Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

YURI DANILO LOPES[1], VLADIMIR JOSÉ FERRARI[2], LEANDRO VANALLI[3]

RESUMO

No contexto das estruturas de concreto, os ensaios para estimativa da avaliação da resistência do concreto são ocasionais, devidos basicamente a duas causas: a primeira, quando existe a suspeita de que o concreto na estrutura não esteja se comportando de acordo com o que foi proposto no projeto, isto é, não está de acordo com as especificações de resistência necessárias e a segunda causa é quando a estrutura apresenta alguma manifestação patológica que precisa ser corrigida. Logo, o presente trabalho teve como principal objetivo estabelecer correlações entre os resultados dos métodos de ensaios não destrutivos baseados em propagação de ondas ultrassônica e esclerometria e as propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão), a partir de ensaios realizados em corpos de provas de 10x20cm aos 28 dias em laboratório com o mesmo material e traço de concreto utilizado no edificio residencial e comercial, localizando na cidade de Umuarama-PR. Fatores que ajudaram na escolha da referida estrutura foi pelo fato de que a construtora executora da obra tem comprometimento com uma política séria e de qualidade onde os seus principais objetivos são contribuir a partir de um processo de melhoria continua envolvendo recursos humanos, insumos, tecnologia e meio ambiente, visando a satisfação dos clientes, acerca dos requisitos exigidos principalmente pelas normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 12655 (ABNT, 2015), referentes à durabilidade do concreto. A construtora, além de possuir os atributos dos fatores citados, recentemente acaba de implementar o Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat-PBQP-H, onde um dos pontos importantes é realizar a rastreabilidade do concreto recebido na obra. Logo, o controle da resistência do concreto é realizado por amostragem total (100%), ou seja, para cada caminhão-betoneira utilizado em um ou mais elemento estrutural é feito o mapeamento do lote que são representadas por exemplares que define a resistência à compressão daquele concreto naquela betonada. Com base nos resultados obtidos diante da inspeção visual e inspeção detalhada conclui-se que, de um modo geral, a supra-estrutura do edifício apresenta-se em bom estado, ou seja, não há comprometimento estrutural atualmente.
Palavras-chave: Concreto, Ultrassom, Esclerometria, Resistência à compressão.

ABSTRACT

In the context of concrete structures, assays to estimate the concrete strength evaluation are occasional, mainly due to two causes: first, when there is a suspicion that the concrete in the structure is not behaving according to what was proposed in design, i.e., it is not in accordance with the required strength and specifications second cause is where the structure has some pathological manifestation that needs to be corrected. Therefore, this study aimed to establish correlations between the results of non-destructive testing methods based on propagation of ultrasonic waves and rebound hammer and mechanical properties of concrete (compressive strength), from tests performed on bodies of evidence 10x20cm 28 days in the laboratory with the same material and concrete mix used in residential and commercial building, locating in the city of Umuarama-PR. Factors that helped in the choice of such structure was the fact that the executing construction company's work is commitment to a serious policy and quality where your main objective is to contribute from a continuous improvement process involving human resources, inputs, technology and environment, aiming at customer satisfaction, mainly on the requirements demanded by NBR 6118 standards (ABNT, 2014) and NBR 12655 (ABNT, 2015), regarding the durability of concrete. The construction, as well as having the attributes of the factors mentioned recently has deployed the Brazilian Program for Quality and Productivity Habitat-PBQP-H, where one of the important points is to perform the traceability of concrete received at work. Therefore, the concrete strength control is performed by the total sample (100%), ie for each truck mixer used in one or more structural element is the mapping of the batch which are represented by exemplary defining the compressive strength that concrete that concreted. Based on the results obtained in case of visual inspection and detailed inspection is concluded that, in general, the superstructure of the building is presented in good condition, that is currently no structural impairment.
Keywords: Concrete, Ultrasound, rebound hammer, Compressive strength.

[1] Engenheiro Civil, Discente no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/PCV, da Universidade Estadual de Maringá, Paraná, Brasil. E-mail: yuridanilolopes@yahoo.com.br
[2] Engenheiro Civil, Docente no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/PCV, da Universidade Estadual de Maringá, Paraná, Brasil. E-mail: vjferrari2@uem.br
[3] Engenheiro Civil, Docente no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/PCV, da Universidade Estadual de Maringá, Paraná, Brasil. E-mail: lvanalli@uem.br

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os ensaios não destrutivos, ou simplesmente (END), vêm ganhando espaço na indústria da construção civil, seja pelo fato de não causar danos à estrutura que se está ensaiando ou por não provocar perda da capacidade resistente da peça. Estes tipos de ensaios estão sendo cada vez mais empregados na Engenharia de Estruturas, pois permitem a inspeção e diagnósticos de elementos estruturais antes de sua utilização inicial ou, ainda, inspeções contínuas ao longo de sua vida útil.

Os END podem ser feitos em qualquer idade do elemento, podendo avaliar possíveis irregularidades nas estruturas já concretadas.Nas estruturas novas, podem ser utilizados no controle da evolução de sua resistência e outras propriedades relevantes, como corrosão, índice de vazios, permeabilidade e verificação da qualidade. Em estruturas existentes ou antigas, permitem avaliar a integridade e capacidade de resistência às solicitações, podendo ser utilizados nas avaliações das condições prévias em construções futuras ou danos estruturais causados por sinistros diversos. Os END também podem ser utilizados para comprovar a homogeneidade do concreto em lote identificado por mapeamento.

Os métodos não destrutivos são convenientes de acordo com BS 1881:Part- 201, (1986):

- controle tecnológico em pré-moldados ou construções em sito;
- aceitação, ou não, de materiais fornecidos;
- esclarecimento de dúvidas a respeito da mão de obra envolvida em mistura, lançamento, compactação ou cura do concreto, transporte;
- monitoramento do desenvolvimento da resistência visando remoção de fôrmas, duração da cura, aplicação de protensão ou de cargas, remoção de escoramento;
- localização e determinação da extensão de fissuras, vazios e falhas de concretagem;
- determinação da posição, diâmetro ou condições das armaduras;
- determinação da uniformidade do concreto;
- aumento do nível de confiança de um pequeno número de ensaios destrutivos;
- verificar a deterioração do concreto resultante de sobrecarga, fadiga, fogo, ataque do meio ambiente;
- avaliação do potencial de durabilidade do concreto;
- monitoramento de mudanças das propriedades do concreto ao longo do tempo;
- fornecimento de informações para que se verifique se é possível mudar a utilização de uma estrutura.

Sua aplicação oferece vantagens significativas devido à velocidade de execução, custo e ausência de danos à estrutura, em relação aos ensaios que requerem a remoção de amostras para um posterior exame. Através da utilização de uma maior quantidade de ensaios, possibilitando uma investigação mais abrangente da estrutura em estudo.

Nesse contexto, dentre os diversos métodos de END utilizados para avaliações da resistência do concreto, os que mais se destacam, muito pela sua larga difusão, são os métodos da esclerometria e o de ultrassom. O método de ultrassom basicamente se caracteriza pela facilidade na execução, portabilidade e fácil manuseio. Ele consiste em determinar medições de velocidades de pulsos ultrassônicos, medições das extensões dos trajetos, profundidades das fissuras, avaliações de uniformidades, estimação do módulo de elasticidade dinâmico de amostras (com transdutores de ondas shear) e estimar a resistência à compressão usando apenas a velocidades de pulsos.

O método de esclerometria por ser um aparelho portátil, simples, de baixo custo e pode viabilizar uma grande quantidade de dados rapidamente. Consiste em submeter à superfície da estrutura de concreto um impacto de maneira padronizada utilizando uma determinada massa com certa energia, medindo-se o valor do ricochete (índice esclerométrico). Parte desta energia é absorvida no impacto e está relacionada à dureza superficial da peça (ACI 228.1R, 2003). A resistência é estimada por meio de curvas de calibração relacionando o índice esclerométrico com a resistência à compressão do concreto.

2. OBJETIVO DA PESQUISA

A presente pesquisa enquadra-se na linha de tecnologia dos materiais estruturais, contribuindo especificamente para a área de avaliação e diagnóstico de estruturas de concreto, uma vez que visa obter correlações entre os resultados dos ensaios não destrutivos supra citados (ultrassom e esclerometria) e as propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão), a partir de ensaios realizados em corpos de provas de 10x20cm aos 28 dias em laboratório com o mesmo material e traço de concreto utilizado no edificio residencial e comercial, localizando na cidade de Umuarama-PR.

3. METODOLOGIA

Todo o programa experimental foi realizado durante uma criteriosa avaliação a qual passou a estrutura de concreto armado do edifício em andamento, cujo o elemento estrutural de concreto armado foi o objeto de pesquisa, com exceção dos ensaios de resistência à compressão em corpos de prova que foram realizados no laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Estadual de Maringá-UEM/Campus Umuarama-PR e no laboratório da Universidade Paranaense–UNIPAR.

Realizou-se uma inspeção preliminar que consistiu em um exame visual abrangendo toda a estrutura procurando-se caracterizar todas as anomalias como nichos, vazios e fissuras nos elementos estruturais de concreto armado analisados, as quais podem prejudicar o comportamento estrutural dependendo da sua localização e dimensão, assim como realizar um número pequeno de ensaios que permitam ser suficiente para definir uma reparação ou solução do problema.

A segunda fase constituiu-se, inspeção detalhada que consistiu em elaborar um plano de trabalho a partir da informação proveniente da inspeção prévia e da documentação existente sobre a construção da estrutura, projeto, plano de controle, resultados de ensaios e outros, como indicado na Figura 1.



Figura 1 - Correspondência entre inspeção previa e inspeção detalhada
Fonte: Carmen Andrade, (1992)

3.1. Características gerais do edifício em andamento

A obra do edifício iniciou-se no ano de 2014 é composto por 22 pavimentos, sendo:

• 2 Pavimentos sub-solo, os pavimentos é composto pela garagem de veículos, hall social interno, elevador e caixa de escadarias;

• Pavimento térreo, é composto pelo acesso social externo, hall social interno, elevador, caixa de escadarias e acesso para garagens;

• 1º Pavimento, é composto pelo acesso hall social interno, elevador, caixa de escadarias, espaço gourmet, cozinha, instalações sanitárias, fitness, sala de festas, sala de jogos, playground, espelho d'água, piscinas adulto e infantil e mini quadra poliesportiva, além de contém um apartamento iguais entre si.

• Os demais andares, serão dezoitos pavimentos tipos iguais entre si, com quatro apartamentos por andares, cada apto com uma área privativa a ser construída de 112,76m² contendo em planta 02 dormitórios, uma suíte mais closet, bwc suíte com 02 duchas, bwc social, wc multiuso, cozinha, área de serviço e varanda gourmet com churrasqueira, acesso social hall interno, elevadores, caixa de escadarias e área total de 197,04m², conforme ilustra a figura 2.



Figura 2 - Planta tipo

Na Figura 3 mostra-se a perspectiva e a fase em que encontrar o edifício



Figura 3 - Vista da perspectiva do edifício

3.2. Materiais para a produção do concreto armado

Todos os materiais, tais como agregado miúdo (areia fina e média artificial), agregado graúdo utilizados nesta pesquisa seguiram as especificações da ABNT. Estes se encontravam nas mesmas condições em que são empregados usualmente na construção civil. Para a confecção dos corpos de prova utilizados nos ensaios laboratoriais, foi firmada parceria com a concreteira que fornece o concreto ao edifício em estudo, localizada na cidade de Umuarama-PR.

3.3. Dosagem do concreto

O traço do concreto convencional cedido pela concreteira local, ambos aplicados nos elementos estruturais de concreto armado do edifício em andamento nos quais apresenta-se três tipos: sendo o primeiro de fck 20MPa e slump 10±2cm e fator água/cimento (a/c) de 0,725 para as fundações e estacas de cortina de contenção, segue anexo quantitativo dos materiais para um metro cúbico de concreto:

- Areia natural = 0,454m³
- Areia Artificial = 0,310m³
- Brita 01 (basalto) = 0,740m³
- Cimento Votorantim – CP II F-40 = 182kg
- Aditivo Mastermix BF 38 Polifuncional = 1,365 litros (1% sobre o peso do cimento – o máximo recomendado)
- Água = 150 litros

O segundo traço de 30 MPa e slump 16±3cm e fator água/cimento (a/c) de 0,694 é destinado aos blocos de fundação, vigas e lajes:

- Areia natural = 0,447m³
- Areia Artificial = 0,306m³
- Brita 1/2 (basalto) = 0,628m³
- Cimento Votorantim – CP II F-40 = 287kg
- Aditivo Mastermix BF 38 Polifuncional = 1,148 litros (1% sobre o peso do cimento – o máximo recomendado)
- Água = 185 litros

O terceiro traço de 35MPa e slump 16±3cm e fator água/cimento (a/c) de 0,558 é destinado aos pilares:

- Areia natural = 0,431m³
- Areia Artificial = 0,294m³
- Brita 1/2 (basalto) = 0,639m³
- Cimento Votorantim – CP II F-40 = 314kg
- Aditivo Mastermix BF 38 Polifuncional = 1,256 litros (1% sobre o peso do cimento – o máximo recomendado)
- Água = 200 litros

Devido à realização da velocidade de propagação da onda ultrassônica, os corpos de prova foram lixados de forma a obter uma superfície suficientemente plana. Para a realização da leitura da velocidade ultrassônica, não foi realizado o faceamento dos corpos de prova visto que esse processo pode alterar o valor final da medição de trajeto da velocidade de propagação da onda sonora.



Figura 4 – Leitura da velocidade ultrassônica no corpo de prova

Com relação ao ensaio para determinação da resistência à compressão, a superfície plana dos corpos de prova também é importante, a fim de evitar concentrações de tensão que conduza à redução aparente da resistência do concreto (SOBRAL, 1983).

Para obter o topo plano dos corpos de prova, fez-se o faceamento, como mostra a (Figura 5), para a realização dos ensaios de determinação da resistência à compressão do concreto.



Figura 5 – Faceamento do corpos de prova

Os ensaios à compressão foram realizados em uma prensa hidráulica Contenco com capacidade de carga de 100 Toneladas, resultados expresso em Mega Pascal (MPa).

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



Figura 6 – Prensa hidráulica da Contenco

3.6. Leituras da velocidade dos pulsos ultrassônicos em idades iniciais

Para o monitoramento da VPU em idades inicias de concretos de diferentes misturas empregado nos elementos estruturais do edifício que encontra-se em andamento, adotaram-se procedimentos empregados por Irrigaray (2012) com as devidas modificações apresentadas.

O dispositivo utilizado possui dimensões de um cubo de aresta de 20 cm. Apresenta estrutura externa em madeira compensada de 10 mm, revestido internamente por vidro de 3mm em duas faces garantindo uma perfeita planicidade da superfície. As outras duas faces revestidas com borracha de 5 mm. Nas faces revestidas com vidro, foram feitos dois furos circulares de 50 mm de diâmetro na madeira compensada, a uma distância de 10 cm da base. Sobre esses dois furos, foram acoplados flanges de 50 mm, coladas na madeira, servindo de guia para os transdutores do ultrassom. O protótipo empregado para a leitura das misturas de concreto nas primeiras idades possui um sistema de parafusos que permite moldar e desmoldar facilmente. A Figura 7 apresenta o protótipo montado, com uma vista frontal, lateral e outra vista superior.


Figura 7 – Protótipo para leituras com ultrassom no concreto fresco.

Para detecção do monitoramento dos concretos com a utilização do ultrassom, colocou-se o concreto no protótipo, e, após o adensamento, o dispositivo foi coberto com filme de plástico para não perder água de hidratação por evaporação, e, logo em seguida, foi deixado o ultrassom em leitura contínua por aproximadamente 24 horas.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



Figura 8 – Leitura com ultrassom no protótipo

3.7. Rastreabilidade do concreto

Como forma de garantir a formação dos lotes e tornar possível a rastreabilidade do concreto fornecido pela concreteira foram mapeadas as regiões onde foram lançados os concretos de cada caminhão, indicando-as em planta específica para cada andar. A seguir a Figura 9 ilustra o mapeamento da concretagem de um dos pavimentos dos edifício em andamento.

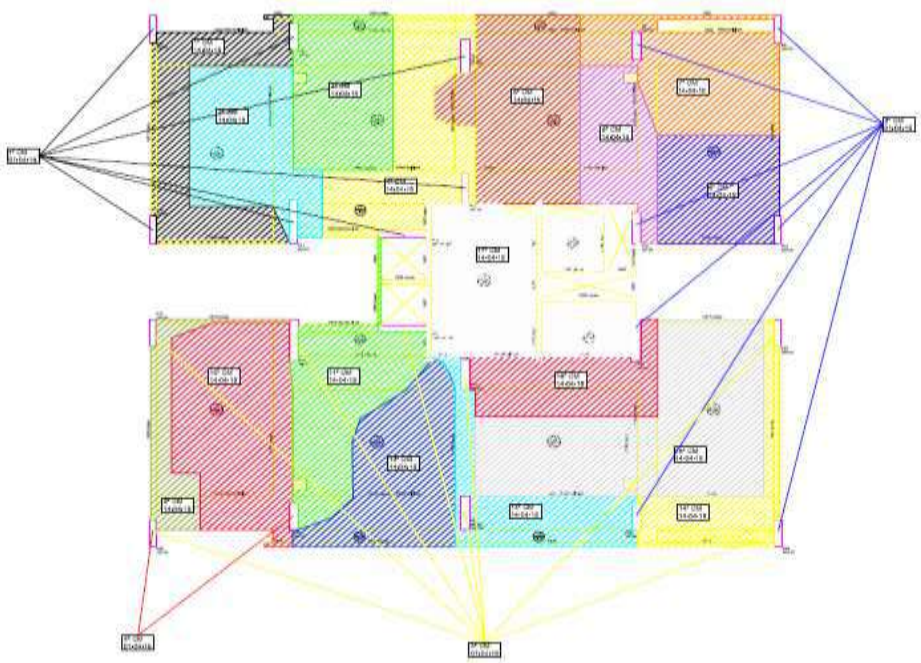


Figura 9 – Mapeamento da concretagem identificando os elementos estruturais do edifício em andamento

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do estudo obtidos no programa experimental, envolvendo a estrutura de concreto armado em andamento (Edifício residencial).

Etapa (laboratorial): Para as construções das curvas de correlações e análises dos resultados de esclerometria, VPU, resistência à compressão, foram utilizados concretos com resistências entre 20, 30 e 35MPa usualmente empregados na obra do edifício. Com esses ensaios foi possível calibrar os equipamentos para melhor aferição das resistências *in loco*.

Neste contexto, é importante observar que para a obtenção de resultados confiáveis, uma sintonia entre emprego de metodologia adequadas e correta interpretações de resultados é necessária.

4.1. Composição dos concretos ensaiados

Para a Concretagem de 12 corpos de prova de 10x20cm + cubo de aresta de 20cm (0,03m³ de concreto) a Tabela 1 mostra os diferentes traços de concreto utilizados e a quantidade de materiais.

Tabela 1 – Composição de traços para 0,03 m³ de concreto

Materiais	20 Mpa (*Slump10±2cm*)	30 Mpa (*Slump16±3cm*)	35 Mpa (*Slump16±3cm*)
Areia natural (kg)	21,99	21,65	20,88
Areia artificial (kg)	18,15	17,91	17,21
Brita 01 (kg)	35,74	30,33	30,86
Cimento (kg)	5,46	8,61	9,42
Aditivo (ml)	40,95	34,44	37,68
Água (litros)	-	-	-

4.2. Velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto fresco

A Figura 10 apresenta as leituras de VPU ao longo do tempo nas diferentes composições de traços de concreto, obtidas em idades iniciais com o concreto no estado fresco nas primeiras 24 horas.

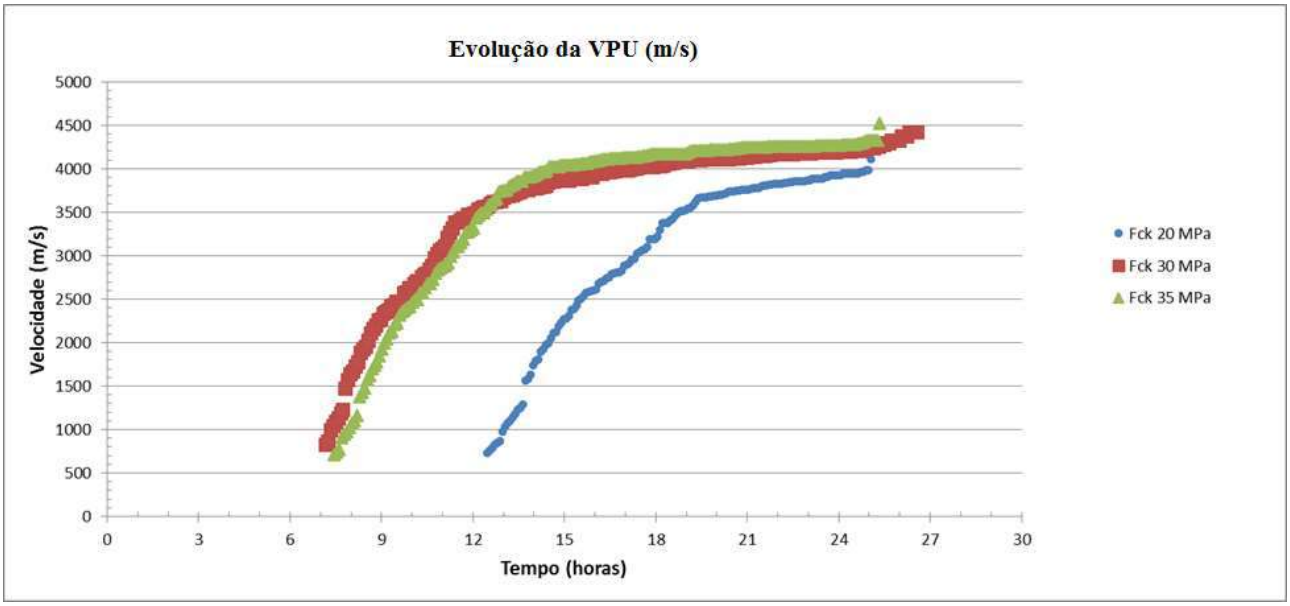


Figura 10 – VPU em idades iniciais nos concretos ao longo do tempo

Analisando-se o comportamento da evolução da velocidade dos concretos ao longo do tempo, percebe-se no gráfico que os concretos com fck 30 e 35MPa apresentaram resultados bem similares, já o concreto com fck 20MPa apresenta uma curvatura diferente dos demais.

4.3. Determinação da velocidade dos pulsos ultrassônicos

Para a determinação da VPU nos corpos de prova foram efetuadas as médias de três leituras para cada idade analisada. As leituras foram feitas nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de velocidades dos pulsos ultrassônicos.

Tabela 2 – Resultados de velocidade dos pulsos ultrassônicos dos concretos ao longo do tempo

Fck - 20MPa - Início: 10h15 - 16/09/2015					Fck - 30 MPa - Início: 09h30 - 02/09/2015			Fck - 35 MPa - Início: 09h00 - 17/09/2015		
Corpos de prova	Dias	Data	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Data	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Data	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)
1	3	18/set	45,5	4396	04/set	42,5	4706	19/set	42,5	4706
2			45,5	4399		42,6	4695		42,3	4728
3			45,2	4425		42,6	4695		42,6	4695
		média	**45,4**	**4406**	média	**42,6**	**4699**	média	**42,5**	**4710**
1	7	22/set	43,7	4577	08/set	41,3	4843	23/set	41,6	4808
2			45,5	4399		41,4	4831		41,8	4785
3			44,9	4458		41,3	4843		41,4	4831
		média	**44,7**	**4478**	média	**41,3**	**4839**	média	**41,6**	**4808**
1	14	29/set	44,8	4461	15/set	41,1	4866	30/set	41,7	4796
2			43,7	4573		41,2	4854		40,5	4938
3			44,1	4532		41,4	4831		40,5	4938
		média	**44,2**	**4522**	média	**41,2**	**4850**	média	**40,9**	**4891**
1	28	13/out	40,4	4946	29/set	40,9	4890	14/out	39,0	5128
2			40,9	4890		40,9	4890		38,4	5213
3			40,9	4894		40,9	4890		37,9	5282
		média	**40,7**	**4910**	média	**40,9**	**4890**	média	**38,4**	**5208**

Nota-se na Figura 11 a presença de uma mudança brusca de velocidade do pulso ultrassônica e curvatura nos concretos ensaiados ao longo do tempo.

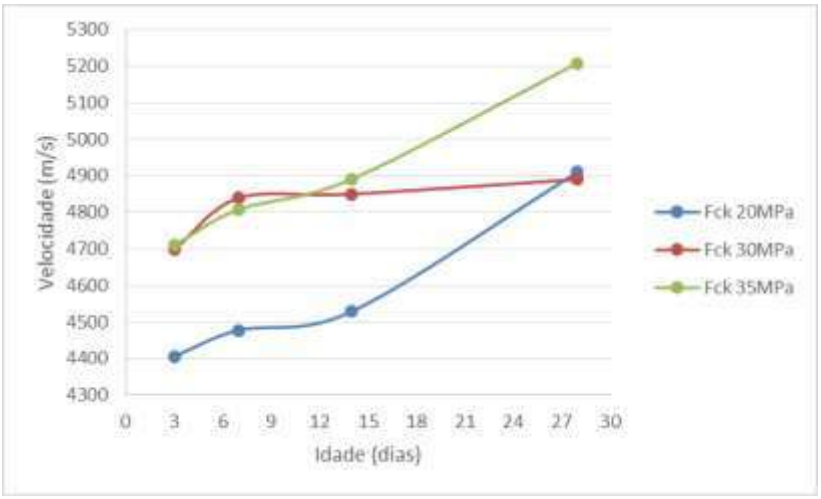


Figura 11 – Velocidade dos pulsos ultrassônicos ao longo do tempo

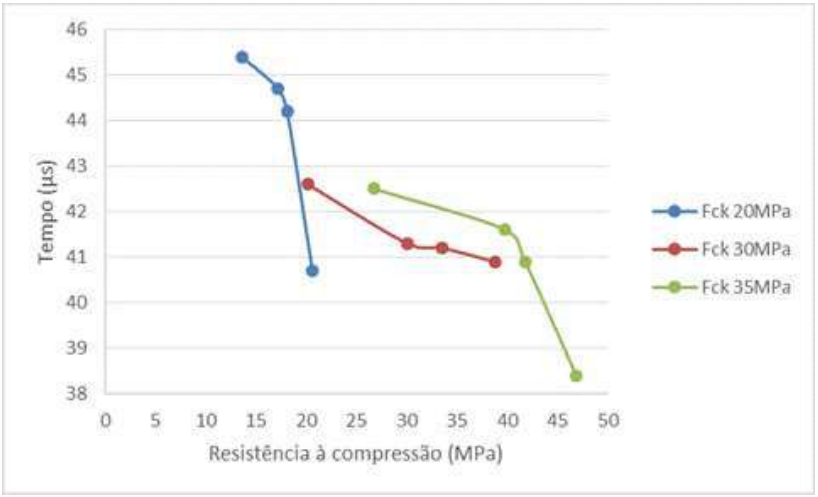


Figura 12 – Tempo de percolação ao longo do tempo

A Figura 12 pela análise do tempo (µs) de percolação que a onda ultrassônica leva, ao sair do transdutor transmissor, para alcançar o transdutor receptor, ou seja, à distância, as medições de trajeto da velocidade de propagação de onda sonora apresentam diminuição continua ao longo do tempo.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

4.4. Correlações entre a resistência à compressão e velocidade dos pulsos ultrassônicos

A curva de correlação foi obtida das médias dos resultados da velocidade e da resistência realizada nos corpos de prova, diferentes tipos de regressões foram testadas: (i) exponencial, (ii) linear, (iii) logarítmica, (iv) polinômio de 2° grau e (v) potência. O critério adotado na escolha do tipo de curva foi de comparação dos coeficientes de determinação (r^2). A curva que apresentou o maior valor de r^2 é a que mais se ajustou aos resultados obtidos foram a de regressão polinomial, exponencial e logarítmica.

A Tabela 3 disponibiliza os resultados dos ensaios de velocidade de pulso ultrassônico e da resistência à compressão no diferentes traços de concreto, obtida através da leitura em corpos de prova.

Tabela 3 – Resultados de VPU e resistência à compressão do concreto

Fck - 20MPa - Início: 10h15 - 16/09/2015				Fck - 30 MPa - Início: 09h30 - 02/09/2015			Fck - 35 MPa - Início: 09h00 - 17/09/2015		
Dias	Data	Velocidade (m/s)	Compressão (MPa)	Data	Velocidade (m/s)	Compressão (MPa)	Data	Velocidade (m/s)	Compressão (MPa)
3	18/set	4406	13,60	04/set	4699	20,13	19/set	4710	26,77
7	22/set	4478	17,17	08/set	4839	30,07	23/set	4808	39,78
14	29/set	4522	18,08	15/set	4850	33,47	30/set	4891	41,77
28	13/out	4910	20,63	29/set	4890	38,81	14/out	5208	46,87

Nota-se ainda, nas Tabelas 4 a 6 as equações obtidas da correlação entre os valores de velocidade ultrassônica e a resistência à compressão do concreto, encontradas com outros tipos de curvas de regressão testadas.

As Figuras 13 a 15 apresentam-se os coeficientes de determinações de correlação (r) e o (r^2).

Tabela 4 – Equações e coeficientes de determinação para as correlações entre velocidade e a resistência à compressão do concreto de 20MPa.

Fck·20MPa¤		
TIPO·DE·CURVA¤	EQUAÇÃO¤	R-quadrado¤
EXPONENCIAL¤	$y = 0{,}8926e^{0{,}0006x}$¤	$R^2 = 0{,}6987$¤
LINEAR¤	$y = 0{,}0112x - 34{,}146$¤	$R^2 = 0{,}7581$¤
LOGARÍTMICA¤	$y = 52{,}862\ln(x) - 428{,}18$¤	$R^2 = 0{,}7669$¤
POLINOMINAL¤	$y = -6E\text{-}05x^2 + 0{,}605x - 1419{,}5$¤	$R^2 = 0{,}986$¤
POTÊNCIA¤	$y = 1E\text{-}10x^{3{,}0373}$¤	$R^2 = 0{,}7082$¤

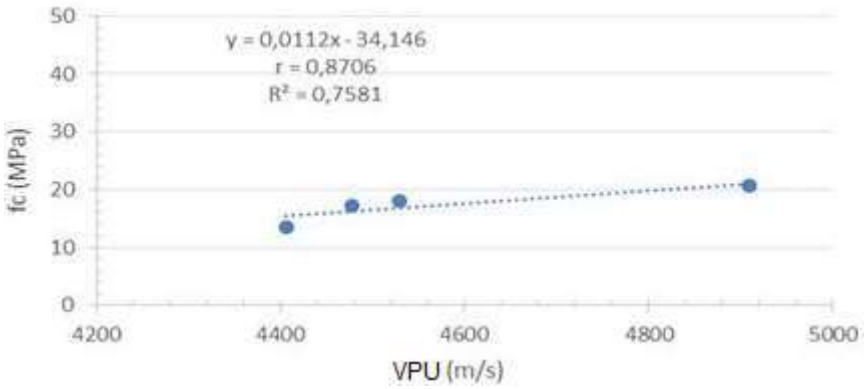


Figura 13 – Correlações entre velocidade de pulso ultrassônico e resistência à compressão – Fck 20MPa

Tabela 5 – Equações e coeficientes de determinação para as correlações entre velocidade e a resistência à compressão do concreto de 30MPa.

Fck 30MPa		
TIPO DE CURVA	EQUAÇÃO	R-quadrado
EXPONENCIAL	$y = 3E\text{-}06e^{0{,}0033x}$	$R^2 = 0{,}982$
LINEAR	$y = 0{,}0922x - 413{,}69$	$R^2 = 0{,}9528$
LOGARÍTMICA	$y = 440{,}83\ln(x) - 3707{,}8$	$R^2 = 0{,}9511$
POLINOMINAL	$y = 0{,}0004x^2 - 3{,}9656x + 9295{,}3$	$R^2 = 0{,}9906$
POTÊNCIA	$y = 3E\text{-}58x^{16{,}01}$	$R^2 = 0{,}9811$

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

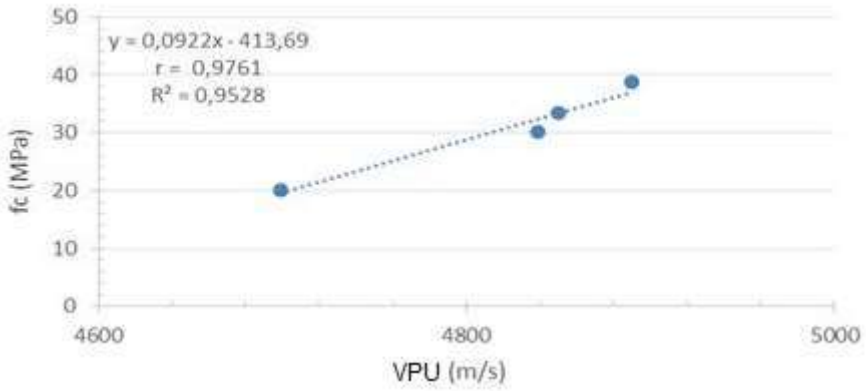


Figura 14 – Correlações entre velocidade de pulso ultrassônico e resistência à compressão – Fck 30MPa

Tabela 6 – Equações e coeficientes de determinação para as correlações entre velocidade e a resistência à compressão do concreto de 35MPa.

Fck 35MPa		
TIPO DE CURVA	**EQUAÇÃO**	**R-quadrado**
EXPONENCIAL	$y = 0{,}4502e^{0{,}0009x}$	$R^2 = 0{,}6416$
LINEAR	$y = 0{,}0334x - 124{,}91$	$R^2 = 0{,}7074$
LOGARÍTMICA	$y = 167{,}24\ln(x) - 1382{,}2$	$R^2 = 0{,}7186$
POLINOMINAL	$y = -0{,}0002x^2 + 1{,}5596x - 3915{,}5$	$R^2 = 0{,}9591$
POTÊNCIA	$y = 7E\text{-}16x^{4{,}537}$	$R^2 = 0{,}6534$

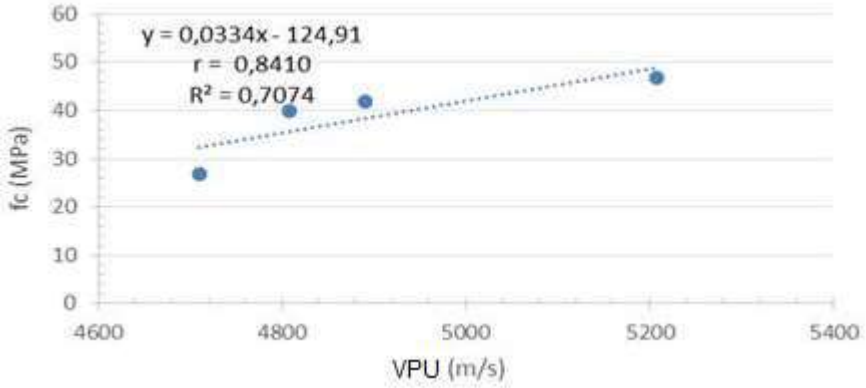


Figura 15 – Correlações entre velocidade de pulso ultrassônico e resistência à compressão – Fck 35MPa

Todas as correlações apresentaram linhas de tendência polinomiais de segunda ordem com valores de R-quadrado superiores a 0,95 e R-múltiplo superiores a 0,84. Diante desse valor, conclui-se que as resistências estimadas através do método de ultrassom aproximaram dos valores obtidos pelo ensaio à compressão, sendo que aos 3,7, 14 e 28 dias o valor estimado pelo VPU foi o mais próximo do obtido no laboratório.

5.1.6 Determinação do índice esclerométrico

Os resultados foram obtidos através da leitura da régua graduada do instrumento após o impacto gerado dentre os corpos de prova cilíndricos de 10cm de diâmetro e 20cm de altura ensaiados nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. Os impactos foram aplicados em locais onde evitasse fatores que pudessem influenciar os resultados, dessa forma foram escolhidos locais sem imperfeições. Com os valores obtidos calculou-se a média. Foram descartados os valores individuais que estavam afastados em mais de 10% do valor médio obtido e calculado novamente a média. Em cima desta média foi aplicado o fator de correção, obtendo assim o valor de rebote (R), conhecido como I.E corrigido, conforme apresentados na Tabelas 7 a 9.

Tabela 7 – Resultados dos índices esclerométricos – Fck 20MPa

Aferição		Pontos	Elemento Estrutural FCK 20 MPA			
Pontos	Leitura		3 Dias	7 Dias	14 Dias	28 Dias
1	80	1	10	12	14	22
2	80	2	10	12	14	23
3	80	3	10	11	15	21
4	80	4	10	12	16	20
5	80	5	10	11	16	22
6	80	6	10	12	18	23
7	80	7	10	11	17	22
8	80	8	10	12	16	22
9	80	9	10	13	18	24
10	80	10	10	13	17	22
Soma	800	11	10	10	13	22
I.E. (Fabriante)	80	12	10	11	15	22
Fator de correção	1	13	10	10	16	21
		14	10	12	15	22
		15	10	10	16	20
		16	10	12	14	20
		Média I	10,00 (11,00 / 9,00)	11,50 (12,65 / 10,35)	15,63 (17,19 / 14,06)	21,75 (23,93 / 19,58)
		Média II	10,00	11,64	15,90	21,60
		I.E corrigido (xFC)	10,00	11,64	15,90	21,60
		Resistência (Mpa)	**13,60**	**17,20**	**18,10**	**20,63**

Tabela 8 – Resultados dos índices esclerométricos – Fck 30MPa

Aferição		Pontos	Elemento Estrutural FCK 30 MPA			
Pontos	Leitura		3 Dias	7 Dias	14 Dias	28 Dias
1	80	1	12	23	25	36
2	80	2	13	18	27	38
3	80	3	14	23	24	40
4	80	4	14	18	23	42
5	80	5	19	26	22	38
6	80	6	14	20	28	38
7	80	7	18	26	24	40
8	80	8	13	20	25	40
9	80	9	20	22	28	40
10	80	10	13	21	30	40
Soma	800	11	16	23	24	36
I.E. (Fabriante)	80	12	21	26	25	38
Fator de correção	1	13	14	20	30	40
		14	16	20	28	36
		15	20	22	30	40
		16	18	18	30	38
		Média I	15,94 (17,53 / 14,34)	21,63 (23,79 / 19,46)	26,44 (29,08 / 23,79)	38,75 (42,63 / 34,88)
		Média II	16,00	21,40	25,80	38,75
		I.E corrigido (xFC)	16,00	21,40	25,80	38,75
		Resistência (Mpa)	**20,13**	**30,06**	**33,47**	**38,81**

Tabela 9 – Resultados dos índices esclerométricos – Fck 35Mpa

Aferição		Pontos	Elemento Estrutural FCK 35 MPA			
Pontos	Leitura		3 Dias	7 Dias	14 Dias	28 Dias
1	80	1	12	14	30	42
2	80	2	15	20	34	42
3	80	3	14	18	24	40
4	80	4	15	24	33	42
5	80	5	12	19	36	40
6	80	6	16	14	32	42
7	80	7	12	22	30	38
8	80	8	13	20	32	38
9	80	9	12	18	35	40
10	80	10	12	20	32	42
Soma	800	11	16	16	32	38
I.E. (Fabriante)	80	12	12	21	32	36
Fator de correção	1	13	12	18	30	38
		14	14	16	32	40
		15	14	18	34	38
		16	16	20	32	40
		Média I	13,56 (14,92 / 12,21)	18,63 (20,49 / 16,76)	31,88 (35,06 / 28,69)	39,75 (43,73 / 35,78)
		Média II	13,75	19,00	32,14	39,75
		I.E corrigido (xFC)	13,75	19,00	32,14	39,75
		Resistência (Mpa)	**26,77**	**39,78**	**41,77**	**46,87**

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

5.1.7 Correlações entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão

De posse dos dados dos índices esclerométricos médios e da resistência à compressão média dos corpos de prova obtida a partir dos corpos de prova rompidos, elaborou-se a curva de correlação para os três traços de concreto estudados, onde, diferentes tipos de regressões foram testadas: potência, exponencial e polinômio de 2° grau. O critério adotado na escolha do tipo de curva foi de comparação dos coeficientes de determinação (r^2). As curvas que apresentaram os maiores valores de r^2 foram a de regressão polinomial e logarítmica.

As tabelas 10 a 12 apresentam as equações obtidas da correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão do concreto, encontradas com outros tipos de curvas de regressão, bem como os respectivos valores do (r^2).

Na Figuras 16 a 18 apresentam-se os coeficientes de determinações (r^2) e o de correlação (r), bem como a equação de regressão aplicável à situação de análise apresentada, ou seja, a que apresenta o coeficiente de correlação mais próximo de 1.

Tabela 10 – Equações e coeficientes de determinação para as correlações entre índice esclerométrico e a resistência à compressão do concreto de 20MPa.

Fck 20MPa		
TIPO DE CURVA	**EQUAÇÃO**	**R-quadrado**
EXPONENCIAL	$y = 11{,}021e^{0{,}0301x}$	$R^2 = 0{,}8012$
LINEAR	$y = 0{,}517x + 9{,}7387$	$R^2 = 0{,}8468$
LOGARÍTMICA	$y = 7{,}9911\ln(x) - 3{,}786$	$R^2 = 0{,}8827$
POLINOMINAL	$y = -0{,}0367x^2 + 1{,}6837x + 1{,}255$	$R^2 = 0{,}8877$
POTÊNCIA	$y = 4{,}9744x^{0{,}4681}$	$R^2 = 0{,}8473$

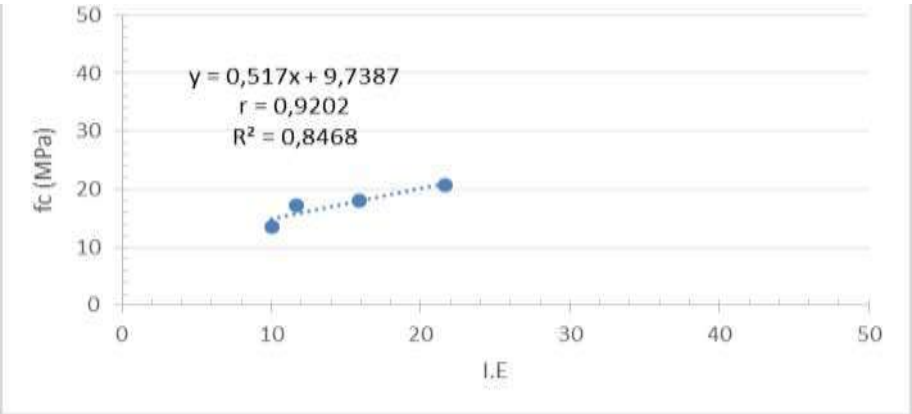


Figura 16 – Correlações entre o índice esclerométrico e resistência à compressão de 20MPa.

Tabela 11 – Equações e coeficientes de determinação para as correlações entre índice esclerométrico e a resistência à compressão do concreto de 30MPa.

Fck 30MPa		
TIPO DE CURVA	**EQUAÇÃO**	**R-quadrado**
EXPONENCIAL	$y = 15{,}524e^{0{,}0256x}$	$R^2 = 0{,}7782$
LINEAR	$y = 0{,}7473x + 11{,}572$	$R^2 = 0{,}851$
LOGARÍTMICA	$y = 20{,}498\ln(x) - 34{,}684$	$R^2 = 0{,}9331$
POLINOMINAL	$y = -0{,}0461x^2 + 3{,}3257x - 20{,}959$	$R^2 = 0{,}9917$
POTÊNCIA	$y = 3{,}0904x^{0{,}7111}$	$R^2 = 0{,}8782$

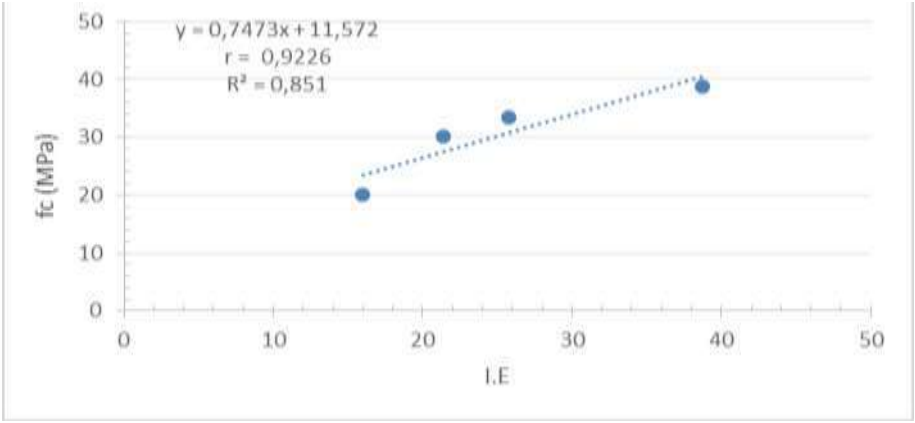


Figura 17 – Correlações entre o índice esclerométrico e resistência à compressão de 30MPa.

Tabela 12 – Equações e coeficientes de determinação para as correlações entre índice esclerométrico e a resistência à compressão do concreto de 35MPa.

Fck 35MPa		
TIPO DE CURVA	**EQUAÇÃO**	**R-quadrado**
EXPONENCIAL	$y = 24{,}061e^{0{,}0175x}$	$R^2 = 0{,}7307$
LINEAR	$y = 0{,}6335x + 22{,}224$	$R^2 = 0{,}778$
LOGARÍTMICA	$y = 16{,}193\ln(x) - 12{,}688$	$R^2 = 0{,}8413$
POLINOMINAL	$y = -0{,}0305x^2 + 2{,}262x + 3{,}7546$	$R^2 = 0{,}8456$
POTÊNCIA	$y = 9{,}0538x^{0{,}4511}$	$R^2 = 0{,}8068$

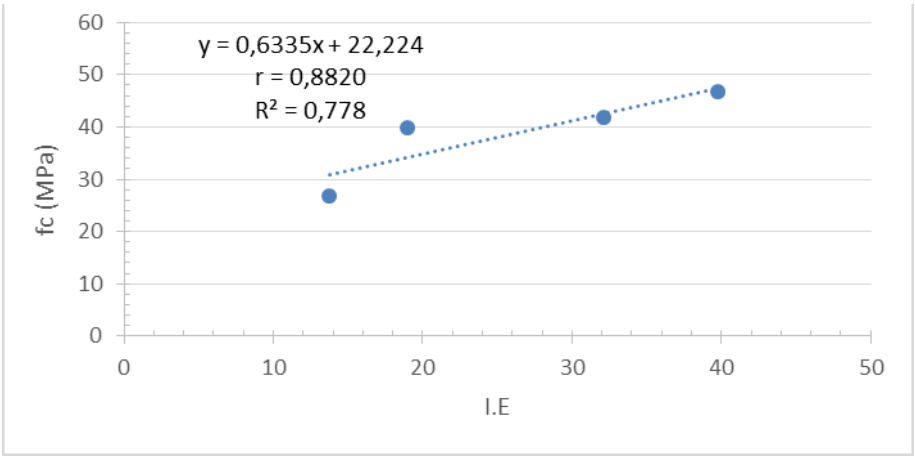


Figura 18 – Correlações entre o índice esclerométrico e resistência à compressão de 35MPa.

Todas as correlações apresentaram linhas de tendência polinomiais de segunda ordem com valores de R-quadrado superiores a 0,84 e R-múltiplo superiores a 0,88. Diante desse valor, conclui-se que as resistências estimadas através do índice esclerométrico aproximaram dos valores obtidos pelo ensaio à compressão, sendo que aos 3,7, 14 e 28 dias o valor estimado pelo ultrassom foi o mais próximo do obtido no laboratório.

. CONCLUSAO

Com os resultados alcançados neste trabalho, são destacadas as seguintes conclusões:

- As curvas obtidas podem ser empregadas para estimar a resistência do concreto de outros elementos da estrutura do edifício.
- Não foi possível estabelecer correlação entre o ensaio de ultrassom realizado diretamente na estrutura com o resultado do ensaio de compressão de corpos de prova de concreto obtidos no laboratório. Isso principalmente pela influência da extensão do trajeto e a distância percorrida entre os centros de cada transdutor no elemento

estrutura de concreto e também pela impossibilidade de realizar nos pontos escolhidos ensaio no modo de transmissão direta.

- O método de ultrassonografia apresentou um nível de confiabilidade superior na identificação de heterogeneidade nas estruturas de concreto frente a técnica da esclerometria.
- Pode-se monitorar a evolução da velocidade ultrassônica nas primeiras 24 horas do concreto fresco utilizado no edifício.
- Por fim, é importante frisar que como o ensaio de esclerometria leva em conta somente a dureza superficial, os valores de resistência encontrados serviram apenas como orientação e não como resultados a ser utilizado em verificação estrutural.

No geral, nota-se que o métodos de ensaios não destrutivos podem ser utilizados para o diagnóstico de estruturas de concreto no que concerne a detecção de falhas estruturais. Especificamente, uma metodologia adotada para a inspeção da estrutura de concreto armado de um importante empreendimento foi detalhada, sobretudo comparando com as prescrições normativas atuais vigentes no Brasil.

Dessa forma, a grande vantagem que os métodos de ensaios não destrutivos juntamente com o controle tecnológico proporcionam aos demais profissionais de engenharia é fornecer elementos, para fazer a rastreabilidade da estrutura e assim detectar se existem falhas, nichos, vazios, fissuras e onde estão localizados. Além do mais, é possível realizar tudo isso sem causar danos as peças ou elementos estruturais.

Conclui-se que com base nos resultados obtidos diante da inspeção visual e inspeção detalhada, de um modo geral, a supra-estrutura do edifício apresenta-se em bom estado, ou seja, não há comprometimento estrutural atualmente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7584, 2012. **Concreto Endurecido: Avaliação da Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão**. Rio de Janeiro.

_____NBR 12655, 2015. **Concreto: Preparo Controle e Recebimento**. Rio de Janeiro.

_____NBR 5738, 2015. **Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro.

_____NBR 5739, 2007. **Ensaio de Compressão de corpos de Prova Cilíndricos de Concreto**. Rio de Janeiro.

_____NBR 6118, 2014. **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro.

_____NBR 8802, 2013. **Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro.

ACI COMMITTEE 228. 1R. **In-Place Methods to Estimate Concrete Strength**, American Concrete Institute, ACI 228.1R, 2003.

_____BS 1881: Part 201, 1986. **Guide to the use of nondestructive methods of test for hardned concrete.** London.

IRRIGARAY, M. A. P. **Estimativa da resistência do concreto à compressão por meio da velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta do concreto**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2012

SOBRAL, H. S. **Resistência mecânica e deformações do concreto.** São Paulo: ABCP,1983. 77 p. (ET-56)