

AVALIAÇÃO DE COMPÓSITO CASCA DE OVO-CIMENTO POR MEIO DA VELOCIDADE DO PULSO ULTRA-SÔNICO (VPU)

Antonio L. Beraldo^{a*}; Flávia Nascimento^a; César H. Nagumo^a

^aSchool of Agricultural Engineering – Campinas State University - UNICAMP
beraldo@agr.unicamp.br, cesarnagumo@yahoo.com.br

*Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas.
CEP – 13083-875 - Campinas – SP – Brasil

RESUMO

No Brasil, são geradas anualmente cerca de 70 mil toneladas de casca provenientes principalmente da produção de ovo em pó. Por outro lado, a exploração da areia causa um forte impacto ambiental. Neste trabalho foi investigado o comportamento da casca de ovo (substituindo parcialmente a areia) na confecção de argamassa de cimento Portland. O endurecimento do compósito foi acompanhado por meio de ensaio não destrutivo (END) avaliando-se a velocidade do pulso ultra-sônico (VPU). O método mostrou-se sensível o suficiente para determinar a influência do tipo de tratamento aplicado à casca de ovo (lavagem em água fria, lavagem em água quente e secagem em estufa) e também do traço utilizado na mistura. Os resultados obtidos indicaram que o comportamento da VPU pode ser explicado por meio de uma curva exponencial, havendo sua estabilização de 7 a 9 dias. O efeito da substituição parcial de 5% de areia por casca de ovo, na magnitude da VPU, não mostrou diferença estatística em relação à argamassa-controle.

PALAVRAS-CHAVE: casca de ovo, ultra-som, END, compósito, resíduos agroindustriais

EGGSHELL-PORTLAND CEMENT COMPOSITE EVALUATION BY ULTRASONIC PULSE VELOCITY (UPV)

ABSTRACT

Mainly as a by-product of egg powder production, 70,000 ton per year of eggshell is generate in Brazil. In the other hand, sand exploration impacts strongly the environment. In this

research work it was evaluate the behavior of a composite from eggshell (partially replacing sand) and Portland cement mortar. Composite hardening was surveyed by a non destructive evaluation (NDE) by means an ultrasonic pulse velocity (UPV). The method was sensitive enough to detect on UPV the influence of the treatment types applied to the eggshell (wash-up, thermal shock and oven-dry) and the mass ratio employed. Results showed that UPV behavior can be explained by an exponential curve and UPV values stabilizes after 7-9 days. Partial sand replacement (5%) by eggshell did not showed statistical difference compared with mortar reference in terms of the magnitude of the UPV.

KEYWORDS: eggshell, ultrasonic, NDE, composite, agricultural waste

INTRODUÇÃO

Durante a exploração agrícola e em diversas atividades ligadas à agroindústria geram-se grandes quantidades de resíduos que nem sempre são aproveitados, ou, então, são utilizados de forma adequada. Dentre tais resíduos pode-se destacar aqueles provenientes da agroindústria, como é o caso da casca de ovo, por exemplo, um importante resíduo originário da fabricação de ovo em pó. A incorporação de tais “agregados” não convencionais evidentemente modifica a resistência mecânica de materiais convencionais (pastas e argamassas). Porém, os compósitos assim obtidos podem vir a ocupar um nicho de mercado, principalmente na categoria de “concreto leve” não estrutural, principalmente devido ao grande apelo quanto a sustentabilidade da construção.

Esta pesquisa visou contribuir para a redução de impactos ambientais ao efetuar o estudo da aplicação de resíduos agroindustriais passíveis de serem utilizados na construção civil.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O ovo é uma estrutura pneumática constituída por uma pele resistente e deformável, submetida a uma pressão interna. A pele em si é formada por três membranas. As duas membranas externas são ligadas entre si por tirantes isolados, exatamente como se fosse um acolchoado; o espaço encerrado entre elas fica cheio de líquido sob pressão. Este líquido logo endurece, após a postura, e forma a casca calcárea. O carbonato de cálcio é o principal constituinte da casca do ovo, apresentando-se na forma de cristais afunilados. Cada cristal apresenta-se na forma de prisma com 300 μ de comprimento e 50 μ de diâmetro (VASCONCELOS [1]).

Os agregados convencionais (areia e pedra) são obtidos de fontes não renováveis, causando, durante sua extração, um elevado impacto ambiental. Por outro lado, principalmente no meio rural, ou em pequenas construções, pode-se antever a possibilidade de utilização de materiais não convencionais (como a casca de ovo, por exemplo), no intuito de substituir parcialmente a areia, para a produção de argamassa.

Normalmente a caracterização físico-mecânica de um determinado material necessita de um tempo relativamente longo para a preparação dos corpos-de-prova e para a execução dos

ensaios. Uma possível alternativa aos ensaios convencionais seria o uso de ensaios não destrutivos (END), por meio dos quais pode-se obter uma avaliação correta da qualidade de um material de uma forma mais rápida. No caso do ensaio por ultra-som, originalmente desenvolvido para aplicação em metais e concreto, pode-se acompanhar as mudanças estruturais iniciais (pega) e em idades mais avançadas (endurecimento) do aglomerante por meio da medição da velocidade de pulso ultra-sônico (VPU). O comportamento de compósitos de cimento e partículas vegetais também pode ser monitorado por meio de ultra-som. Resultados obtidos por BERALDO [2] permitiram verificar a adequação de um modelo matemático relacionando a velocidade v na idade i do compósito, de acordo com a expressão:

$$v_i = v_{\max} [1 - \exp(A + B.i)] \quad (1)$$

sendo v_{\max} - valor determinado experimentalmente;

i = idade do corpo-de-prova (em dias);

A, B - coeficientes obtidos por regressão.

MATERIAIS E MÉTODOS

A casca de ovo, gerada por galinhas poedeiras, foi fornecida pela granja Nagumo (Lins – SP). A casca em sua dimensão original foi desintegrada em moinho-de-martelos sendo, posteriormente, efetuado um peneiramento, selecionando-se o material passante na peneira de abertura 2,4 mm.

A casca de ovo triturada foi submetida a três tipos de tratamentos visando eliminar parte da película aderida internamente, pois a mesma, de acordo com NAGUMO e BERALDO [3], causa perturbações à pega do cimento.

- **W** - Lavagem em água fria: a casca foi lavada em água corrente até que não se observasse a saída de água turva;

- **TS** - Lavagem em água quente: a casca foi fervida durante 2 h em água (80 °C);

- **D** - Secagem em estufa: a casca foi seca em estufa (103 °C) durante 24 h e, a seguir, efetuou-se a separação da membrana por meio de ventilação.

Para as misturas utilizou-se o cimento CP V-ARI (de alta resistência inicial, NBR 5733 [4], de marca Cauê). Utilizou-se, igualmente, areia de rio de granulometria média.

Por não haver metodologia específica para a caracterização do compósito, adaptou-se, na medida do possível, as recomendações da norma NBR 7215 [5]. Dessa maneira foram confeccionados corpos-de-prova cilíndricos (50 mm de diâmetro e altura de 100 mm), efetuando-se três repetições para cada combinação.

Adotou-se como traço de referência **1 : 3 : 0,5** (cimento : areia : água , em massa). A seguir, efetuou-se a substituição gradativa da areia pela casca de ovo, obtendo-se os seguintes traços (em massa, cimento:areia:casca de ovo:água):

R1 – 1 : 2,5 : 0,5 : 0,5; **R2** – 1 : 2,0 : 1,0 : 0,5; **R3** – 1 : 1,5 : 1,5 : 0,5; **R4** – 1 : 1,0 : 2,0 : 0,5.

A mistura dos componentes foi realizada em argamassadeira Solotest até obter-se homogeneidade do material. A mistura foi então colocada em moldes plásticos previamente

untados com óleo mineral desmoldante. A compactação manual foi efetuada em três etapas com o auxílio de um soquete simples e procedia-se à regularização da superfície com uma espátula.

Após 24 h da fabricação efetuava-se a desmoldagem dos corpos-de-prova. A cura foi conduzida em câmara úmida durante uma semana, seguido de três semanas de secagem ao ar livre.

Na medição do tempo de propagação da onda ultra-sônica (em μs) através dos corpos-de-prova cilíndricos, utilizou-se o equipamento Ultrasonic Tester, modelo BP-7, da Steinkamp, com transdutores pontuais de seção exponencial com frequência de ressonância de 45 kHz. O experimento visou acompanhar a evolução diária da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU), ao longo de 14 dias, aplicando-se aos diferentes corpos-de-prova.

Ao final do período de cura de 28 dias procedeu-se o ensaio de compressão simples. As bases dos corpos-de-prova foram capeadas com uma mistura de enxofre (75%) e caulim (25%). A resistência à compressão simples foi calculada individualmente dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova, conforme os procedimentos descritos na norma NBR 7215 [5].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaio não destrutivo (END) por ultra-som.

Na Tabela 1 apresenta-se a análise de variância dos valores da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU). Observa-se a influência dos fatores idade, tipo de tratamento e do traço utilizado na variável-resposta. As interações entre os fatores também foram significativas, com exceção da idade x traço.

TABELA 1 - Análise de variância para VPU - Type III Sums of Squares.

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-value |
|---------------------|----------------|-----|-------------|---------|---------|
| Main Effects | | | | | |
| A: Idade | 19,548 | 9 | 2,172 | 340,70 | 0,0000 |
| B: Tratamentos | 4,962 | 2 | 2,481 | 389,18 | 0,0000 |
| C: Traço | 60,830 | 3 | 20,276 | 3180,60 | 0,0000 |
| Interactions | | | | | |
| AB | 0,567 | 18 | 0,032 | 4,94 | 0,0000 |
| AC | 0,151 | 27 | 0,006 | 0,88 | 0,6433* |
| BC | 2,137 | 6 | 0,356 | 55,86 | 0,0000 |
| Residual | 1,855 | 291 | 0,006 | | |
| Total (Corrected) | 91,738 | 356 | | | |

* não significativa ao nível de 95% de probabilidade (teste de Tukey).

Na Figura 1 apresenta-se a variação da VPU de acordo com a idade do compósito, independentemente do tipo de tratamento aplicado à casca de ovo. Observa-se que a partir do 7-9 dias a VPU se torna praticamente constante.

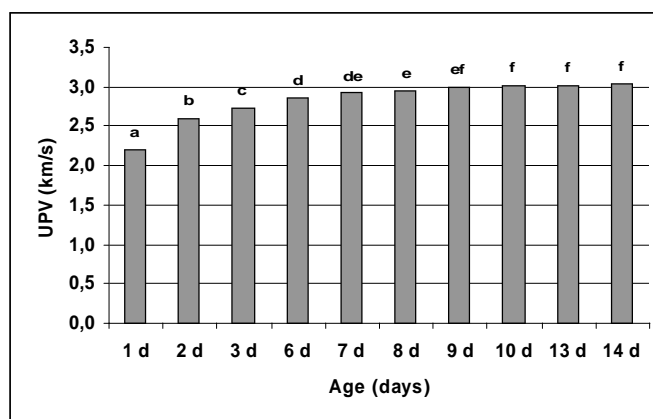


FIGURA 1 – Evolução da VPU para o conjunto dos compósitos. Mesma letra significa que não houve diferença estatística ao nível de 95% de probabilidade.

Na Figura 2 apresenta-se a comparação entre as VPU para os tratamentos de lavagem em água fria (**W**), lavagem em água quente (**TS**) e de secagem em estufa (**D**). Verifica-se que houve diferença estatística entre as médias, mostrando ser superior o valor médio da VPU referente à lavagem da casca em água quente. Na mesma figura observa-se que à medida que aumenta o teor de casca de ovo no traço diminui a magnitude da VPU (**R1 > R2 > R3 > R4**).

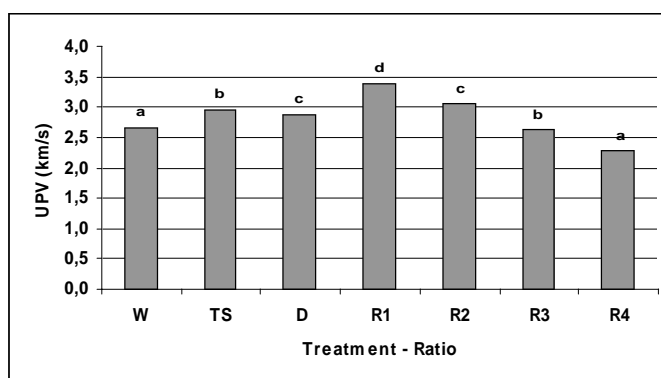


FIGURA 2 – Evolução da VPU para o tipo de tratamento e para o traço adotado. Mesma letra significa que não houve diferença estatística ao nível de 95% de probabilidade.

Nas Figuras 3, 4 e 5 apresentam-se os valores da VPU para os tratamentos aplicados à casca de ovo: lavado em água fria (**W**), lavado em água quente (**TS**) e secagem em estufa (**D**), respectivamente. Os resultados indicam que a VPU para os diferentes casos analisados tende a estabilizar-se entre 7-9 dias. Provavelmente a falta de suprimento em água interrompa as reações de hidratação do cimento, ou, então, que as modificações estruturais ainda ocorridas no seio do compósito não sejam mais passíveis de serem detectadas por ultra-som.

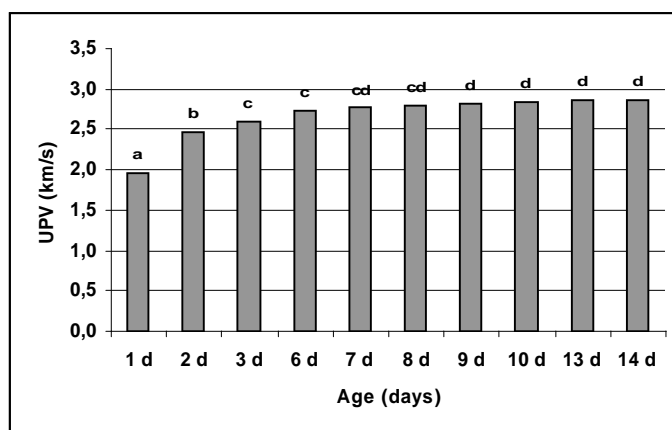


FIGURA 3 – VPU para compósito de casca de ovo lavada em água fria (**W**). Mesma letra significa que não houve diferença estatística ao nível de 95% de probabilidade.

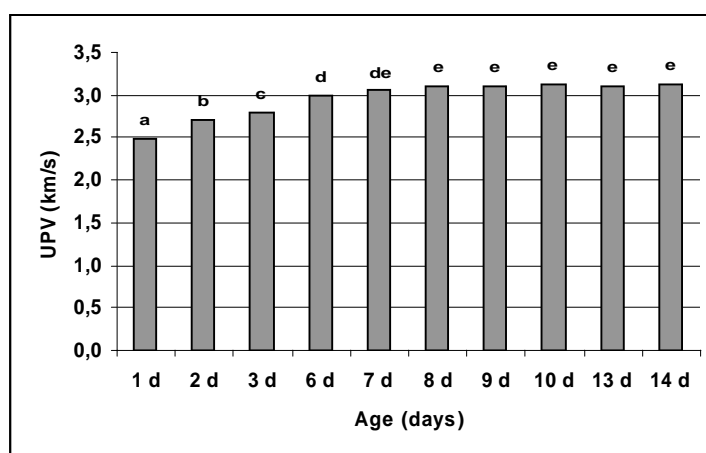


FIGURA 4 – VPU para compósito de casca de ovo lavada em água quente (**TS**). Mesma letra significa que não houve diferença estatística ao nível de 95% de probabilidade.

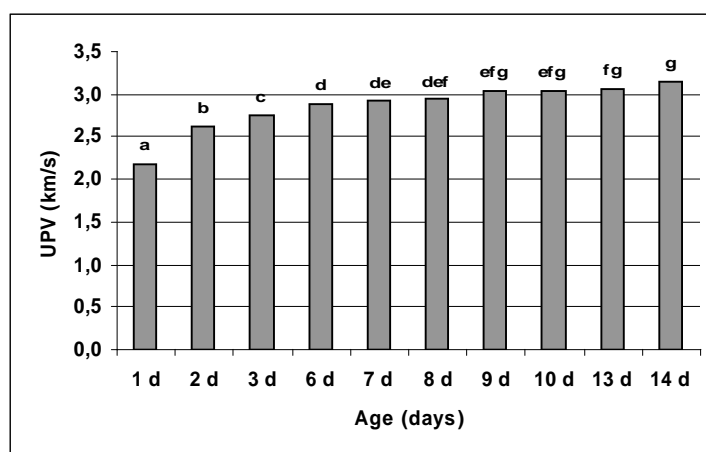


FIGURA 5 – VPU para compósito de casca de ovo seca em estufa (**D**). Mesma letra significa que não houve diferença estatística ao nível de 95% de probabilidade.

Coefficientes do modelo matemático e tensão de ruptura em compressão

Nas Tabelas 2, 3 e 4, correspondentes aos tratamentos lavagem em água fria (**W**), lavagem em água quente (**TS**) e secagem em estufa (**D**), respectivamente, apresentam-se os dados

referentes ao modelo matemático obtido de acordo com a expressão (1), assim como, dos resultados do ensaio de compressão simples. O modelo matemático proposto para a VPU em função da idade do compósito apresentou um elevado coeficiente de determinação para a maioria dos casos observados.

Os resultados do ensaio de compressão simples confirmaram o que havia sido detectado pelo ensaio de ultra-som – quanto maior foi o teor de casca, menor foi a resistência à compressão. Destaca-se, igualmente, o elevado coeficiente de variação obtido nesse ensaio, pois além do traço utilizado, outros fatores interferem, tais como, o estado da superfície e a eventual falta de paralelismo das bases. Nesse aspecto, o ensaio de ultra-som mostra-se muito promissor, pois o resultado da VPU praticamente independe do operador.

A substituição de 5% de areia por casca de ovo, mostrou-se viável, pois não se observou diferença estatística ao nível de 95% de probabilidade pelo teste de Tukey, para a resistência à compressão, quando comparada com o valor médio da argamassa-controle (18,4 MPa). De forma idêntica, a VPU máxima para cada combinação (tratamento aplicado à casca de ovo e traço adotado) mostrou-se muito próxima daquela referente à da argamassa-controle (3,49 km/s).

TABELA 2 – Tratamento – Lavado em água fria (**W**). Coeficientes do modelo matemático (1) e resistência à compressão média (em MPa), desvio-padrão e coeficiente de variação.

| Traço | 1 : 2,5 : 0,5 : 0,5 | 1 : 2,5 : 1,0 : 0,5 | 1 : 1,5 : 1,5 : 0,5 | 1 : 1,0 : 2,0 : 0,5 |
|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| A | -1,54 | -0,54 | -0,34 | -0,42 |
| B | -0,28 | -0,52 | -0,63 | -0,58 |
| v_{max} | 3,58 | 3,05 | 2,67 | 2,19 |
| r^2 | 0,74 | 0,93 | 0,91 | 0,92 |
| Tensão | 23,68 | 14,22 | 11,67 | 7,16 |
| DP | 3,37 | 2,65 | 1,69 | 1,07 |
| CV | 14,22 | 18,66 | 14,49 | 14,93 |

TABELA 3 – Tratamento – Lavado em água quente (**TS**). Coeficientes do modelo matemático (1) e resistência à compressão média (em MPa), desvio-padrão e coeficiente de variação.

| Traço | 1 : 2,5 : 0,5 : 0,5 | 1 : 2,5 : 1,0 : 0,5 | 1 : 1,5 : 1,5 : 0,5 | 1 : 1,0 : 2,0 : 0,5 |
|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| A | -1,54 | -0,53 | -1,23 | -1,66 |
| B | -0,43 | -0,53 | -0,50 | -0,27 |
| v_{max} | 3,54 | 3,46 | 2,93 | 2,60 |
| r^2 | 0,56 | 0,76 | 0,80 | 0,96 |
| Média | 19,78 | 18,59 | 14,77 | 9,59 |
| DP | 3,60 | 3,13 | 3,75 | 0,82 |
| CV | 18,22 | 16,83 | 25,40 | 8,53 |

TABELA 4 – Tratamento – Secagem em estufa (**D**). Coeficientes do modelo matemático (1) e resistência à compressão média (em MPa), desvio-padrão e coeficiente de variação.

| Traço | 1 : 2,5 : 0,5 : 0,5 | 1 : 2,5 : 1,0 : 0,5 | 1 : 1,5 : 1,5 : 0,5 | 1 : 1,0 : 2,0 : 0,5 |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| A | -1,10 | -1,17 | -0,83 | -1,14 |
| B | -0,35 | -0,33 | -0,56 | -0,19 |
| v _{max} | 3,69 | 3,33 | 2,85 | 2,71 |
| r ² | 0,88 | 0,98 | 0,84 | 0,90 |
| Média | 21,20 | 17,06 | 9,44 | 9,10 |
| DP | 3,21 | 1,17 | 2,96 | 0,33 |
| CV | 15,15 | 6,84 | 31,39 | 3,60 |

A partir dos dados das tabelas precedentes buscou-se correlacionar os valores médios da VPU e da tensão de ruptura à compressão, tendo se obtido o modelo matemático ($r^2 = 0,75$):

$$\sigma = 1,59 \cdot v^{2,04} \quad (2)$$

sendo:

σ = tensão de ruptura à compressão simples (em MPa);

v = velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) aos 28 dias (em km/s).

CONCLUSÕES

A magnitude da velocidade do pulso ultra-sônico depende acentuadamente do tipo de tratamento aplicado à casca de ovo e do traço utilizado para a confecção da mistura. De uma forma geral, pôde-se observar a tendência à estabilização do valor da VPU no intervalo entre 7 e 9 dias. Compósitos com substituição de 5% de areia por casca de ovo não apresentaram diferença estatística em relação à argamassa-controle.

REFERÊNCIAS

1. Vasconcelos AC. Estrutura da natureza: um estudo da interface entre a biologia e engenharia. Studio Nobel, São Paulo, 2000, p. 111-114.
2. Beraldo AL. Ultrasonic speed wave: cure type influence on wood-cement composite compression strength. In: Proceedings of the NDTISS'99. International Symposium on Nondestructive Testing Contribution to the Infrastructure Safety Systems in the 21st Century. Torres, RS, Brazil, 1999, p. 86- 90.
3. Nagumo CH, Beraldo, A. L. Compósito casca de ovo e argamassa de cimento Portland. In: ICTR 2004 - Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Resíduos e Desenvolvimento Sustentável & NISAM 2004 - Ciclo de Conferência sobre Política e Gestão Ambiental, 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis. ICTR, 2004. v. 1. p. 1-12.

4. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro. NBR 5733. Cimento Portland de alta resistência inicial, especificação, 1996, 6p.
5. _____ . NBR 7215. Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão, método de ensaio, 1996, 8p.