

DISPOSITIVO ELETRÔNICO PARA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Augusto Cesar da Silva Bezerra^{1*}, Rafaela Silva Vasconcelos¹, Marcela Maira Nascimento de Souza Soares², Domingos Sávio Resende^{1†}, Sérgio Luiz da Silva Pithan^{1‡}, Maria Teresa Paulino Aguilár²

1 - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Araxá, Avenida Ministro Olavo Drummond, 25, São Geraldo, Araxá, Brasil, email: {^{*}augustobezerra, [†]savio, [‡]pithan}@araxa.cefetmg.br

2 - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Avenida Antonio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, Brasil, email: teresa@ufmg.br

Resumo

A engenharia de materiais alcançou muitos avanços. A determinação das propriedades dos materiais com precisão se faz necessária. Os métodos de ensaios não destrutivos desempenham importante papel neste contexto. O objetivo foi estudar os princípios físicos da propagação de ondas mecânicas nos materiais e desenvolver um equipamento para a determinação da curva de vibração natural dos materiais, sendo possível determinar o módulo de elasticidade e estimar a resistência à compressão e a tração. Para a montagem do equipamento foram estudadas novas aplicações para equipamentos e dispositivos eletrônicos existentes, entre eles, osciloscópio digital, gerador de sinais, pastilhas piezelétricas e computador portátil. Com esses equipamentos foi construído um dispositivo que determina a curva de frequência natural de ressonância e a largura de banda de materiais utilizando um processo não-destrutivo. O dispositivo foi utilizado para ensaiar corpos-de-prova de diversos compósitos cimentícios. Os resultados obtidos foram coerentes com os encontrados na literatura.

Palavra-chave: Freqüência ressonante, largura de banda, propriedades dos materiais.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, inúmeras empresas investem tempo em pesquisas procurando conhecer melhor os materiais que serão utilizados, para evitarem futuros erros e patologias que comprometeriam recursos e vidas. Existem disponíveis no mercado diversos equipamentos que realizam ensaios não destrutivos que estimam algumas propriedades mecânicas de certos materiais. Um tipo de equipamento de ensaio não-destrutivo ainda não tão conhecido no Brasil é o de determinação da freqüência ressonante e este não tem fabricante nacional. Por isso, possui um custo relativamente alto, dificultando a utilização por algumas indústrias.

1.1 Equipamentos Eletrônicos

Uma onda mecânica é uma perturbação que se propaga em um meio, que é um material capaz de propagar a energia através das vibrações das partículas que o constituem. A onda pode ser medida por aparelhos eletrônicos que conseguem-se observar um sinal senoidal, caracterizando a amplitude, o comprimento, o vale e a crista da onda mecânica medida.

A largura de banda é a medida da faixa de freqüência, em hertz, de um sistema ou sinal. Em eletrônica corresponde a faixa de freqüência na qual um sistema tem uma resposta em freqüência aproximadamente plana (com variação inferior a 3dB).

A freqüência de ressonância pode ser caracterizada pelo ponto máximo de uma determinada curva, que entra em declínio ao atingir esse valor.

O gerador de sinais é um equipamento que produz tons de baixa freqüência de um valor compreendido entre os 40Hz e os 1000Hz e sinais de rádio freqüência entre 100KHz e 100MHz. O amplificador é um equipamento que utiliza uma pequena quantidade de energia para controlar uma quantidade maior de energia. A relação entre a entrada e a saída de um amplificador, geralmente expressa em função da freqüência de entrada, é denominada função de transferência do amplificador, e a magnitude da função de transferência é denominada de ganho. O captador é um

dispositivo eletrônico que capta vibrações mecânicas e as converte em sinais elétricos que podem ser processados, amplificados, ou gravados.

O osciloscópio consegue reunir automaticamente um conjunto de medidas temporais (período, frequência, largura de pulso, etc.) e de amplitude (valor médio, RMS, pico, etc.) a partir de funções pré-definidas no sistema operacional.

O buzzer é composto de 2 camadas de metal e uma camada interna de cristal piezoelétrico. Ao ser alimentado com uma fonte de sinal, essa camada vibra da mesma frequência recebida, funcionando como uma sirene ou alto-falante. Sua vantagem em relação a altos-falantes comuns é que consome pouca energia em relação à potência sonora, sendo facilmente alimentado com pequenas baterias.

1.2 Propriedades Mecânicas dos Materiais

Para muitos materiais da engenharia, tais como o aço, o comportamento observado tensão-deformação quando um espécime é submetido a um carregamento pode ser dividido em duas porções. Inicialmente, quando a deformação é proporcional a tensão aplicada e é reversível quando descarregado, é chamada deformação elástica. O módulo de elasticidade é definido como a relação entre a tensão e a deformação elástica. Em materiais com uma macroestrutura mais homogênea, como metais, o módulo de elasticidade é uma função das forças de ligações interatômicas e do grau de empacotamento atômico, e não é afetado por mudanças microestruturais. Isto não é totalmente verdadeiro nos materiais com mais de uma fase, heterogêneos, tais como o concreto. O módulo de elasticidade do concreto na compressão varia de 14 a 40 GPa (Metha e Monteiro, 2004). Para a maioria dos metais, este módulo varia entre 45 GPa, para o magnésio, até 407 GPa, para o tungstênio. Os polímeros geralmente possuem módulo de elasticidade bem mais baixos, variando entre 0,007 e 4 GPa. Uma das principais causas das diferenças no valor do módulo de elasticidade dos metais, cerâmicas e polímeros são os diferentes tipos de ligação atômica existentes nestes três tipos de materiais.

O Módulo de elasticidade comumente denominado por estático (E_c) é calculado a partir da inclinação da curva tensão-deformação obtida no regime elástico quando o material é submetido a carregamento uniaxial de compressão ou tração, com velocidade controlada. No caso do concreto, que é um material que não obedece a lei de Hooke, são traçadas retas arbitrárias com o objetivo de se estimar o módulo.

Dependendo da reta utilizada na sua determinação, o módulo estático pode ser tangente ou secante (Almeida, 2005).

Como a curva tensão-deformação do concreto apresenta um comportamento não-linear, existe dificuldade para determinação de um único valor do módulo de elasticidade estático, portanto a utilização de métodos experimentais não-destrutivos, que aplicam vibrações e não interferem diretamente na amostra, fornecem o valor do módulo de elasticidade do material de forma mais precisa. Além disso, o uso do módulo de elasticidade dinâmico é mais adequado para a análise de deformações e tensões das estruturas carregadas dinamicamente, ou daquelas sujeitas a terremotos ou cargas de impacto (Almeida, 2005 e Garaygordóbil, 2003). Se tratando da comparação do módulo de elasticidade estático e dinâmico, METHA e MONTEIRO (2004) afirmam que o “módulo dinâmico”, correspondente a uma deformação instantânea muito pequena, é dado, aproximadamente, pelo módulo tangente inicial, geralmente 20, 30 e 40% maior que o módulo estático de deformação para concretos de alta, média e baixa resistência, respectivamente.

SWAMY e RIGHY (1971) citam que para valores baixos e médios, o módulo dinâmico (E_d) é cerca de 7GPa maior que o estático, enquanto que, para valores mais altos, os dois módulos tendem a um mesmo valor, isso para ensaios de ressonância, e não por de velocidade de propagação.

Para o BSI (1990), concretos com teor de cimento menor que 500kg/m³ ou concretos com agregados de peso normal o módulo estatico (E_c) é:

$$E_c = 3650(f_{ck})^{1/2} \text{ (em GPa)} \quad (1)$$

Para concretos com teor de cimento maior que 500kg/m³ ou concretos com agregados leves:

$$E_c = 1,04E_d - 4,1 \text{ (em GPa)} \quad (2)$$

Para LYNDON e BALENDRAN (1989):

$$E_c = 0,83E_d \quad (3)$$

Outros pesquisadores tentaram estabelecer uma correlação entre o módulo dinâmico e a resistência à compressão do concreto, porém ainda não existe uma relação generalizada, e sim, expressões que dependem do tipo de concreto empregado. Pelo BSI (1990) a relação entre o módulo dinâmico (E_d) e a resistência à compressão (f_{ck}) é dada por:

$$E_d = 7600f_{ck}^{0,33} + 14000 \quad (4)$$

Um ensaio que possibilita calcular o módulo de elasticidade dinâmico é o da medição da frequência natural utilizando a frequência ressonante longitudinal forçada. Ele é pouco difundido no Brasil, mas é normalizado pela ASTM C215 (ASTM, 1991) e pela BS 1881: Parte 209 (BSI, 1990). Neste método o corpo-de-prova é fixado com um excitador colocado numa das extremidades do corpo-de-prova e um coletor na outra extremidade. O excitador é ativado por um oscilador de frequência variável. As vibrações que se propagam dentro do corpo-de-prova são recebidas pelo coletor e sua amplitude é medida por um indicador adequado. A frequência de excitação é variada até que se obtenha a ressonância na frequência fundamental do corpo-de-prova (Neville, 1997). O fenômeno da ressonância ocorre quando a frequência da força de excitação coincide com uma das frequências naturais não-amortecidas do sistema. A amplitude do movimento aumenta progressivamente com um mínimo de excitação exposta (Almeida, 2005).

O equipamento Erudite MKII realiza um sistema de teste de frequência ressonante, no modo longitudinal. Segundo o manual de operação do equipamento ERUDITE MKII (CNS, 1995 e GERMANN INSTRUMENTS, 2007), o módulo de elasticidade dinâmico (E_D) para modo longitudinal em MN/m² é dado pela Equação 5.

$$E_D = 4n^2l^2\rho \times 10^{-12} \quad (5)$$

onde l = comprimento do corpo-de-prova em mm; n = frequência do modo fundamental da vibração longitudinal em Hz; ρ = densidade em Kg/m³.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MONTAGEM DO EQUIPAMENTO

Foi montado um protótipo que utilizou-se um gerador de sinais, buzzers e um osciloscópio digital para realizar a leitura da frequência de ressonância dos compósitos cimentícios. Com o protótipo concluído foi automatizado todo o processo de varredura de frequência, tornando-o completamente automático.

O primeiro passo foi analisar as características internas do gerador de sinais, após análise foi determinada a variação de tensão interna do gerador de -8 a -15v.

Foi utilizado o Microcontrolador PIC16F628A e este teve a função de enviar determinados bits pré-selecionados na programação para um conversor digital

analógico. O conversor analógico teve o objetivo de converter esse sinal digital dos bits do PIC para um sinal de saída analógica. Em seguida, a saída desse conversor DA foi enviada para um amplificador operacional, com o objetivo de amplificar o sinal de saída para facilitar a leitura do gerador. E finalmente, esse último sinal de saída, foi encaminhado para outro amplificador operacional, porém dessa vez com o objetivo apenas de inverter o sinal de saída, pois a máxima tensão que o gerador conseguiria identificar seria de -8v; portanto o último AO teve um ganho unitário para executar esse tipo de função. O projeto do circuito foi esquematizado no software Protheus. Após a esquematização foi iniciada a programação no MPLab. O primeiro Delay utilizado para testes foi o de 30 segundos. A primeira programação foi para setar os determinados bits que seriam utilizados na programação. E no intervalo entre um bit e outro, chamamos o CALL de 30 segundos, que futuramente será substituído por 1 minuto = CALL 1, 1,5 minutos = CALL 2 e 2 minutos = CALL 3. Após a última programação, foi montado o circuito do PIC no módulo para teste com os circuitos do DA, do inversor e do amplificador operacional. O último passo foi a fabricação da placa que acoplaria todos os CIs em um único objeto. Foi compilado o circuito onde as trilhas da placa foram desenhadas, concluindo assim a parte do estudo da varredura automática da frequência.

2.2 CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Para verificação do desempenho do equipamento foram moldados 5 corpos de prova para cada um dos três traços de compósitos cimentícios confeccionados. Na tabela 1 são apresentadas as proporções de materiais.

Tabela 1 - Proporção de materiais utilizada na confecção dos compósitos

Materiais	Descrição	Quantidade de materiais (g)		
		Traço 1	Traço 2	Traço 3
Aglomerante	Cimento Portland III – 40 RS	624,0	624,0	624,0
Agregado miúdo	Areia normal	1.872,0	1.872,0	1.872,0
Água	-	187,2	312,0	436,8
A/C	Relação água-cimento	0,3	0,5	0,7

Os corpos de prova foram mantidos nos moldes durante 24h, e após a desforma submetidos a cura por imersão em água até o dia anterior a realização dos ensaios. Os corpos de prova foram ensaiados aos 28 dias de idade para determinação da

freqüência ressonante pelo equipamento desenvolvido e por um equipamento de mercado importando. Após os ensaios para determinação da freqüência ressonante, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão e os dados encontrados foram analisados e comparados.

3. RESULTADOS

Na Figura 1 apresenta os resultados de absorção de água e índice de vazios dos corpos de prova dos traços confeccionados. O traço 2 ($A/C=0,5$) que utilizou a relação água cimento intermediária apresentou a menor absorção de água e o menor índice de vazios, o que indicaria que o traço 1 ($A/C=0,3$) apresentou consumo de água inferior ao necessário para garantir trabalhabilidade e o traço 3 ($A/C=0,7$) apresentou consumo de água excessivo, o que pode ter causado exsudação e por consequência porosidade.

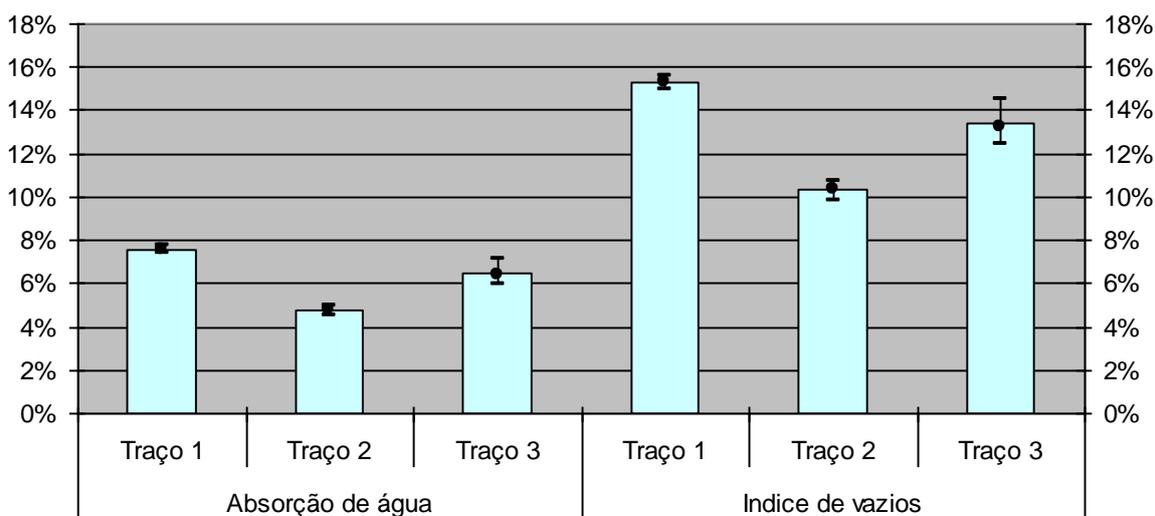


Figura 1 - Absorção de água e Índice de vazios dos compósitos cimentícios

Na Figura 2 são apresentados os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova dos traços confeccionados. O traço 2 foi o que apresentou os melhores resultados, acompanhando a absorção de água e o índice de vazios.

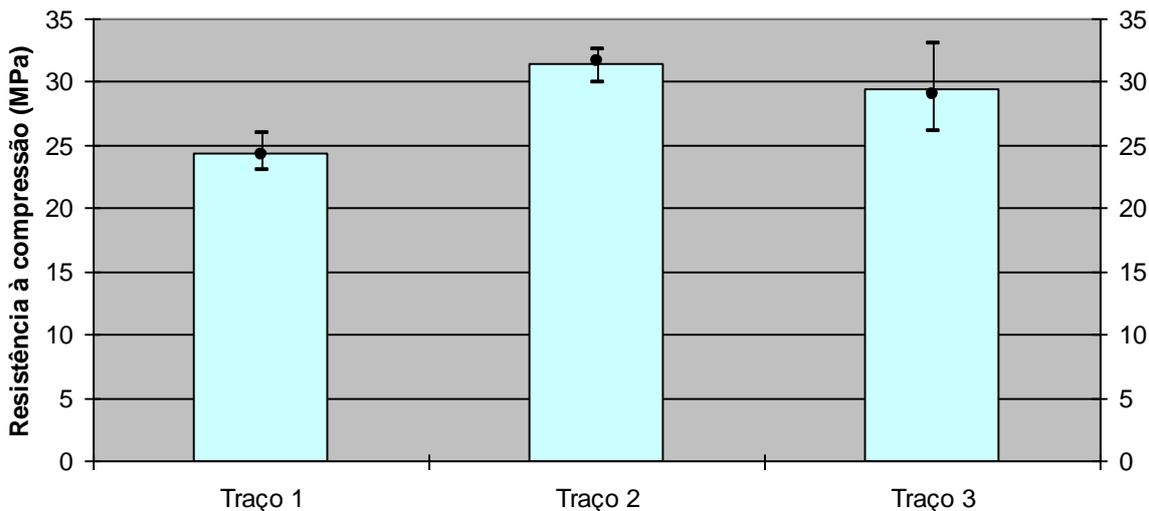


Figura 2 - Resistência à compressão dos compósitos cimentícios

Na Figura 3 são apresentados os resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos corpos de prova dos traços confeccionados. São apresentados os resultados obtidos pelo equipamento desenvolvido pelos autores e por um equipamento comercial (Erudite), percebe-se que os resultados encontrados são coerentes entre si.

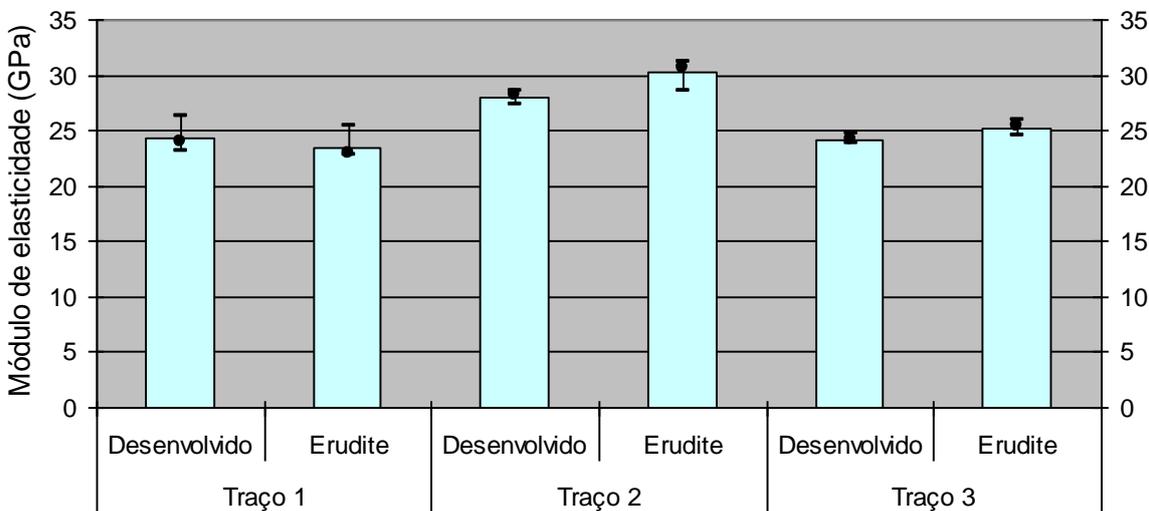


Figura 3 - Módulo de elasticidade dos compósitos cimentícios

Na Tabela 3 são apresentados os resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade teórico obtido pela equação 3, módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo equipamento desenvolvido e pelo Erudite.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas avaliadas

Compósito cimentício	Resistência à compressão (MPa)	MED Teórico Eq. 3 (GPa)	MED Equipamento desenvolvido (GPa)	MED Erudite (GPa)
Traço 1	24,34	21,70	24,34	23,52
Traço 2	31,41	24,65	28,08	30,23
Traço 3	29,47	23,87	24,21	25,26

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho conclui que o desenvolvimento do equipamento para a determinação da frequência ressonante com o objetivo de calcular o módulo de elasticidade dinâmico de compósitos cimentícios obteve sucesso, uma vez que os resultados encontrados foram coerentes com a resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico determinado por outro equipamento de mercado.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) pela bolsa de iniciação científica Junior concedida.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, S. F. Análise dinâmica da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM C215 - Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. Philadelphia, 1991.

- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI) - BS 1881: Part 209 – Testing Concret – Recommendations for the measurement of dynamic modulus of elasticity, 1990.
- CNS ELECTRONICS Operating. Manual of Erudite MK II Resonant Frequency Test System, 1995. 67p.
- GARAYGORDÓBIL, J. C. A. Dynamic Assessment of Structural Building Components. Tese (Doutorado) – Escola Técnica Superior d’Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Canal; Ports de Barcelona. Espanha. 2003.
- GERMANN INSTRUMENTS - NDT Systems for durability assessment, service life estimation, fast-track construction, corrosion survey, structural integrity, repair quality, structural monitoring, Catalog NDT-2007. Copenhagen, Denmark, 2007.
- LYNDON, F. D.; BALANDRAN, R. V. Some observations on elastic properties of plain concrete. Cement and Concrete Research, 16, nº3, p. 314-324, 1986.
- MEHTA, P. K. e MONTEIRO P. J. M., Concrete, microstructure, properties and materials, BooksInBites, Vol. I, 2001.
- NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 2ª Edição, São Paulo: Pini, 1997.
- SWAMY, N.; RIGBY, G. (1971). Dynamic properties of hardened paste, mortar and concrete. Matériaux et Constructions. Paris, 4(19): 13-40, jan./fev. 1971.