

Correlation Curves to Characterize Concretes Used in Rio de Janeiro by Means of Non-destructive Tests

Curvas de Correlação para Caracterizar Concretos Usados no Rio de Janeiro por Meio de Ensaios Não Destrutivos

M. D. MACHADO ^a
mauriciodornellas@hotmail.com

L. C. D. SHEHATA ^b
lidashehata@vm.uff.br

I. A. E. M. SHEHATA ^c
ibrahim@coc.ufrj.br

Non-destructive tests give information about the properties of the concrete of a structure, but the reliability of the evaluation of those properties depends on the experience of the professional that carries out the tests and the curves employed to correlate the measured values with the properties of the investigated concrete. The main objective of this study was to supply engineers with correlation curves that make it possible to evaluate, by using non-destructive test results, the compressive strength and the modulus of elasticity of ready-mixed concretes used in Rio de Janeiro. Test specimens cast with concretes used in several constructions and supplied by different ready-mixed concrete producers were tested. These concretes had, in general, nominal fck value of 25 MPa or 30 MPa. Aiming to include concretes with strength varying within a wider range and made with the two types of typical coarse aggregates of Rio de Janeiro, test specimens cast in the laboratories of two ready-mixed concrete producers were tested. In these concretes, the water-cement ratio (0.40 to 0.60) and the petrographic characteristic of the coarse aggregate were varied. Compressive strength and modulus of elasticity tests, ultrasonic pulse velocity, rebound hammer and penetration resistance tests were carried out, at the ages of 3, 7, 14, 28 and 90 days. The correlation curves obtained from the analysis of the results of all those tests are presented here. When only one non-destructive test was used, the rebound hammer was the one that led to the best estimation of compressive strength and the combination of that test with the penetration resistance test improved the accuracy of the evaluation. If modulus of elasticity tests cannot be carried out, the ultrasonic pulse velocity test can be an interesting option to evaluate that property.

Keywords: *correlation curves, nondestructive tests, ready-mixed concrete*

Os ensaios não destrutivos fornecem informações quanto às propriedades do concreto das estruturas, mas a confiabilidade da avaliação dessas propriedades depende da experiência do profissional que realiza esses ensaios e das curvas empregadas para correlacionar as grandezas medidas nos ensaios com as propriedades do concreto investigado. Este estudo visou prover os engenheiros de curvas de correlação que os possibilitem estimar, por meio da utilização de ensaios não destrutivos, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos dosados em central utilizados no Rio de Janeiro. Foram ensaiados corpos-de-prova moldados com concretos usados em diversas obras, fornecidos por diferentes concreteiras. Esses concretos tinham, em geral, fck nominal de 25 MPa ou 30 MPa. Objetivando englobar concretos com resistências mais variadas e os dois tipos de agregados graúdos típicos do Rio de Janeiro, foram ensaiados corpos-de-prova moldados nos laboratórios de dois grupos de concreteiras. Nestes concretos, variaram-se a relação água-cimento (0,40 a 0,60) e a característica petrográfica do agregado graúdo. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e de módulo de elasticidade, de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, de esclerometria e de penetração de pinos, em concretos com idades de 3, 7, 14, 28 e 90 dias. Aqui são apresentadas as curvas de correlação obtidas a partir da análise dos resultados de todos esses ensaios. Ao se usarem os métodos isolados, o de esclerometria foi o que levou à melhor avaliação da resistência à compressão e a combinação desse método com o de cravação de pinos melhorou a acurácia dessa avaliação. Na impossibilidade de se realizarem ensaios de módulo de elasticidade, o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas pode ser uma opção interessante para a avaliação dessa grandeza.

Palavras-chave: *curvas de correlação, ensaios não destrutivos, concreto usinado*

^a COPPE, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, mauriciodornellas@hotmail.com, Caixa Postal 68506, CEP 21941-972, Rio de Janeiro, Brasil

^b Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, lidashehata@vm.uff.br, COPPE-UFRJ, lidia@coc.ufrj.br, Caixa Postal 68506, CEP 21941-972, Rio de Janeiro, Brasil

^c COPPE, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, ibrahim@coc.ufrj.br, Caixa Postal 68506, CEP 21941-972, Rio de Janeiro, Brasil.

1. Introdução

A resistência do concreto à compressão é de fundamental importância no cálculo estrutural, sendo definida como a resistência à compressão adquirida pelo material em condições controladas de temperatura e umidade, numa determinada idade.

A verificação de que o concreto utilizado na execução da estrutura atende as exigências estabelecidas no projeto é feita a partir de ensaios de resistência à compressão, geralmente aos 28 dias, em corpos-de-prova cilíndricos ou cúbicos, sendo estes moldados, curados e rompidos de acordo com as normas técnicas vigentes em cada país. Entretanto, por diferentes razões, muitas vezes é necessária a investigação do próprio concreto da estrutura.

A necessidade de se avaliar a resistência do material *in situ* em idades inferiores à de 28 dias, por motivos inerentes às etapas construtivas, ou em idades superiores à da execução da obra, para avaliar a necessidade de se efetuar reparos e/ou reforços, tem levado ao desenvolvimento ou aperfeiçoamento de diversos ensaios para caracterização do concreto.

A retirada de amostras de concreto da estrutura, e seu posterior rompimento em ensaios de compressão, apresenta as desvantagens de ser onerosa e da restrição dos locais de retirada das amostras, para que não se comprometa a estabilidade da estrutura. Devido a isso, os corpos-de-prova são, em geral, extraídos apenas das lajes e em número relativamente pequeno, não permitindo um completo mapeamento dos níveis de resistência do concreto da estrutura.

A utilização de ensaios não destrutivos surge, então, como uma alternativa, uma vez que a peça estrutural a ser avaliada não sofre dano algum ou pequenos danos facilmente reparáveis, que não comprometem o seu desempenho, permitindo assim uma investigação mais ampla do concreto da estrutura.

Esses ensaios, entretanto, devem ser realizados segundo procedimentos adequados e ter seus resultados analisados com cuidado, uma vez que eles são afetados por diversos fatores, alguns relacionados com a resistência à compressão do concreto e outros com o tipo de ensaio. Existe o consenso de que a obtenção de resultados confiáveis depende da qualificação do realizador do ensaio e da utilização de curvas de correlação adequadas, desenvolvidas para o tipo de concreto em questão.

Sendo assim, buscou-se obter curvas de correlação para avaliar a resistência à compressão dos concretos dosados em central utilizados no Rio de Janeiro usando diferentes ensaios não destrutivos, as quais são aqui apresentadas.

Um estudo de regressão não linear múltipla, que visou avaliar o aumento da acurácia na estimativa da resistência à compressão com a utilização de métodos de ensaios não destrutivos combinados, também é apresentado neste trabalho.

Os resultados de ensaios de módulo de elasticidade tangente inicial dos mesmos concretos, obtidos em estudo realizado em paralelo, possibilitaram ainda correlacionar essa propriedade com a velocidade de propagação de onda ultra-sônica.

2. Avaliação da resistência à compressão por meio de ensaios não destrutivos

A estimativa da resistência à compressão (f_c) utilizando ensaios não destrutivos é feita empregando curvas que correlacionam f_c

com as grandezas obtidas nesses ensaios. A obtenção de resultados confiáveis está relacionada com a utilização de curvas de correlação adequadas, desenvolvidas para o tipo de concreto em questão.

Segundo Malhotra [1], sempre que houver mudanças dos materiais envolvidos na confecção do concreto, uma nova curva de correlação deverá ser estabelecida. Erros consideráveis poderão ser cometidos na avaliação de f_c caso sejam utilizadas indiscriminadamente curvas de correlação fornecidas pelos fabricantes dos aparelhos utilizados nesses ensaios, uma vez que elas foram estabelecidas para condições de ensaio e materiais específicos.

De acordo com o ACI 228.1R-03 [2], a utilização de ensaios não destrutivos no campo deve ser precedida pelo estabelecimento de curvas de correlação, a partir de ensaios realizados no laboratório em corpos-de-prova (cilíndricos ou cúbicos) de concretos feitos com os mesmos materiais utilizados no concreto da estrutura a ser avaliada. Nesses corpos-de-prova, são realizadas medições de uma determinada grandeza, por meio de um ensaio não destrutivo e, logo a seguir, eles são submetidos a ensaios de resistência à compressão. Por fim, os pares de resultados obtidos são submetidos a análises para determinar expressões que melhor caracterizem a correlação desejada.

Em alguns casos, como no método de penetração de pinos, os ensaios são feitos em corpos-de-prova diferentes daqueles que são usados no ensaio de resistência à compressão. Nesses casos, é imprescindível que ambos os ensaios sejam realizados em amostras de mesmas condições de maturidade e compactação.

Segundo Neville [3], o maior obstáculo para a obtenção de curvas de correlação adequadas consiste no fato de que os fatores que influenciam a resistência à compressão nem sempre afetam as grandezas obtidas dos ensaios não destrutivos nas mesmas proporções ou da mesma forma.

3. Programa experimental

No intuito de propor curvas de correlação entre a resistência à compressão ou o módulo de elasticidade e a grandeza obtida de ensaios não destrutivos do concreto, o programa experimental englobou ensaios de concretos fornecidos a obras por 5 concreteiras e produzidos nos laboratórios de 2 grupos de concreteiras.

Na primeira fase buscou-se obter de cada concreteira, previamente selecionada em função de sua participação no mercado, duas amostras de concretos com valores de f_{ck} nominais iguais a pelo menos 25 MPa e diferentes entre si. Entretanto, com uma única exceção, no prazo de 180 dias (janeiro a junho de 2004) só foram conseguidos concretos com f_{ck} nominal de 25 MPa ou 30 MPa, valores mínimos indicados pela NBR 6118 [4] para ambientes de agressividade moderada e forte.

Na segunda fase (julho a dezembro de 2004), objetivando-se englobar concretos com resistências mais variadas e os dois tipos de agregados graúdos típicos do Rio de Janeiro, foram ensaiados corpos-de-prova moldados nos referidos laboratórios, com concretos de composição semelhante à que seria normalmente adotada pelas concreteiras. Nesses concretos variaram-se a relação água-cimento (0,60, 0,55, 0,50, 0,45 e 0,40) e a característica petrográfica do agregado graúdo (britas de gnaíse granítico e de sienito). As composições dos concretos dessa fase são apresentadas por Machado [12].

Tabela 1 - Resumo do programa experimental desenvolvido

Fases	Concretos	f_{ck} Nominal	Agregado Graúdo	a/c
1º	1 a 4	25 MPa	Gnaisse, $D_{máx.}=19$ mm	Não informada pela concreteira
	5 a 7	30 MPa	Gnaisse, $D_{máx.}=19$ mm	
	8	35 MPa	Gnaisse, $D_{máx.}=19$ mm	
2º	A1 a A5		Gnaisse, $D_{máx.}=19$ mm	Variou de 0,40 a 0,60, em incrementos de 0,05
	B1 a B5		Sienito, $D_{máx.}=19$ mm	
	C1 a C5		Gnaisse, $D_{máx.}=19$ mm	

Ensaio**Resistência à compressão**

Norma: NBR 5739 (5)

Número de ensaios: 400

Nº de CP ensaiados por idade: 4 CP cilíndricos

 $f_{cm,j}$ → média de 4 valores de $f_{c,i,j}$ **Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas**

Norma: NM 58 (6)

Número de ensaios: 400 (800 medições de V)

Nº de CP ensaiados por idade: 4 CP cilíndricos

Equipamento: Pundit, transdutores: 54 kHz e $d = 50$ mm

Configuração dos transdutores: transmissão direta

 $V_{i,j}$ → média de 2 valores de V $V_{m,j}$ → média de 4 valores de $V_{i,j}$ **Índice esclerométrico**

Norma: NM 78 (7)

Número de ensaios: 400 (3600 medições de IE)

Nº de CP ensaiados por idade: 4 CP cilíndricos

Equipamento: Proceq-Digi Schimdt tipo ND

Medições: Aparelho na posição horizontal

Carga aplicada para restringir o movimento dos CP:

Aproximadamente 15 % da carga de ruptura

 $IE_{i,j}$ → média de 9 valores de IE $IE_{m,j}$ → média de 4 valores de $IE_{i,j}$ **Penetração de pinos**

Número de ensaios: 95 (380 disparos)

1 face do CP prismático ensaiada por idade

4 disparos por face

Equipamento: Pistola Walsywa e pinos com 55 mm de comprimento e 6,35 mm de diâmetro

Tipo de carga: carga padrão recomendada em (8)

 $L_{e,i,j}$ → média de 4 valores de L_e $L_{em,j}$ → média de 4 valores de $L_{e,i,j}$ $L_{pm,j}$ = comprimento do pino (55mm) - $L_{em,j}$ **Corpos-de-prova (CP)**

400 CP cilíndricos

(150 mm x 300 mm) e

44 CP prismáticos

(200 mm x 200 mm x 725 mm)

Idade dos ensaios

1º Fase

3, 7, 14, 28 e 90 dias

2º Fase

3, 7, 14 e 28 dias

Tipo de cimento

CP III

(equivalente ao ASTM Tipo IS)

Moldagem dos CP

Adensamento manual

segundo NBR 5738 (19)

Condições de cura**CP cilíndricos**

Para casos de ensaios aos 3 dias, em ambiente de laboratório

Para casos de ensaios em outras idades, em câmara úmida até 48 h antes da realização dos ensaios

CP prismáticos

Cobertura com mantas, que foram molhadas 3 vezes ao dia e retiradas 48 h antes da realização dos ensaios

Faixa dos valores obtidos f_c : 12,9 a 61,2 MPa

V: 3,7 a 4,7 km/s

IE: 22 a 45

 L_p : 38,71 a 14,63 mm E_c : 18 a 35 GPa (13)

Foram realizados, tanto na 1ª como na 2ª fase, os seguintes ensaios: ensaios de resistência à compressão e ensaios de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, esclerométrico e de penetração de pinos. Os ensaios de módulo de elasticidade estático (tangente inicial) foram realizados por Nunes [13], utilizando os mesmos concretos desta pesquisa, e os seus resultados foram usados na obtenção da curva de correlação entre módulo de elasticidade e velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas.

Neste estudo foram analisadas três combinações de métodos não destrutivos, obtendo-se a correlação entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, o índice esclerométrico e a resistência à compressão do concreto ($V \times IE \times f_c$), a correlação entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, o comprimento de penetração de pinos e a resistência à compressão do concreto ($V \times L_p \times f_c$) e a correlação entre o índice esclerométrico, o comprimento de penetração dos pinos e a resistência à compressão ($IE \times L_p \times f_c$).

A tabela 1 resume o programa experimental desenvolvido. Os concretos da 1ª fase foram produzidos por cinco diferentes concreteiras, enquanto os da 2ª fase foram produzidos por duas concreteiras (concretos A e B por uma e C por outra). Os ensaios não destrutivos realizados estão apresentados na figura 1.

Os ensaios de resistência à compressão, de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas e esclerométrico foram realizados segundo as recomendações das NBR 5739 [5], NM 58 [6] e NM 78 [7], respectivamente. As normas do Mercosul foram utilizadas, pois elas apresentam, além da metodologia do ensaio não destrutivo, o procedimento necessário para a obtenção das curvas de correlação. Além das recomendações dessas normas, seguiram-se também as dos manuais dos fabricantes dos equipamentos utilizados.

O sistema utilizado em outros países para a realização do ensaio de penetração de pinos denomina-se "Windsor probe", enquanto que no Brasil adota-se o Método Brasileiro, desenvolvido por Vieira [8], utilizando-se pistola e pinos de fabricação nacional. Conforme exemplificado na tabela 2, o Método Brasileiro apresenta lacunas no que diz respeito aos procedimentos que devem ser adotados durante a realização dos ensaios de penetração de pinos. Sendo assim, e por não existir nenhuma norma brasileira que regulamente esse tipo de ensaio, foram seguidas neste trabalho recomendações da norma americana ASTM C803 [9] e, para a seleção de pinos válidos, o critério estabelecido pela norma britânica BS 1881:Part 207 [10].

Apesar de todos os cuidados tomados durante a execução dos ensaios, foram encontrados valores de comprimento exposto do pino (L_e) incoerentes, ou seja, valores de L_e em idades mais avançadas menores do que os encontrados em idades anteriores, sendo este fato também observado nos ensaios realizados por Evangelista [11]. Além disso, os ensaios apresentaram coeficientes de variação superiores ao valor de 5%, limite recomendado pelo ACI 228.1R-03 [2].

Após descartar a possibilidade de que essas incoerências pudessem estar acontecendo devido a falhas ocorridas durante a execução dos ensaios, tomou-se a decisão de buscar um valor limite para a seleção de valores válidos de L_e mais adequado ao comprimento do pino utilizado no Brasil. A necessidade de se estabelecer esse novo limite advém do fato de que o comprimento do pino utilizado no Brasil (55 mm) é menor do que o utilizado nos EUA e na Europa (em torno de 80 mm). Além disso, o valor limite de diferença de L_e de um pino para outro na mesma região indicado pela norma britânica [10], de 5 mm, é mais rigoroso do

Figura 1 – Ensaios realizados



Ensaio de Propagação de Ondas Ultra-Sônicas



Ensaio Esclerométrico



Ensaio de Penetração de Pinos

que o estabelecido pela norma americana [9], 8,4 mm ou 11,7 mm, conforme mostrado na tabela 2.

O critério empregado no estabelecimento desse novo limite, descrito em detalhe por Machado [12], consistiu na consideração da

Tabela 2 - Comparação entre os procedimentos recomendados pelas normas BS 1881: Part 207 (10) e ASTM C 803 (9) e pelo Método Brasileiro (8) para o ensaio de penetração de pinos

	BS 1881:Part 207 1992	ASTM C803 1990	Método Brasileiro 1978
Distância mínima entre os pinos	200 mm	175 mm	Nenhum valor é mencionado.
Distância mínima entre os pinos e as arestas	150 mm	100 mm	Nenhum valor é mencionado.
Número mínimo de cravações por região	3, em área não estabelecida	3, em área não estabelecida	5, numa área de 30 cm x 30 cm.
Validade do ensaio	Mínimo de 3 pinos válidos (diferença no valor de L_e de um pino para outro não deve ultrapassar 5 mm).	Mínimo de 3 pinos válidos (diferença no valor de L_e de um pino para outro não deve ultrapassar 8,4 mm para concretos I e 11,7 mm para concretos II).	Não é estabelecido nenhum critério para a seleção de pinos válidos.
Resultados	Média de pelo menos 3 penetrações válidas.	Média de pelo menos 3 penetrações válidas.	Média de pelo menos 5 cravações efetuadas.
Sistema Utilizado	Windsor Probe	Windsor Probe	Pistolas e pinos da marca WALSYWA
Tipo de Carga	Diferentes cargas devem ser usadas para diferentes intervalos de f_{cr} de acordo com instruções do fabricante do equipamento	Carga Baixa (1) Carga Padrão	Carga Padrão (2)
Pinos	Comprimento: em torno de 80 mm	Pino 1 Comprimento: 79,4 mm Diâmetro: 7,94 mm (corpo) 6,35 mm (ponta) Pino 2 Comprimento: 79,4 mm Diâmetro: 7,94 mm	Comprimento: 55 mm Diâmetro: 6,35 mm

L_e - comprimento exposto do pino.

Concreto I - concreto com agregado de dimensão máxima igual a 25 mm.

Concreto II - concreto com agregado de dimensão máxima igual a 50 mm.

(1) - para concretos com massa específica menor ou igual a 2000 kg/m³ ou f_c menor que 17,2 MPa.

(2) - para todos os concretos, independente do valor de f_c .

Pino 1 - utilizado em concretos com massa específica igual ou superior a 2000 kg/m³.

Pino 2 - utilizado em concretos com massa específica inferior a 2000 kg/m³.

média de apenas 3 valores de L_e dos 4 obtidos, eliminando-se o que apresentou maior diferença com relação ao valor médio dos 4 obtidos. As diferenças entre o valor de L_e do pino excluído e o maior ou menor valor de L_e dos 3 pinos restantes indicaram que o valor recomendado pela BS 1881:Part 207 [10], 5 mm, se mostrou mais adequado para utilização na análise dos ensaios realizados neste trabalho.

4. Resultados

4.1 Métodos Isolados

Nos estudos realizados por Evangelista [11], onde foram mantidos constantes os volumes de agregado graúdo e de água, sobre concretos com os mesmos agregados graúdos usados neste trabalho, foi constatado que os fatores que mais influenciaram a correlação $V \times f_c$ foram a massa específica do agregado graúdo e o tipo de cimento. Segundo a mesma autora, estes fatores foram os que mais influenciaram a correlação $IE \times f_c$, enquanto que o tipo de cimento e a dimensão máxima do agregado foram aqueles que mais influenciaram a correlação $L_p \times f_c$.

Estas constatações serviram de base para a decisão de se utilizar, nos estudos de regressão não linear simples visando à escolha da curva que melhor representasse a correlação entre as grandezas medidas nos ensaios não destrutivos e f_c , os dados experimentais obtidos na 1ª e na 2ª fase deste trabalho simultaneamente; uma vez que em todos os concretos ensaiados foram utilizados o mesmo tipo de cimento e agregados graúdos com massas específicas e volumes praticamente iguais e com a mesma dimensão máxima.

Na falta de um estudo detalhado sobre os fatores que influenciam a relação $V \times E_c$, a decisão de se utilizar os dados experimentais obtidos na 1ª e na 2ª fase simultaneamente foi tomada levando-se em conta o trabalho desenvolvido por Nunes [13], que estudou os mesmos concretos desta pesquisa. Nele, praticamente não se

constatou diferença entre as expressões que relacionam E_c e f_c obtidas para cada grupo de concreto ensaiado e aquela referente a todos os dados experimentais obtidos.

Neste estudo, para cada correlação, foram testados os cinco modelos de curva mais comumente propostos na literatura: linear, potência, exponencial, polinômio (2º grau) e logarítmica. O critério para selecionar a curva que melhor se ajustasse aos dados experimentais teve por base o coeficiente de determinação (r^2) e o desvio padrão residual (S_{res}), bem como o parâmetro estatístico (α), igual a (S_{res}) dividido pelo valor médio de f_c ou E_c . As curvas de potência foram as que melhor representaram as correlações $V \times f_c$ e $IE \times f_c$, enquanto que as de polinômio de 2º grau foram aquelas que melhor representaram as correlações entre L_p e f_c e entre V e E_c .

As expressões propostas para correlacionar a resistência à compressão do concreto com a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, com o índice esclerométrico e com o comprimento cravado dos pinos, juntamente com a expressão proposta para relacionar o módulo de elasticidade com a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, são apresentadas na tabela 3. As figuras 2, 3, 4 e 5 apresentam, respectivamente, as curvas que representam as expressões mostradas na tabela 3, juntamente com os intervalos de predição de 95%, além de todos os dados experimentais obtidos. Para obtenção dessas expressões, foram descartados os dados distantes da média de valor igual a três vezes o desvio-padrão ou maior (ver figuras 4 e 5).

Analisando os resultados da tabela 3 referentes às expressões para avaliação de f_c , constata-se que a relação $IE \times f_c$ é a que apresentou o maior valor de r^2 e o menor valor de (α), seguida em ordem decrescente pelas relações $L_p \times f_c$ e $V \times f_c$, estando de acordo com a seqüência encontrada por Yun et al [14] e Samarin e Meynink [15].

Segundo Popovics [16], a estimativa da resistência à compressão do concreto não pode ser obtida, com uma acurácia aceitável, utilizando expressões em que a única variável seja o valor de V . Este

Tabela 3 - Expressões propostas para correlacionar f_c com V , f_c com IE , f_c com L_p e E_c com V

Correlação	Curva	r^2	S_{res}	α^* (%)	Expressão**
$V \times f_c$	Potência	0.640	6.30 MPa	18.6	$f_c = 0.036 V^{4.696}$
$IE \times f_c$	Potência	0.899	3.45 MPa	10.2	$f_c = 0.026 IE^{2.044}$
$L_p \times f_c$	Polinômio	0.778	4.66 MPa	13.6	$f_c = 0.045 L_{p2} - 4.043 L_p + 107.1$
$V \times E_c$	Polinômio	0.814	1.80 GPa	6.9	$E_c = 7.724 V_2 - 48.97 V + 94.24$

* α - parâmetro estatístico

$$\alpha = \frac{S_{res}}{f_{cm,obs}} \quad \text{or} \quad \alpha = \frac{S_{res}}{E_{cm,obs}}$$

** f_c em MPa, V em km/s, IE adimensional, L_p em mm e E_c em GPa.

fato foi verificado neste trabalho, uma vez que a relação $V \times f_c$ é a que apresentou o menor valor de r^2 e o maior valor de α , dentre todas as relações analisadas. De acordo com esse autor, estudos preliminares demonstraram que a inclusão de uma nova variável (idade do concreto) nas expressões que relacionam V com f_c propicia uma melhoria na acurácia do valor de f_c estimado. Comparando os valores de r^2 e de α obtidos para a relação $V \times f_c$ com os obtidos para a relação $V \times E_c$, constata-se que a última leva a valores mais acurados da grandeza estimada, já que ela apresentou um maior valor de r^2 e um menor valor de α do que a relação $V \times f_c$. Tal fato já era esperado, uma vez que a velocidade de propagação da onda ultra-sônica é uma medida de rigidez

elástica e está diretamente relacionada com o módulo de elasticidade [17].

Deve-se ressaltar que os valores de f_c e E_c , obtidos por meio das expressões apresentadas na tabela 3, correspondem a valores médios situados dentro de uma faixa delimitada pelos limites superior ($f_{c,sup}$ ou $E_{c,sup}$) e inferior ($f_{c,inf}$ ou $E_{c,inf}$) do intervalo de predição. O que se pode afirmar, uma vez que esses limites foram determinados a partir de intervalos de predição de 95%, é que o valor de f_c ou de E_c apresenta 95% de chances de estar compreendido entre esses limites. As expressões para o cálculo desses limites são apresentadas na tabela 4.

As expressões dessa tabela e os intervalos de predição mostra-

Figura 2 - Curva que correlaciona f_c com a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas (V)

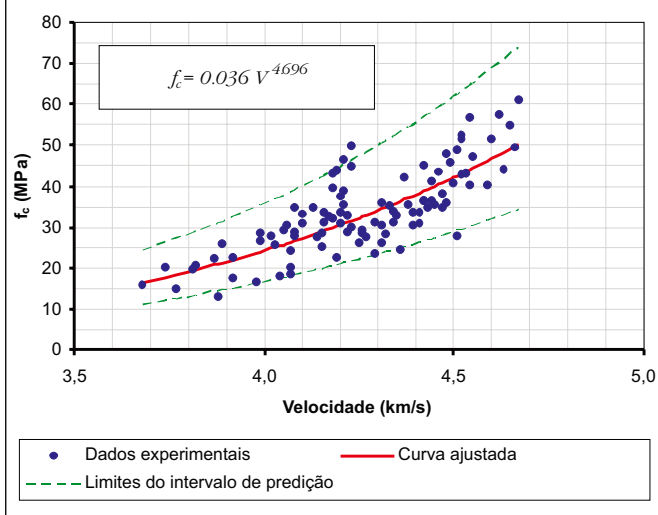


Figura 3 - Curva que correlaciona f_c com o índice esclerométrico (IE)

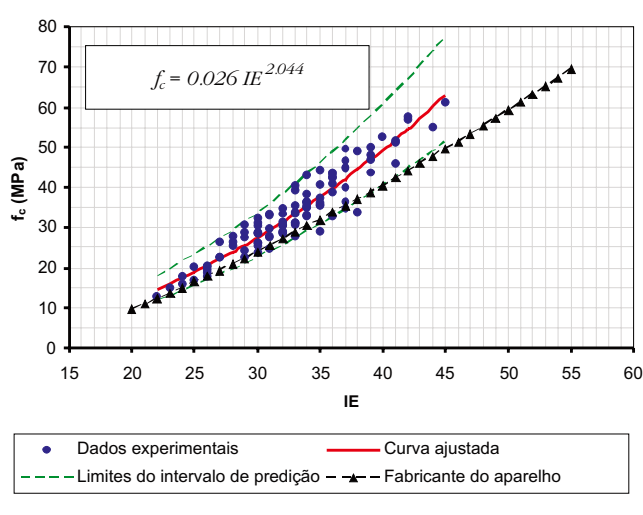


Figura 4 - Curva que correlaciona f_c com o comprimento de penetração dos pinos (Lp)

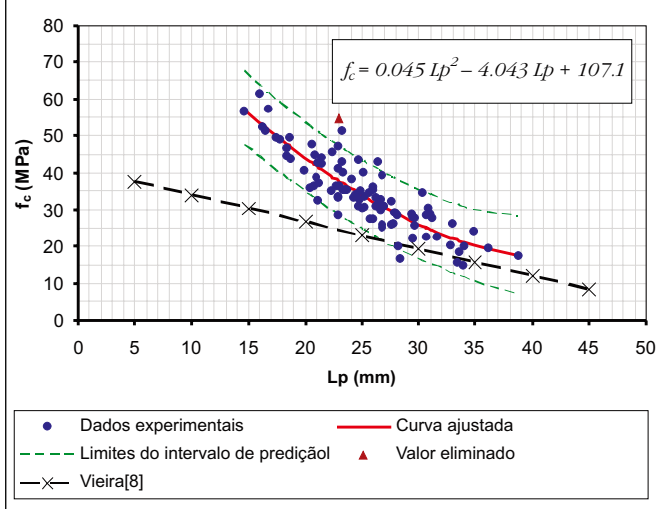


Figura 5 - Curva que correlaciona E_c com a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas (V)

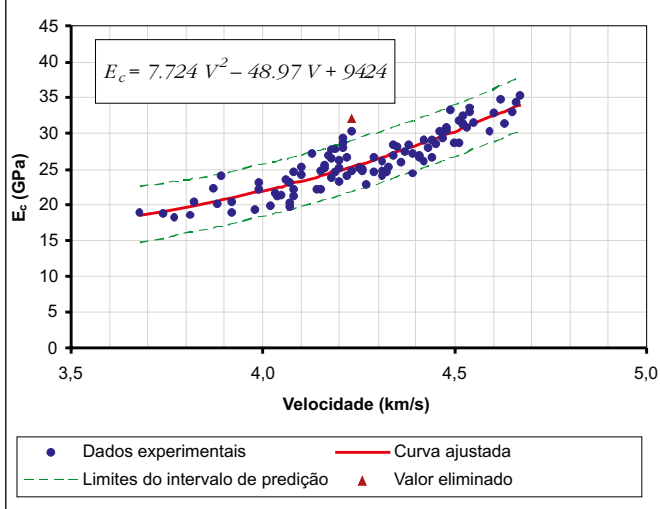


Tabela 4 – Expressões para o cálculo dos limites superior e inferior dos métodos isolados

Correlação	Limites
$V \times f_c$	$f_{c,sup} = 1.47 f_c$ $f_{c,inf} = 0.68 f_c$
$IE \times f_c$	$f_{c,sup} = 1.23 f_c$ $f_{c,inf} = 0.81 f_c$
$Lp \times f_c$	$f_{c,sup} = f_c + 9.4 \text{ MPa}$ $f_{c,inf} = f_c - 9.4 \text{ MPa}$
$V \times E_c$	$E_{c,sup} = E_c + 3.6 \text{ GPa}$ $E_{c,inf} = E_c - 3.6 \text{ GPa}$

f_c – Valores calculados a partir das equações apresentadas na tabela 3.

dos nas figuras 2, 3, 4 confirmam a conclusão citada anteriormente tirada a partir dos valores de r^2 e de α : a relação $IE \times f_c$ é aquela que apresentou a menor faixa de incerteza dos valores de f_c dentre as relações estudadas neste trabalho.

O que se deve ter sempre em mente, quando se faz uma avaliação do valor de f_c por meio de ensaios não destrutivos ou de E_c por meio da relação $V \times E_c$, é a finalidade a que se destina tal avaliação. Deve-se verificar se a faixa de incerteza dos valores de f_c ou de E_c , inerente a todos os métodos, está de acordo com a acurácia exigida pelo trabalho a ser realizado.

4.2 Métodos Combinados

Nos estudos de regressão não linear múltipla, visando escolher as curvas que melhor representassem as correlações $V \times IE \times f_c$, $V \times Lp \times f_c$ e $IE \times Lp \times f_c$, foram utilizados simultaneamente os dados experimentais obtidos na 1ª e na 2ª fases, conforme justificado anteriormente.

Foram testados 10 tipos de curva [12], para cada correlação, sendo escolhidos aqueles que apresentaram o maior coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 5 – Expressões propostas para os métodos combinados

Correlação	R^2	α (%)	Expressão*
$V \times IE \times f_c$	0.999	11.7	$f_c = e^{(0.048 IE + 0.446 V)}$
$V \times Lp \times f_c$	0.999	12.5	$f_c = V^{3.613} Lp^{-0.539}$
$IE \times Lp \times f_c$	0.999	8.8	$f_c = IE^{1.422} Lp^{-0.455}$

* f_c em MPa, V em km/s, IE adimensional, Lp em mm e E_c em GPa.

As expressões propostas, para os 3 métodos combinados abordados neste estudo, são apresentadas na tabela 5.

Visando avaliar se houve um aumento na acurácia da estimativa de f_c com a utilização dos métodos combinados, em relação àquela obtida com o uso dos métodos isoladamente, foi elaborada a tabela 6.

Na literatura consultada, foram encontrados dois critérios para avaliar a acurácia alcançada por uma determinada relação em comparação com a obtida pelas demais. Esses critérios foram denominados neste trabalho de (A) e (B). No critério (A), adotado pela grande maioria dos autores, esta avaliação é feita levando-se

em conta somente o valor do coeficiente de determinação, ou seja, quanto maior for o seu valor, maior é a acurácia. Já no critério (B), utilizado por Samarin e Meynink [15] e Popovics [16], essa avaliação é feita analisando-se, além do coeficiente de determinação, os valores de S_{res} e de α . Segundo este critério, a relação mais acurada é aquela que apresenta os menores valores de S_{res} e de α .

Analisando-se somente as correlações obtidas com o uso de um único ensaio não destrutivo, constata-se que os dois critérios citados levam a uma mesma conclusão: os valores de f_c estimados a partir da relação $IE \times f_c$ são mais acurados do que os estimados pelas relações $V \times f_c$ e $Lp \times f_c$, já que para essa relação foram encontrados o maior valor de r^2 e os menores valores de S_{res} e de α . Com relação aos métodos combinados, constata-se que a análise apenas dos valores de R^2 não permite avaliar qual das 3 combinações testadas

Tabela 6 – Comparação entre os valores de r^2 ou R_2 , S_{res} , α e β encontrados para as diversas correlações estudadas

Correlação	r^2 or R_2	S_{res} (MPa)	α (%)	β (%)
$V \times f_c$	0.640	6.30	18.6	6.9
$IE \times f_c$	0.899	3.45 *	10.2 *	-1.5 ***
$V \times IE \times f_c$	0.999	3.96	11.7	
$V \times f_c$	0.640	6.30	18.6	6.1
$Lp \times f_c$	0.778	4.66	13.6	1.1**
$V \times Lp \times f_c$	0.999	4.32 *	12.5 *	
$IE \times f_c$	0.899	3.45	10.2	1.4 **
$Lp \times f_c$	0.778	4.66	13.6	4.8
$IE \times Lp \times f_c$	0.999	3.04 *	8.8 *	

β – diferença, em porcentagem, entre o valor de α encontrado num método combinado e os encontrados nos respectivos métodos isolados.

* Menores valores de S_{res} e de α .

** Menores valores de β .

proporciona valores mais acurados de f_c , já que elas apresentaram o mesmo valor de R^2 (0,999). Já com a utilização do critério (B), pode-se afirmar que os valores de f_c estimados da relação IE x L_p x f_c são mais acurados do que os estimados pelas outras 2 combinações estudadas, pois nessa relação foram encontrados os menores valores de S_{res} e de α .

Avaliando, por intermédio do critério (A), o aumento da acurácia na estimativa de f_c com o uso dos métodos combinados, constata-se que as 3 combinações estudadas apresentaram uma acurácia sensivelmente mais elevada do que a observada nas correlações isoladas, o que justificaria a utilização das referidas combinações. Os métodos combinados apresentaram valores de R^2 superiores aos valores de r^2 encontrados nas relações V x f_c (aumento de 56%), IE x f_c (aumento de 11%) e L_p x f_c (aumento de 28%).

Ao efetuar essa mesma avaliação utilizando-se o critério (B), observa-se que a estimativa de f_c seria mais acurada com a utilização dos métodos combinados V x L_p x f_c e IE x L_p x f_c do que com a utilização dos métodos isolados correspondentes, pois os valores de S_{res} e de α encontrados nos métodos combinados foram inferiores aos encontrados nos métodos isolados. Mas, ao contrário do que foi concluído a partir do critério (A), o aumento de acurácia verificado dificilmente justificaria os tempo e custo adicionais que a utilização dos referidos métodos combinados acarretaria. Isto decorre do fato de que os menores valores da diferença percentual entre o valor de α encontrado num método combinado e os encontrados nos métodos isolados (β) são relativamente pequenos, não ultrapassando 2%, conforme mostrado na tabela 6. Nesta mesma

Tabela 7 - Resumo da análise dos erros cometidos na estimativa de f_c por uma determinada relação

Correlação	Erro Médio (%)	X (%)
V x f_c	15.4	6.5
IE x f_c	7.9 *	-1.0 ***
V x IE x f_c	8.9	
V x f_c	13.9	3.0
L_p x f_c	12.0	1.1 **
V x L_p x f_c	10.9 *	
IE x f_c	7.6	0.5 **
L_p x f_c	12.0	4.9
IE x L_p x f_c	7.1 *	

X diferença, em porcentagem, entre o erro relativo encontrado num método combinado e os encontrados nos respectivos métodos isolados.

* Menor valor do erro médio.

** Menores valores de X.

*** Não houve aumento da acurácia com a utilização do método combinado.

Tabela 8 - Expressões para o cálculo dos limites superior e inferior dos métodos combinados

Correlação	Limites
V x IE x f_c	$f_{c,sup} = 1.26 f_c$ $f_{c,inf} = 0.79 f_c$
V x L_p x f_c	$f_{c,sup} = 1.31 f_c$ $f_{c,inf} = 0.76 f_c$
IE x L_p x f_c	$f_{c,sup} = 1.21 f_c$ $f_{c,inf} = 0.83 f_c$

f_c - Valores calculados a partir das equações apresentadas na tabela 5.

tabela, constata-se que a utilização do método combinado V x IE x f_c não é viável, uma vez que o mesmo apresentou valores de S_{res} e de α superiores aos encontrados na correlação IE x f_c .

Buscando eliminar a dúvida quanto à viabilidade da utilização dos métodos combinados, já que os 2 critérios levaram a conclusões contraditórias, foram elaboradas por Machado [12] tabelas onde são mostrados os erros na estimativa de f_c relativos a cada uma das 6 expressões propostas. Estes erros foram calculados levando-se em conta a diferença entre os valores de f_c obtidos por uma determinada expressão e os obtidos por meio do ensaio padrão de resistência à compressão. Um resumo da análise desses resultados é apresentado na tabela 7.

Com base nos resultados apresentados nas tabelas 6 e 7, pode-se dizer que:

- Com relação aos métodos isolados, os critérios (A) e (B) se mostraram adequados para apontar, dentre várias relações, aquela em que os valores de f_c são estimados com maior acurácia, já que a relação IE x f_c , apontada pelos 2 critérios como sendo a mais acurada, foi a que apresentou os menores erros relativos, 7,9% contra 15,4% da relação V x f_c e 7,6% contra 12% da relação L_p x f_c .
- O critério (B), ao contrário do critério (A), se mostrou adequado para apontar, dentre vários métodos combinados, aquele em que os valores de f_c são estimados com maior acurácia. A relação IE x L_p x f_c , apontada pelo critério (B) como sendo a mais acurada, foi a que apresentou os menores erros relativos, 7,1% contra 8,9% e 10,9% das relações V x IE x f_c e V x L_p x f_c , respectivamente.
- A grande diferença entre os valores de R^2 encontrados nos métodos combinados e os de r^2 encontrados nos respectivos métodos isolados, segundo o critério (A), indica um aumento considerável na acurácia da estimativa de f_c com o uso dos métodos combinados, o que justificaria a utilização dos mesmos. Este fato, porém, não foi confirmado pelos resultados das diferenças percentuais entre o erro relativo encontrado no método combinado e os encontrados nos respectivos métodos isolados, X, mostrados na tabela 7, o que demonstra a ineficácia desse critério nesse tipo de avaliação.

Tabela 9 - Comparação entre os intervalos de predição de 95% das diversas relações estudadas

Correlação	Intervalo de Predição de 95%*
V x f_c	0.79 f_c
IE x f_c	0.42 f_c
V x IE x f_c	0.47 f_c
V x f_c	0.79 f_c
Lp x f_c	0.60 f_c **
V x Lp x f_c	0.55 f_c
IE x f_c	0.42 f_c
Lp x f_c	0.60 f_c **
IE x Lp x f_c	0.38 f_c

* Diferença entre os valores de $f_{c,sup}$ e $f_{c,inf}$.

** Obtido a partir da média das diferenças entre os limites superior e inferior do limite de predição de 95% e os valores preditos.

d) O critério (B), por sua vez, mostrou-se adequado para avaliar a viabilidade dos métodos combinados. Nas comparações efetuadas na tabela 7, entre um determinado método combinado e os respectivos métodos isolados, os valores de X indicam que, em geral, os métodos combinados apresentaram um aumento discreto na acurácia da estimativa de f_c . Isto somente não foi verificado na comparação entre as relações V x IE x f_c e IE x f_c . A correspondência entre essas conclusões e as obtidas com a utilização desse critério atestam a validade do mesmo nesse tipo de avaliação.

Deve-se ressaltar que os valores de f_c , obtidos por meio das expressões apresentadas na tabela 5, correspondem a valores médios situados dentro de uma faixa delimitada pelos limites superior e inferior do intervalo de predição. As expressões para o cálculo desses limites são apresentadas na tabela 8.

A partir das expressões dessa tabela, pode-se afirmar que os valores de f_c estimados com a relação IE x Lp x f_c apresentaram uma maior acurácia do que os estimados com as relações relativas às outras 2 combinações estudadas, uma vez que ela teve o menor intervalo de predição de 95% para os valores de f_c . Esta mesma conclusão já havia sido tirada a partir da análise dos valores de S_{res} e de α .

Uma comparação entre os intervalos de predição de 95% das diversas relações estudadas nesta pesquisa é apresentada na tabela 9.

Analisando os valores dessa tabela, observa-se que:

a) A relação V x IE x f_c apresentou um intervalo de predição menor que o encontrado na relação V x f_c , porém maior que o encontrado na relação IE x f_c , o que não justifica a sua utilização.

b) A relação V x Lp x f_c apresentou um intervalo de predição menor que os encontrados nas relações V x f_c e Lp x f_c . Apesar disso, a sua utilização pode não ser economicamente viável devido, principalmente, à pequena diferença observada entre o seu intervalo de predição e o da relação Lp x f_c .

c) A relação IE x Lp x f_c apresentou um intervalo de predição menor que os encontrados nas relações IE x f_c e Lp x f_c , mas também pode não ser economicamente interessante face à pequena diferença entre o seu intervalo de predição e o da relação IE x f_c .

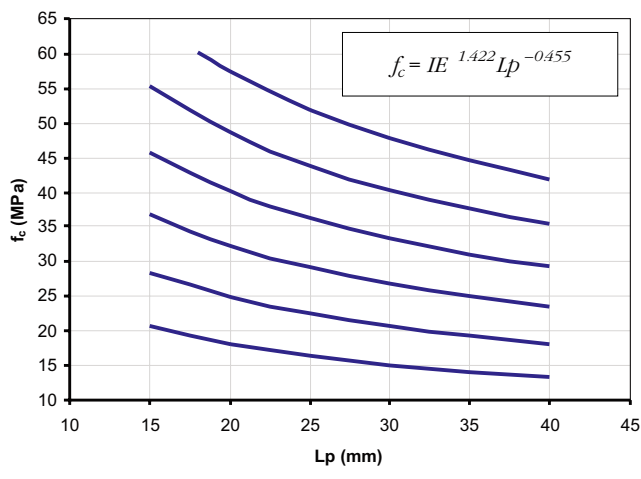
Curvas que representam a correlação IE x Lp x f_c , método combinado que apresentou os melhores resultados, encontram-se na figura 6.

5. Conclusões

Com base na análise dos resultados obtidos, podem ser feitas as seguintes observações:

a) Com relação aos métodos não destrutivos isolados, constatou-se que a correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão foi a que apresentou os melhores resultados, seguida em ordem decrescente pelas correlações Lp x f_c e V x f_c . O fato da relação V x f_c ter mostrado os piores resultados poderia ser explicado, segundo Popovics [16], pela não existência de uma relação teórica entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, nem mesmo para materiais homogêneos e com comportamento linear elástico. Esta explicação, entretanto, não parece ser suficiente para justificar esse fato, pela simples razão de também não existir uma relação teórica entre a resistência à compressão e as demais grandezas (IE e Lp). Análises feitas por Machado [12] mostram que o método de propagação de ondas ultra-sônicas é mais afetado por alterações na composição do concreto do que os demais métodos, podendo ser essa a explicação mais adequada.

Figura 6 - Curvas que correlacionam f_c com o índice esclerométrico (IE) e o comprimento de penetração dos pinos (Lp)



Apesar de apresentar nesta pesquisa os piores resultados, a estimativa de f_c utilizando o método de propagação de ondas ultra-sônicas não deve ser descartada, principalmente quando essa avaliação for feita em idades avançadas. Nestas idades, os resultados obtidos pelos métodos do esclerômetro de reflexão e de penetração de pinos são influenciados pela carbonatação, podendo não representar o concreto situado no interior da peça. Nos resultados obtidos pelo método de propagação de ondas ultrasônicas, a influência da carbonatação não é tão significativa, pois a espessura da camada superficial é relativamente pequena em comparação com o caminho total percorrido pela onda ultra-sônica (caso de transmissão direta).

O que se deve ter sempre em mente, quando se deseja avaliar a resistência à compressão do concreto por meio de ensaios não destrutivos, independente do método escolhido, é que quanto maior for o conhecimento da composição do concreto sob investigação, implicando desta forma na utilização de curvas mais apropriadas, maior será a acurácia dos resultados obtidos.

- b) Com relação aos métodos não destrutivos combinados, constatou-se que a correlação entre o índice esclerométrico, o comprimento cravado dos pinos e a resistência à compressão foi a que apresentou os melhores resultados. Isto está de acordo com a afirmação da RILEM NDT4 [18] de que a combinação de 2 ou mais métodos é vantajosa quando os métodos em questão fornecerem estimativas de resistência à compressão com níveis similares de acurácia. A correlação $IE \times L_p \times f_c$ foi obtida pela combinação dos 2 métodos isolados ($IE \times f_c$ e $L_p \times f_c$) que apresentaram os melhores resultados individualmente. Apesar das correlações $V \times L_p \times f_c$ e $IE \times L_p \times f_c$ apresentarem um aumento na acurácia dos resultados obtidos em comparação à obtida nos respectivos métodos isolados, este aumento pode não ser o bastante para justificar os aumentos de tempo e custo decorrentes do emprego dos dois métodos em vez de apenas um.
- c) As diferenças observadas entre as curvas de correlação propostas neste e em outros trabalhos [12] evidenciam a necessidade de se obter o maior número possível de informações a respeito da composição do concreto sob investigação, o que permitirá a escolha de curvas mais adequadas e, conseqüentemente, a obtenção de resultados mais próximos dos reais. Ressalta-se que a utilização dessas curvas deve ser precedida por uma verificação, feita a partir da extração de testemunhos, visando avaliar a validade das mesmas. Nas figuras 3 e 4, verifica-se que as curvas indicadas pelo fabricante do esclerômetro usado e por Vieira [8], em geral, não levam a uma adequada avaliação de f_c dos concretos analisados.
- d) No que se refere ao procedimento estatístico adotado, constatou-se que a utilização do coeficiente de determinação se mostrou adequado tanto na escolha da curva que melhor representou a correlação estudada como na avaliação, dentre vários métodos isolados, daquele que apresentou os melhores resultados. Entretanto, a sua utilização não permite avaliar de forma correta a utilização dos métodos combinados. Recomenda-se que na avaliação do método isolado ou combinado que fornece os melhores resultados

- para um determinado conjunto de dados, sejam utilizados, além do coeficiente de determinação, os parâmetros S_{res} e α .
- e) A estimativa do valor do módulo de elasticidade estático do concreto por meio da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas apresentou resultados bastante satisfatórios, em função do relacionamento direto entre essas duas grandezas. Existe, no Brasil, um vasto campo a ser explorado com relação ao aprimoramento dos ensaios não destrutivos visando à obtenção de resultados mais confiáveis: na formação de mão de obra qualificada; na alteração de procedimentos adotados; na inclusão de novas variáveis (como a idade do concreto) nas expressões que relacionam as grandezas obtidas nos ensaios não destrutivos com a resistência à compressão do concreto.

Com relação ao método de penetração de pinos, sugere-se a realização de um estudo amplo buscando adequá-lo à realidade brasileira, investigando principalmente os seguintes parâmetros: número mínimo de pinos a serem cravados numa certa região, distância mínima entre eles, diferença máxima no valor do comprimento exposto de um pino para outro e o posicionamento ideal do pino da alma da pistola (tipo de carga utilizado) em função da resistência do concreto analisado.

6. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a todos os profissionais que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste estudo, às concretores Concretex, Engemix, Intermix, Lafarge, Redimix e à Holcim do Brasil pelo fornecimento dos concretos utilizados neste trabalho, bem como ao CNPq, à CAPES e à FAPERJ pelos recursos financeiros.

7. Referências bibliográficas

- [01] MALHOTRA, V.M. In situ/nondestructive testing of concrete – A global review. **In Situ/Non destructive testing of concrete**, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, p.1-16, 1984.
- [02] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 228. 1R-03, **In-place methods to estimate concrete strength**, Detroit, 2003.
- [03] NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Editora Pini, 1997.
- [04] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2003: Projeto de estruturas de concreto-Procedimento**, Rio de Janeiro, 2004.
- [05] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, 1994.
- [06] COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 58: Hormigón endurecido-Determinación de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1996.
- [07] COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 78: Hormigón endurecido-Evaluación de la dureza superficial mediante el esclerómetro de resorte**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1996.

- [08] VIEIRA, D. P. Método brasileiro de penetração de pinos, In: XIX JORNADAS SULAMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, **Proceedings**. Santiago, Chile, 1978.
- [09] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C803: Standard test method for penetration resistance of hardened concrete**, Philadelphia, 1990.
- [10] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1881: Part 207, Recommendations for the assessment of concrete strength by near-to-surface tests**, London, 1992.
- [11] EVANGELISTA, A.C.J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- [12] MACHADO, M.D. **Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [13] NUNES, F.W.G., **Resistência e módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [14] YUN et al. Comparative evaluation of nondestructive test methods for in-place strength determination, **Nondestructive testing**, Special Publication SP-112, American Concrete Institute, Detroit, 1988, p.111-116.
- [15] SAMARIN, A. and MEYNINK, P. Use of combined ultrasonic and rebound hammer method for determining strength of concrete structural members. **Concrete International**, v.3, n.3, p.25-29, March 1981.
- [16] POPOVICS, S. Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship. **Materials Evaluation**, v. 59, n.2, p.123-130, February 2001.
- [17] NOGUEIRA, C.L. and WILLAN, K.J. Ultrasonic testing of damage in concrete under uniaxial compression. **ACI Materials Journal**, v.98, n.3, p.265-275, May-June 2001.
- [18] RILEM. **NDT 4: Recommendations for in situ concrete strength determination by combined non-destructive methods**, 1993
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**, Rio de Janeiro, 2003.