

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO ANOVA EM AMOSTRAS DE CONCRETO LEVE COM PÉROLAS DE EPS: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA VOLTADA PARA O ENSINO DE ESTATÍSTICA NOS CURSOS DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

USE OF ANOVA METHOD IN SAMPLES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH EPS PEARLS: A DIDACTIC APPROACH TO STATISTICS TEACHING IN UNDERGRADUATE ENGINEERING COURSES

Antônio Marcos da Silva Oliveira¹, Diêgo Fernandes Ribeiro²,
Lourdiane Gontijo das Mercês Gonzaga³

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v41p3-15.2022

RESUMO

A análise de variância (ANOVA) é uma ferramenta essencial entre os modernos experimentos de engenharia, incluindo as pesquisas em torno dos materiais compósitos cimentícios. A execução de experimentos planejados, tendo em vista as aplicações práticas da Estatística sobre as Ciências Aplicadas, possibilita a interpretação rápida das medidas coletadas, ao mesmo tempo em que permite estipular, com certo nível de confiabilidade, a acurácia dos resultados. O presente estudo apresenta uma proposta de abordagem didática do método ANOVA por meio da análise da resistência à compressão e do módulo de elasticidade para misturas de concreto leve com adição de pérolas de poliestireno expandido (EPS). Foram considerados quatro níveis ou tratamentos para o experimento e os dados coletados nos ensaios foram interpretados com auxílio da ANOVA, calculada através de um editor de planilhas. O presente estudo permitiu a verificação da influência da quantidade de pérolas de EPS sobre as propriedades mecânicas da mistura, o que o torna fonte de embasamento para professores e alunos do ensino superior interessados no processo de condução de métodos estatísticos em laboratório, por meio de uma abordagem relativamente simples, direta e objetiva.

Palavras-chave: ANOVA; concreto leve; poliestireno expandido; estatística.

ABSTRACT

Analysis of variance (ANOVA) is an essential tool among modern engineering experiments, including research on cementitious composite materials. The execution of planned experiments, in view of the practical applications of Statistics on Applied Sciences, allows the rapid interpretation of the collected measures, while allowing stipulating, with a certain level of reliability, the accuracy of the results. The current study presents a proposal for a didactic approach to the ANOVA method through the analysis of the compressive strength and the modulus of elasticity for lightweight concrete mixtures with the addition of expanded polystyrene (EPS) beads. Four levels or treatments were considered for the experiment and the data collected in the tests were interpreted with the aid of ANOVA, calculated using a spreadsheet editor. The present study allowed the verification of the

¹ Pós-graduado em Ciência e Engenharia de Materiais, Faculdade Unyleya; ant.marcos.cvo@hotmail.com

² Professor Pós-graduado em Docência do Ensino Superior, Faculdade Cidade de Guanhães; diegofernandes008@hotmail.com

³ Professora Dra. em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais; lourdiane@cefetmg.br

influence of the amount of EPS beads on the mechanical properties of the mixture, which makes it a source of support for teachers and students of higher education interested in the process of conducting statistical methods in the laboratory, through a relatively simple, direct and objective approach.

Keywords: ANOVA; lightweight concrete; expanded polystyrene; estatística.

INTRODUÇÃO

O tratamento e a interpretação de dados qualitativos e quantitativos por engenheiros e pesquisadores dependem quase que, essencialmente, da abordagem centrada em métodos estatísticos. É evidente, portanto, que a Ciência Estatística tem um importante papel dentro da Engenharia, incluindo os aspectos de planejamento. Conforme descrevem Montgomery e Runger (2014), a execução de experimentos planejados é o que garante a análise completa das variáveis que influenciam o experimento, possibilitando que os engenheiros e cientistas descubram formas de aumentar o rendimento e de, ao mesmo tempo, reduzir os custos de operação, tempo e variabilidade dos processos analisados.

Dentro de um planejamento experimental, o pesquisador deverá decidir pelos *objetos* ou *condições impostas* que serão analisados. No campo da Estatística, tais condições são chamadas níveis ou tratamentos (ANJOS, 2009), e inúmeros exemplos podem ser citados, dentro dos mais diversos setores de pesquisa, como a quantidade de aditivos em misturas de concreto, o teor de nutrientes dos alimentos ou o percentual de óleo existente em uma semente. Se o interesse do pesquisador durante o experimento reside em analisar uma única variável, fala-se em análise de fator único (MONTGOMERY; RUNGER, 2014).

A utilização da Análise de Variância (ANOVA) em experimento com um único fator se torna uma ferramenta poderosíssima para interpretação de resultados em pesquisas laboratoriais. Os experimentos em materiais como concretos e argamassas podem ser conduzidos de forma a se obter o máximo

controle das variáveis, garantindo a observação da influência quantitativa de um dos agregados ou aditivos sobre as propriedades da mistura. A utilização da ANOVA nos mais variados experimentos de engenharia, incluindo as modernas pesquisas sobre materiais compósitos cimentícios, demonstra a grande aplicabilidade desse método de análise.

Entre os diversos materiais que podem ser investigados pela ANOVA, são citados os concretos de reduzida massa específica, como o concreto leve com pérolas de poliestireno expandido (EPS), também conhecido como CLE. Conforme destaca Catoia (2012), o uso desse polímero em misturas de concreto garante a produção de um material compósito de maior leveza, ideal para aplicação em elementos pré-moldados, por exemplo.

O estudo aprofundado de importantes propriedades do CLE tem início nos anos 1990, com a investigação do efeito das pérolas sobre as características mecânicas do concreto, estudo este publicado por Parant e Le Roy (1999⁴ apud MILED; SAB; LE ROY, 2007). Ainda durante o fim do século XX, Sri Ravindrarajah e Tuck (1994) e Sabaa e Sri Ravindrarajah (1997) verificaram outros aspectos de significativa importância para compreensão de propriedades relativas ao material, como o comportamento mecânico, a relação água-cimento e o uso do EPS triturado em substituição ao agregado de maior granulometria. Nos anos 2000, outras importantes pesquisas foram realizadas, incluindo a utilização de cinza volante na mistura e o uso de modelagens e simulações computacionais. Tais estudos foram desenvolvidos por Saradhi Babu, Ganesh Babu e Wee (2005) e Bouvard et al. (2007).

⁴ PARANT, E.; LE ROY, R. **Optimisation des bétons de densité inférieure à 1**. Tech. rep., Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France. 1999.

Quanto à abordagem estatística com auxílio de ANOVA para análise do CLE, observa-se tal estudo no trabalho de Trussoni, Hays e Zollo (2013), quando os autores investigaram o mecanismo de ruptura em amostras de concreto sem adição de aditivos ou incorporadores de ar. De fato, pôde-se constatar redução da fragilidade das amostras em virtude da maior inserção de pérolas, uma vez que estas proporcionam o aumento da absorção de energia durante os ensaios.

A presente pesquisa apresenta a aplicação prática da Análise de Variância em torno de mistura de CLE produzida com agregados locais da região central do estado de Minas Gerais. Foram analisadas amostras de concreto leve com adição de pérolas de poliestireno expandido (EPS), tendo sido realizadas substituições parciais do volume de agregado graúdo (brita 0), no estado seco e solto, por esferas de EPS com diâmetros entre 0,6 mm e 2,4 mm. Após o devido processo de cura, as amostras foram ensaiadas para verificação da resistência à compressão e determinação do módulo de elasticidade.

Salienta-se que o objetivo desta pesquisa foi o de analisar a influência da quantidade de pérolas de EPS sobre as propriedades mecânicas da mistura, por meio do auxílio da análise de variância em experimento com um único fator (*one way*). Através deste estudo buscou-se elucidar a aplicação do método ANOVA dentro da engenharia, em especial da Engenharia Civil e de Materiais, de forma que esta pudesse servir de embasamento para professores e alunos do ensino superior interessados no processo de condução de métodos estatísticos em laboratório, por meio de uma abordagem relativamente simples e direta.

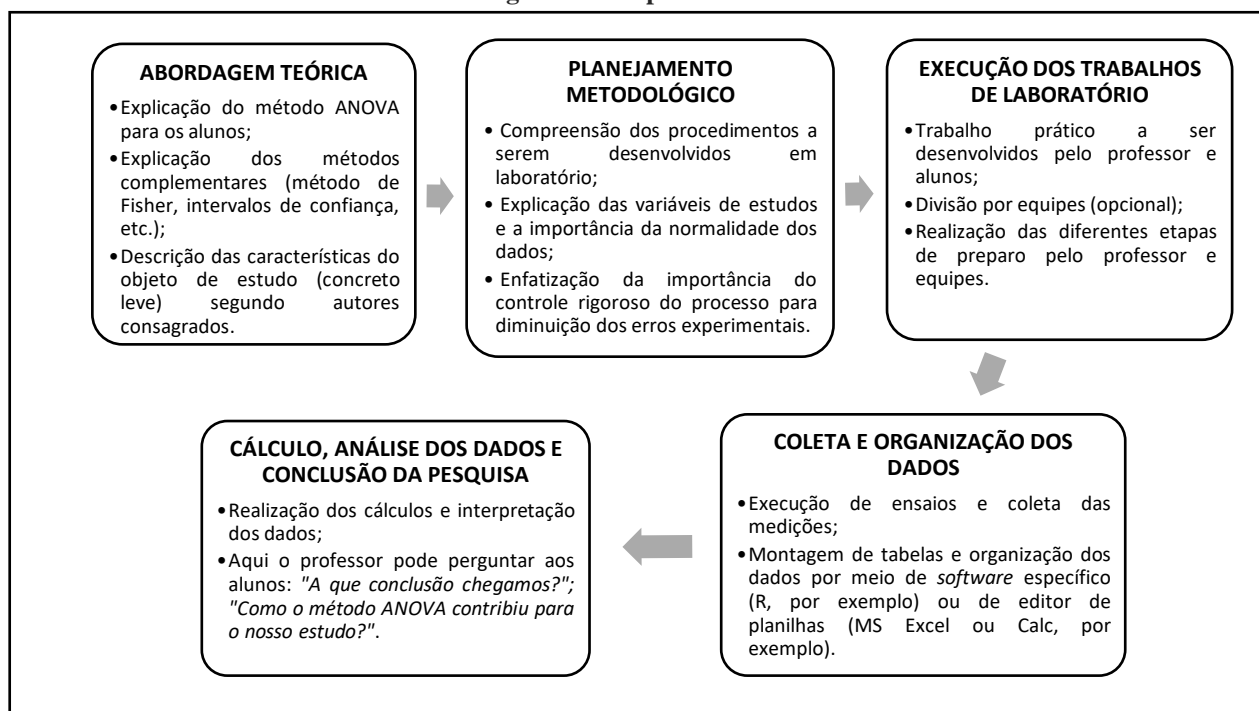
Quanto à classificação da pesquisa, de acordo com os critérios definidos por Gil (1999), ressalta-se que esta se enquadra na categoria descritiva, uma vez que a condução experimental se assenta em normas e padronizações específicas. Do ponto de vista de Rampazzo (2015), pode-se dizer que se trata de uma pesquisa experimental e quantitativa. Além disso, tendo como base a abordagem teórica desenvolvida ao longo deste estudo, pode-se classificá-lo como sendo uma pesquisa bibliográfica, ainda que não o seja em sua totalidade.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O resumo teórico a seguir descreve sucintamente o método ANOVA em experimento com fator único. Essa descrição poderá servir como um guia norteador para o professor, de forma que ele possa ter uma visão abrangente do método estatístico aplicado a esta pesquisa, executando a posterior interpretação dos dados de forma mais clara e objetiva.

As etapas do trabalho desenvolvido em laboratório podem ser agrupadas e inter-relacionadas conforme o esquema apresentado na Figura 1. O conhecimento teórico do método ANOVA se encontra inserido dentro da primeira etapa de trabalho.

Figura 1 – Etapas de trabalho



Fonte: elaborada pelos autores.

O método ANOVA em experimento de fator único

Spiegel (1993) e Magalhães e Lima (2002) informam que em muitas situações pode haver a necessidade de se testar uma determinada hipótese em que as médias amostrais não diferem entre si, havendo uma dispersão decorrente unicamente do acaso. Diante disso, a comparação de amostras definidas por *um* fator ou variável quantitativa será feita por meio de testes com as correspondentes médias amostrais, incluindo também suas respectivas variações. A resolução de problemas desse tipo envolverá o método desenvolvido por Fisher, também conhecido como Análise de Variância ou ANOVA.

Montgomery e Runger (2014) destacam que cada tratamento, em um experimento com fator único, pode ser pensado como uma população normal com média μ_i e variância σ^2 . As observações do experimento podem ser descritas por meio do modelo linear estatístico da seguinte forma (Equação 1):

$$Y_{ij} = \mu_i + \epsilon_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, a \text{ e } j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

em que Y_{ij} são as variáveis aleatórias de cada observação e ϵ_{ij} são os componentes do erro aleatório de cada tratamento, considerados normal e independentemente distribuídos, com média zero e variância σ^2 .

De acordo com Montgomery e Runger (2014), os dados de um experimento planejado podem ser inicialmente analisados por meio de um diagrama de caixa ou *box-plot*. Tais diagramas permitem a observação da variabilidade existente entre as observações (variabilidade *within*) ou entre os níveis do fator (variabilidade *between*).

A análise de variância com fator único consiste num teste de hipóteses em que são testadas as médias dos a tratamentos, objetivando conhecer o efeito da mudança dos níveis do fator sobre a média. Fonseca e Martins (2011) pontuam que a hipótese nula (H_0) se fundamenta no fato de que todas as amostras ou tratamentos são oriundos de uma população normal. Caso haja aceitação da hipótese nula, considera-se que as mudanças nos tratamentos não exercem efeito sobre a resposta média (Equação 2):

$$\begin{aligned} H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a = 0 \\ H_1: \mu_i \neq 0 \text{ para no mínimo um } i \end{aligned} \quad (2)$$

em que: H_0 é a hipótese nula e H_1 é a hipótese alternativa.

Na Tabela 1 tem-se um resumo da Análise de Variância, ou ANOVA, para o modelo de efeitos fixos, em que os efeitos dos tratamentos são considerados desvios da média global μ .

Tabela 1 – ANOVA para experimento com único fator: modelo de efeitos fixos

Fonte de variação	SQ*	GL**	MQ***	F ₀
Tratamentos	SQ _{Trat.}	a – 1	MQ _{Trat.}	MQ _{Trat./MQ_E}
Erro	SQ _E	a(n – 1)	MQ _E	
Total	SQ _T	an – 1		

*SQ = Soma dos Quadrados; **GL = Graus de Liberdade; ***MQ = Média Quadrática.

Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2014).

Lewis (1995) destaca que a base da análise de variância decorre da comparação da variação *entre* grupos e da variação *dentro* dos grupos. A estimativa dentro de cada grupo ou tratamento é uma forma de analisar as correspondentes variações entre as amostras. Já a variação entre grupos permite a comparação entre os tratamentos. Uma vez que não é possível saber se as médias populacionais diferem de fato uma da outra, a razão entre as duas estimativas de variância permite verificar a ordem de tamanho da estimativa entre grupos, como forma de aceitá-la ou rejeitá-la. Assim sendo, a etapa final da Análise de Variância consiste em calcular o chamado F_0 , por meio da seguinte relação (Equação 3):

$$F_0 = \frac{SQ_{Trat.}/a - 1}{SQ_E/a(n - 1)} = \frac{MQ_{Trat.}}{MQ_E} \quad (3)$$

Montgomery e Runger (2014) destacam que a rejeição de H_0 ocorre com base na distribuição F de Fisher-Snedecor, quando $F_0 > F_{\alpha, a-1, a(n-1)}$, sendo F_0 o valor calculado pela Equação 3. O teste de hipótese também pode ser feito por meio da comparação do valor P frente

ao nível de significância α adotado, geralmente igual a 5%. Se o valor P for inferior ao nível de significância, a hipótese nula deverá ser rejeitada.

Quanto ao intervalo de confiança para média de tratamento, este poderá ser feito com base na distribuição t de Student com $a(n - 1)$ graus de liberdade. Para um nível de significância α , o intervalo de confiança de $100(1 - \alpha)\%$ para a média do i-ésimo tratamento é encontrado por meio do intervalo apropriado.

Havendo rejeição da hipótese nula (H_0), sabe-se que algumas das médias dos tratamentos diferem-se entre si. Contudo, a ANOVA não permite a identificação dos distintos níveis ou tratamentos. Montgomery e Runger (2014) informam que, para resolver esse problema, deve-se recorrer a métodos específicos como o método de Fisher da Mínima Diferença Significativa (MDS). De acordo com esse método, o par de médias é declarado significativamente diferente para o caso em que a diferença entre médias for superior à MDS.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A escolha do traço do concreto usual foi feita seguindo os critérios de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland em concordância com os trabalhos de Ambrozewicz (2012) e Rodrigues (1995).

Para preparo do concreto foram utilizados: cimento Portland pozolânico resistente a sulfatos, CPIV 32 RS, produzido pela empresa InterCement Brasil, Unidade de Pedro Leopoldo (Minas Gerais); areia média de rio, proveniente da região de Paraúna (Minas Gerais); brita 0, com dimensão máxima característica igual a 12,5 mm, produzida pela empresa AgroCity, na região de Curvelo (Minas Gerais), conforme informações prestadas pelos comerciantes.

Após o ajuste inicial do traço padrão, foram preparadas quatro misturas em betoneira com diferentes percentuais de EPS em substituição ao volume de agregado graúdo (brita 0), no

estado seco e solto. Os traços de cada uma delas estão reunidos na Tabela 2. O fator água-cimento foi corrigido em função da absorção de água pela brita.

Tabela 2 – Traços em massa utilizados para preparo das amostras

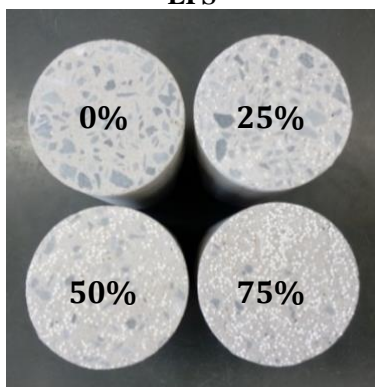
Traços	Cimento : Areia : Brita 0 : EPS	Fator A/C*
T01	1,000 : 1,601 : 1,798 : 0,000	0,528
T02	1,000 : 1,601 : 1,348 : 0,009	0,525
T03	1,000 : 1,601 : 0,899 : 0,018	0,522
T04	1,000 : 1,601 : 0,449 : 0,027	0,520

*Fator água-cimento.

Fonte: elaborada pelos autores.

Para cada traço foram testados quatro corpos de prova em ensaio de compressão aos 28 dias. Ressalta-se que o traço T01 não contou com adição de EPS, sendo esse correspondente à mistura de concreto convencional. Os traços T02, T03 e T04 correspondem às misturas com substituição de 25%, 50% e 75% do volume de agregado graúdo por pérolas de EPS (Figura 2).

Figura 2 – Amostras com diferentes percentuais de EPS



Fonte: elaborada pelos autores.

Os corpos de prova foram preparados em moldes metálicos com dimensão básica de 100 mm e altura de 200 mm. Os procedimentos de moldagem e cura das amostras seguiram os critérios definidos na NBR 5738 (ABNT, 2015) e NBR 5739 (ABNT, 2007), tendo sido aplicados 50 golpes em cada camada durante a etapa de preenchimento dos moldes, em virtude da menor massa específica e baixa capacidade

de adensamento do concreto leve. As bases dos corpos de prova passaram por processo de retificação em equipamento da marca Stuhler. Os testes de resistência à compressão foram executados em prensa automática da marca Instron, com carga máxima de 300 kN, modelo EMIC 23-300 (Figura 3). O passo adotado nos ensaios foi de 10 MPa/min. Para determinação do módulo de elasticidade, foram coletadas as alturas iniciais de todos os corpos de prova por meio de paquímetro digital.

Figura 3 – Prensa EMIC utilizada para ensaio



Fonte: acervo dos autores.

Salienta-se que as análises de variância para os dados de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram realizadas com auxílio de um editor de planilhas. O uso de pacotes computacionais para realização dos cálculos diminui as possibilidades de erros matemáticos, ao mesmo tempo que permite maior rapidez e agilidade na obtenção de resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise da resistência à compressão

Os ensaios de rompimento dos corpos de prova em prensa, conforme ilustra a Figura 4, indicaram, *a priori*, uma redução gradual dos valores de tensão mediante o aumento gradual de agregado leve na mistura.

Figura 4 – Ensaio de rompimento de corpo de prova



Fonte: acervo dos autores.

A comparação entre as médias de resistência aos 28 dias, obtidas para cada traço, foi feita por meio da Análise de Variância (ANOVA), aplicada em experimento com fator único (percentual de pérolas de EPS em substituição ao volume de brita 0). Os dados coletados do experimento estão reunidos na Tabela 3. As observações correspondem aos corpos de prova testados, e as diferentes porcentagens de EPS se referem aos níveis ou tratamentos do fator.

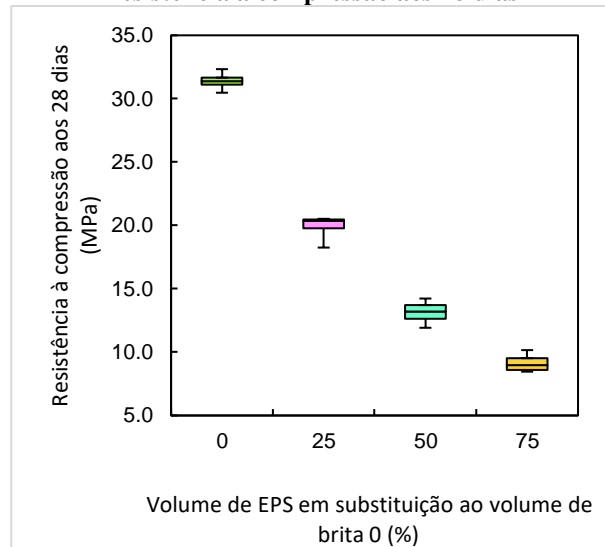
Tabela 3 – Resistência à compressão do concreto (MPa)

Porcentagem de EPS (%)	Observações				Totais
	1	2	3	4	
0	31,44	30,47	31,32	32,33	125,56
25	20,52	18,25	20,28	20,45	79,50
50	14,23	13,54	12,87	11,92	52,56
75	10,16	9,31	8,46	8,64	36,57

Fonte: elaborada pelos autores.

Na Figura 5 estão representados os diagramas de caixa (*box-plot*) montados para cada tratamento ou nível, referentes aos diferentes percentuais de EPS. O diagrama à esquerda no topo da Figura 5 permite constatar que o concreto de referência, sem adição de EPS, apresenta um comportamento distinto frente aos demais traços.

Figura 5 – Diagramas de caixa com base na resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: elaborada pelos autores.

Por meio da Análise de Variância, foi testada a hipótese de que diferentes percentuais de EPS no concreto *não afetam* a resistência à compressão. Sendo μ_i o valor médio populacional de resistência de cada tratamento, teve-se, portanto, como hipótese nula (H_0) e hipótese alternativa (H_1) (Equação 4):

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0 \quad (4)$$

$$H_1: \mu_i \neq 0 \text{ para no mínimo um } i, \text{ com } i = 1, 2, 3, 4$$

A ANOVA encontra-se sintetizada na Tabela 4, em que foi adotado nível de significância igual a 5%. Foi constatado valor P inferior ao nível de significância, de forma que a hipótese nula, H_0 , pôde ser rejeitada. Isso indica que existe uma forte evidência de que o percentual de EPS no concreto influencia sua resistência à compressão, ao nível de confiança de 95%.

Tabela 4 – ANOVA para dados de resistência à compressão

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F ₀	Valor P	F _{crítico}
Tratamentos	1137,14	3	379,05	455,78	1,267 x 10 ⁻¹²	3,490
Erro	9,98	12	0,83	-	-	-
Total	1147,12	15	-	-	-	-

Fonte: elaborada pelos autores.

Na Tabela 5 estão apresentados os intervalos de confiança (IC) de 95% para a média de cada tratamento. Verifica-se que os intervalos se encontram bem espaçados, não havendo interseção entre eles.

Tabela 5 – IC para resistência à compressão de cada tratamento (MPa)

Percentual de EPS (%)	Média	Margem de Erro	IC 95%
0	31,39	0,99	[30,40; 32,38]
25	19,88		[18,88; 20,87]
50	13,14		[12,15; 14,13]
75	9,14		[8,15; 10,14]

Fonte: elaborada pelos autores.

Na Tabela 6 estão os resultados observados para o método de Fisher da Mínima Diferença Significativa.

Tabela 6 – Comparações entre médias com base na Mínima Diferença Significativa (MDS)

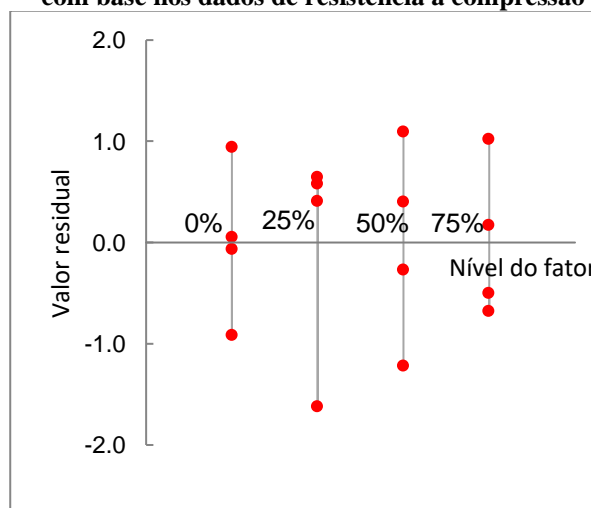
Comparações entre tratamentos	Diferenças entre médias	MDS
4 vs. 1	22,25	1,41
4 vs. 2	10,73	
4 vs. 3	4,00	
3 vs. 1	18,25	
3 vs. 2	6,74	
2 vs. 1	11,52	

Fonte: elaborada pelos autores.

Com base na Tabela 6, observa-se que a MDS se mostra inferior a todas as diferenças entre médias, o que corrobora a existência de distintos valores de μ para cada um dos tratamentos. Isso implica dizer que todos os níveis testados se relacionam a diferentes resistências à compressão, de forma que o concreto com maior percentual de EPS mostra menor resistência.

Os resíduos foram calculados com base na diferença entre o valor de cada observação e a média do tratamento. Na Figura 6, os valores residuais foram plotados em função de cada nível do fator (percentual de EPS). Salienta-se que os pontos mais próximos de zero indicam proximidade entre a média do tratamento e a resistência à compressão específica do corpo de prova durante o ensaio.

Figura 6 – Gráfico dos resíduos vs. níveis de fator com base nos dados de resistência à compressão



Fonte: elaborada pelos autores.

Análise do módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade das amostras aos 28 dias foi feita com base na deformação medida pela prensa EMIC.

Inicialmente, antes do ensaio de compressão, procedeu-se à medição da altura do eixo de cada um dos corpos de prova.

Tendo em vista que o módulo de elasticidade é uma variável dependente da resistência à compressão, propôs-se realizar a análise de variância para os valores aproximados observados nos ensaios aos 28 dias. Os dados obtidos através do experimento encontram-se resumidos na Tabela 7.

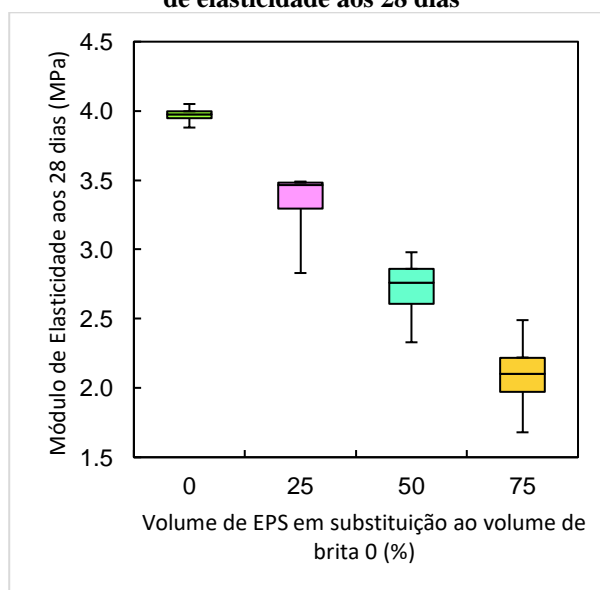
Tabela 7 – Módulo de elasticidade do concreto (GPa)

Porcentagem de EPS (%)	Observações				Totais
	1	2	3	4	
0	3,97	3,88	3,98	4,05	15,88
25	3,45	2,83	3,48	3,49	13,25
50	2,98	2,82	2,70	2,33	10,83
75	2,49	2,07	1,68	2,13	8,37

Fonte: elaborada pelos autores.

Os diagramas de caixa, montados com base nos valores de módulos de elasticidade, estão representados na Figura 7.

Figura 7 – Diagramas de caixa com base no módulo de elasticidade aos 28 dias



Fonte: elaborada pelos autores.

Verifica-se que o diagrama para percentual de 0%, no topo à esquerda da figura, mostra-se mais concentrado e com comportamento distinto dos demais. Para os digramas relativos às diferentes substituições do agregado graúdo por EPS, 25%, 50% e 75%, constata-se a existência de interseções entre eles. Diante disso, não se pode afirmar, *a priori*, que existem diferenças significativas de módulo de elasticidade decorrente da adição de EPS para estes percentuais.

De forma análoga à ANOVA executada para a resistência à compressão, considerou-se como fator único o percentual de EPS em substituição ao volume de brita 0 para cada traço. Foi testada a hipótese de que diferentes percentuais de EPS no concreto *não afetam* o módulo de elasticidade. Sendo μ_i o valor médio populacional do módulo de elasticidade de cada tratamento, teve-se, portanto, como hipótese nula (H_0) e hipótese alternativa (H_1) (Equação 5):

$$\begin{aligned}
 H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0 \\
 H_1: \mu_i \neq 0 \text{ para no mínimo um } i, \text{ com } i = 1, 2, 3, 4
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Na Tabela 8 se encontram os dados da ANOVA, com nível de significância igual a 5%. Sendo o valor P inferior ao nível de significância, a hipótese nula, H_0 , foi rejeitada. Isso mostra que existem fortes evidências de que a incorporação de pérolas de poliestireno expandido, em diferentes proporções, ocasiona interferências sobre o módulo de elasticidade do concreto.

Tabela 8 – ANOVA para dados de módulo de elasticidade

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F ₀	Valor P	F _{crítico}
Tratamentos	7,78	3	2,595	35,164	3,18 x 10 ⁻⁶	3,490
Erro	0,89	12	0,0738	-	-	-
Total	8,67	15	-	-	-	-

Fonte: elaborada pelos autores.

Na Tabela 9 estão apresentados os intervalos de confiança (IC) de 95% para a média de cada tratamento. Observa-se que, embora os intervalos não apresentem interseção entre si, seus extremos encontram-se bastante próximos.

Tabela 9 – Intervalos de confiança para módulo de elasticidade de cada tratamento (GPa)

Percentual de EPS (%)	Média	Margem de Erro	IC 95%
0	3,97	0,30	[3,67; 4,27]
25	3,31		[3,02; 3,61]
50	2,71		[2,41; 3,00]
75	2,09		[1,80; 2,39]

Fonte: elaborada pelos autores.

Na Tabela 10 se encontram os resultados das comparações executadas com base na Mínima Diferença Significativa (MDS).

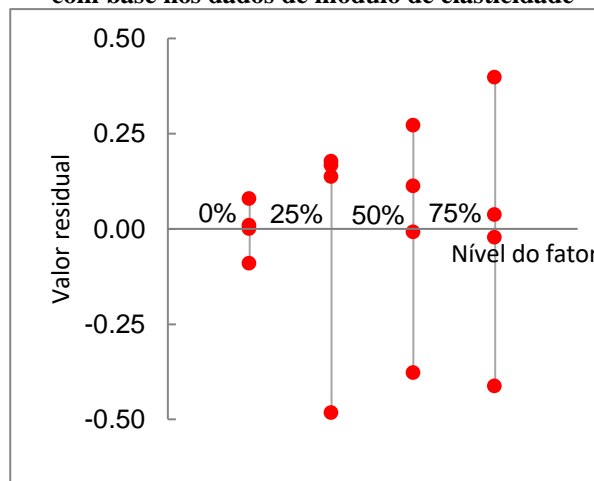
Tabela 10 – Comparações entre médias com base na Mínima Diferença Significativa (MDS)

Comparações entre tratamentos	Diferenças entre médias	MDS
4 vs. 1	1,88	0,42
4 vs. 2	1,22	
4 vs. 3	0,62	
3 vs. 1	1,26	
3 vs. 2	0,60	
2 vs. 1	0,66	

Fonte: elaborada pelos autores.

De acordo com a Tabela 10, as diferenças entre médias foram todas superiores à MDS, sendo possível constatar a existência de distintos valores de μ entre todos os tratamentos, o que implica dizer que todos os níveis testados se relacionam a diferentes módulos de elasticidade, de forma que o concreto com maior percentual de EPS mostra menor módulo.

Figura 8 – Gráfico dos resíduos vs. níveis de fator com base nos dados de módulo de elasticidade



Fonte: elaborada pelos autores.

Pode-se observar na Figura 8 os resíduos em função de cada nível (percentual de EPS). Os valores residuais mais próximos de zero indicam proximidade entre a média e o módulo de elasticidade apresentado pelo corpo de prova durante o ensaio. Conforme se observa, o aumento gradual do percentual de EPS nas misturas de concreto tende a ocasionar um maior afastamento dos dados em torno da média, ou seja, tem-se uma variação maior do módulo de elasticidade em virtude da diminuição da quantidade de brita 0 e consequente aumento da quantidade de pérolas de EPS adicionadas ao concreto.

REFLEXÕES SOBRE A ABORDAGEM EM SALA DE AULA

O desenvolvimento de novas tecnologias que atendam à sociedade é uma etapa que passa primeiramente pelos laboratórios e trabalhos de campo. Dessa forma, não basta que seja feita apenas a coleta de dados, mas é preciso também que o pesquisador saiba trabalhar com os números levantados, de forma que possa extrair deles o máximo de informação possível. Por conseguinte, a maior divulgação do método ANOVA, através de experimentos práticos dentro dos cursos de graduação, é uma iniciativa que merece a devida atenção. Apesar desse método estatístico ter uma vasta aplicabilidade para o desenvolvimento de novas tecnologias, seu uso permanece restrito a uma pequena parcela do meio acadêmico, geralmente se reservando aos estudantes, professores e pesquisadores dos cursos de pós-graduação.

Quanto à abordagem didática do método ANOVA apresentada neste trabalho, recomenda-se que o docente faça adequações sempre que houver necessidade, uma vez que as condições aqui apresentadas não se adaptam a todos os cenários do meio acadêmico. É essencial que os estudantes tenham uma boa compreensão do método aplicado, para que consigam extrair resultados confiáveis e, ao mesmo tempo, possam interpretá-los sob um olhar metódico e criterioso.

Recomenda-se ainda que o docente se sinta livre para fazer uso de outras ferramentas estatísticas, incluindo gráficos e diagramas, a fim de que os alunos desenvolvam um olhar mais abrangente durante a etapa de interpretação dos resultados. Logo, aconselha-se que este trabalho não seja executado no início do semestre letivo, uma vez que o discente ainda não terá toda a bagagem de conhecimento necessária para tal.

A interdisciplinaridade aliada a um método prático e sistemático é uma ferramenta de grande ajuda no processo de assimilação de conteúdo. É importante frisar que esta nova junção ou simbiose representa uma nova

esperança para a reconexão dos saberes antes fragmentados, diante de um cenário social cada vez mais pragmático. Embora o conhecimento teórico seja de grande importância, a aplicação prática desse conhecimento tem se tornado cada vez mais essencial para a formação de profissionais capacitados e preparados para a vivência fora da sala de aula.

CONCLUSÕES

O trabalho apresentado ao longo deste artigo evidenciou, de forma prática, didática e objetiva, a aplicação do método ANOVA em um projeto experimental de engenharia voltado para a análise de uma tecnologia relativamente nova: o concreto leve com EPS. Pode-se afirmar que a utilização da ANOVA para interpretação dos resultados coletados atingiu os objetivos propostos para esta pesquisa. Observa-se que os diferentes percentuais de EPS se relacionam a diferentes médias entre os tratamentos, as quais foram corroboradas pelo método de Fisher da Mínima Diferença Significativa. Assim como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade também mostrou diminuição gradual em virtude do aumento da quantidade de pérolas em substituição à brita 0 na mistura.

Com relação ao material compósito em questão, é importante pontuar que sua produção exige alto rigor e padronização durante as etapas de preparo e cura dos elementos, tendo em vista o alto grau de heterogeneidade observada entre as amostras, o qual decorre, principalmente, da dificuldade de moldagem e adensamento dos corpos de prova em virtude de sua leveza. Tendo em vista que a incorporação de pérolas de EPS ocasiona redução da resistência à compressão, assim como do módulo de elasticidade, a obtenção de concreto leve com finalidade estrutural poderia ser feita mediante a utilização de adições especiais. Ressalta-se que, apesar da menor resistência do concreto leve, as misturas com maior quantidade de pérolas podem ser utilizadas em elementos construtivos sujeitos a esforços reduzidos, como contrapisos e preenchimentos de vãos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Knauf Isopor Ltda. pela doação das pérolas de EPS utilizadas para preparo das amostras.

REFERÊNCIAS

- AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção**. São Paulo: PINI, 2012.
- ANJOS, A. **Capítulo 7: Análise de Variância**. Notas de Aula. Departamento de Estatística, Setor de Ciências Exatas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009. Disponível em: <<http://www.est.ufpr.br/ce003/>>. Acesso em: 02 mai. 2018.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.
- BOUVARD, D. et al. Characterization and simulation of microstructure and properties of EPS lightweight concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1666-1673, 2007.
- CATOIA, T. **Concreto ultraleve® estrutural com pérolas de EPS: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes**. 2012. 154 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.
- FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A. **Curso de estatística**. São Paulo: Atlas, 2011.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas em pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.
- LEWIS, D. G. **Análise de variância**. São Paulo: Editora Harbra, 1995.
- MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. **Noções de probabilidade e estatística**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.
- MILED, K.; SAB, K.; LE ROY, R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: experimental investigation and modelling. **Mechanics of Materials**, v. 39, p. 222-240, 2007.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Trad. Verônica Calado. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- RAMPAZZO, L. **Metodologia científica: para alunos dos cursos de graduação e pós-graduação**. São Paulo: Edições Loyola, 2015.
- RODRIGUES, P. P. F. **ET-67 Parâmetros de Dosagem do Concreto**. São Paulo. ABCP, 1995.
- SABAA, B. A.; SRI RAVINDRARAJAH, R. Engineering properties of lightweight concrete containing crushed expanded polystyrene waste. In: **Symposium MM: Advances in Materials for Cementitious Composites**, 1997, Boston, USA. Materials Research Society, p. 1-11, 1997.
- SARADHI BABU, D.; GANESH BABU, K.; WEE, T. H. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1218-1223, 2005.
- SPIEGEL, M. R. **Estatística**. São Paulo: Makron Books, 1993.
- SRI RAVINDRARAJAH, R.; TUCK, A. J. Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads. **Cement and Concrete Composites**, v. 16, p. 273-277, 1994.
- TRUSSONI, M.; HAYS, C. D.; ZOLLO, R. F. Fracture properties of concrete containing expanded polystyrene aggregate replacement. **ACI Materials Journal**, v. 110, n. 5, p. 549-557, 2013.

DADOS BIOGRÁFICOS DOS AUTORES



Antônio Marcos da Silva Oliveira – Graduação em Engenharia Civil pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Curvelo (2017). Pós-graduado em Engenharia de Produção e MBA em Gestão Pública pelo Centro Universitário Leonardo Da Vinci (UNIASSELVI) (2019). Especialista em Ciência e Engenharia de Materiais pela Faculdade Unyleya (2020). Participou de Projeto de Iniciação Científica Voluntária (PICV) e do Programa de Iniciação Científica com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), tendo projetos de pesquisa voltados para a área de Materiais e Componentes de Construção. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Engenharia Civil e Materiais de Construção.



Lourdiane Gontijo das Mercês Gonzaga – Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (1999). Mestrado em Engenharia de Estruturas pela Universidade Federal de Minas Gerais (2003) e doutorado em Engenharia de Estruturas pela Universidade Federal de Minas Gerais (2008). Foi Diretora do Campus Curvelo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2016 - 2019). Coordenou o curso de Engenharia Civil do Campus Curvelo (2012 - 2016). Atualmente, é professora no curso técnico em Edificações e na graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Tem experiência na área de Engenharia Civil, Estruturas Metálicas e Materiais de Construção.



Diêgo Fernandes Ribeiro – Graduação em Engenharia Civil pelas Faculdades Unidas do Norte de Minas (2011). Possui curso de aperfeiçoamento em Gestão de Negócios Imobiliários e da Construção Civil pela Fundação Getúlio Vargas (2013), especialização em Docência do Ensino Superior pela Faculdade Cidade de Guanhães (2014). Atua como Professor no curso de Engenharia Civil pela Faculdade Promove Curvelo. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Engenharia Civil e Materiais de Construção. Responsável Técnico e Consultor da Concretagem Brasil Ltda.