

# Aplicação de ondas ultra-sônicas na detecção das primeiras fissuras em vigas de concreto armado e na avaliação da resistência à compressão

Vladimir José Ferrari<sup>1\*</sup> e Ivo José Padaratz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Maringá, campus de Cidade Gaúcha. <sup>2</sup>Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. \*Autor para correspondência. Rua Demétrio Ribeiro, 364, Apto 401, 87030-090, Maringá, Paraná, Brasil. e-mail: vladimirjf@hotmail.com

**RESUMO.** O método de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas é uma técnica que envolve a propagação de ondas através do material que se quer avaliar e é caracterizado por ser um método de ensaio não destrutivo, podendo ser utilizado para avaliar a qualidade do material concreto. Através do uso desse método, é possível, por exemplo, obter *in situ* a espessura de lajes de concreto e estimar a resistência à compressão do concreto. Este trabalho tem por objetivo apresentar resultados da aplicação do método de propagação de ondas ultra-sônicas na detecção das primeiras fissuras em vigas de concreto armado solicitadas à flexão simples. O método é também utilizado para avaliar a resistência à compressão do concreto. Os resultados comprovam que o método de propagação de ondas ultra-sônicas pode ser utilizado para estimar a resistência à compressão do concreto e, se corretamente utilizado, pode ser útil em ensaios de flexão de vigas de concreto armado para detecção do início de fissuração do concreto.

**Palavras-chave:** ondas ultra-sônicas, concreto, vigas de concreto armado.

**ABSTRACT.** Ultrasonic waves in the detection of first cracks in strengthened concrete beams and on strength evaluation. The ultrasonic waves velocity method is a technique that is related to the propagation of the waves through the material that is being evaluated. It is considered a nondestructive test and can also be utilized to evaluate the quality of the concrete. Through this method it is possible, for example, to obtain the thickness of concrete slabs and to estimate the strength of concrete. This research aims to present results obtained through the application of ultrasonic waves propagation method in the detection of the first cracks in strengthened concrete beams (solicitadas à flexão simples). The method is also used to evaluate the strength of concrete during the first days. The results show that the method can be used to estimate the strength of concrete and, if correctly used, can be useful in strengthened concrete beams tests to detect first cracks.

**Key words:** ultrasonic waves, concrete, strengthened concrete beams

## Introdução

Os tecnólogos do concreto sempre despenderam atenção especial à possibilidade de determinação das propriedades do concreto através de ensaios não-destrutivos. Em 1960, métodos foram propostos para uso em laboratório, com corpos de prova através de técnicas vibracionais. Tais métodos foram desenvolvidos por autores como Powers, Obert, Hornibrook e Thomson (Naik e Malhotra, 1991, *apud* Meneghetti, 1999). A Segunda Guerra Mundial acelerou as pesquisas com relação aos testes não-destrutivos usando ondas ultra-sônicas. Segundo Meneghetti (1999), o desenvolvimento do método de propagação de ondas ultra-sônicas começou

simultaneamente no Canadá e na Inglaterra: Leslie e Cheesman desenvolveram um instrumento chamado sinoscópio, enquanto na Inglaterra, Jones desenvolveu o teste ultra-sônico e, no início da década de 70, surgiu o PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non Destructive Indicating Tester*), um aparelho portátil, de pouco peso, com bateria própria e com a apresentação do tempo de propagação da onda ultra-sônica em mostrador digital.

Logo após o surgimento da técnica, muitos pesquisadores estabeleceram os fatores influentes no método e, talvez pela grande quantidade desses fatores e pelos maus resultados muitas vezes encontrados, esses pesquisadores perderam o estímulo para novas pesquisas. Hoje em dia, com a

possibilidade de análise conjunta com outras técnicas não-destrutivas e com a necessidade de conhecimento rápido das propriedades dos materiais, esse assunto voltou a ser objeto de novas pesquisas.

O aumento da utilização de concretos de alta resistência na construção civil, o período de tempo relativamente longo exigido pelos ensaios de resistência à compressão em corpos-de-prova, a insegurança quanto ao fato de que as condições de conservação dos corpos-de-prova em laboratório não representam, satisfatoriamente, a realidade da obra, provocando desvios importantes nos resultados de resistência do concreto, o caráter destrutivo da extração de corpos de prova para avaliação do desempenho da estrutura em serviço contribuem para a necessidade de surgimento de testes mais rápidos que possibilitem a avaliação das propriedades do concreto nas primeiras idades.

Particularmente, o ultra-som é um teste verdadeiramente não-destrutivo, pois a sua técnica envolve a propagação de ondas ultra-sônicas que não resultam em dano algum ao elemento que é testado. Em estruturas de concreto, segundo Naik e Malhotra (1991), *apud* Meneghetti (1999), o método pode ter as seguintes aplicações:

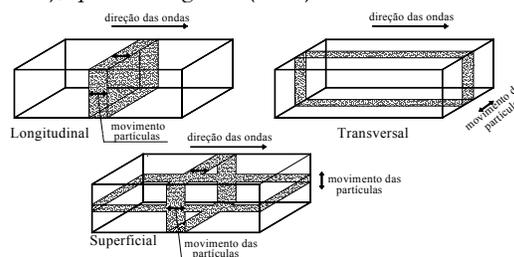
- estimar a resistência à compressão do concreto, devido a grandes diferenças de densidade que ocorrem logo nas primeiras idades, oriundas do processo de hidratação do cimento, as quais provocam mudanças significativas na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas;
- determinar o módulo de elasticidade dinâmico do material;
- avaliar a homogeneidade do concreto;
- detectar a presença de fissuras e trincas.

Neste trabalho, o método de propagação de ondas ultra-sônicas é utilizado para detecção das primeiras fissuras em vigas de concreto armado solicitadas à flexão simples e, também, para avaliar a resistência à compressão do concreto.

### Princípio básico de funcionamento do ultra-som

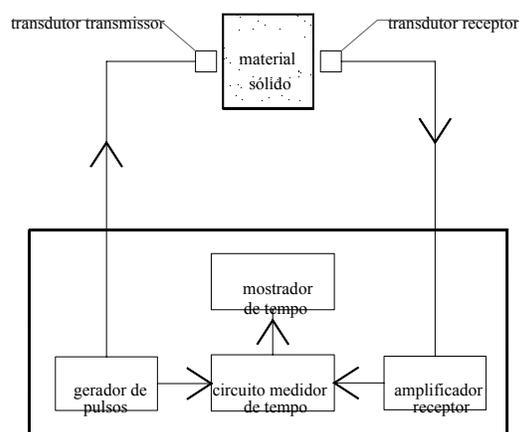
Quando impulsos mecânicos são aplicados a materiais sólidos, três diferentes tipos de ondas são gerados. Cada tipo de onda ocasiona um movimento específico das partículas no meio de transmissão, neste caso, o concreto. Os tipos de onda são geralmente conhecidos como longitudinal (compressão), transversal (cisalhamento) e de superfície, conforme mostra a Figura 1. Essas ondas são produzidas por transdutores eletroacústicos acoplados à superfície do concreto (Naik e Malhotra,

1991), *apud* Meneghetti (1999).



**Figura 1.** Tipos de ondas geradas no interior de um material sólido (Naik e Malhotra, 1991).

Um transdutor eletroacústico ligado a um circuito eletrônico recebe estímulo para oscilar mecanicamente, pois o circuito emite pequenos pulsos elétricos ao transdutor, excitando o cristal na sua frequência natural. Essa vibração gera as ondas ultra-sônicas capazes de atravessar o material em estudo (Bungey, 1982 *apud* Meneghetti, 1999). O equipamento de teste basicamente é composto, conforme ilustra a Figura 2, por um circuito eletrônico capaz de gerar os pulsos, que são transformados em ondas ultra-sônicas transmitidas para o concreto e recebidas por um transdutor-receptor, sendo então amplificadas e transformadas em pulsos elétricos novamente para medir o tempo de propagação.

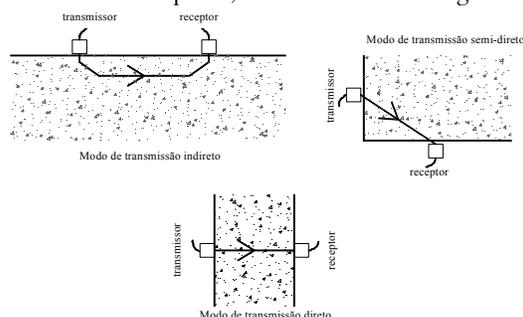


**Figura 2.** Esquema de funcionamento do ultra-som (Naik e Malhotra, 1991).

Para transmissão ou recepção do pulso, os transdutores devem estar completamente em contato com a superfície, caso contrário, a camada de ar existente introduzirá um erro na leitura do tempo. Esse erro surgirá pelo fato de que somente uma quantidade desprezível de pulso pode ser transmitida pelo ar.

Segundo Bungey (1982), *apud* Meneghetti

(1999), os transdutores (um transmissor de ondas e outro receptor) podem ser dispostos em: (1) modo de transmissão direta, quando os pulsos são gerados por transdutores em faces opostas; (2) transmissão semidireta, quando estão perpendiculares entre si; (3) transmissão indireta, quando os transdutores estão no mesmo plano, conforme ilustra a Figura 3.



**Figura 3.** Modos de transmissão dos pulsos (Bungey, 1982), *apud* Meneghetti (1999).

Vários são os fatores que afetam a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico, podendo ser divididos em duas categorias: (1) fatores que afetam as propriedades do material, tais como: agregados, tipo de cimento, relação água/cimento, condições de cura e idade do concreto e (2) fatores independentes das propriedades do material: temperatura do concreto, umidade, distância de propagação da onda, tamanho e forma do elemento, nível de tensão e presença de armadura. Os testes de velocidade do pulso ultra-sônico são relativamente fáceis de serem conduzidos, entretanto o mais importante é saber interpretar os resultados.

### Programa experimental

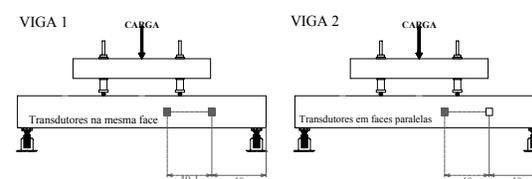
Dois vigas de concreto armado de seção transversal retangular de  $0,12 \times 0,25\text{m}^2$  e  $1,95\text{m}$  de comprimento, sendo  $1,80\text{m}$  entre apoios, foram executadas e submetidas a esforços de flexão através de uma prensa hidráulica de acionamento elétrico, conforme mostra a Figura 4. Através da prensa, foi aplicada uma carga conhecida em um perfil metálico, bi-apoiado sobre a face superior da viga ensaiada, transmitindo, dessa maneira, a carga desejada para a viga.

As cargas foram aplicadas segundo incrementos de  $5\text{ kN}$ , até que fosse atingida a carga de ruína do elemento. A cada incremento de carga, com o objetivo de detectar de forma mais precisa (pois a visualização a olho nu é imprecisa) o aparecimento das primeiras fissuras de flexão nas vigas ensaiadas, foram realizadas leituras com o ultra-som. A Figura 5 ilustra as posições de leituras dos transdutores

durante a realização dos ensaios nas vigas.



**Figura 4.** Esquema de ensaio.

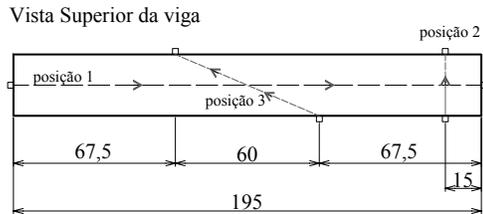


**Figura 5.** Posições dos transdutores nas vigas durante o ensaio de flexão.

Neste programa experimental, o ultra-som também foi utilizado para acompanhar a evolução de propagação das ondas ultra-sônicas com a idade e a resistência dos corpos-de-prova moldados no dia de concretagem das vigas. Para a viga 1, foram moldados oito corpos de prova cilíndricos de  $10\text{cm}$  de diâmetro por  $20\text{cm}$  ou  $22\text{cm}$  de altura (alguns moldes disponíveis possuíam  $22\text{cm}$  de altura) e, para a viga 2, foram moldados apenas seis corpos-de-prova, devido a um desperdício de concreto ocorrido durante a concretagem desta viga. Durante o período de cura das vigas, foram realizadas, através do ultra-som, leituras do tempo de propagação das ondas ultra-sônicas, com o objetivo de acompanhar a evolução dessas ondas e estimar a resistência do concreto com base nos valores obtidos para os corpos-de-prova. As leituras nas vigas deram-se sempre em três posições pré-determinadas, ilustradas através da Figura 6. Essas posições de leitura foram idealizadas de forma a permitir a propagação das ondas no sentido do eixo da viga (acompanhando a armadura longitudinal), no sentido transversal a esta armadura e diagonalmente a estas, respectivamente, posições 1, 2 e 3. A Figura 7 mostra como eram realizadas as leituras.

O instrumento de medição utilizado era composto basicamente de um sistema capaz de emitir pulsos elétricos de baixa frequência ultra-sônica e com alta estabilidade e precisão de leitura da ordem de  $0,1\mu\text{s}$ . Acoplados a esse sistema existia um

transdutor-emissor, constituído por um cristal piezoelétrico, que possibilitava a transformação do pulso elétrico em onda ultra-sônica na faixa de 20 a 500 KHz e, um transdutor-receptor capaz de transformar a onda recebida em pulso elétrico novamente, com amplificação adequada ao circuito gerador receptor. A Figura 8 ilustra o aparelho de ultra-som utilizado nas medições.



**Figura 6.** Posições dos transdutores nas vigas durante período de cura.



**Figura 7.** Detalhe das leituras nas posições 2 (acima) e 3 (abaixo).



**Figura 8.** Aparelho de ultra-som utilizado.

Foi utilizado um concreto convencional, de resistência característica igual a 22 MPa, sendo o traço executado com cimento CP-V-ARI, areia média e brita 1, com relação água/cimento igual a 0,57. As vigas foram moldadas no mesmo dia, utilizando-se concretos de misturas semelhantes.

A cura do concreto das vigas foi realizada com lançamento de água na superfície das vigas, prática comum nas obras de edificações. As Tabelas 1 e 2 indicam a dosagem e as especificações dos materiais adotados para a confecção do concreto.

**Tabela 1.** Materiais e parâmetros adotados para confecção do concreto.

Dosagem conforme ACI 211	
Slump adotado	8,0 + 1,0cm
Relação água/cimento	0,57
Consumo cimento	381kg/m <sup>3</sup>
Agregado graúdo	912kg/m <sup>3</sup>
Agregado miúdo	797kg/m <sup>3</sup>

**Tabela 2.** Proporções de materiais utilizados na confecção do concreto.

Material	Especificação	Quantidade*
Cimento	CP V-ARI	26,8kg
Arcia	média	56,0kg
Brita	1	64,0kg
Água	potável	15,2kg

\*quantidades necessárias à produção de uma viga (aproximadamente 80 litros de concreto).

## Resultados e discussão

O controle tecnológico do concreto foi realizado fazendo leituras (Tabelas 3 e 4) com o ultra-som e rompendo-se dois corpos-de-prova aos 7, 14, 21 e 29 dias, para obtenção, respectivamente, da resistência do concreto e das correlações (Figuras 9 e 10) entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas no concreto e sua resistência à compressão.

**Tabela 3.** Resultados das leituras de ultra-som e da resistência à compressão do concreto – corpos-de-prova referentes à viga 1.

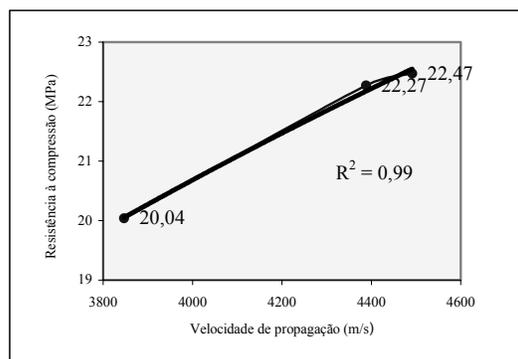
idade	Tempo de propagação (µs)		Resistência à compressão (MPa)
	leitura <sup>1</sup>	velocidade do pulso (m/s) <sup>2</sup>	média
7 dias	46,80	3.847,02	20,04
10 dias	46,82	4.241,38	-
14 dias	45,23	4.388,41	22,27
17 dias	45,48	4.365,72	-
21 dias	44,20	4.491,25	22,47
24 dias	45,60	4.342,24	-
29 dias	46,58	4.250,73	23,14

<sup>1</sup>Valor médio das leituras realizadas em todos os corpos-de-prova. Três leituras para cada corpo-de-prova; <sup>2</sup> Razão entre a distância percorrida pela onda (igual à altura do corpo-de-prova) e seu tempo de propagação.

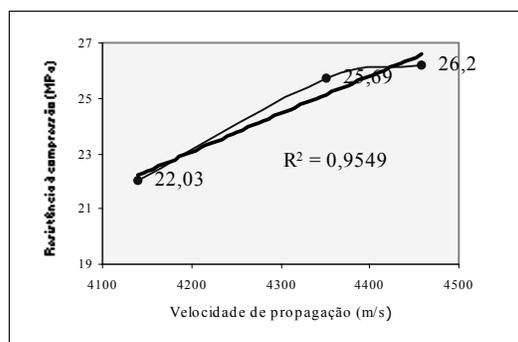
**Tabela 4.** Resultados das leituras de ultra-som e da resistência à compressão do concreto – corpos-de-prova referentes à viga 2.

idade	Tempo de propagação (μs)		Resistência à compressão (MPa)
	leitura <sup>1</sup>	velocidade do pulso (m/s) <sup>2</sup>	média
7 dias	45,90	4.139,46	22,03
10 dias	49,80	4.216,02	-
14 dias	48,27	4.351,26	25,69
17 dias	45,27	4.418,38	-
21 dias	44,87	4.457,97	26,20
24 dias	50,22	4.401,22	-
29 dias	51,93	4.255,68	26,87

<sup>1</sup>Valor médio das leituras realizadas em todos os corpos-de-prova. Três leituras para cada corpo-de-prova; <sup>2</sup> Razão entre a distância percorrida pela onda (igual à altura do corpo-de-prova) e seu tempo de propagação.



**Figura 9.** Correlação entre a resistência à compressão dos corpos-de-prova de concreto (viga 1) e a velocidade dos pulsos.

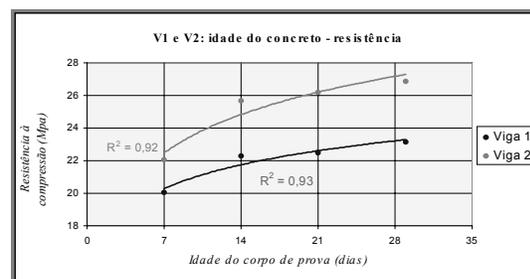


**Figura 10.** Correlação entre a resistência à compressão dos corpos-de-prova de concreto (viga 2) e a velocidade dos pulsos.

Das Figuras 9 e 10, percebe-se que, com o aumento da resistência à compressão dos corpos-de-prova de concreto, esses tendem a se tornarem mais compactos em razão das reações de hidratação do cimento; conseqüentemente, verificou-se, conforme era esperado, um aumento gradativo na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas nesses elementos. Os resultados de leituras com ultra-som nos corpos-de-prova com 29 dias de idade foram suprimidos, devido a esses, por falha, serem retirados

da câmara úmida e submetidos ao ensaio num intervalo de tempo diferente dos demais.

O concreto apresentou resistência compatível com o tipo de dosagem estabelecido, sendo que, aos 7 dias de idade, já apresentava resistência próxima da característica, comprovando a eficiência do cimento, como apresentado na Figura 11.



**Figura 11.** Correlação entre a resistência à compressão do concreto e a sua idade.

Os resultados das leituras realizadas com o ultra-som nas vigas durante o período de cura do concreto estão apresentados nas Tabelas 5 e 6. As Figuras 12 e 14 comparam graficamente os resultados das leituras realizadas nas três posições distintas e as Figuras 13 e 15 apresentam graficamente a correlação entre a velocidade de propagação e a idade dos corpos-de-prova.

**Tabela 5.** Resultados das leituras com ultra-som durante o período de cura da viga 1.

idade	posição	Tempo de propagação (μs)	
		leitura média <sup>1</sup>	velocidade do pulso (m/s) <sup>2</sup>
7 dias	1	515,50	3.847,02
	2	29,10	4.226,80
	3	210,00	2.914,29
10 dias	1	518,57	3.760,41
	2	29,67	4.149,07
	3	162,57	3.764,66
14 dias	1	515,63	3.781,84
	2	29,30	4.198,38
	3	158,83	3.853,33
17 dias	1	516,07	3.778,85
	2	29,13	4.222,31
	3	162,23	3.775,31
20 dias	1	512,63	3.803,90
	2	28,53	4.311,32
	3	156,53	3.909,98

<sup>1</sup>Média de três leituras consecutivas; <sup>2</sup> Razão entre a distância percorrida pela onda e seu tempo de propagação.

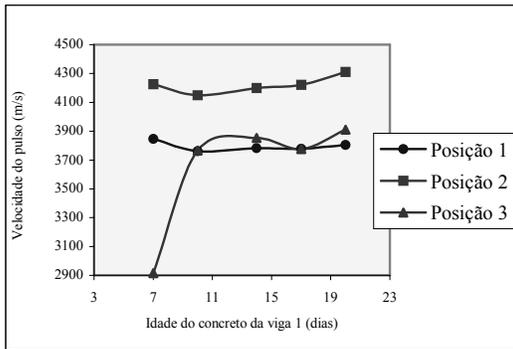
Os dados apresentados na Tabela 5 mostram que, para a posição 1, os valores de velocidade do pulso diminuíram com a idade do concreto e, nas posições 2 e 3, houve apenas uma tendência de aumento dessa velocidade com a idade. Isso indica que a posição 1 mostrou-se a mais sensível à variação dos resultados,

necessitando de ensaios adicionais para análises dos fatores que causaram essa variação, tais como, a propagação do pulso no sentido da armadura, a distância entre transdutores.

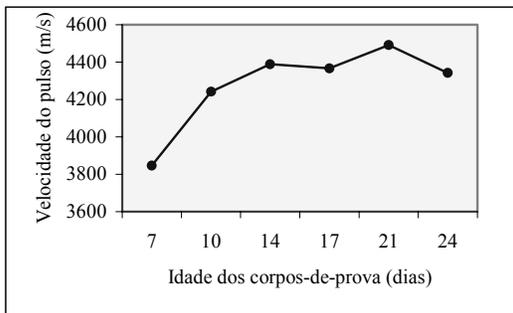
**Tabela 6.** Resultados das leituras com ultra-som durante o período de cura da viga 2.

Tempo de propagação (μs)			
idade	posição	leitura média <sup>1</sup>	velocidade do pulso (m/s) <sup>2</sup>
7 dias	1	528,50	3.689,69
	2	30,70	3.973,94
	3	164,50	3.720,36
10 dias	1	519,97	3.750,40
	2	30,83	3.989,25
	3	167,33	3.657,45
14 dias	1	508,17	3.837,56
	2	30,17	4.077,42
	3	166,30	3.680,19
17 dias	1	511,80	3.810,44
	2	30,27	4.064,00
	3	161,93	3.779,51
20 dias	1	510,03	3.823,29
	2	30,07	4.090,98
	3	161,10	3.798,89

<sup>1</sup>Média de três leituras consecutivas; <sup>2</sup> Razão entre a distância percorrida pela onda e seu tempo de propagação.



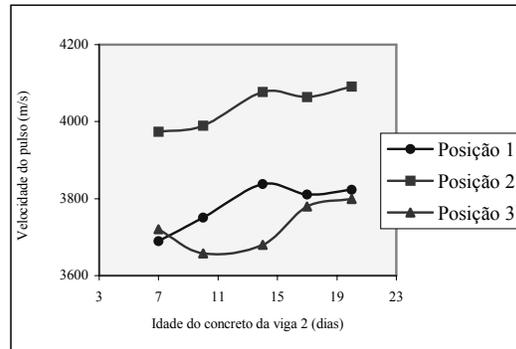
**Figura 12.** Correlação entre a velocidade de propagação do pulso e a idade do concreto da viga 1.



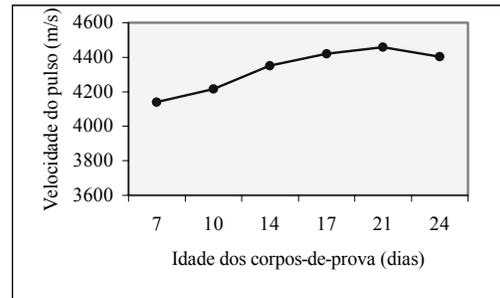
**Figura 13.** Correlação entre a velocidade de propagação do pulso e a idade do corpo-de-prova – viga 1.

Os resultados de velocidade de propagação das

ondas ultra-sônicas para os corpos-de-prova foram diferentes dos resultados obtidos para as vigas durante o período de cura, conforme ilustrado nas Figuras 12 a 15. Entretanto, para as vigas, os resultados obtidos através da posição 2 foram os que mais se aproximaram dos corpos-de-prova. Já a posição 1 foi a que apresentou maior dispersão dos resultados em relação aos corpos-de-prova.



**Figura 14.** Correlação entre a velocidade de propagação do pulso e a idade do concreto da viga 2.



**Figura 15.** Correlação entre a velocidade de propagação do pulso e a idade do corpo de prova – viga 2.

As Figuras 16 e 17, a seguir, mostram os resultados obtidos através das leituras realizadas com o ultra-som nas vigas de concreto armado submetidas a ensaio de flexão simples. Na viga 1, primeira viga ensaiada, ambos os transdutores do ultra-som foram posicionados na mesma face lateral. Já na viga 2, os mesmos foram dispostos em faces opostas, idêntico à posição 2 descrita na Figura 6.

Para a viga 1, percebeu-se uma alteração considerável na leitura com o ultra-som no instante de fissuração do concreto, entretanto não foi possível detectar exatamente o valor da carga correspondente, devido aos intervalos adotados para realização das leituras. Após a fissuração, as velocidades de propagação das ondas decresceram com a aplicação de carga. Isso se justifica pelo aumento do número

de fissuras no concreto, provocando aumento no tempo de propagação das ondas. Na viga 2, no instante da fissuração, a leitura com ultra-som não apresentou alteração significativa.

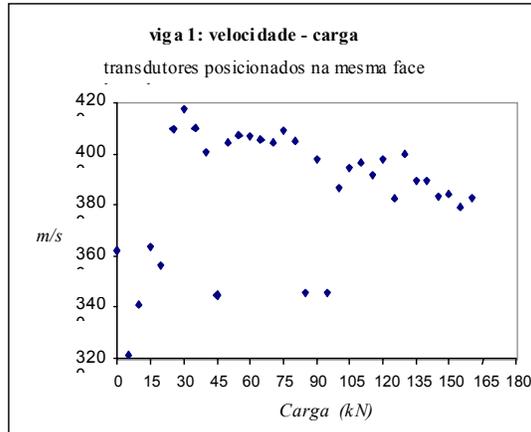


Figura 16. Evolução de propagação da onda ultra-sônica durante solicitação da viga 1.

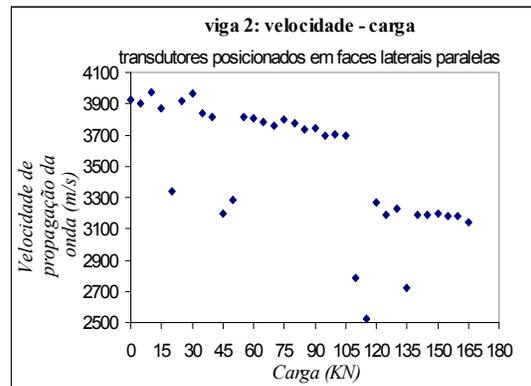


Figura 17. Evolução de propagação da onda ultra-sônica durante solicitação da viga 2.

**Conclusão**

- O ultra-som pode ser útil na detecção precisa do início de fissuração em vigas de concreto armado ensaiadas à flexão simples. Para isso, as leituras devem-se dar de forma contínua, sem intervalos;
- Para detecção das primeiras fissuras, as leituras obtidas com os transdutores posicionados na mesma face lateral apresentaram melhor sensibilidade.

**Referências**

MENEGHETTI, L. C. *Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas*. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

Received on July 22, 2003.

Accepted on November 25, 2003.