

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

DESENVOLVIMENTO DE MODELO ESTATÍSTICO PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE ARGAMASSA INCORPORADA COM FLOCOS DE POLIETILENO TEREFALATO (PET) POR MEIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO (VPU)

Laio Andrade Sacramento¹ - laio.a.sacramento@gmail.com

Felipe William de Souza Santos² - felipewilliam21@gmail.com

Joel Sanchez Domínguez³ - joel.iprj@gmail.com

José Renato de Castro Pessôa⁴ - jrcessoa@uesc.br

Joaquim Teixeira de Assis⁵ - joaquim.iprj@gmail.com

Ruan Carlos de Araújo Moura⁶ - rcamoura@uesc.br

¹ Universidade Estadual de Santa Cruz, Campus Soane Nazaré de Andrade - Ilhéus, BA, Brazil

² Universidade Estadual de Santa Cruz, Campus Soane Nazaré de Andrade - Ilhéus, BA, Brazil

³ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico – Nova Friburgo, RJ, Brazil

⁴ Universidade Estadual de Santa Cruz, Campus Soane Nazaré de Andrade - Ilhéus, BA, Brazil

⁵ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico – Nova Friburgo, RJ, Brazil

⁶ Universidade Estadual de Santa Cruz, Campus Soane Nazaré de Andrade - Ilhéus, BA, Brazil

Resumo. O constante crescimento no volume de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) apresenta-se preocupante no contexto ambiental. O Polietileno Tereftalato (PET) lidera a composição dos perfis plásticos, atingindo valores acima de 40%. Nessa vertente, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas no que tange o desenvolvimento de argamassas através da incorporação à matriz cimentícia de resíduos de PET pós-consumo. Dessa forma, o objetivo principal desse trabalho foi analisar a influência da incorporação de PET em argamassa e desenvolver modelo estatístico que descreva essa relação. Foram produzidas argamassas sem e com substituição parcial (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 35%) do agregado miúdo (areia) por flocos de PET, obtidos da moagem de embalagens pós-consumo, com granulometria entre 1,18 mm a 2,36 mm. A velocidade de pulso ultrassônico foi medida utilizando um par de transdutores com frequência nominal de 54 KHz de forma direta. Foi construído modelo polinomial tendo a porcentagem de PET como variável independente. Constatou-se que com o aumento da porcentagem de PET há diminuição do valor do módulo de elasticidade dinâmico. Verificou-se que o modelo polinomial obteve um coeficiente de determinação de 0,994, o que evidencia seu sucesso na previsão do módulo de elasticidade dinâmico de corpos-de-prova de argamassa incorporados com PET.

Palavras-chave: Argamassa, Velocidade de pulso ultrassônico, PET.

1. INTRODUÇÃO

O constante crescimento no volume de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) apresenta-se preocupante no contexto ambiental. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE)(2015), em seu Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2015, a geração de RSU no Brasil em 2015 atingiu 218 874 t/dia em todo o país.

De acordo com a CICLOSOFT (2016), os materiais recicláveis são a maioria quando comparado aos rejeitos. Desses, os plásticos são o segundo tipo mais coletado, sendo responsáveis por 11% da composição gravimétrica da coleta seletiva. Entre os plásticos, o Polietileno Tereftalato (PET) lidera a sua composição, atingindo valores acima de 40% (CEMPRE, 2016).

Mesmo com a reciclagem do PET, cerca de 50% dos resíduos pós-consumo desse material não possuem o tratamento necessário. Seu descarte inadequado pode comprometer o equilíbrio do meio ambiente, visto que sua degradação pode levar cerca de 400 anos. Além, quando depositado em aterros, pode reduzir a capacidade de percolação de gases e líquidos, e aumentando o tempo de estabilização da matéria orgânica (MODRO, 2008).

Dessa forma, alternativas que visem a reciclagem e incorporação de resíduos de PET pós-consumo são necessárias para evitar impacto ambiental proveniente do descarte inadequado.

Nessa vertente, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas no que tange o desenvolvimento de argamassas através da incorporação à matriz cimentícia de resíduos de PET pós-consumo (MODRO, 2008). Sua incorporação promove a redução da densidade da argamassa final, conforme apontado por DETOMI (2012) e MODRO (2008). Tal redução pode favorecer aplicações na produção de blocos para alvenaria e elementos vazados, além de possibilitar transporte mais fácil, economia e dinâmica das operações.

Dentre as propriedades da argamassa em estado endurecido, para caracterização de sua elasticidade, pode-se efetuar tanto ensaios estáticos quanto dinâmicos. Os ensaios estáticos são destrutivos e consistem na aplicação de cargas e leitura de deformações para construção da curva tensão-deformação e cálculo do módulo de elasticidade.

Em contrapartida, os ensaios dinâmicos caracterizam-se por serem não-destrutivos, ou seja, mantem a integridade do material ensaiado deixando nenhum ou pouco dano para ser reparado após sua execução. De acordo com SANTIN (2003), no ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) o modulo de elasticidade dinâmico do material pode ser aferido através de princípios de propagação de ondas, descrito pela eq.1, abaixo.

$$E_d = v^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (1)$$

Em que:

- E_d é o módulo de elasticidade dinâmico (em MPa);
- v é a velocidade de pulso ultrassônico (em km/s);
- ρ é a densidade de massa aparente do corpo-de-prova (em kg/m³);
- μ é o coeficiente de Poisson, por norma 0,20.

Uma vez que compósitos cimentícios incorporados com materiais não usuais apresentam variabilidade em seu módulo de elasticidade dinâmico, conhecer através de modelos estatísticos como se dá a influência da incorporação percentual de PET no compósito final permite planejar produtos e processos mais eficazes e eficientes para aplicação na construção civil.

Dessa forma, esse trabalho objetiva: a- determinação do módulo de elasticidade dinâmico de argamassa incorporada com PET através de sua VPU; b- desenvolver modelo estatístico da influência da adição de PET em argamassa; c- Validar o modelo desenvolvido.

2. MATERIAIS E MÉTODO EXPERIMENTAL

Os corpos-de-prova utilizados foram confeccionados com materiais da região de Ilhéus-BA. Para compor a matriz dos compósitos utilizou-se: a- Cimento Portland CP II-Z 32 RS de massa específica $3,07\text{g/cm}^3$; b- Areia como agregado miúdo natural com dimensão máxima característica de $1,18\text{mm}$, módulo de finura de $1,60\text{ mm}$ e massa específica de $2,63\text{ g/cm}^3$. A curva granulométrica da areia utilizada é vista na Figura-1, a seguir; c- Água proveniente da rede de abastecimento da cidade de Ilhéus, Ba. Adotou-se $1,00\text{ g/cm}^3$ como massa específica da água; e d- Flocos de PET como substituição do agregado miúdo, oriundos de coleta de embalagens pós-consumo de refrigerantes, sucos e água mineral componentes de resíduos domésticos. Sua dimensão máxima característica de $4,75\text{mm}$, módulo de finura de $4,69\text{ mm}$ e massa específica de $1,34\text{ g/cm}^3$. A curva granulométrica dos flocos de PET utilizados é vista na Figura-2, a seguir.

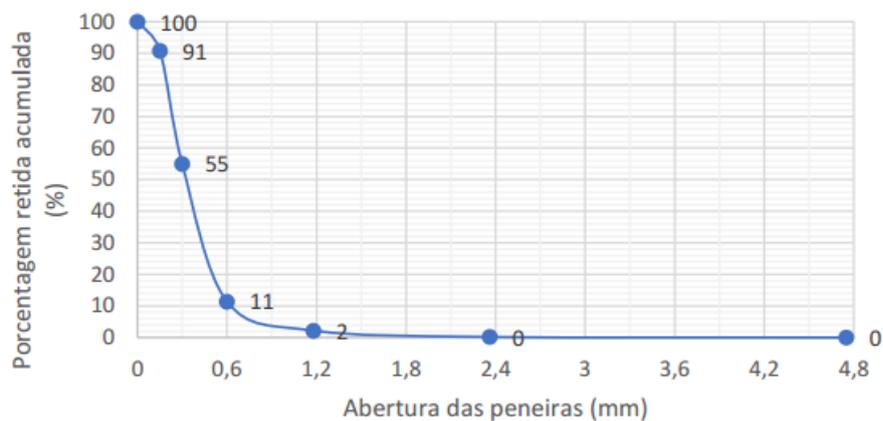


Figura 1 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural.

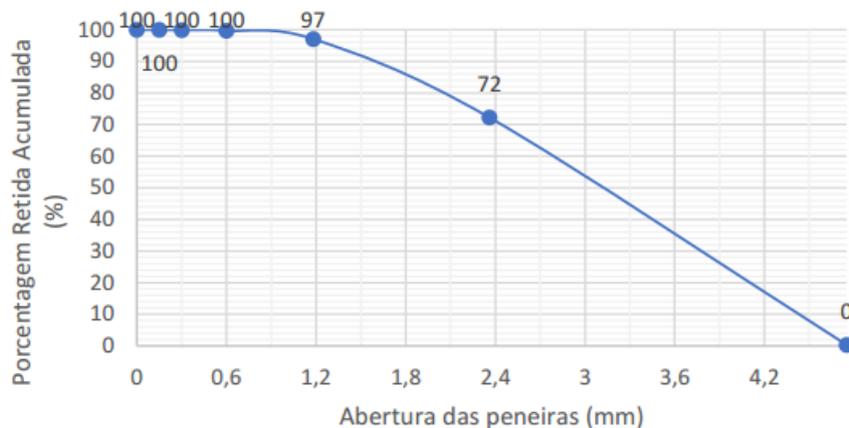


Figura 2 – Curva granulométrica dos flocos de PET.

Manteve-se o traço de referência 1:2:0,48 ,calculado pelo método ABPC, com substituição parcial do agregado miúdo por PET triturada nos percentuais de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 35%. Definiu-se 35% como porcentagem limite visto à constatação qualitativa de redução da trabalhabilidade das argamassas à medida que se incorpora o PET. A faixa granulométrica estabelecida para o PET foi entre 1,18 mm a 2,36mm, em virtude da dimensão característica máxima da areia.

Foram confeccionados três corpos-de-prova prismáticos de dimensões 4 x 4 x 16 cm (largura x altura x comprimento) para cada percentual de substituição, totalizando 24. A tabela-1, a seguir apresenta as proporções de mistura para cada grupo.

Tabela – 1. Proporções de mistura para as argamassas.

Nomenclatura	Porcentagem de Substituição (%)	c	a	p	a/c
C0	0	1	0,760	0	0,48
C5	5	1	0,722	0,038	0,48
C10	10	1	0,684	0,076	0,48
C15	15	1	0,646	0,114	0,48
C20	20	1	0,608	0,152	0,48
C25	25	1	0,570	0,190	0,48
C30	30	1	0,532	0,228	0,48
C35	35	1	0,494	0,266	0,48

Legenda: c: proporção de cimento (em massa); a: proporção de areia (em volume); p: proporção de flocos de PET (em volume); a/c: relação água/cimento.

A moldagem dos corpos-de-prova foi feita em formas metálicas com dimensões internas correspondentes como descrito pela NBR 13279 (ABNT 2005). O ensaio de medida da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi realizado como descrito pela NBR 8802 (ABNT 2013). A velocidade de Pulso foi aferida utilizando transdutores de 54kHz de forma direta, como descrito na Figura-3. A determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi feita através da equação-1, descrita anteriormente.



Figura 3 – Ensaio de Ultrassom em corpo-de-prova prismático.

3. RESULTADOS OBTIDOS

Os corpos-de-prova foram testados como descrito. A tabela 2 mostra as médias e erros-padrão obtidos para os corpos-de-prova analisados.

Tabela 2 – Proporções de mistura das argamassas.

Formulação	Ed (Gpa)	
	Média	Erro-padrão
C0	34.22	0.12
C5	31.33	0.11
C10	28.67	0.08
C15	29.04	0.21
C20	26.31	0.01
C25	24.8	0.3
C30	24.49	0.21
C35	21.81	0.25

Com base nos dados acima, elaborou-se modelo polinomial, representado na eq. 2, que simula o comportamento da influência da incorporação da porcentagem de flocos de PET sobre o módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo ensaio de VPU por meio da utilização do software estatístico R versão 3.4.2. O coeficiente de determinação para o modelo foi de 0,994.

$$\hat{E}_d = 3,423 \times 10^1 + 2,323 \times 10^{-1}x - 3,567 \times 10^{-1}x^2 + 5,152 \times 10^{-2}x^3 - 3,092 \times 10^{-3}x^4 + 8,318 \times 10^{-5}x^5 - 8,276 \times 10^{-7}x^6 \quad (2)$$

Em que:

- \hat{E}_d é o módulo de elasticidade dinâmico estimado (em MPa);
- x é o percentual de substituição de PET;

Pela inserção dos valores percentuais na curva acima, obteve-se valores estimados do módulo de elasticidade dinâmico para cada conjunto de corpos-de-prova, tais estão contidos na tabela 3.

Tabela 3 – Valores estimados para o módulo de elasticidade dinâmico na argamassa.

Formulação	\hat{E}_d (Gpa)
C0	34.23
C5	31.23
C10	28.97
C15	28.53
C20	26.82
C25	24.5
C30	24.59
C35	21.8

Com os valores das tabelas 2 e 3, foi possível desenvolver a figura 4, a seguir, com as medidas do módulo de elasticidade dinâmico x a porcentagem de PET.

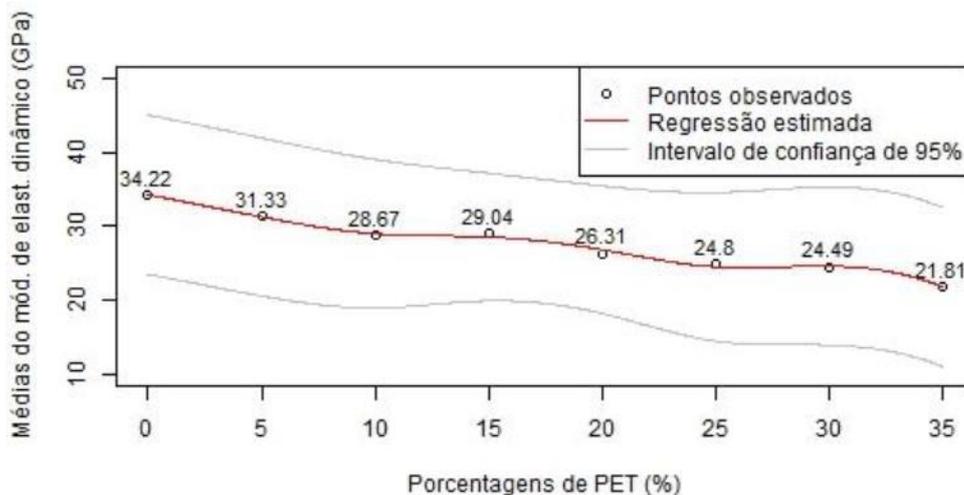


Figura 4 – Gráfico com os as médias do módulo de elasticidade dinâmico versus a porcentagem de PET.

Percebe-se, que existe uma tendência de diminuição do módulo dinâmico de elasticidade com o aumento do teor de PET incorporado. A única fuga observada encontra-se entre os percentuais de 10% e 15% de PET. A redução dos valores médios do módulo de elasticidade relacionam-se com a redução dos valores de densidade de massa aparente e de velocidade de propagação de ondas, uma vez que essas grandezas são diretamente proporcionais.

Pela comparação das tabelas 2 e 3 e pelo gráfico acima, verifica-se que os valores estimados para o módulo de elasticidade dinâmico são bem próximos dos obtidos pela investigação física pela VPU, o que é evidenciado pelo coeficiente de determinação de 0,994. Dessa forma, o modelo estatístico desenvolvido apresenta-se válido para determinação do módulo de elasticidade dinâmico de argamassas, com características analisadas, com base no teor de PET incorporado.

4. CONCLUSÕES

Baseado na análise dos resultados, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- a- Ambas a VPU e o módulo de elasticidade dinâmico da argamassa incorporada com PET diminuem com o aumento da quantidade de PET no traço. A redução dos valores médios do módulo de elasticidade relacionam-se com a redução dos valores de densidade de massa aparente e de velocidade de propagação de onda.
- b- A relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o teor de PET na mistura para argamassas pode ser simulada pela equação 2.
- c- A acurácia do modelo estatístico proposto para estimar o módulo de elasticidade dinâmico da argamassa pelo teor de PET incorporado é evidenciada pelo ótimo coeficiente de determinação de 0,994.

REFERENCIAL

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto endurecido – Determinação da velocidade da propagação de onda ultrassônica. NBR 8802, Rio de Janeiro. 2013.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro. 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.

DETOMI, A. C. Investigação do efeito da incorporação de resíduos de PET em compósitos cimentícios. 2012. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2012. Disponível em: . Acesso em: 21 mar. 2016.

DA SILVA, T. J.; FERREIRA, G.; DIAS, J. F. Influência de variáveis nos resultados de ensaios não destrutivos em estruturas de concreto armado. Science & Engineering Journal, v. 22, p. 103–113, 2013.

EVANGELISTA, A. C. J. Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

LIN, Y. et al. Investigation of pulse velocity-strength relationship of hardened concrete. ACI materials journal, v. 104, n. 4, p. 334–350, 2007.

MACHADO, M. D.; SHEHATA, L. C. D.; SHEHATA, I. A. E. M. Correlation Curves to Characterize Concretes Used in Rio de Janeiro by Means of Non-destructive Tests. IBRACON STRUCTURES AND MATERIALS JOURNAL, v. 2, n. 2, p. 100–111, 2009.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. Handbook on Nondestructive testing of concrete. 2. ed. West Conshohocken: CRC Press, 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2014.

MODRO, N. L. R. Desenvolvimento e caracterização de concreto de cimento portland contendo resíduos poliméricos de pet. 2008. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2008. Disponível em: < <https://goo.gl/do4GfZ>>. Acesso em: 27 jul. 2017.

PESQUISA CICLOSOFT. São Paulo: Compromisso Empresarial para Reciclagem. [1994-]. Biental. Disponível em: < <http://cempre.org.br/ciclosoft/id/8>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

SANTIN, J. L. Ultra-som: técnica e aplicação. 1. ed. Artes Gráficas e Editora Unificado. Curitiba – PR. 276 p. 2003.

DEVELOPMENT OF A STATISTICAL MODEL TO PREDICT THE DYNAMIC MODULUS OF MORTAR INCORPORATED WITH POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) BY ULTRASONIC PULSE VELOCITY (UPV)

Abstract. *The constant growth in the volume of Urban Solid Waste (RSU) had become an environmental problem. Polyethylene Terephthalate (PET) leads the composition of plastic profiles, reaching values above 40%. In this context, many researches have been developed regarding the development of mortars through the incorporation of PET residues to the cement matrix. Thus, the aim of this work was to analyze the influence of the incorporation of PET in mortar and to develop a statistical model that describes this relationship. Mortars were produced without and with partial replacement (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% and 35%) of sand by PET flakes with granulometry between 1.18 mm and 2.36 mm. Ultrasonic pulse velocity was measured using a pair of transducers with a nominal frequency of 54 KHz directly. Later, it was developed a polynomial model having the percentage of PET as independent variable. It was verified that with the increase of the percentage of PET there is a decrease of the value of the dynamic modulus. It was verified that the polynomial model obtained a coefficient of determination of 0.994, which shows its success in predicting the dynamic modulus of mortar specimens incorporated with PET.*

Keywords: *mortar, ultrasonic pulse velocity, PET*