camada inferior das faces laterais dos blocos e a intermediária das vigas na condição molhada e posicionamento do esclerômetro na horizontal. Nos blocos obteve-se a média dos valores de cada par do mesmo grupo (B1-B2, B3-B4 e B5-B6) e para as vigas V2, V3, V4, V5 e V6, conforme apresentado nos gráficos ilustrados na Figura 17.

Observou-se que, tanto para os blocos quanto para as vigas, ocorre um comportamento semelhante, com um decréscimo do índice esclerométrico à medida que a umidade superficial aumenta.

Para os blocos com brita 0 (B1-B2) e brita 1 (B3-B4) o decréscimo do índice esclerométrico ocorre na ordem de 11% até o acumulado de 1.750 g/m² de água na superfície, enquanto que nas vigas a redução é de aproximadamente 4,5% até o acumulado de 1.000 g/m² de água.

Figura 17 – Influência da umidade nos blocos e nas vigas no índice esclerométrico



CONCLUSÕES

A aplicação de ensaios não destrutivos (END) nas análises, avaliações e diagnósticos das condições das estruturas de concreto armado é tida como uma opção bem atraente por proporcionar pouco ou nenhum dano à estrutura e permitir a detecção de anomalias em estágio inicial. Além disso, a evolução e a modernização dos métodos de ensaios não destrutivos contribuem para uma maior precisão nas análises e maior confiabilidade no processo de avaliação.

Quando as estruturas de concreto armado atingem uma determinada idade, torna-se comum o surgimento de anomalias patológicas, exigindo a adoção de medidas e intervenções a fim de atender a segurança e a estabilidade estrutural do elemento, bem como, estabelecer a garantia do valor patrimonial do bem.

Em edifícios com idades mais avançadas, é comum os projetos não estarem disponíveis. Isto é agravado pela falta de dados e informações acerca de controles tecnológicos realizados quando da execução das obras, na maioria dos casos torna-se necessária a realização de ensaios para complementar as informações. Devido a ausência de projetos específicos, falta de dados e informações acerca de controles tecnológicos realizados quando da execução das obras, na maioria dos casos torna-se necessária a realização de ensaios para complementar as além das inspeções técnicas no local.

O grande problema dos ensaios em campo é a diversidade de condições, tanto do concreto quanto do ambiente, o que pode influenciar nos resultados. Assim, torna-se imperativo a obtenção de fatores capazes de correlacionar as variáveis intercorrentes e se proceder aos ajustes e adequações cogentes na análises dos resultados.

Os autores realizaram essa pesquisa na busca de se obter parâmetros envolvendo as variáveis que exercem influência nos resultados dos ensaios não destrutivos, quantificar tais influências e procurar auferir uma correlação de ajuste para a aplicação prática e analítica de diagnósticos e prognósticos em estruturas de concreto armado usuais na cidade de Uberlândia.

Foi abordado o estudo da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (UPV) e da dureza superficial do concreto (esclerometria), tendo sido analisada a variação de determinados fatores, quais sejam: a dimensão máxima característica dos agregados; a umidade do concreto; a camada de concretagem e a distância entre os transdutores de pulsos ultrassônicos.

Em relação à umidade observou-se que, durante o processo de molhagem, para as camadas com profundidade de 40 mm a umidade aumentou mais nas três primeiras molhadas, enquanto que para as camadas com profundidade de 20 mm o aumento da umidade foi mais pronunciado nas molhagens posteriores.

Em relação aos ensaios de UPV foram tiradas as seguintes conclusões:

– para os blocos contendo agregados com maior DMA, a velocidade de propagação de pulso ultrassônico foi menor em todas as camadas, chegando a atingir uma redução na ordem de 22% para a média das três camadas. Esta tendência pode ser justificada pela alteração da matriz devido a manutenção da relação água/cimento a qual permite uma maior quantidade de água livre para dimensões maiores de agregados, menor área superficial de molhagem, sobrando mais água na pasta, conforme evidenciada pelos valores de abatimento;

– a camada intermediária apresentou valor de UPV maior que as demais, chegando a alcançar um valor aproximadamente 26% maior para a média dos blocos B5-B6, porém, para os demais blocos a diferença não foi tão expressiva;

– tanto para os blocos quanto para as vigas, a UPV aumentou à medida que se molhava a superfície;

– em relação a distância entre transdutores para as vigas, houve uma redução da UPV à medida que se aumentou distância entre os transdutores a uma razão de 13%, com a variação de 90 cm para 180 cm.

Para a esclerometria as conclusões foram as seguintes:

– os índices esclerométricos dos blocos contendo agregados com maior DMA, apresentaram valores menores em todas as camadas entre 6,8% e 8,6% de redução;

– o valor do índice esclerométrico decresceu da camada inferior para a superior em torno de 10%;

– para os blocos e para as vigas ocorreu um comportamento semelhante com um decréscimo do índice esclerométrico à medida que a umidade superficial aumentou, sendo que este decréscimo foi de 11% nos blocos e de 4,5% nas vigas;

Os resultados demonstraram que o estudo da influência das diversas variáveis nos ensaios não destrutivos é muito complexo e que os valores obtidos nem sempre conduzem a uma clara avaliação.

Porém, o que foi possível concluir é que a posição do elemento estrutural no qual se realiza o ensaio influencia o resultado, daí, por se tratar de ensaios não destrutivos e de custo não tão elevado, se recomenda realizar o ensaio em vários pontos do elemento para permitir a tomada de decisão.

Diante desses resultados é recomendável programar experimentos com amostras suficientes para a obtenção de correlações entre as camadas de concretagem, assim como a dimensão máxima característica entre várias amostras. Para a influência da umidade superficial, os resultados aqui obtidos podem ser considerados conclusivos.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento concedido por meio do edital de demanda universal 01/2008 (TEC-APQ-01106-08).

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228-1R-89**: In Place Methods for Determination of Strength of Concrete, Detroit, 26 p., 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 7584**: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão, 2012.
- BERRIMAN, J.; PURNELL, P.; HUTCHINS, D. A.; NEILD, A. **Humidity and aggregate content correction factors for air-coupled ultrasonic evaluation of concrete**. School of Engineering University of Warwick. Coventry CV4 7AL, UK – In: www.sciencedirect.com, 2004.
- BUNGEY, J. H.; MILLARD, S. G.; GRANTHAM, M. G. **Testing of Concrete in Structures**. Taylor & Francis e-Library, 4th edition, 2006.
- CHUNG, H. W.; LAW, K. S. Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique. **Concrete International**, October, p. 42-49, 1983.
- EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaios Não Destrutivos**, Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, Brasil, 209 p., 2002.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, **EN-ISO 8047**: Testing concrete – Determination of ultrasonic pulse velocity, Brussels, 1994.
- FERREIRA, G. **Estudo sobre fatores influentes nos resultados de ensaios não destrutivos em concreto endurecido**. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 172 p., 2011.
- MALHOTRA, V. M. Surface Hardness Method. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**. CRC Press. 2004.
- METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed., IBRACON, São Paulo, Brasil, 2008.
- NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S. The ultrasonic pulse velocity method. **CRC handbook on nondestructive testing of concrete**. CRC Press, p. 169-189, 2004.
- STURRUP, V. R.; VECCHIO, F. J.; CARATIN, H. Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength. **In Situ/Nondestructive Testing of Concrete**. American Concrete Institute SP-82, Detroit, p. 201-228, 1984.
- TOMSETT, H. N. The practical use of ultrasonic pulse velocity measurements in the assessment of concrete quality. **Magazine of Concrete Research**. March, p. 7-16, 1980. <https://doi.org/10.1680/mac.1980.32.110.7>.