

Utilization of the ultrasonic method to evaluate the properties of high performance concrete

Utilização do método ultra-sônico para avaliação da performance do concreto de alto desempenho

B. M. TORALLES-CARBONARI ^a
toralles@uel.br

S. H. CAVALARO ^b
sergiohpc@hotmail.com

J. C. MENDES CASTANHA ^c
juliomendes_eng@hotmail.com

P. A. G. GUACELLI ^d
paulo.guacelli@londrina.pr.gov.br

C. CATISTE SILVA ^e
caiocatiste@hotmail.com

Abstract

The present paper deals with the utilization of the ultrasonic method to evaluate the properties of high performance concrete. The compressive strength and the elasticity module of the concrete are evaluated. A comparative study was performed with the results obtained in the test with the ultrasonic method and in the test with strain gages.

The latter were then compared with the elastic module estimated in accordance with the CEB 90 [1] and the NBR 6118 [2] equations. The study shows that test with the ultrasonic method is sensible to variations in the mechanical properties of concrete. Furthermore, the comparative study showed that the elasticity module of concrete may be estimated indirectly by the ultrasonic pulse velocity.

Keywords: ultrasonic pulse velocity; high performance concrete; mechanical properties; non-destructive tests.

Resumo

O presente trabalho trata da utilização do método ultra-sônico para avaliar a desempenho do concreto de alto desempenho. As propriedades mecânicas avaliadas foram a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Com respeito ao módulo, foi feito um estudo comparativo entre os resultados obtidos com o aparelho de ultra-som e com extensômetros colados. Os resultados obtidos em ambos os ensaios foram também contrastados com os valores previstos de acordo com o CEB 90 [1] e a NBR 6118 [2].

Através desse estudo se verificou que as leituras realizadas com o método ultra-sônico são sensíveis às variações das propriedades mecânicas. Por outro lado, a análise comparativa do módulo de elasticidade mostrou que é possível estimar o seu valor por meio dos resultados obtidos com o aparelho de ultra-som.

Palavras-chave: ultra-som; concreto de alto desempenho; propriedades mecânicas; ensaios não destrutivos.

^a Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Construção Civil, Doutora em Engenharia de Caminos Canales y Puertos, toralles@uel.br, Calle Rubio I Balaguer 83, 2º, 1ª, CEP 08035, Barcelona, Espanha.

^b Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería de La Construcción, Doutor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, sergiohpc@hotmail.com, Barcelona, Espanha.

^c Universidade Estadual de Londrina, Aluno de Graduação do Curso de Engenharia Civil, juliomendes_eng@hotmail.com, Rua Enrico Mignoni 257, CEP 86041000, Jardim Vale Azul, Londrina, Brasil.

^d Universidade Estadual de Londrina, Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento, paulo.guacelli@londrina.pr.gov.br, Londrina, Brasil.

^e Universidade Estadual de Londrina, Aluno de Graduação do Curso de Engenharia Civil, caiocatiste@hotmail.com, Londrina, Brasil.

1. Introdução

A preocupação com o meio ambiente deve estar presente hoje em dia em todos os setores de produção e em especial na construção civil, pois é esta uma das grandes responsáveis pela destruição do mesmo. Nesse contexto, a extração da areia natural ganha importância à medida que causa um impacto negativo à conservação das matas ciliares e provoca o assoreamento dos rios

Além disso, a areia natural a cada dia está mais escassa e seus pontos de extração se distanciam dos grandes centros, causando o aumento do custo final deste produto. A areia de britagem é uma das alternativas que surgem como agregado miúdo. Apesar disso, pouco se conhece sobre o comportamento de concretos de alto desempenho (CAD) produzidos com areias de britagem, sendo essa a principal área a qual o presente trabalho pretende contribuir.

O CAD diferencia-se por apresentar reduzido valor de relação água-cimento, possibilitado pela adição de aditivos superplastificantes que garantem a consistência e a trabalhabilidade. No entanto é necessário um controle sistemático de suas propriedades no decorrer do tempo, especialmente em elementos sujeito a meios agressivos.

A extração de testemunhos é um procedimento inconveniente, de alto custo e em alguns casos de difícil execução. Para evitar esses problemas procura-se utilizar ensaios não destrutivos.

Tendo em vista as propriedades diferenciadas do CAD, bem como a forte tendência de realização de ensaios não destrutivos, parece pertinente analisar a aplicabilidade do método ultra-sônico para a estimativa das propriedades mecânicas do citado concreto.

Frente a isso, o objetivo deste trabalho é avaliar a precisão do método ultra-sônico, assim como estabelecer uma correlação matemática entre a velocidade ultra-sônica e a resistência à compressão em CAD. Para tanto, se produziram corpos de prova que foram ensaiados primeiramente pelo método ultra-sônico e logo rompidos à compressão axial simples.

Foram consideradas como variáveis independentes o teor de ar incorporado, a massa específica, a absorção de água por imersão e a quantidade de vazios. Além disso, foram feitas análises comparativas do módulo de elasticidade obtido através das equações do aparelho de ultra-som, da CEB 90 [1] e da NBR 6118 [2].

1.1 Concreto de alto desempenho

Segundo Metha e Aitcin [3] concretos de alto desempenho, são entendidos como aqueles que possuem elevada trabalhabilidade, durabilidade e resistência. Desta forma proporcionam maior vida útil às estruturas e diminuição das seções de vigas e pilares, permitindo melhor aproveitamento de espaços com eficiente economia.

Outra definição de CAD, citada por Metha e Monteiro [4] foi proposta pela U.S. Federal Highway Administration, que ao realizar ensaios de campo em tabuleiros de pontes verificou que a suposição de que “concretos mais resistentes seriam mais duráveis” não era consistente, pois os resultados mostraram que misturas com resistência elevadas nas primeiras idades eram mais propensas à fissuração. Tal constatação motivou a seguinte reformulação do conceito de CAD em estruturas rodoviárias:

“O concreto de alto desempenho CAD é um concreto projetado para ser mais durável e, se necessário, mais resistente que o concreto convencional”.

Para os autores Metha e Monteiro esta definição é prática e útil, visto que deixa claro que resistência não é sinônimo de durabilidade e ressalta que para o “alto desempenho” é mais essencial a alta durabilidade.

O CAD diferencia-se do concreto convencional por apresentar reduzido valor de relação água/aglomerante e em consequência pouca ou nenhuma permeabilidade. Essa última é a propriedade mais desejada para a longa durabilidade de estruturas expostas a ambientes agressivos – (Metha e Monteiro [4]); sendo de significativa importância para estruturas expostas a condições ambientais severas que estas estejam isentas de fissuras e permaneçam impermeáveis por um longo período (AİTCIN [5]).

Segundo Aitcin [5] o CAD é visto como um tipo de concreto emergente, e suas aplicações são crescentes em volume e em diversidade. Sobre esse tema, o mesmo autor ainda complementa:

“Qualquer estrutura de concreto que tenha que fazer frente a condições ambientais difíceis, será feita com concreto de alto desempenho para aumentar seu ciclo de vida”.

Aitcin [5] conclui que o crescimento do emprego do CAD e sua monitoração inteligente irão refinar os métodos de projeto e aumentar a vida útil das estruturas. No entanto o que foi ganho em desempenho será perdido em simplicidade, sendo que terá que se evoluir de um baixo nível tecnológico para um alto nível tecnológico.

Na composição do CAD se incorporam adições minerais e os aditivos químicos sendo, os aditivos superplastificantes, os mais utilizados.

O controle de qualidade e verificação das propriedades, principalmente ao longo da vida útil da estrutura torna-se determinante e essencial na execução de peças de elevada durabilidade ainda mais quando expostas a meios agressivos.

Desta necessidade de acompanhamento continuado surge a questão de como avaliar uma estrutura sem o inconveniente da extração de testemunhos representativos ou como fazê-lo, quando tal coleta não for possível.

Assim, encontra-se atualmente bem difundidos e à disposição um bom número de métodos e técnicas de fácil aplicação que possibilitam uma avaliação não destrutiva e “in situ” das características do concreto. Dentre estas técnicas destaca-se o ensaio com ultra-som como uma das mais promissoras.

1.2 Ensaios não destrutivos

O aparelho de ultra-som realiza um ensaio de tipo não destrutivo, ou seja, sem causar danos à estrutura que se está ensaiando. Os primeiros relatos de estudos com ondas ultra-sônicas provêm dos Estados Unidos em meados de 1940. Atualmente, é sem dúvida, o método não destrutivo mais utilizado e que apresenta o maior crescimento, devido a sua facilidade durante a execução, baixo investimento, velocidade de realização e alta sensibilidade.

O procedimento de ensaio com o aparelho de ultra-som é relativamente simples, estando definido na norma NBR NM 58 [6]. O ensaio permite avaliar propriedades mecânicas, elásticas, composição e danos de materiais como concreto ou madeira.

O aparelho de ultra-som é composto de uma fonte, na qual são conectados dois transdutores. O primeiro transforma impulsos elétricos em ondas acústicas com frequências acima do limite audível que são transmitidas ao interior do material analisado. O segundo transdutor capta esses sinais, convertendo-os novamente em impulsos elétricos.

Tabela 1 - Características físicas do cimento CPV-ARI

Ensaio	CP V-ARI
Início de pega	3h e 1 min.
Fim de pega	4h e 11 min.
Consistência normal	28,49% de água
Massa específica	3,14 kg/dm ³
Finura peneira 200	-----
Finura peneira 325	1,37%
Superfície específica	4430 cm ² /g

cos. Com base na distância percorrida e no tempo transcorrido, é possível calcular a velocidade de trânsito da onda sonora. Em um material que apresente descontinuidades internas, a propagação da onda é mais lenta que em um material mais íntegro.

Deve-se ressaltar que quase a totalidade da bibliografia existente sobre a técnica supracitada, principalmente quanto à estimativa da resistência a compressão axial, encontra-se restrita em sua aplicação ao concreto convencional.

No presente trabalho o aparelho de ultra-som utilizado foi um PUNDIT. O acoplante usado para servir de ponte entre o corpo de prova e os transdutores foi a vaselina. As medidas foram realizadas nos vinte e quatro concretos estudados.

1.3 Módulo de elasticidade

Módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona a medida da rigidez de um material. É obtido a partir da razão entre a tensão exercida e a deformação sofrida. Este parâmetro está relacionado à frequência natural de vibração da estrutura, ou seja, para uma massa específica constante um componente com baixo módulo tem uma frequência de vibração menor que outro com maior módulo (Aguilar, M. T. P., et al/2006 [7]).

Segundo Metha e Monteiro [4], o concreto é um material heterogêneo, cujo comportamento elástico é função da fração volumétrica, da densidade e do módulo dos seus componentes, assim como as características da zona de transição na interface. De acordo com a ACI 318:05 [8] o módulo do concreto depende sensivelmente do módulo do agregado. Em decorrência, os concretos com agregados de origem basáltica, têm um módulo mais elevado em comparação àqueles confeccionados com agregados de quartzo ou calcários.

Embora o comportamento do agregado e da pasta possa ser considerado elástico o mesmo não ocorre com o concreto. A relação entre tensão e deformação, no caso do concreto, pode ser considerada aproximadamente linear para tensões que não excedam a 30% da resistência à compressão e 70% da sua resistência a tração. Para valores superiores a estes, a deformação não é mais proporcional à carga aplicada e a deformação não é mais totalmente reversível uma vez realizado o descarregamento. Mesmo a baixas tensões as deformações serão maior quanto mais lenta for a aplicação das cargas e quanto mais tempo estas permanecerem atuando.

Segundo Metha e Monteiro [4] no concreto a relação direta entre resistência e módulo de elasticidade advém de que ambos são afetados pela porosidade dos materiais constituintes, ainda que não com a mesma intensidade. Portanto, todos os fatores que afetam a porosidade dos componentes do concreto são importantes. De acordo com o mesmo autor para determinar as tensões provocadas pelas deformações devidas a influências ambientais, como também para se calcular as tensões de projeto fazem-se necessárias a estimativa do módulo de elasticidade. Nesse sentido cabe ressaltar que quanto menor o módulo de elasticidade, menor será a tensão de tração induzida por uma determinada retração do material.

Portanto para o projeto de estruturas de concreto e para o seu monitoramento ao longo do tempo, a relação entre as tensões e deformações é de fundamental importância.

2. Materiais

A fim de alcançar o objetivo proposto foram produzidos vinte e quatro tipos distintos de concreto, com quatro esqueletos granulados, quatro porcentagens de pasta e duas relações água/cimento. Com o propósito de obter uma maior amplitude dos resultados trabalhou-se com concretos de alto desempenho com massas específicas normais (CAD) e leves.

A utilização de tão ampla variedade de concretos visou garantir um estudo abrangente sobre a utilização do método ultra-sônico voltado à estimativa de propriedades dos concretos de alto-desempenho, mais especificamente a resistência à compressão.

Os materiais empregados na produção dos concretos foram CP V-ARI, areia natural quartzosa, areia de britagem de rochas basálticas, brita zero, brita um, aditivo superplastificante e sílica ativa, sendo suas características descritas a seguir.

2.1 Cimento

O desempenho do cimento em termos de reologia e resistência torna-se um item crítico à medida que a resistência à compressão almejada aumenta. Além disso, os diferentes tipos e marcas de cimento não têm o mesmo desempenho quando se produz concretos de alto desempenho.

Assim, alguns tipos podem apresentar elevado desempenho quanto à resistência final, mas um comportamento reológico ruim enquanto outros podem ser considerados satisfatórios em termos reológicos, mas ruins em termos de resistência. Desta forma, torna-se essen-

Tabela 2 - Características físicas da sílica ativa

Ensaio	Sílica
Massa específica aparente	550 kg/m ³
Massa específica	2220 kg/m ³
Superfície específica	20.000 m ² /kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro da partícula	0,2 µm

Tabela 3 – Aditivo superplastificante

Características físicas	Aditivos superplastificantes
Massa específica (kg/m ³)	1,06 ± 0,02
Sólidos (%)	30,07

cial a escolha prudente do tipo de cimento a fim de produzir um concreto de alto desempenho com as propriedades desejadas.

A opção pelo uso do cimento do tipo CP V-ARI em todos os concretos produzidos foi feita devido à alta resistência inicial propiciada pelo teor mais elevado de C3A. As características do cimento usado nos ensaios encontram-se na tabela 1.

2.2 Adição mineral

A sílica ativa é um subproduto da fabricação do silício metálico, das ligas de ferro-silício e de outras ligas de silício. O silício e as suas ligas são produzidos em fornos de arco elétrico imerso onde o quartzo é reduzido na presença de carvão. Como esse gás escapa para a parte superior da carga, ele resfria, condensa e oxida na forma de partículas finíssimas de sílica (Aitchin [9]).

Os efeitos benéficos da sílica ativa na microestrutura e nas propriedades mecânicas do concreto são devidos não apenas à reação pozolânica, mas também ao efeito físico das partículas de sílica ativa, o qual é conhecido como “efeito filler” (Sillevoid [10]). Além disto, a sílica ativa tem um efeito químico relacionado com a formação de cristais de portlandita, Ca(OH)₂ (Groves [11]).

Devido à sua finura, as partículas de sílica ativa preenchem os vazios entre as partículas maiores de cimento. Diz-se que o efeito filler é também responsável pelo aumento da fluidez do concreto com relações água/cimento muito baixas. Além de diminuir a exsudação e ter efeito fluidificante a combinação dos diferentes modos de ação da sílica ativa no concreto resulta numa microestrutura densa (Regourd [12]) com uma ligação íntima entre agregados e a pasta de cimento hidratada.

Tabela 4 – Agregado miúdo natural

Ensaio	Areia
Granulometria D _{máx} (mm)	2,4
MF	2,11
Massa específica (kg/dm ³)	2,66
Massa específica aparente (kg/dm ³)	1,657
Material pulverulento (%)	0,67
Absorção (%)	1,35

A sílica ativa utilizada neste trabalho apresenta as características físicas apresentadas na tabela 2.

Visto que os ganhos de resistência são significativos quando a dosagem de sílica ativa aumenta de 5% para 10% (Aitchin [5]) fixou-se para todos os concretos estudados uma porcentagem em massa de 10% de sílica ativa relativa à massa de cimento.

2.3 Aditivos químicos

Os aditivos químicos redutores de água representam um marco na evolução da resistência do Concreto. O surgimento do CAD está vinculado à nova geração de aditivos químicos que proporcionam uma redução ainda maior da relação água/cimento. Isso se reflete na diminuição da porosidade e do diâmetro dos poros, o que eleva a durabilidade do concreto e diretamente a sua resistência (Almeida [13]).

Neste trabalho foi utilizado um aditivo superplastificante de última geração (a base de éter de policarboxilato) cujas características encontram-se na tabela 3.

Como no caso da adição mineral, a porcentagem de superplastificante utilizado em todos os concretos é relativa à massa de cimento. Além disto, o valor está sempre referido aos sólidos de material especificado para cada tipo de aditivo superplastificante. A dosagem do superplastificante foi fixada em função do ponto de saturação do aditivo, conforme estudado por Toralles-Carbonari (Toralles-Carbonari et al, 2003)[14].

Tabela 5 – Agregado graúdo

Ensaio	Areia de britagem	Brita zero	Brita 1
Granulometria D _{máx} (mm)	4,8	9,5	19,0
MF	3,2	5,68	5,84
Massa específica (kg/dm ³)	2,92	2,917	2,93
Massa específica aparente (kg/dm ³)	1,787	1,535	1,614
Material pulverulento (%)	18,91	3,66	1,75
Absorção (%)	1,44	0,55	1,02

Tabela 6 – Esqueletos Granulares

Esqueleto	Composição (massa)	Massa unitária (kg/dm ³)	Índice de vazios (%)
A	40% AN + 24% B0 + 36% B1	2,089	25,74
B	16% AN + 60% AB + 24% B0	2,07	27,97
C	36% AN + 10% AB + 22% B0 + 32% B1	2,11	25,26

AN = Areia natural; AB = Areia de britagem; B0 = Brita 0; B1 = Brita 1.

2.4 Agregado miúdo

Recomenda-se que o agregado miúdo selecionado seja o mais grosso dentro de seu limite, o que corresponde a um módulo de finura próximo de 3,0 (De Larrard [15]). O uso de uma areia mais grossa é apoiado pelo fato de que todos os concretos de alto desempenho são bastante ricos em partículas finas devido ao seu alto teor de partículas cimentícias.

Não é necessário, portanto, uma areia mais fina do ponto de vista da trabalhabilidade e segregação. Assim, o uso de uma areia grossa leva a um pequeno decréscimo na quantidade de água de mistura necessária para uma dada trabalhabilidade (Aitcin [5]).

O agregado miúdo utilizado no presente trabalho é uma areia natural quartzosa da região de Nova Londrina, Paraná, Brasil cujas características encontram-se na tabela 4.

2.5 Agregado graúdo

No concreto de alto desempenho a resistência é limitada superiormente pela resistência mecânica do agregado graúdo, desta forma, é preferível que a resistência do agregado seja superior à da pasta. No entanto, não deve ser tão elevada em virtude do mó-

dulo de elasticidade do agregado poder ser superior ao da pasta, originando concentração de tensões capazes de provocar fissuras e comprometer a ligação pasta-agregado.

A dimensão máxima do agregado graúdo deve ser reduzida para evitar concentrações de tensões. Sendo assim, é recomendada pela maioria dos autores que a dimensão máxima seja a menor possível, entre 12,5mm e 9,5mm, e que não supere 19 mm (Torales-Carbonari [16], Almeida [13], ACI Committee 363 [17]). Também é recomendado que o agregado graúdo tenha forma retangular e superfície áspera proporcionando maior aderência entre pasta e agregado.

Os agregados graúdos; brita 0 (9,5 mm) e brita 1 (19,0 mm), utilizados no presente trabalho são de origem basáltica coletado na bacia do rio Paraná. As características dos agregados ensaiados encontram-se transcritas na tabela 5.

3. Método

O método utilizado no trabalho foi primeiramente fazer a dosagem dos concretos para a obtenção dos concretos ótimos. Depois, as diferentes dosagens ótimas foram utilizadas para produzir os concretos que em seguida foram ensaiados tanto no estado fresco como endurecido.

Tabela 7 – Ensaio e estimativas teóricas dos diferentes concretos

Concreto	Massa específica (kg/dm ³)	Velocidade de propagação (m/s)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)			
				Extensômetro	Equações		
					Aparelho de ultra-som	NBR 6118	CEB 90
A; 5; 0,25	2,634	5120,98	90,63	46,32	49,73	53,31	44,83
B; 10; 0,25	2,607	4892,97	87,93	41,19	44,94	52,51	44,38
C; 10; 0,25	2,639	5095,68	82,44	44,07	49,34	50,85	43,43
C; 10; 0,30	2,641	5199,36	86,43	46,56	51,4	52,06	44,12
D; 8; 0,30	2,466	4676,65	70,91	30,9	38,83	47,16	41,31
D ¹ ; 8; 0,30	1,957	3762,95	24,83	16,9	19,95	27,9	29,11

D = Concreto de referência para posterior incorporação de espuma; D¹ = Concreto leve feito com espumígeno.

3.1 Dosagem ótima dos concretos estudados

Primeiramente foi feito um estudo da dosagem através da metodologia proposta por Toralles-Carbonari [16] onde a partir da avaliação das três fases que compõem o concreto (pasta, esqueleto granular e combinação pasta-esqueleto), foi definida a dosagem ótima.

Para o estudo foram dosados 24 concretos com 4 esqueletos granulares distintos, 4 porcentagens de pasta e 2 relações água/cimento. A variação de tantos aspectos constitutivos teve como intuito avaliar a aplicabilidade do método ultra-sônico para a estimativa da resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

A nomenclatura a ser adotada para referenciar cada tipo de concreto, segundo suas características de dosagem, consiste de três termos separados entre si por “;”. [Tabela 6].

O primeiro termo refere-se ao esqueleto granular utilizado; o segundo, à por-

centagem de pasta para preencher os vazios do dado esqueleto granular e o terceiro termo será relação água/cimento. Assim tem-se, por exemplo, A; 15; 0,30 que se refere a um concreto composto pelo esqueleto granular A (tabela 6), com excedente de pasta de 15% e relação água-cimento 0,30.

3.2 Ensaios no estado fresco

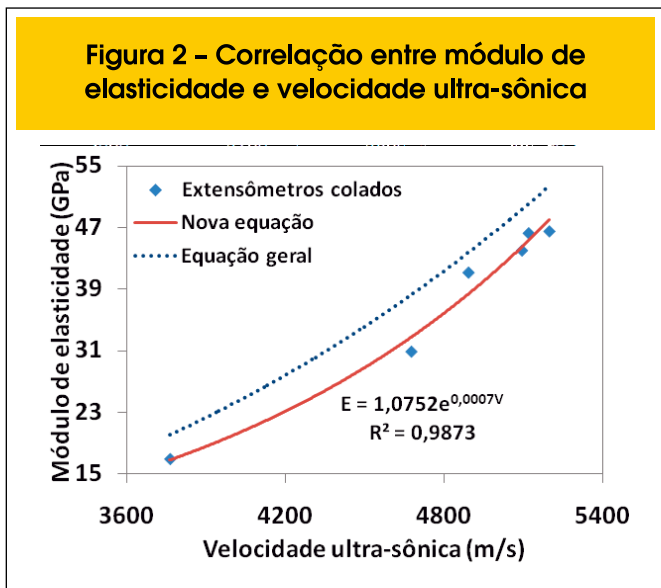
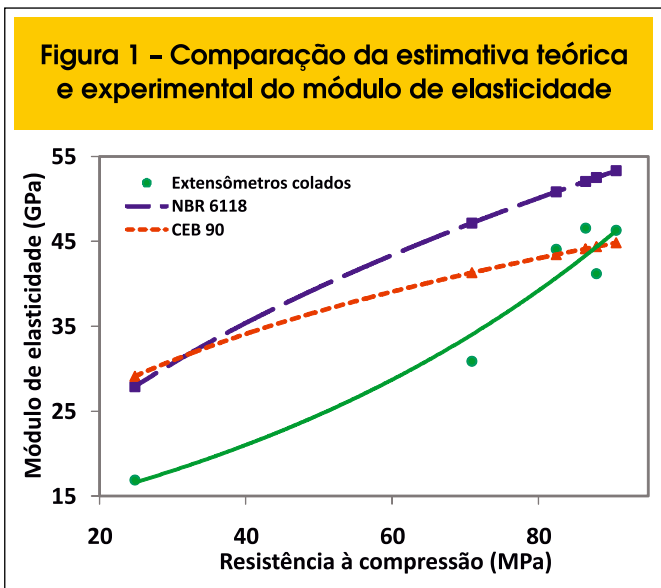
Para a verificação das propriedades no estado fresco são realizados os seguintes ensaios: massa específica (NBR 9778 [22]), consistência através do cone de Abrams (NBR 7223 [18]) e teor de ar incorporado (NBR 11686 [23]).

3.3 Ensaios no estado endurecido

As propriedades no estado endurecido foram avaliadas através

Tabela 8 – Ensaios realizados no estado fresco e endurecido

Concreto	Velocidade de propagação (m/s)	Ar incorporado (%)	Absorção total (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (kg/dm ³)	Resistência à compressão (MPa)
A; 0; 0,25	5069,72	5,8	1,081	2,76	2,625	69,01
A; 5; 0,25	5120,98	1,6	1,59	4,021	2,634	90,63
A; 10; 0,25	5076,14	2	1,584	4,01	2,637	67,2
A; 15; 0,25	5003,46	0,5	2,219	5,521	2,635	69,36
A; 0; 0,30	5154,64	6	1,443	3,393	2,604	70,03
A; 5; 0,30	5159,17	1	1,569	3,389	2,648	84,27
A; 10; 0,30	5102,06	2	1,784	4,529	2,66	73,86
A; 15; 0,30	5073,17	3,5	2,429	6,041	2,648	70,07
B; 5; 0,25	4747,63	4,6	3,838	9,245	2,66	42,22
B; 10; 0,25	4892,97	2,8	1,659	4,147	2,607	87,93
B; 15; 0,25	4898,96	1,8	1,667	4,147	2,596	94,51
B; 0; 0,30	4773,32	2,7	2,802	6,938	2,661	57,58
B; 5; 0,30	4848,49	3,6	1,863	4,656	2,621	83,12
B; 10; 0,30	4878,99	1,5	2,831	6,954	2,64	95,06
B; 15; 0,30	4765,11	1,6	2,888	7,131	2,658	92,87
C; 5; 0,25	4971,03	5,4	2,128	5,312	2,642	65,28
C; 10; 0,25	5095,68	2,6	1,462	3,716	2,639	82,44
C; 10; 0,30	5199,36	2,3	2,221	5,542	2,641	86,43
C; 15; 0,30	5047,02	1,3	2,103	5,262	2,643	90,6
D; 8; 0,30	4676,65	3,9	1,88	4,38	2,466	70,91
D ¹ ; 8; 0,30	3762,95	19	2,11	4,11	1,957	24,83
D ² ; 8; 0,30	3373,41	22	2,5	4,28	1,787	14,51
D ³ ; 8; 0,30	3687,99	20	2,1	3,82	1,895	18,82
D ⁴ ; 8; 0,30	4012,76	15	1,93	3,84	2,056	27,52



dos seguintes ensaios: resistência à compressão segundo NBR 5739 [19]; com extensômetros colados, NBR 9778 [20]; com ultrassom, NBR 8802 [21] e absorção por imersão, NBR 9778 [20]. Cabe destacar, que a determinação do módulo de elasticidade foi feita pela estimativa teórica através das equações do aparelho ultra-sônico (1), NBR 6118 [2] (2), CEB 90 [1] (3), e por meio de ensaios com extensômetro colado. O custo elevado dos extensômetros colados restringiu o número de corpos de prova de concreto ensaiados. Na tabela 7 encontram-se os resultados obtidos pelas estimativas teóricas e pelo ensaio.

$$E_c = \frac{V^2 \cdot \delta \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$E_c = 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

$$E_c = 2,15 \times 10^4 \sqrt[3]{\frac{f_{c28}}{10}} \quad (3)$$

Onde:
 E_c = Módulo de elasticidade do concreto em MPa;
 V = Velocidade ultra-sônica em m/s;
 δ = Massa específica do concreto em kg/dm³;
 ν = Coeficiente de Poisson estimado em 0,20 para os concretos ensaiados;
 f_{ck} = Resistência característica a compressão em MPa, f_{ck} = f_{c28}, por simplificação;
 f_{c28} = A resistência média aos 28 dias em MPa;

A resistência a compressão foi determinada segundo a NBR 5739 [19] e os resultados estão apresentados na tabela 8. Na referida tabela também estão apresentados os resultados dos ensaios de ultra-som, ar incorporado, absorção e massa específica que subsidiaram a análise final.

4. Análise dos resultados

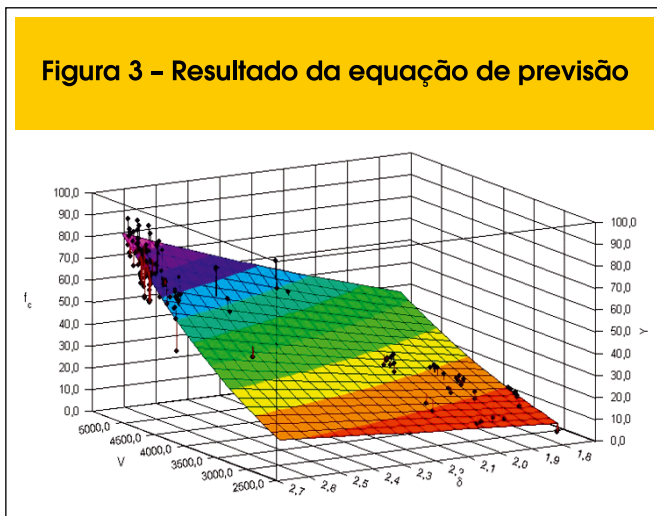
4.1 Avaliação do módulo de elasticidade

Comparando-se os resultados do módulo de elasticidade obtido através das equações da CEB 90 [1] e da NBR 6118 [2] observa-se que a primeira se aproxima com maior precisão das medidas tomadas nos ensaios com os extensômetros colados, principalmente para concretos de resistência superior a 50 MPa, tal como mostra a figura 1. Todavia, as equações encontram-se distantes dos valores experimentais para concretos de resistência menores, ou seja, os concretos leves de alto desempenho. Justifica-se tal comportamento devido à microestrutura esponjosa destes concretos.

Tabela 9 - Resultados da avaliação estatística

Variáveis	Fator de Importância
Velocidade de propagação	0,972
Ar incorporado	-0,984
Absorção total	-0,195
Índice de vazios	0,134
Massa específica	0,974
Resistência à compressão	0,920

Figura 3 – Resultado da equação de previsão



Contudo, cabe ressaltar a significativa imprecisão cometida por ocasião do uso das citadas equações normativas para a estimativa do módulo de elasticidade nos concretos leves de alto desempenho. Assim, apesar de apresentarem resistência comparáveis aos concretos convencionais, os concretos leves se caracterizam por sua estrutura diferenciada que resulta em uma menor massa específica, impedindo qualquer abstração.

Baseado nas medidas do módulo de elasticidade obtido nos ensaios com extensômetros colados e nas medidas de velocidades ultra-sônicas registradas foi possível estabelecer uma correlação aplicável a concretos de alto desempenho e concretos leves de alto desempenho tal como se apresenta na figura 2. Nota-se que apesar de considerar concretos com características bastante diferentes, o nível de correlação encontrado foi elevado.

Na figura 2 também se compara o módulo de elasticidade obtido através da velocidade ultra-sônica, por meio da correlação determinada anteriormente, e pela equação do aparelho ultra-sônico. Verifica-se que a ampla diferença entre as curvas equivale ao transladado da curva da equação geral do aparelho em 5 GPa para menos.

4.2 Avaliação da resistência a compressão

Buscou-se inicialmente determinar do conjunto de variáveis ensaiadas (velocidade ultra-sônica, teor de ar incorporado, massa específica, índice de vazios, absorção por imersão) aquelas que estatisticamente apresentavam alguma influência nos valores encontrados da resistência a compressão.

Para tanto, realizou-se uma análise estatística do peso de variáveis múltiplas em todos os concretos ensaiados. Tal análise permite avaliar a correlação existente entre os diferentes parâmetros medidos e quantificar o nível de interdependência entre eles. Com esse intuito, empregou-se o coeficiente de Pearson e o Método do Fator Principal de forma iterativa com o programa XLSTAT. Em seguida, aplicou-se a rotação Varimax para facilitar a interpretação dos resultados que se representam através do fator de importância.

O principal resultado deste teste encontra-se na tabela 9 que mostra o grau de importância da correlação entre as diferentes variáveis. Cabe destacar variáveis com elevado nível de interdependência apresentam um coeficiente de importância próxima de 1.

A análise da referida tabela evidencia que, contrariamente ao esperado, o índice de vazios não apresentou significativa importância conjunta, tão pouco boa correlação com a velocidade ultra-sônica e a resistência à compressão. O mesmo também foi observado para a absorção total e o teor de ar incorporado.

Por outro lado, observa-se um alto nível de interdependência entre as variáveis: resistência à compressão, massa específica e velocidade ultra-sônica. Assim modelou-se um número suficiente de equações matemáticas tendo como variável dependente a resistência à compressão e como variável independente a velocidade ultra-sônica e a massa específica. Para isso, foram utilizados todos os corpos de prova dos 24 concretos ensaiados nas idades de 3, 7 e 28 dias.

$$f_c = 1,6204 \times 10^{-8} \cdot V^{2,4079} \cdot \delta^{1,7979} \quad (4)$$

Onde:

f_c = Resistência a compressão;

V = Velocidade Ultra-sônica em m/s;

δ = Massa específica do concreto em kg/dm³

A figura 3 mostra a representação gráfica da equação obtida, apesar de contemplar um número significativo de corpos-de-prova com características e idades diferentes, a equação de previsão proposta apresenta um elevado grau de correlação com os dados experimentais ($R^2=0,927$).

5. Conclusões

O presente trabalho mostra que a obtenção de uma boa correlação entre a velocidade ultra-sônica e o módulo de elasticidade é plenamente factível. Todavia, são necessários mais ensaios para uma análise estatística mais completa da correlação, bem como, para a consideração de outras variáveis independentes que possam influir no valor do módulo de elasticidade.

Nota-se claramente que as equações da CEB 90 [1] e da NBR 6118 [2] não se encontram devidamente calibradas para estimar o módulo de elasticidade dos concretos leves de alto desempenho. Além disso, observou-se que a estimativa do módulo de elasticidade através da equação do aparelho ultra-sônico apresenta uma diferença aproximadamente constante de 5 GPa com respeito à estabelecida neste trabalho.

Das variáveis independentes consideradas na análise estatística dos dados, somente a velocidade ultra-sônica, a massa específica e a resistência à compressão apresentaram um grau de interdependência significativo. No entanto, mais estudos são necessários para identificar a causa da não importância do índice de vazios, pois se esperava que esse parâmetro tivesse maior influência na leitura ultra-sônica.

Cabe ressaltar que foi possível modelar, com bom nível de correlação, uma equação para estimativa da resistência à compressão a partir da velocidade ultra-sônica para concretos de características diferentes e em diversas idades.

6. Agradecimentos

Frente a sua contribuição para a realização do presente estudo, se

presta o merecido agradecimento à Camargo Corrêa pela doação do cimento e da sílica ativa; à Basf pelo aditivo superplastificante; à Pedreira Expressa pelos agregados; à Fundação Araucária e à Universidade Estadual de Londrina pelas bolsas de iniciação científica.

7. Referências bibliográficas

- [01] COMITÉ EURO/INTERNACIONAL DU BÉTON. FIP Model Code, Final Draft, Bulletin D'Information N, 203, 204 e 205. Paris, 1990.
- [02] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e execução de obras de concreto simples, armado e protendido – Procedimento - NBR 6118/07, Rio de Janeiro, 2003.
- [03] METHA, P. D., and P. C. AITCIN, CEM. - Concrete Aggregates. *In: American Society for Testing Materials, J.*, Philadelphia, PA, 1990, v.12, n.2, p. 70-78.
- [04] MEHTA, P. K., E MONTEIRO, P. J. M. - Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo, IBRACON, 2008.
- [05] AÍTCIN, P. C. Concreto de alto desempenho - Tradução de Geraldo G. Serra, São Paulo: PINI, 2000. 667p.
- [06] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. – NBR NM 58, Rio de Janeiro, 1996.
- [07] AGUILAR, M. T. P.; SILVA A. P.; CORRÊA E. C. S.; CETLIN P. R. - Análise da capacidade de deformação do concreto: Módulo de Young x Módulo de Deformação – *In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, 2006.
- [08] American Concrete Institute - ACI Committee 318/2005.
- [09] AITCIN, P. C. - Sur lês propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut-fourneau de fonte Thomas et leur utilisation dans lês mortiers em béton. *In: Revue des Matériaux de Constrution*. Mai, 1969. p. 185-194.
- [10] SLLEVOLD, E. - The Function of Condensed Silica Fume in High-Strength Concrete. *In: Symposium on Utilization of HSC*, Trondheim, Norway, ISVN 82-519-0797-7, June, 1987. p. 39-50.
- [11] GROVES, G. W. AND RICHARDSON, I. G. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 1191-6, 1994.
- [12] REGOURD, M. - Pozzolanic activity of condensed silica fume, in *Condensed Silica Fume. Lês Édition de l'université de Sherbrooke*, Université de Sherbrooke, Québec, Canadá, ISBN 2-7622-0016-4, 99. 20-4, 1983.
- [13] ALMEIDA, I. R. - Concretos de Alto Desempenho, A evolução tecnológica dos concretos tradicionais. São Paulo, 1997. CD-ROM.
- [14] TORALLES-CARBONARI, M.B.; ELIAN, M.M.S.; CARBONARI, G. - Influência da compacidade do esqueleto granular no consumo de pasta e nas propriedades do CAD. *In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto*, p.1-12, 2003.
- [15] DE LARRARD AND F., MALIER, Y. - Engineering Properties of Very High-Performance Concrete, High Performance Concrete: From Material to Structure. Book edited by Yves Maier, 1992.
- [16] TORALLES CARBONARI, M. B. - "Estúdio Paramétrico de Variables y Componentes relativos a la Dosificación y Producción de Hormigones de Altas Prestaciones.", Tese de Doutorado, ETSECCPB – Universitat Politècnica de Catalunya, Departament D'Enginyeria de la Construcció, Barcelona, Espanha, Outubro, 1996. p.179. 1996
- [17] American Concrete Institute - Committee 363. State of the Art Report High-Strength Concrete. *ACI Journal* 81(4), p364-411.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação da Consistência pelo abatimento do tronco de cone. – NBR 7223, Rio de Janeiro, 1992.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ensaio de Compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto, Método de Ensaio. – NBR 5739, Rio de Janeiro, 2007.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação da Absorção de Água por imersão, Índices Vazios e Massa Específica - Método de Ensaio. – NBR 9778, Rio de Janeiro, 2005.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. , Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. – NBR 8802, Rio de Janeiro, 1994.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. , Argamassa e Concreto Endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. - NBR 9778, Rio de Janeiro, 1987.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. , Concreto Fresco – Determinação do teor de Ar pelo Método Pressométrico.- NBR 11686, Rio de Janeiro, 1990.