ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM COMPÓSITOS CIMENTO-MADEIRA POR MEIO DA EMISSÃO DE ONDAS ULTRASSONORAS

Kátia A. Bohn
Graduanda do Curso de Engenharia Civil – Universidade Federal de Pelotas
katia0706bohn@yahoo.com.br
Mônica R. Garcez
Professora do Curso de Engenharia Civil – Universidade Federal de Pelotas
garcez.mr@gmail.com
Thiara M. Santos
Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais – Concreferro – Ind. e Comércio de Pré-moldados Ltda

Resumo. *O presente trabalho foi desenvolvido por meio de uma parceria entre a Universidade Federal de Pelotas – UFPel e a empresa Concreferro – Indústria e Comércio e Pré-moldados Ltda, e teve como objetivo avaliar o emprego de técnicas ultrassonoras para estimar o módulo de elasticidade de concreto pré-moldado com a adição de serragem de* ***Pinus elliottii*** *Engelm. Para tanto, foram avaliados cinco diferentes tratamentos, os quais sofreram variação de areia, que foi substituída pela serragem nas proporções de 0, 25, 50, 75 e 100% em volume. Para cada tratamento foram moldados cinco corpos de prova. Após 28 dias de cura, foram realizados os ensaios não-destrutivo, por meio do ultrassom, e destrutivo, de resistência a compressão axial. Como resultados, verificou-se que houve uma redução significativa dos módulos de elasticidade com o aumento da proporção de serragem de Pinus em substituição ao agregado míudo tradicional (areia).*

Palavras-chave: *Ultrassom. Resistência. Pinus elliottii.*

1. INTRODUÇÃO

O concreto é formado por uma mistura de aglomerantes, agregados e água, que podem ser combinados com adições de outros materiais e aditivos, destinados a melhorar ou conferir propriedades especiais ao mesmo.

Estas propriedades podem ser avaliadas tanto de forma destrutiva, quanto não destrutiva. As avaliações de natureza destrutiva são em geral, segundo Stangerlin et al. (2010a), os principais métodos utilizados para o conhecimento das propriedades tecnológicas de um material. Os resultados obtidos a partir dessa metodologia, por vezes, são onerosos em razão do tempo consumido com a confecção dos corpos de prova e custo dos equipamentos e também são apenas uma estimativa, já que os ensaios são realizados por meio de amostragem e não da peça real em uso. Já dentre as técnicas não destrutivas pode-se destacar o emprego de aparelho emissor de ondas ultrassônicas (STANGERLIN et al., 2010b).

A utilização do ultrassom é descrita por Calegari (2006), como a emissão de pulsos elétricos por um circuito eletrônico, que são conduzidos por cabos coaxiais e convertidos em ondas elásticas pelo cristal piezoelétrico localizado nos transdutores. Dessa forma, a partir da distância e do tempo de percurso da onda, obtém-se a velocidade de propagação.

Alguns materiais, como a madeira tem perdido competitividade perante outros

materiais aplicados nas construções, por desconhecimento quanto às suas propriedades e técnicas de processamento. A serragem, que é um resíduo proveniente de fontes renováveis, em substituição parcial da areia contribui para um programa específico de reciclagem, conforme salienta Dantas Filho (2004), reduzindo a demanda de agregado miúdo para a fabricação de concreto e argamassa, além de tornar esses compostos mais isolantes termicamente e leves.

Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o emprego de técnicas ultrassonoras para estimar o módulo de elasticidade de concreto pré-moldado com a adiçao de serragem de ***Pinus elliottii*** Engelm. Para alcançar este objetivo foram realizados ensaios de ultrassom nos concretos estudados e os dados obtidos nos ensaios (módulo de elasticidade dinâmico) foram comparados com dados estimados por meio de fórmulas baseadas em resultados de ensaios destrutivos de compressão axial (módulo de elasticidade estático). Os resultados foram ainda analisados estatisticamente com o objetivo de verificar a relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico para os concretos estudados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi destinado à fabricação de peças de concreto pré-moldadas. A serragem de ***Pinus elliottii*** Engelm. utilizada em substituição ao agregado miúdo, proveniente do equipamento Serra Fita, foi obtida junto a Serraria Madecom, do município de Pelotas, RS.

A determinação da composição granulométrica da serragem foi realizada com auxílio do agitador mecânico, por três minutos, a uma frequência de 7Hz, conforme as prescrições da NBR 7217 (ABNT, 1987).

Foram avaliados cinco tratamentos, os quais sofreram variação do agregado miúdo, que foi substituído pela serragem de ***Pinus elliottii*** Engelm nas proporções de 0, 25, 50, 75 e 100%, em volume. O traço de dosagem padrão de referência da empresa foi 1:2:1,2 (cimento: areia: brita, em volume). Para cada tratamento foram moldados cinco corpos de prova, seguindo as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2003), de dimensões 10 x 20 cm, em formato cilíndrico.

No processo de cura, os corpos de prova permaneceram por 21 dias no local de moldagem e nos outros sete dias em câmara úmida, a uma temperatura de 23 ± 2ºC e umidade de 95%, conforme as condições solicitadas pela NBR 9479 (ABNT, 1984).

Para a realização dos ensaios não destrutivos foi utilizado equipamento de ultrassom, dotado de transdutores de faces planas, com frequência de aproximadamente 54 kHz, que medem diretamente o tempo de propagação das ondas, em microssegundos (μs). O equipamento foi calibrado, conforme solicitado pelo fabricante. Os transdutores do equipamento foram conectados as peças de concreto por meio da aplicação de vaselina sólida nas bases dos corpos de prova, garantindo o contato e evitando a presença de ar na interface. A determinação do tempo de propagação das ondas ultrassônicas foi realizada pela metodologia de transmissão direta, onde os pulsos ultrassônicos são transmitidos por meio de dois transdutores, um emissor, que transmite a onda, e outro receptor, que recebe a onda, na qual se realizaram duas leituras. A partir da razão entre a distância do trecho percorrido (comprimento real do corpo de prova) e o valor médio dos tempos de propagação, calculou-se a velocidade de propagação das ondas. O módulo de elasticidade dinâmico (Ed) foi obtido através do produto entre a velocidade de propagação e a massa específica do corpo de prova.

O ensaio destrutivo de resistência à compressão axial do concreto foi realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 1994). Com os resultados obtidos, por meio de cálculos foi estimado o módulo de elasticidade estático do concreto. O traço referência, sem

adição de serragem, foi estimado por meio das formulações descritas na NBR 6118 (ABNT, 2003), pois o mesmo não foi determinado por meio dos ensaios mecânicos. Já o módulo de elasticidade estático para o concreto com 25, 50, 75 e 100% de serragem, foi estimado por meio da equação proposta pelo American Concrete Institute – ACI, citada por Piccolli (2010), que estima o módulo de elasticidade para concretos leves. Adicionalmente, foram coletadas, de todos os corpos de prova ensaiados, amostras para determinação do teor de umidade base seca e massa específica aparente.

Os resultados foram interpretados, com auxílio de testes de médias (LSD Fisher, $p > 0,05$) e análise de regressão linear, em que a variável independente foi o módulo de elasticidade dinâmico obtido em ensaio de ultrassom e a variável dependente foi o módulo de elasticidade estático obtido em ensaio de compressão axial.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados estimados para o módulo de elasticidade estático do concreto foram inversamente proporcionais ao aumento do percentual de serragem em substituição a areia (Tabela 1).

Tabela 1. Resultados da análise de variância do módulo de elasticidade estático e dinâmico para os diferentes tratamentos.

Tratamento	E_{ci} Médio (GPa)	E_d Médio (GPa)	P
T1	$18,70^a$	$35,35^a$	
T2	$14,18^b$	$24,91^b$	
T3	$9,13^c$	$16,91^c$	<0,0001
T4	$7,29^d$	$10,67^d$	
T5	$4,21^e$	$6,04^e$	

Em que: E_{ci} = Módulo de Elasticidade Estático; E_d = Módulo de Elasticidade Dinâmico; P = Probabilidade de erro; Médias não seguidas da mesma letra diferem estatisticamente a um nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste LSD-Fischer

Observou-se que à medida em que aumenta a proporção de serragem inserida no concreto ocorre uma redução no módulo de elasticidade estático do mesmo.

Ao analisar a razão entre E_d/E_{ci} verifica-se que, de modo geral, a mesma decresceu com o acréscimo de serragem de Pinus (T1= 1,89; T2= 1,76; T3= 1,85; T4= 1,46 e T5= 1,43).

Os resultados indicam que à medida que foi sendo inserida serragem em substituição da areia no traço do concreto, ocorreu uma redução gradativa do módulo de elasticidade, do concreto, tanto estático quanto dinâmico. Como o módulo de elasticidade caracteriza a rigidez do material, ou seja, a dificuldade em deformá-lo, quanto maior o módulo de elasticidade, maior deverá ser a tensão aplicada para se atingir uma dada deformação. Neste caso, como o módulo de elasticidade do concreto (cimento, agregados e água) é superior ao da madeira, quando se substitui agregado miúdo do concreto por madeira, o compósito resultante apresentará módulo de elasticidade inferior ao do concreto original.

Os valores do módulo de elasticidade dinâmico (Tabela 1) medidos para os cinco tratamentos foram superiores aos estimados para o módulo de elasticidade estático, a partir dos ensaios de compressão axial. Esse comportamento, como bem observa Oliveira et. al (2003), é coerente, uma vez que o ensaio de ultrassom é um ensaio de curta duração quando comparado com o ensaio de compressão.

Por meio dos parâmetros de regressão (coeficiente de determinação ajustado - R^2_{aj}, erro padrão de estimativa - S_{yx} e valor de F calculado) pode-se verificar que o modelo estatístico gerado para a estimativa do módulo de elasticidade estático em função do módulo de elasticidade dinâmico foi satisfatório (Fig. 1).

Apesar de a relação entre velocidade de propagação de onda ultrassônica e resistência à compressão fornecer apenas

uma estimativa, os dados obtidos neste trabalho indicam que esse ensaio é um bom estimador para o módulo de elasticidade dos materiais estudados. Além disso, pode ser um indicativo útil para ser aplicado na avaliação da uniformidade do concreto em uma estrutura acabada.

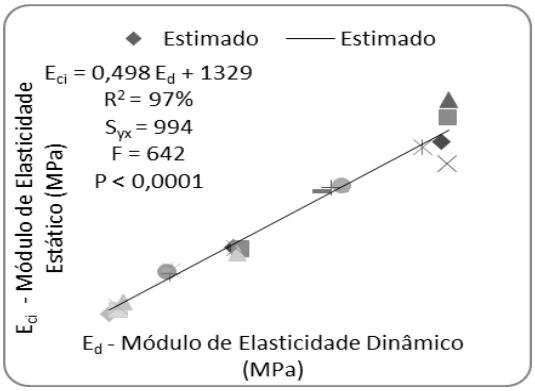

Figura 1. Módulo de elasticidade estático E_{ci} em função do módulo de elasticidade dinâmico E_d para diferentes tratamentos do concreto.

Agradecimentos

À Concreferro – Indústria e Comércio de Pré-moldados Ltda pelo fornecimento do cimento, brita e areia.

À Madecom pelo fornecimento da serragem de *Pinus elliotti*.

4. REFERÊNCIAS

CALEGARI, L. **Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - UFSM - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria –RS, 2006. 91 p.

DANTAS FILHO, F.P. **Contribuição ao estudo para aplicação do pó de serra da madeira em elementos de alvenaria de concreto não estrutural.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2004. 117f.

OLIVEIRA, F.G.R.; et al. Avaliação de propriedades mecânicas de madeira por meio de ultra-som. In: PAN AMERICAN CONFERENCE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, 3., 2003, Rio de Janeiro. **Anais…** Rio de Janeiro: Pan American Conference for Nondestructive Testing, 2003. 5p.

PICCOLI. G.M. **Engemat**. A importância de determinação experimental do módulo de elasticidade do concreto. Disponível em: <http://www.engemat.com.br/ShowMateria.asp?var_chavereg=133>. Acesso em 13 out. 2010.

STANGERLIN, D.M.; GATTO, D.A.; MELO, R. R.; CALEGARI, L.; VIVIAN, M.A.; CASTELO, P.A.R.; BELTRAME, R. Uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de Peltophorum dubium. **Ciência da Madeira**, v.1, n.2. p. 44-53, 2010a.

STANGERLIN, D.M.; MELO, R.R.; GATTO, D.A.; CADEMARTORI, P.H.G.; CASTELO, P.A.R.; CALEGARI, L. Estimativa do módulo de elasticidade em painéis aglomerados por meio de emissão de ondas ultra-sonoras. Revista **Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 5, n.2, p. 17-22, 2010b.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em geral, o concreto com inserção de serragem, apresentou resistência compressão e módulos de elasticidade inferiores ao traço referência, o que compromete sua utilização como elemento estrutural. Porém, os concretos produzidos com serragem poderão ser utilizados em outras aplicações, como tapumes de obra, que necessariamente, não precisam ser executados com um material de elevada resistência. Em consequência da redução do peso das peças de concreto pré-moldado, sua montagem e desmontagem serão facilitadas. Os ensaios não destrutivos realizados com o ultrassom podem ser considerados um bom recurso para estimar o módulo de elasticidade dinâmico em concretos e também para determinar o mesmo em estruturas acabadas. Como recomendações para trabalhos futuros, seria interessante desenvolver pesquisas sobre o uso deste material em peças armadas.