

## Métodos combinados para a avaliação da resistência de concretos

### A combination method for evaluation of the concrete strength

Gihad Mohamad<sup>1</sup>, Paulo Inácio Obregon do Carmo<sup>2</sup>,  
Marcelo de Jesus Dias de Oliveira<sup>3</sup>, Aldo Leonel Temp<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Santa Maria - UFSM - Avenida Roraima, Centro de Tecnologia, Santa Maria, RS.  
e-mail: gihad.civil@gmail.com

<sup>2</sup> Laboratório de Materiais de Construção Civil - LMCC - Centro de Tecnologia, UFSM, Santa Maria, RS.  
e-mail: paulo\_inacio@uol.com.br

<sup>3,4</sup> Mestrando do Programa de pós-graduação em Engenharia Civil- UFSM, Santa Maria, RS.  
e-mail: marcelod.oliveira@gmail.com; eng.aldotemp@gmail.com

---

#### RESUMO

O objetivo principal deste artigo é avaliar o comportamento à compressão dos concretos utilizando métodos combinados de testes não destrutivos, como a velocidade de ultrassom e o índice esclerométrico. Para tanto, foram confeccionados corpos de prova cilíndricos e cúbicos de concretos, com diferentes tipos de brita de acordo com o diâmetro máximo (brita 0, 1 e 2) e relações água/cimento. Para a previsão da resistência à compressão dos concretos, os resultados experimentais foram comparados com os resultados teóricos propostos por Rilem [4], Gasparik [5] e Di Leo e Pascale [6]. Como conclusão, pode afirmar-se que existiu uma maior variabilidade nos resultados de velocidade de ultrassom para resistências de concretos acima de 30 MPa, diferentemente do encontrado nos resultados dos índices esclerométricos. As funções potenciais que relacionavam a resistência do cilindro e a velocidade de ultrassom apresentaram comportamentos semelhantes para os concretos com brita 1 e 2, sendo significativamente diferentes aos concretos de brita 0. Já para as medidas dos índices esclerométricos, não se pode verificar diferenças quanto ao tipo de brita nos resultados experimentais. A combinação dos resultados de resistências experimentais e teóricas dos métodos combinados de testes não destrutivos ficou abaixo da reta de representação unitária (experimental/teórico), o que permite concluir que os modelos propostos não foram confiáveis para a previsão da resistência do concreto a partir da velocidade de ultrassom e do índice esclerométrico.

**Palavras-chave:** ultrassom, esclerômetro, métodos combinados, resistência mecânica.

---

#### ABSTRACT

The main goal of this article was evaluated the compressive strength of concrete by combination method of non-destructive testing using ultrasonic pulse velocity and Schmidt rebound hammer. For the comparison of different method it was molded cylindrical and cubical samples of concrete at the laboratory with different size of aggregate (stone 0, 1 and 2) and water/cement ratio. Rilem [4], Gasparik [5] and Di Leo and Pascale [6] theoretical model were used to preview the compressive strength of concrete. The conclusions of this work were: for concrete with compressive strength above 30 MPa, it was found a higher variability on the ultrasonic pulse velocity, differently that was found for rebound index. The ultrasonic pulse velocity for concrete with aggregate size 0 was higher when compared with concrete with aggregate size 1 and 2. For rebound index, it wasn't possible to verify the difference between the rebound index and the size of the aggregate. Comparing the experimental and theoretical strengths of nondestructive method, it was observed that the results were below of the unitary line (experimental / theoretical), which confirms that Rilem [4], Gasparik [5] and Di Leo and Pascale [6] are non-reliable models for the prediction of concrete strength.

**Keywords:** ultrasound, rebound hammer, combined methods, mechanical strength.

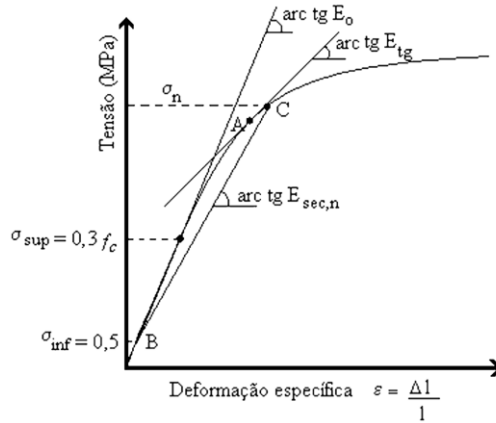
## 1. INTRODUÇÃO

O controle da resistência do concreto é uma prática regular e necessária para verificar se os requisitos de resistência definidos em projeto foram atendidos. Esse controle normalmente é realizado por meio de técnicas destrutivas, cuja a amostra possui um formato cilíndrico com diâmetros de 10 ou 15 cm, e altura igual a duas vezes o diâmetro (NBR 5738 [1]; NBR 6118 [2]). Os valores obtidos destes ensaios de compressão axial dos corpos-de-prova de concreto são importantes parâmetros para o controle tecnológico da produção. Quando se trata de estruturas já executadas, a extração de testemunhos para a determinação da capacidade resistente se mostra inviável tecnicamente pelo transtorno provocado aos usuários da edificação, inviabilizando a avaliação da resistência do elemento estrutural. Assim, o controle das construções por meio de ensaios não destrutivos (END), pode e deve ser requerido para aceitação da estrutura, sem o qual a qualidade e a vida útil da estrutura pode ser prejudicada. Os ensaios não destrutivos (END) são recomendados, pois não causam danos ao concreto, podendo ser utilizado para a avaliação da capacidade resistente de peças como lajes, vigas e pilares, cuja pequena espessura, geralmente menor que 20 cm, não permitem extrair testemunhos com as dimensões requeridas, facilidade e rapidez de execução, e por poder ser repetido, quantas vezes forem necessárias. Entre os END mais difundidos, se pode citar a determinação da dureza superficial, realizado por meio do esclerômetro de reflexão, e a verificação da velocidade de ultrassom. Existem, porém, fatores que afetam os resultados dos ensaios não destrutivos, e que por isso, a confiabilidade dos resultados pode ser prejudicada. A dureza superficial é afetada pela existência de porosidade e agregados graudos próximos a superfície de impacto, e por outros fatores relacionados a preparação da superfície de ensaio, enquanto a velocidade de ultrassom é afetada pela densidade do concreto, obtendo-se, portanto, velocidade de ultrassom mais altas para concretos densos, mas que não tem necessariamente resistência mais elevada (Evangelista [3]). As características descritas nos levam intuitivamente a aventar o uso de um modelo de ensaios conjugados de dureza superficial (IE) e de velocidade de ultrassom (VU), pois se percebe que estas técnicas fornecem informações sobre diferentes propriedades que afetam a resistência do concreto (Rilem [4]). Com isso, empregando uma gama de resultados experimentais obtidos em laboratório com diferentes diâmetros de britas (0, 1 e 2), relações água/cimento e dois tipos de cimento, avaliaram-se o uso combinado da dureza superficial (esclerometria) e da velocidade de ultrassom para a previsão da resistência do concreto, tendo como referência comparativa os modelos consagrados desenvolvidos por Gasparik [5], Rilem [4] e Di Leo e Pascale [6]. Como parâmetro para a validação dos resultados experimentais, definiu-se duas retas limites iguais a  $f_{ce}=1.f_{ct}$  e  $f_{ce}=0,5.f_{ct}$  ( $f_{ce}$ = resistência à compressão experimental e  $f_{ct}$ = resistência à compressão teórica) no intuito de avaliar o nível aproximado do erro entre os resultados experimentais e os teóricos. Partiu-se da premissa que o coeficiente angular da reta limite não seja superior a um (1) para não ocorrer uma superestimativa entre a resistência teórica obtida com os diferentes modelos e a correspondente experimental por ensaios de velocidade de ultrassom e esclerometria.

### 1.1 Previsão do módulo de elasticidade estático e dinâmico

Um dos principais parâmetros mecânicos de avaliação da capacidade estrutural é o módulo de elasticidade. De acordo com a NBR-8522 [7], o módulo de elasticidade estático pode ser obtido pela aplicação de ciclos sucessivos de carga e descarga, entre os limites de 0,5 MPa e 30% da resistência à compressão prevista ( $f_c$ ), como mostra a Figura 1. Os carregamentos e descarregamentos devem ser efetuados a uma velocidade de  $0,5 \pm 0,05$  MPa/s. Após os cinco primeiros ciclos de carga e descarga, deve efetuar-se uma pausa de 60 segundos, mantendo a tensão constante, 0,5 MPa ( $\sigma_{mf}$ ), e realizar a primeira leitura de deformação específica ( $\epsilon_0$ ), cuja duração máxima deve ser de 60 segundos. Imediatamente após um sexto carregamento, até a tensão de  $0,3.f_c$  ( $\sigma_{sup}$ ), mantendo este valor de tensão constante durante 60 segundos, realiza-se a leitura  $\epsilon_{0,3}$ , cuja duração máxima deve ser de 60 segundos. O módulo de elasticidade deve ser calculado segundo a Equação (1).

$$E_0 = 2 \cdot \frac{\sigma_{sup} \cdot \sigma_{inf.}}{(\epsilon_{0,3} - \epsilon_0) + (\epsilon'_{0,3} - \epsilon'_0)} \quad (1)$$



**Figura 1:** Módulo de elasticidade segundo a NBR-8522 [7].

Na ausência de ensaios e de dados mais precisos, a NBR 6118 [2] permite estabelecer que o módulo de elasticidade tangente na origem para os concretos com idades de 28 dias, podem ser estimados pela Equação 2 para concretos de  $f_{ck}=20\text{MPa}$  a  $50\text{MPa}$ .

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

onde  $f_{ck}$  é a resistência à compressão característica do concreto;  $\alpha_E = 1,2$  para basalto e diabásio;  $\alpha_E = 1,0$  para granito e gnaíse;  $\alpha_E = 0,9$  para calcário e  $\alpha_E = 0,7$  para arenito.

Já o módulo de elasticidade dinâmico é determinado a partir do tempo de propagação da onda em um corpo de prova com dimensões conhecidas. Para Mehta e Monteiro [8], o módulo de elasticidade dinâmico é 20 à 40% maior do que o módulo de elasticidade estático. O primeiro a definir a equação para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico em relação à velocidade de ultrassom foi Timoshenko e Goodier [9]. Os autores afirmam que se uma perturbação é produzida em um ponto de um meio elástico, irradiam-se ondas deste ponto em todas as direções. O caso geral de propagação de ondas em meio elástico é obtido pela superposição de ondas de dilatação (compressão ou primárias (P) e distorção (cisalhamento ou secundária (S)), onde a Equação (3) representa a velocidade de propagação e pode ser empregada para o caso de ondas de dilatação.

$$V = \sqrt{\frac{\lambda + 2 \cdot G}{\rho}} \quad (3)$$

Essa velocidade ( $V$ ) pode ser expressa em termos do módulo de elasticidade dinâmico ( $E$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e peso-específico do material ( $\rho$ ), pela substituição dos valores equivalentes de  $\lambda$  (constante elástica do material) e  $G$  (módulo de elasticidade transversal) dados pelas Equações (4) e (5).

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \quad (4)$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (5)$$

onde  $K$  é uma constante elástica multiplicadora do material, dado pela Equação (6).

$$K = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \quad (6)$$

Dessa forma se obtém a velocidade de onda, conforme a Equação (7), que serve apenas para materiais com um comportamento elástico e homogêneo.

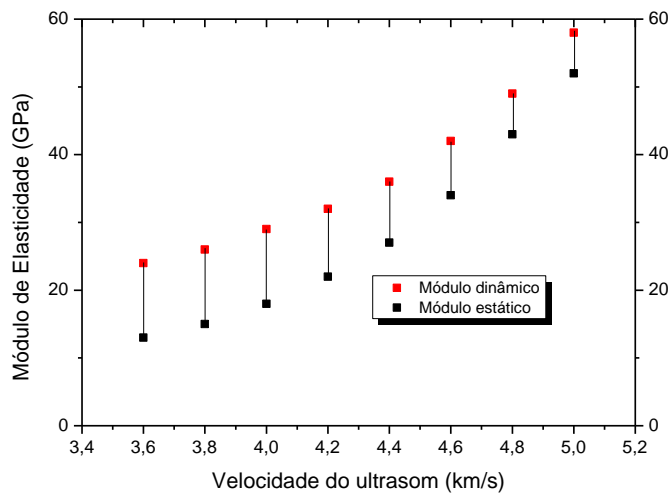
$$V = \sqrt{\frac{E_d \cdot K}{\rho}} \tag{7}$$

As normas nacionais não estabelecem correlações entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico, somente a BS 1881-203 [10] permite o uso de relações empíricas para estimar os valores do módulo de elasticidade estático e dinâmico para diferentes tomadas de velocidade em qualquer ponto da amostra, conforme a Tabela 1. Essas relações servem para concretos constituídos de agregados extraídos diretamente da natureza sem sofrer processos de fragmentação como a areia e o seixo, com uma imprecisão de ± 10%.

**Tabela 1:** Velocidade de pulso ultrassônico e módulo de elasticidade dinâmico e estático - BS 1881:203[10].

Velocidade de pulso ultrassônico (km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa)
3,6	24	13
3,8	26	15
4,0	29	18
4,2	32	22
4,4	36	27
4,6	42	34
4,8	49	43
5,0	58	52

Organizando os dados da Tabela 1 de acordo com a Figura 2, se podem verificar as diferenças entre os módulos de elasticidades estático e dinâmico de acordo com BS 1881-203 [10]. Onde se observa que à medida que a velocidade do ultrassom aumenta (km/s) existe uma tendência de diminuição na diferença entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico.



**Figura 2:** Diferenças entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico e a velocidade de ultrassom (BS 1881:203 [10]).

A Tabela 2 apresenta as funções de interpolação entre o módulo de elasticidade estático, dinâmico e a velocidade de ultrassom, de acordo com a BS 1881:203 [10] (dados da Tabela 01), com o respectivo coeficiente de correlação ( $R^2$ ).

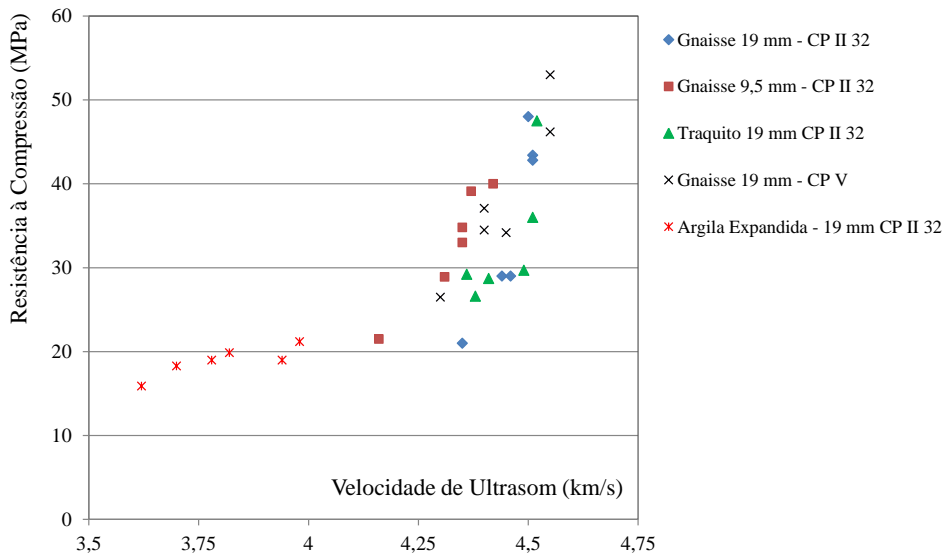
**Tabela 2:** Funções de interpolação entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático e velocidade de ultrassom (BS 1881:203 [10]).

Função		Equação	$R^2$
Potencial	y = módulo de elasticidade dinâmico; x= velocidade de ultrassom (km/s)	$y = 0,735 \cdot x^{2,6675}$	0,97
	y= módulo de elasticidade estático; x= velocidade de ultrassom (km/s)	$y = 0,047 \cdot x^{4,3224}$	0,99
Exponencial	y = módulo de elasticidade dinâmico; x= velocidade de ultrassom (km/s)	$y = e^{0,8275 \cdot x}$	0,89
	y= módulo de elasticidade estático; x= velocidade de ultrassom (km/s)	$y = e^{0,7527 \cdot x}$	0,93

De acordo com os dados da BS 1881:203 [10], pode se perceber que das funções apresentadas na Tabela 2, tanto para o módulo de elasticidade estático quanto para o dinâmico em relação à velocidade de ultrassom, a função potencial é a que melhor aproxima os resultados, com coeficientes de correlação ( $R^2$ ) considerados altos. A função exponencial possui um bom coeficiente de correlação, sendo também considerado apropriado para aproximar o módulo de elasticidade estático e dinâmico em relação à velocidade de ultrassom.

**1.2 Velocidade de ultrassom e índice esclerométrico**

Evangelista [3] realizou estudos de correlação entre a velocidade de ultrassom e o índice esclerométrico para concretos. Para isso o autor estudou uma série de amostras com três diferentes tipos de agregados graúdo (gnaisse, traquito e argila expandida), seis relações água e cimento (0,40; 0,45; 0,50; 0,55; 0,60 e 0,65), dois tipos de cimento (CP II-32 e CP V-ARI) e dois diâmetros máximos para o agregado graúdo (9,5 e 19 mm). A Figura 3 apresenta os resultados experimentais de resistência à compressão e velocidade de ultrassom para a idade de 28 dias.



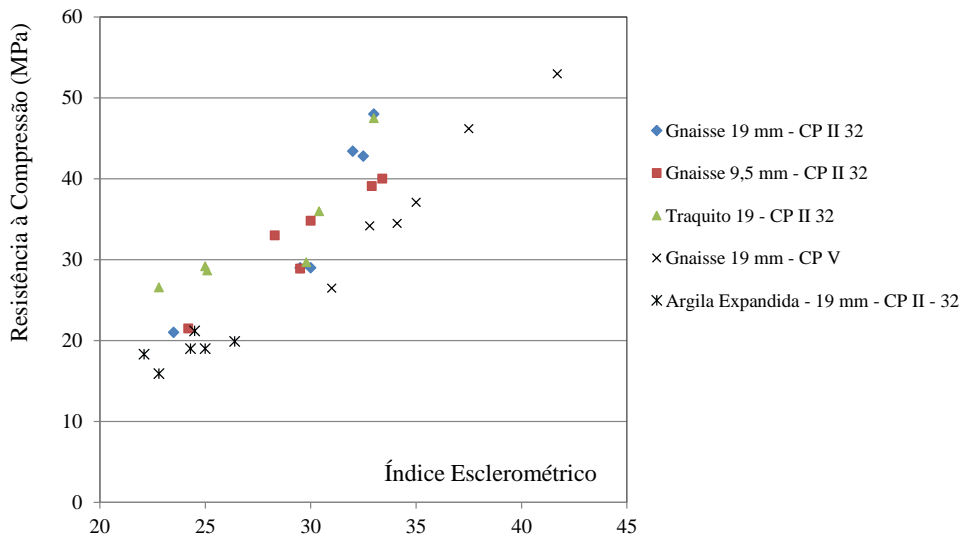
**Figura 3:** Resistência à compressão e a velocidade de ultrassom (Evangelista [3]).

Segundo Evangelista [3], pelos resultados verificados experimentalmente, se observou que os concretos com argila expandida apresentaram as menores velocidades de ultrassom e os concretos confeccionados com agregado com menor dimensão apresentaram uma tendência em diminuição da velocidade de ultrassom. Outra observação dos estudos experimentais foi de que não se pode verificar uma mudança significativa na velocidade de ultrassom em função do tipo de cimento empregado (CP II-32 e CP V-ARI), em função das idades dos experimentos serem aos 28 dias. Esse autor resumiu os resultados experimentais por faixa de variação da velocidade de ultrassom para os diferentes tipos de concreto na idade de 28 dias, como mostra a Ta-

bela 3. Evangelista [3] determinou a relação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão para diferentes diâmetros máximos de agregados e tipos de cimento, como mostra a Figura 4.

**Tabela 3:** Faixa de variação da velocidade de ultrassom em função da série dos concretos de Evangelista [3].

Série	Características	VU (km/s)
01	Gnaisse 19 mm – CP II 32	4,35 a 4,51
02	Gnaisse 9,5 mm – CP II 32	4,16 a 4,42
03	Traquito 19 mm – CP II 32	4,36 a 4,52
04	Gnaisse 19 mm – CP V ARI	4,30 a 4,55
05	Argila Expandida – 19 mm – CP II 32	3,62 a 3,98



**Figura 4:** Resistência à compressão e índice esclerométrico (Evangelista [3]).

A Tabela 4 resume a faixa de variação do índice esclerométrico para as diferentes séries de concreto na idade de 28 dias. Não se verificou para as três primeiras séries diferenças significativas no índice esclerométrico. Os concretos confeccionados com os agregados do tipo gnaisse de 19 mm e cimento CP V ARI apresentaram os maiores índices esclerométricos. Os concretos com argila expandida apresentaram uma menor faixa de variação nos resultados do índice esclerométrico.

**Tabela 4:** Faixa de variação do índice esclerométrico em função da série dos concretos de Evangelista [3].

Série	Características	Índice Esclerométrico
01	Gnaisse 19 mm – CP II 32	23,5 à 33,0
02	Gnaisse 9,5 mm – CP II 32	24,2 à 33,4
03	Traquito 19 mm – CP II 32	22,8 à 33,0
04	Gnaisse 19 mm – CP V-ARI	31,0 à 41,7
05	Argila Expandida – 19 mm – CP II 32	22,1 à 26,4

Alguns autores como Trtnik, G. *et.al.* [11] citam que existem várias tentativas de se prever a resistência à compressão a partir da velocidade de ultrassom. Normalmente estas aproximações são baseadas em relações empíricas entre a resistência e a velocidade de ultrassom, onde a expressão mais popular é dada pela Equação (8):

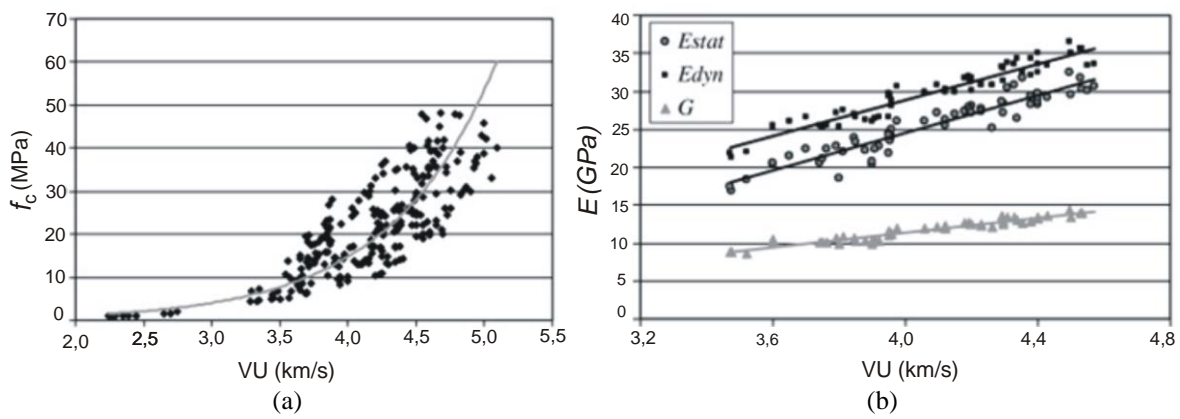
$$f_c = a. \exp(b.VU) \tag{8}$$

onde a e b são parâmetros empíricos determinados pelo método dos mínimos quadrados;  $f_c$  é a resistência à compressão e  $VU$  é a velocidade de pulso ultrassônico.

A Figura 5(a) mostra a relação entre a resistência à compressão ( $f_c$ ) e a velocidade ultrassom ( $VU$ ) para os ensaios experimentais de Trtnik, G. *et. al.* [11]. Pode-se observar pelo gráfico da Figura 5 (a) uma fraca aproximação entre a resistência e a velocidade de ultrassom, cujo coeficiente de correlação é  $R^2 = 0,6444$  e o desvio padrão de 7,26 MPa. A Equação (9) apresenta a correspondência entre a resistência à compressão (MPa) e a velocidade de ultrassom.

$$f_c = 0,0854. \exp(1,2882. VU) \tag{9}$$

Devido à variabilidade e dispersão dos valores entre a resistência à compressão e a velocidade de ultrassom, Trtnik, G. *et al* [11] optou em correlacionar a velocidade de ultrassom com o módulo de elasticidade estático, dinâmico e módulo de elasticidade transversal, conforme a Figura 5(b).



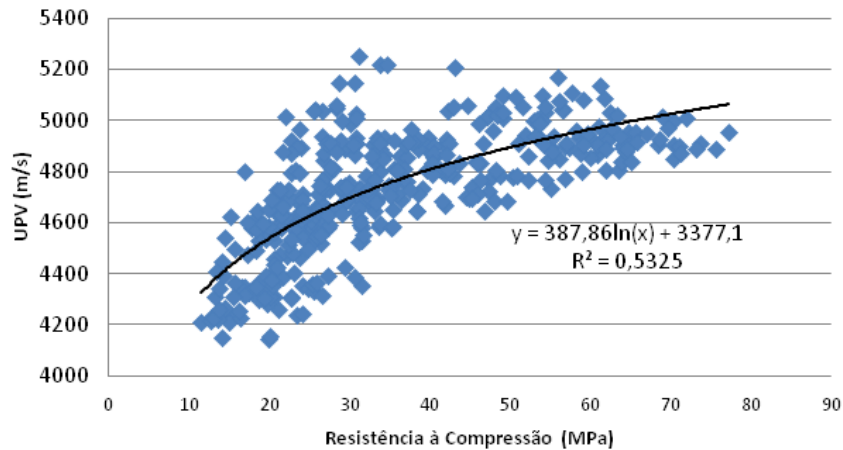
**Figura 5:** Resistência e módulo em relação à velocidade de ultrassom (Trtnik, G. et al[11]).

Na Tabela 5 é apresentada à análise estatística dos modelos de regressão linear, com os parâmetros obtidos dos resultados experimentais.

**Tabela 5:** Análise estatística e os modelos de regressão linear dos ensaios de Trtnik, G. et al [11].

Parâmetro	$R^2$	Desvio-padrão (MPa)	Modelo de regressão linear
$f_c$	0,64	7,26	$f_c=0,0854.\exp(1,2882.VU)$
$E_s$	0,89	1,31	$E_s = 12435.VU-25,20$
$E_p$	0,92	1,07	$E_d = 11796.VU-18,31$
G	0,93	0,39	$G = 4,84. VU-7,94$

Lorenzi [12] desenvolveu estudos de correspondências entre as velocidades de ultrassom e as propriedades físicas e mecânicas do concreto, aplicando o uso de redes neurais para gerar modelos mais precisos para a avaliação das características do concreto. Ao definir um modelo para a relação entre a resistência à compressão ( $f_c$ ) e a velocidade de ultrassom nos dados experimentais coletados, Lorenzi [12] afirmou que se pode estabelecer a relação entre estas variáveis, embora exista uma grande variabilidade demonstrada pelo alto coeficiente de correlação  $R^2=0,532$ , como mostra a Figura 6.



**Figura 6:** Velocidade de ultrassom e a resistência à compressão [12].

Lorenzi [12] concluiu que os ensaios de velocidade de ultrassom são ferramentas sensíveis à variação de homogeneidade e densidade, fatores estes importantes para a tomada de decisão com relação à resistência do concreto.

Câmara [13] realizou estudos experimentais em concretos com diferentes resistências (20, 25 e 30 MPa), com cura ao ar e úmida, diferentes modos de transmissão de onda ultra sônica (direta e indireta) e posicionamento do esclerômetro (vertical e horizontal). Com os resultados experimentais, o autor combinou os valores de resistência à compressão com a velocidade de ultrassom e a esclerometria, a fim de aumentar a confiabilidade na estimativa da resistência à compressão. As equações e seus respectivos valores de  $r^2$  são apresentados na Tabela 6. As equações propostas por Câmara [13] para concretos só servem para uma faixa específica de velocidade de pulso ultrassônico e índice esclerométrico, pois as equações são polinomiais que não zeram na origem.

**Tabela 6:** Equações entre a resistência, velocidade de ultrassom e índice esclerométrico - Câmara [13].

Concreto de 20MPa – com cura ao ar	$f_c = -139,267 + 0,10169.V^{0,8977} - 0,6076.IE$	$r^2=0,996$
Concreto de 20MPa – com cura úmida	$f_c = -122,374 + 0,19537.V^{0,66136} + 4,227.IE$	$r^2=0,966$
Concreto de 25MPa – com cura ao ar	$f_c = -35,055 + 0,04949.V^{0,55445} + 2,01487.IE$	$r^2=0,960$
Concreto de 25MPa – com cura úmida	$f_c = -73,5635 + 0,07779.V^{0,802} + 1,5572.IE$	$r^2=0,968$
Concreto de 30MPa – com cura ao ar	$f_c = -13,92 + 0,13307.V^{0,8456} + 0,30946.IE$	$r^2=0,991$
Concreto de 30MPa – com cura úmida	$f_c = -53,3325 + 0,006648.V^{1,01757} + 1,93936.IE$	$r^2=0,959$

Os métodos combinados têm sido utilizados para se ter uma maior precisão na previsão da resistência e módulo de elasticidade do concreto. Dentre as combinações, a que utiliza o método do ultrassom e esclerometria são as mais empregadas (Samarin [14]). A precisão da grandeza a ser avaliada é aumentada por métodos combinados pelo fato de que um método pode medir apenas uma única propriedade física do concreto (RILEM [4]). Fatores que influenciam os métodos de maneira diferente, como é o fato da umidade que diminui o IE e aumenta a velocidade de propagação da onda ultrassônica, podem ter seus efeitos minimizados na combinação destes métodos, aumentando a precisão da estimativa de resistência à compressão. Na literatura em geral encontra-se diversas equações baseadas em experimentos obtidos em laboratório ou diretamente no campo. Entre as equações mais usuais, destacam-se: a Equação (10) do RILEM [4], a Equação (11) de Gasparik [5] e a Equação (12) Di Leo e Pascale [6], respectivamente.

$$f_c = 9,27 \cdot 10^{-11} \cdot IE^{1,4} \cdot VU^{2,6} \quad (10)$$

$$f_c = 8,06 \cdot 10^{-8} \cdot IE^{1,246} \cdot VU^{1,85} \quad (11)$$

$$f_c = 1,2 \cdot 10^{-9} \cdot IE^{1,058} \cdot VU^{2,446} \quad (12)$$



## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o objetivo de avaliar o uso dos ensaios de esclerometria e de velocidade de ultrassom na previsão da resistência dos concretos, foram produzidos em laboratório 13 traços para determinar as correlações entre o índice esclerométrico, a velocidade de ultrassom e a resistência à compressão. Para cada traço de concreto foram moldados três corpos de prova cilíndricos de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura e três corpos de prova cúbicos de 15 cm de lado, totalizando 39 amostras ensaiadas. Foi estabelecida como referência a idade de 28 dias para realização dos ensaios. As variáveis consideradas neste estudo empregaram dois tipos de cimento portland (CP IV –32 e CP V –ARI), três dimensões de agregados graúdos (brita 0, 1 e 2) de origem basáltica e duas relações água/cimento. O traço básico definido possuía as proporções entre os materiais de 1:2,2:2,8 em massa de cimento, areia e brita, respectivamente. A proporção de agregados totais empregados manteve-se constante e igual a cinco ( $m=5$ ) e o teor de argamassa (cimento e areia) igual a 53%. Para os traços produzidos com o cimento CP IV –32 (pozolânico), foram empregados três com a relação água e cimento ( $a/c$ ) igual a 0,5 e três com a relação  $a/c=0,75$ , utilizando-se três tipos de agregados graúdos (brita 0, 1 e 2). Para o cimento CP V –ARI foi produzido seis traços com as mesmas variações de relação água/cimento e agregados graúdos. Além disso foi realizado um traço adicional, para um traço piloto, com fator  $a/c= 0,6$ , brita zero e com o cimento CP V ARI. A descrição dos traços e das variáveis utilizadas é apresentada na Tabela 7.

**Tabela 7:** Descrição das variáveis dos traços estudados.

Traço	Cimento	A/C	Ag. Graúdo
1	CP IV-32	0,50	0
2			1
3			2
4		0,75	0
5			1
6			2
7	CP V-ARI	0,50	0
8			1
9			
10		0,75	0
11			1
12			2
13		0,60	0

Para produção dos traços de concreto estudados foram utilizados os seguintes materiais: cimento (CP IV-32 e CP V-ARI), areia natural proveniente da várzea do Rio Vacacaí e britas 0, 1 e 2 provenientes da pedreira Brita Pinhal. Os resultados obtidos nas análises granulométricas e propriedades físicas da areia e das britas utilizadas são mostrados nas Tabela 8. Os ensaios de caracterização dos cimentos CP IV-32 e CP V-ARI são apresentados na Tabela 9.

**Tabela 8:** Análise granulométrica da areia natural e das britas empregadas (NM 248 [15]).

Abertura da Peneira	Areia Natural		Brita 0		Brita 1		Brita 2	
	% retida individual	% retida acumulada	% retida individual	% retida acumulada	% retida individual	% retida acumulada	% retida individual	% retida acumulada
25	–	–	–	–	–	–	2,0	2
19	–	–	–	–	–	–	49,6	52
12,5	–	–	0,2	0	51,6	52	47,0	99
9,5	–	–	2,5	3	27,0	79	1,3	100
6,3	–	–	50,2	53	18,7	97	–	100
4,8	–	–	37,1	90	1,8	99	–	100
2,4	0,9	1	9,0	99	0,3	99	–	100

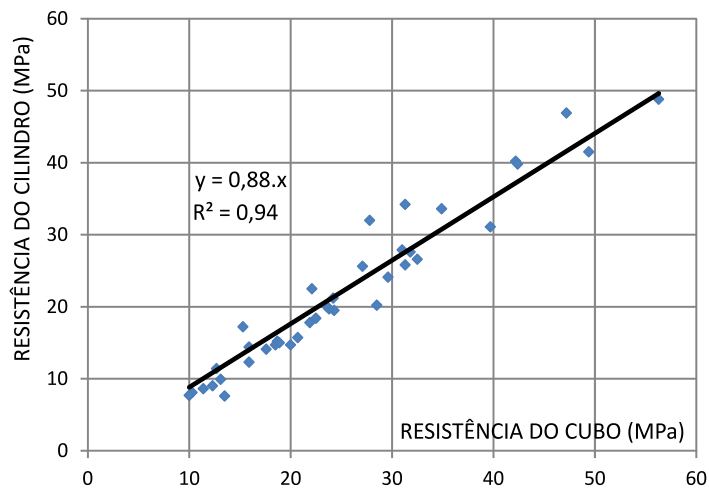
1,2	4,0	5	-	99	-	99	-	100
0,6	17,6	23	-	99	-	99	-	100
0,3	51,2	74	-	99	-	99	-	100
0,15	19,7	93	-	99	-	99	-	100
Fundo	6,6	100	1,0	100	0,6	100	0,1	100
Total	<b>100</b>	-	<b>100</b>	-	<b>100</b>	-	<b>100</b>	-
M. finura	1,95		5,88		6,75		7,51	
D. máximo	1,2		9,5		19		25	
Massa esp.	2,60		2,47		2,53		2,56	
Massa Un.	1,52		1,33		1,28		1,29	

**Tabela 9:** Caracterização física dos cimentos CP IV-32 e CP V-ARI empregado.

Ensaio	Cimento	
	CP IV-32	CP V-ARI
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) – NM 23 [17]	2,80	2,98
Finura por meio da peneira 75 µm – NBR 11579 [16]	0,72	0,5

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais dos corpos de prova cúbicos e cilíndricos foram obtidos em uma prensa hidráulica da marca WPM, com capacidade máxima de carga de 300 toneladas e uma velocidade de carregamento de 0,5 MPa/s. A Figura 7 mostra os resultados da relação entre a resistência dos corpos de prova cilíndricos e cúbicos e a reta que melhor aproximou os dados experimentais. A função linear foi a que melhor descreveu os pontos correspondentes aos treze 13 traços de concreto, totalizando trinta e nove 39 amostras. O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) foi de 0,94 e o coeficiente angular da reta foi de 0,88. A Figura 8 apresenta uma visão geral dos resultados de velocidade de ultrassom para as idades de 7, 14 e 28 dias, em função do fator água e cimento, do tipo de cimentos CP IV-32, CP V-ARI e os diferentes diâmetros de britas (0,1 e 2).



**Figura 7:** Relação entre a resistência dos corpos de prova cilíndricos e cúbicos.

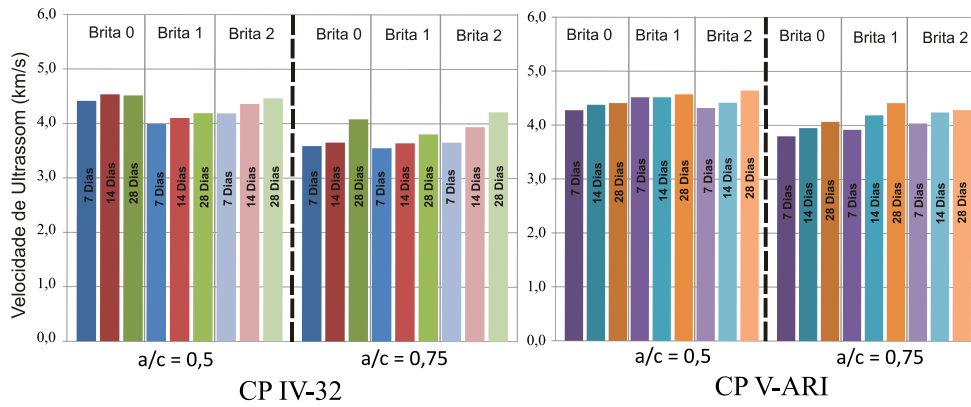


Figura 8: Relação entre a velocidade de ultrassom e o fator água e cimento.

Na Figura 08 observa-se pouca diferença entre os resultados de velocidade de ultrassom em função do diâmetro da brita, do tipo de cimento e da idade (7, 14 e 28 dias). O fator que mais influenciou os resultados de velocidade de ultrassom foi a relação água/cimento. Por isso, se combinou os diferentes resultados experimentais a fim de se obter o nível de dispersão total dos resultados de velocidade de ultrassom para as diferentes relações água e cimento, independentemente da idade e do diâmetro da brita. Para os concretos com relação água/cimento de 0,50 a velocidade de ultrassom variou de aproximadamente 3,9 à 4,7 km/s, e para a relação água/cimento maior de 0,75 a faixa de variação da velocidade de ultrassom foi de 3,5 à 4,5 km/s.

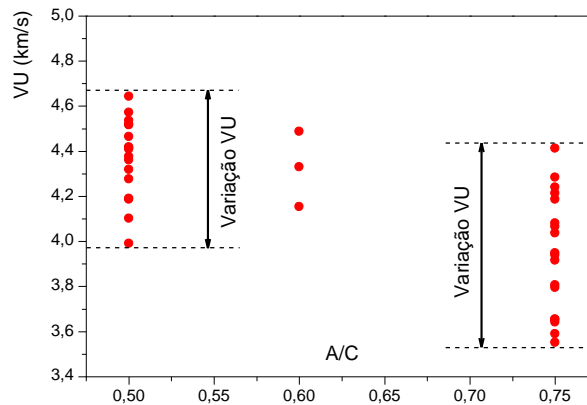
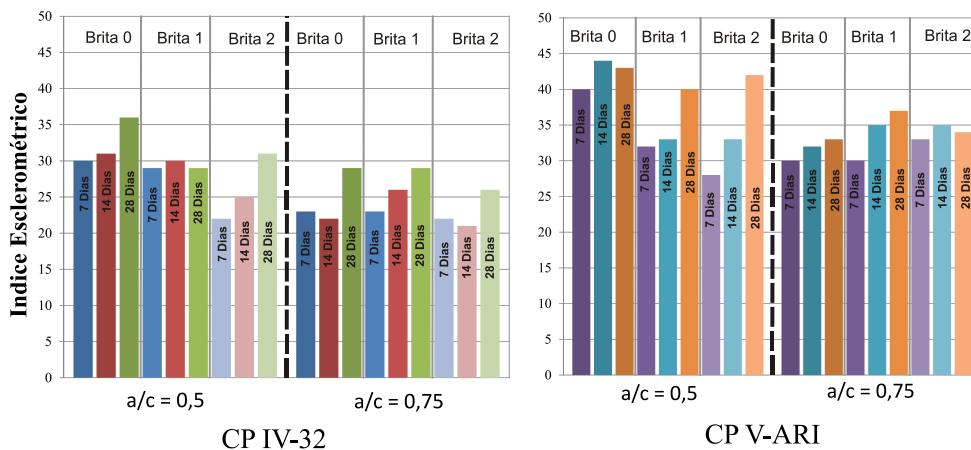


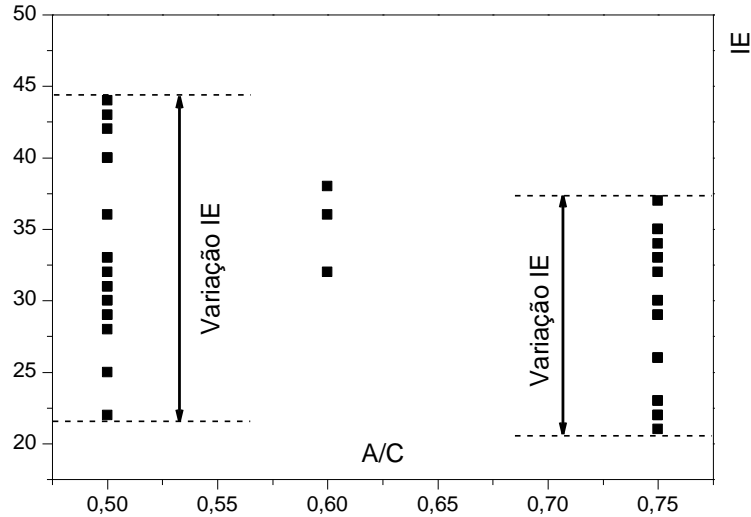
Figura 9: Faixa variação da velocidade de ultrassom e o fator água e cimento.

Os resultados do índice esclerométrico em função do fator água e cimento, para as idades de 7, 14 e 28 dias, em função do tipo de cimento CP IV-32, CP V-ARI e os diferentes tamanhos de britas (0,1 e 2) são apresentados na Figura 10.



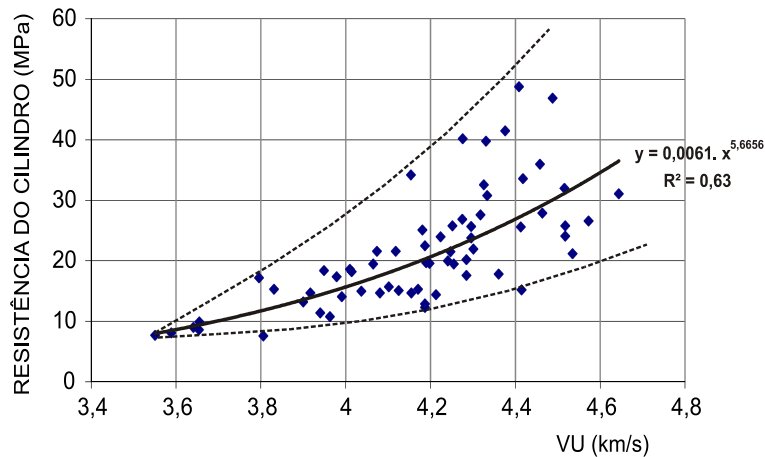
**Figura 10:** Relação entre o índice esclerométrico e o fator água e cimento.

Observa-se pelos resultados experimentais da Figura 11 uma maior dispersão nos resultados de velocidade de ultrassom para a menor relação água e cimento. No fator água e cimento de 0,50, o índice esclerométrico variou de aproximadamente 22 à 44 e para o fator água e cimento de 0,75, a faixa de variação foi de 20 à 37.



**Figura 11:** Faixa de variação do índice esclerométrico e o fator água e cimento.

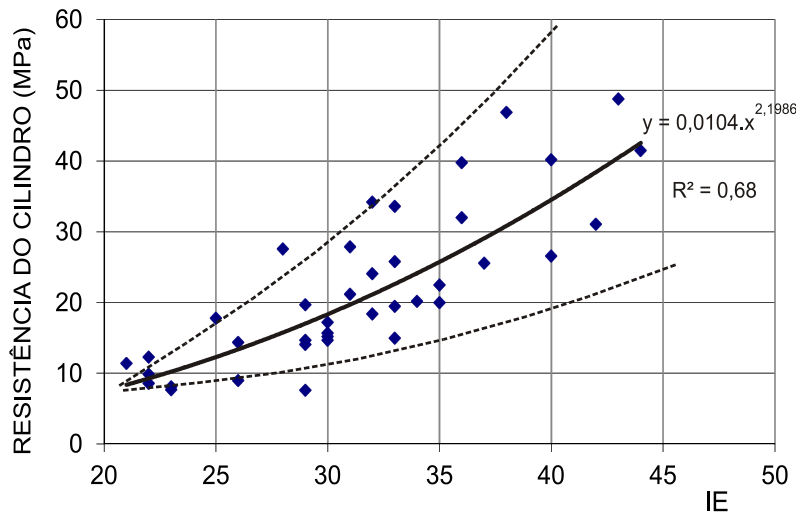
A Figura 12 apresenta os resultados das resistências dos cilindros em relação à velocidade de ultrassom para os 13 diferentes traços de concreto. Observa-se na Figura 12 que há uma tendência da variabilidade dos resultados da velocidade de ultrassom aumentar com o aumento da resistência do concreto. Essa tendência pode ser melhor visualizada pela linha pontilhada da Figura 12. Para concretos de baixa resistência (10 à 20 MPa) a faixa de variabilidade dos resultados torna a técnica do ultrassom não muito confiável. Já para resistências superiores (acima de 20 MPa) o ultrassom mostrou possuir uma menor variabilidade. Por isso, que a utilização de técnicas combinadas como ultrassom e esclerometria diminuem o erro de avaliação e previsão da capacidade de suporte do material. A função potencial foi a que melhor correlacionou os resultados entre as resistências dos cilindros e as velocidades de ultrassom. O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) foi de 0,63, valor esse considerado baixo para a representação do comportamento da função potencial. O baixo coeficiente de correlação foi provocado pela variabilidade nas medidas da velocidade de ultrassom.



**Figura 12:** Relação entre a resistência dos cilindros e a velocidade de ultrassom.

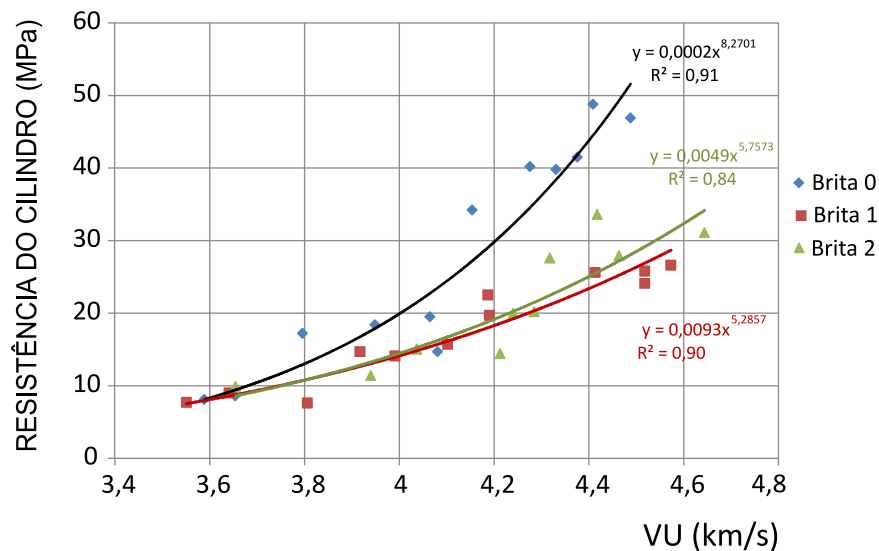
A Figura 13 mostra o resultado entre a resistência do cilindro de concreto e o índice esclerométrico. Pela combinação dos resultados de resistência do cilindro e do índice esclerométrico pode-se concluir que a

variabilidade dos resultados, praticamente, permaneceu constante em relação aos diferentes níveis de resistência do concreto, como mostra a linha pontilhada da Figura 13, cuja curva de aproximação dos pontos é uma função potencial com coeficiente de correlação  $R^2 = 0,68$ .



**Figura 13:** Relação entre a resistência dos cilindros e o índice esclerométrico.

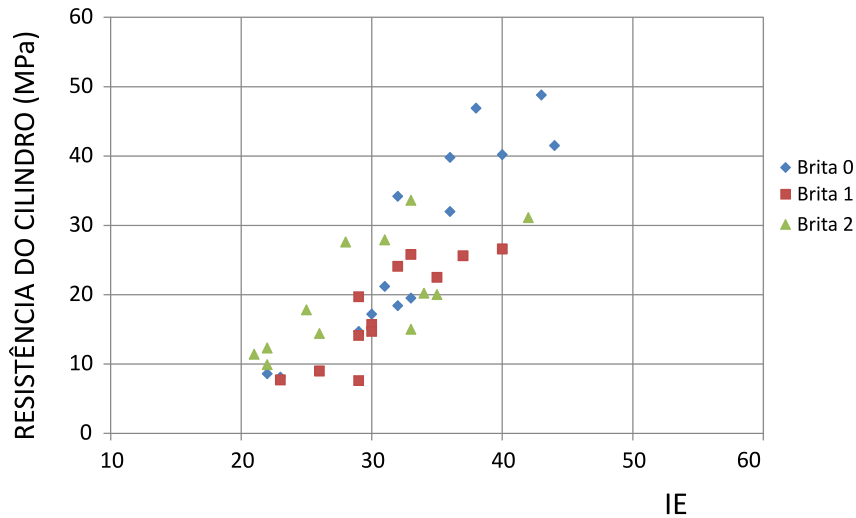
Buscou-se neste estudo avaliar o comportamento da velocidade de ultrassom em função do tipo de brita. Na Figura 14 são apresentados os resultados experimentais das resistências dos cilindros em função da velocidade de ultrassom, para os três tipos de britas analisadas. Pode-se verificar, pela Figura 14, que existe uma diferença significativa na velocidade do ultrassom obtida para as britas um (1) e dois (2) em relação à brita zero (0). As curvas de aproximação entre as resistências do cilindro e a velocidade de ultrassom para as britas 1 e 2 foram praticamente semelhantes, com coeficientes de correlação  $R^2$  igual a 0,90 e 0,84, respectivamente. A velocidade do ultrassom obtida experimentalmente para a brita zero (0) foi significativamente diferente das obtidas para as britas 1 e 2.



**Figura 14:** Relação entre as resistências dos cilindros e velocidade de ultrassom.

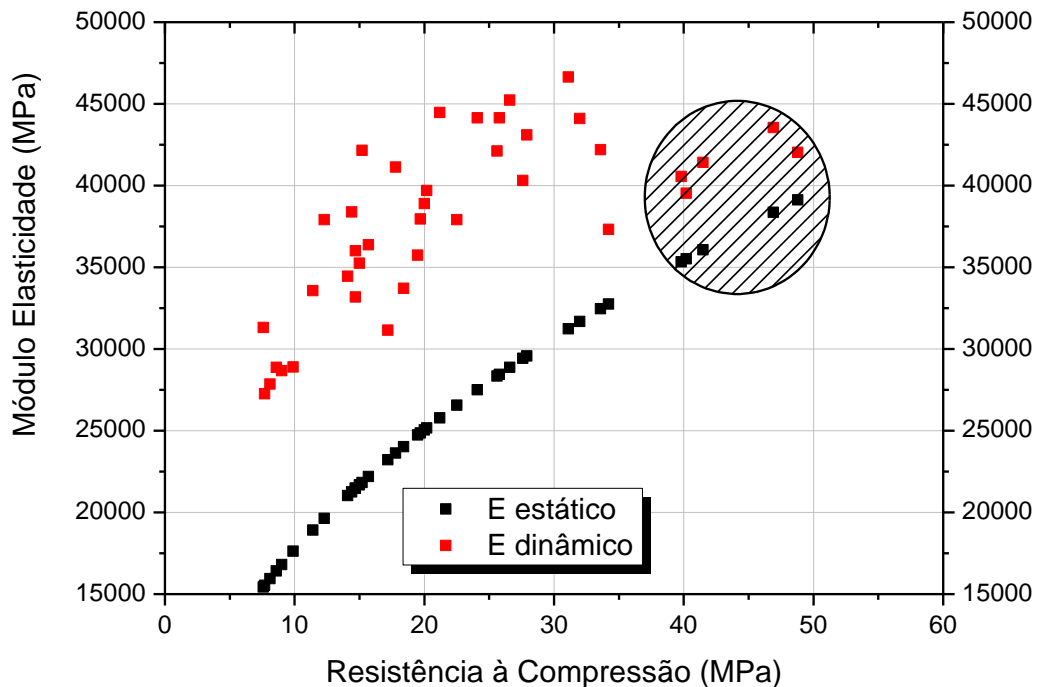
A Figura 15 apresenta os resultados experimentais entre a resistência do cilindro de concreto e o índice esclerométrico, em função do tipo de brita empregado. Não se pode verificar uma diferença nos valores obtidos entre a resistência à compressão do cilindro e o índice esclerométrico em relação ao tipo de brita empregado no concreto. A dispersão dos resultados de resistência à compressão e índice esclerométrico não pos-

sibilitou determinar uma tendência de comportamento, pois para qualquer equação de aproximação o valor do coeficiente de correlação seria muito baixo.



**Figura 15:** Relação entre a resistência dos cilíndricos e o índice esclerométrico.

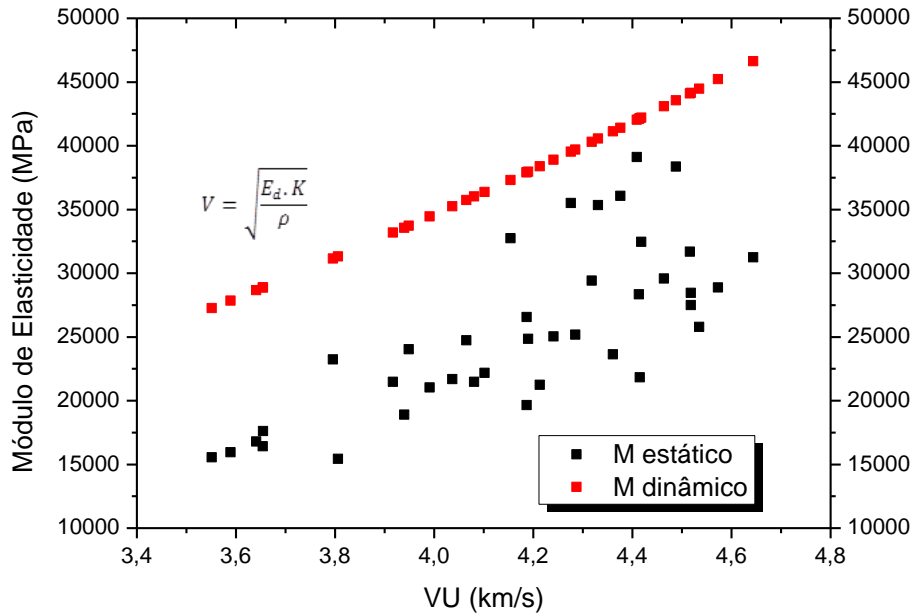
Na Figura 16 é apresentada uma comparação entre os resultados experimentais de resistência à compressão dos concretos e os módulos de elasticidades estáticos (calculado a partir da tangente inicial da corda a 30%, de acordo com a Equação (02)), com os valores dos módulos de elasticidades dinâmicos obtidos com a Equação (07), tendo como referência um coeficiente de Poisson constante de 0,2 e um peso-específico do concreto de  $24 \text{ kN/m}^3$ . Observa-se na BS-1881:203 [10] que o módulo de elasticidade dinâmico é significativamente superior ao estático para concretos de resistências inferiores a 40 MPa. Para concretos com resistência acima de 40 MPa existe uma tendência dos módulos em se aproximarem. Isso pode ter ocorrido devido ao aumento das resistências dos concretos possibilitarem uma diminuição nos defeitos internos como a porosidade e a retração das interfaces entre a pasta e o agregado.



**Figura 16:** Relação entre o módulo de elasticidade estático e o dinâmico.

Pode se comparar os valores do módulo de elasticidade estático e dinâmico em relação à velocidade de ultrassom, como mostra a Figura 17. Os módulos de elasticidades estáticos foram determinados a partir das resistências obtidas nos ensaios experimentais, com o auxílio da Equação (2) e o dinâmico foi calculado a

partir das velocidades de ultrassom medidas experimentalmente de acordo com a Equação (7). Observa-se que não existe uma boa correspondência entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico em função da velocidade de ultrassom.



**Figura 17:** Módulo de elasticidade estático e dinâmico em relação a VU (m/s).

De acordo com a conclusão obtida na Figura 17, é interessante o uso de modelos combinados no intuito de obter resultados de resistência à compressão mais realistas, de acordo com a natureza heterogênea do material. Com as Equações (10), (11) e (12) do RILEM [4], Gasparik [5] e Di Leo e Pascale [6], respectivamente, plotou-se os resultados entre a resistência experimental versus teórica. Os resultados experimentais de resistências à compressão das equações foram obtidos para os corpos de prova cúbicos.

$$f_c = 9,27 \cdot 10^{-11} \cdot IE^{1,4} \cdot VU^{2,6} \tag{10}$$

$$f_c = 8,06 \cdot 10^{-8} \cdot IE^{1,246} \cdot VU^{1,85} \tag{11}$$

$$f_c = 1,2 \cdot 10^{-9} \cdot IE^{1,058} \cdot VU^{2,446} \tag{12}$$

onde  $f_c$  é a resistência do cubo de concreto (MPa); IE é o índice esclerométrico; VU é a velocidade de ultrassom em m/s.

Na Figura 18 observam-se os resultados experimentais e teóricos das resistências à compressão em corpos de prova cúbicos, para as diferentes equações que relacionam o índice esclerométrico e a velocidade de ultrassom. Na Figura 18 observa-se que os valores teóricos ficaram abaixo da reta de representação unitária pontilhada experimental/teórico ( $f_{ce}/f_{ct}$ ), para os modelos de RILEM [4], Gasparik [5], e Di Leo e Pascale [6]. O limite inferior da reta de representação entre as resistências experimentais e teóricas possui um coeficiente angular de 0,5, ou seja,  $f_{ce}/f_{ct} = 0,5$ . Portanto, em termos de previsão de resistência à compressão dos concretos pela utilização combinada de ensaios não destrutivos (índice esclerométrico e velocidade de ultrassom), os modelos não são significativamente confiáveis para a previsão combinada da resistência à compressão de concretos. A equação da reta foi a que melhor aproximou os resultados experimentais em relação aos teóricos obtidos de acordo com as equações de RILEM [4], Gasparik [5], e Di Leo e Pascale [6], com coeficientes de correlações ( $R^2$ ) de 0,78; 0,76 e 0,75, respectivamente.

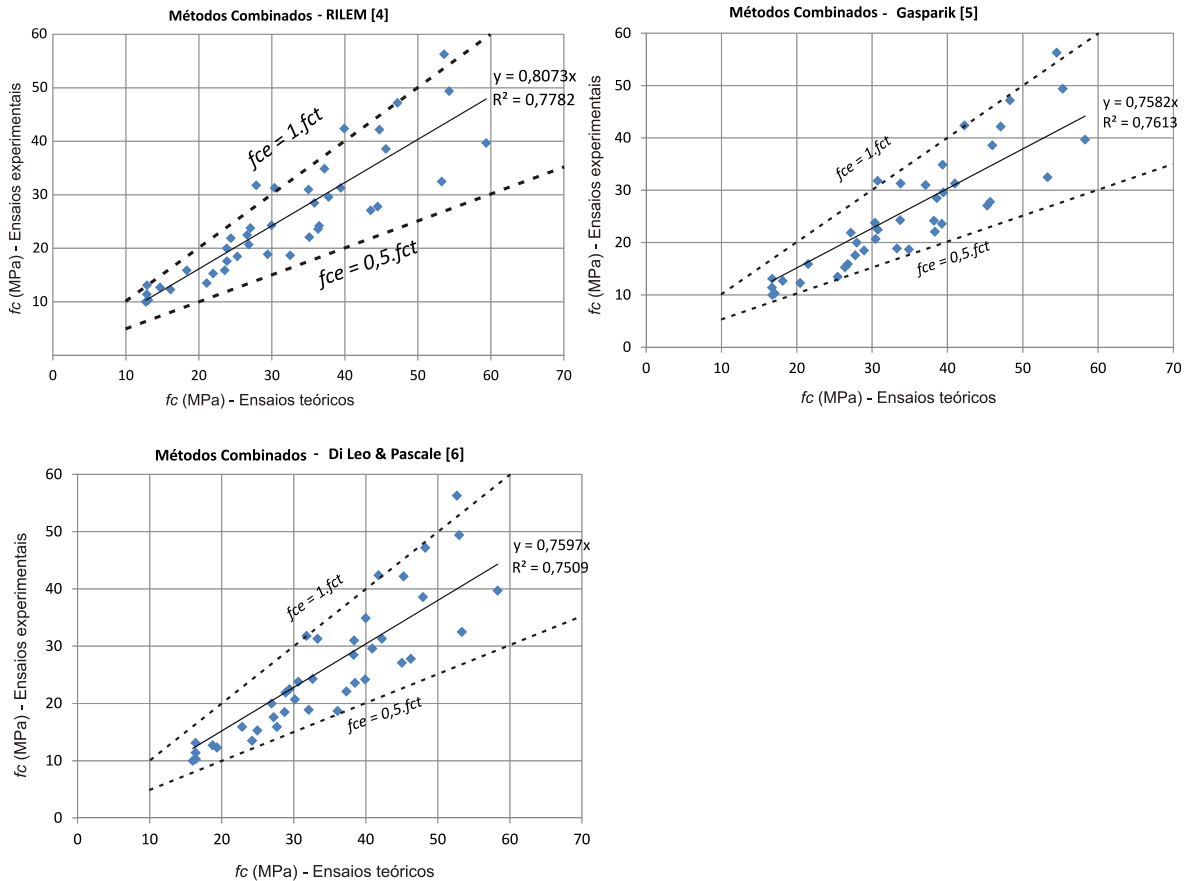


Figura 18: Relação entre a resistência experimental e teórica.

#### 4. CONCLUSÃO

Como conclusões, pode afirmar-se que:

- existiu uma maior variabilidade nos resultados de velocidade de ultrassom para resistência de concretos acima de 30 MPa, diferentemente do encontrado para o índice esclerométrico;
- verificou-se que os concretos com brita zero (0) forneceram maiores velocidades de ultrassom, quando comparados com os confeccionados com brita um (1) e dois (2). Demonstrando que cabem estudos específicos a fim de avaliar esse efeito e suas causas. A velocidade de ultrassom para os concretos com britas um (1) e dois (2) apresentou o mesmo comportamento;
- nas medidas dos índices esclerométricos, não se pode verificar diferenças nos resultados experimentais em função do tipo de brita;
- existe uma diferença significativa no valor do módulo de elasticidade dinâmico em relação ao estático, principalmente para concretos com níveis de resistência à compressão menor que 40 MPa;
- a combinação dos resultados de resistências experimentais e teóricas dos métodos combinados de testes não destrutivos de RILEM [4] Gasparik [5], e Di Leo e Pascale [6] ficaram abaixo da reta representação unitária (experimental/teórico), o permite concluir que os modelos não são confiáveis para a previsão da resistência do concreto a partir da velocidade de ultrassom e índice esclerométrico.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos-de-prova*. ABNT – Rio de Janeiro, 2008.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento*. ABNT, Rio de Janeiro, 2014.
- [3] EVANGELISTA, A. C. J. *Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não-destrutivos*, Tese de doutorado, PPGE-UFRJ, Junho de 2002.



- [4] RILEM TC 43 – CND. *Draft recommendation for in situ concrete strength determination by combined non-destructive methods*, *Journal Materials and Structures*, v. 26, n. 15, pp. 43-49, 1993.
- [5] J. GASPARIK, *Prove Non distruttive Nell'edilizia*, Università di Brescia, Itália, 1992.
- [6] LEO, A.DI., PASCALE, G., *Prove Non distruttive Sulle Costruzioni in cement armato, convegno sistema qualità e prove non distruttive per l'affidabilità e la sicurezza delle strutture civili*, Bologna, Italy, 1994.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522: Concreto: Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. ABNT, Rio de Janeiro, 2008.
- [8] MEHTA, K. P., MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3ª ed., São Paulo, Editora Pini, 2008.
- [9] TIMOSHENKO, S. P., GOODIER, J. N. *Teoria da Elasticidade*, 3 ed., Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois, 1980.
- [10] BRITISH STANDARD. BS1881-203. *Testing Concrete – Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*. London, 1986.
- [11] TRTNIK, G., KAVCIC, F., TURK, G. “*Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks*”, *Ultrasonic Journal*, n. 1, v. 49, pp. 53-60, January 2009.
- [12] LORENZI, A. *Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação de pulso ultra-sônico*, Tese de doutorado, PPGEC-UFRGS, 2009.
- [13] CÂMARA, E. *Avaliação da resistência à compressão de concretos utilizadas na grande Florianópolis através de ensaios não destrutivos*, Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da UFSC, Florianópolis, 2006.
- [14] SAMARIN, A. *Combined method handbook on non-destructive testing of concrete*, CRC Press, 2004.
- [15] ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. *NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2001.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)*. Rio de Janeiro, 2012.
- [17] ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. *NM 23: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2001.