

## **METODOLOGIA DO EXPERIMENTO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA (BOX-BEHNKEN) PARA OTIMIZAÇÃO DO TRAÇO DO CONCRETO COM CINZA VOLANTE DE CARVÃO MINERAL**

**DANIELE FERREIRA LOPES<sup>1</sup>; SABRINA DA SILVA NEVES<sup>2</sup>; CÉSAR ANTONIO OROPESA AVELLANEDA (ORIENTADOR)<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – [epdaniele@gmail.com](mailto:epdaniele@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal do Pampa – [sabrinasilva@unipampa.edu.br](mailto:sabrinasilva@unipampa.edu.br)

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas – [cesaravellaneda@gmail.com](mailto:cesaravellaneda@gmail.com)

### **1. INTRODUÇÃO**

O consumo e a produção de cimento apresentam grande impacto em termos de emissões de gases do efeito estufa. Logo, a busca pela redução do impacto ambiental, se faz necessário. E o desenvolvimento de materiais alternativos que sirvam de incorporação em matrizes cimentícias, como as cinzas volantes, provenientes da queima do carvão mineral produzido nas Usinas Termelétricas estão em voga (FERREIRA, 2019).

Cinzas volantes são materiais que quando descartados de forma inadequada, podem acarretar danos ao meio ambiente. Todavia, o uso desse subproduto substituindo parcialmente o cimento Portland, é um modo seguro e barato de removê-lo da superfície do solo, contribuindo para conservação da energia usada na fabricação do cimento, e de recursos minerais (calcário e argila) cuja exploração geralmente agride o meio ambiente (JUNG *et al.*, 2018).

Estas cinzas possuem características de material pozzolânico capazes de reagir com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, em temperatura ambiente e na presença de água, formando compostos com propriedades hidráulicas (METHA, 2014).

Diante disso, esta pesquisa apresenta um conjunto de técnicas estatísticas básicas aplicados à metodologia de superfície de resposta que teve como objetivo, otimizar do traço do concreto contendo cinza volante na sua formulação.

### **2. METODOLOGIA**

#### **2.1 Delineamento Box-Behnken**

Um delineamento experimental de três fatores e três níveis experimentais tipo Box-Behnken foi empregado para a otimização do traço do concreto com cinza volante de forma a permitir uma estimativa eficiente e econômica dos coeficientes de primeira e segunda ordem do modelo matemático ajustado. Avaliou-se as respostas: traço do concreto, fator água/cimento e tempo de cura, mostrados na Tabela 1. No estudo, os fatores foram codificados em nível mínimo (-1), ponto central (0) e máximo (+1) e executou-se o planejamento mostrado na Tabela 2, totalizando 15 experimentos. O planejamento experimental e a análise dos resultados foram realizados utilizando-se o *software* Statistica 7.

Tabela 1 - Fatores e níveis do delineamento *Box-Behnken*

Fator	Unidade	Nível		
		–	0	+
tra_conc	%	5	10	15
fator_ac	–	0,58	0,60	0,62
temp_cura	dias	14	28	42

A variável traço do concreto, foi denominada como: traço verão (5% de cinza volante), traço outono (10% de cinza volante) e traço inverno (15% de cinza volante).

Tabela 2 – Matriz para três fatores

Ordem	Variáveis codificadas		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	–	–	0
2	+	–	0
3	–	+	0
4	+	+	0
5	–	0	–
6	+	0	–
7	–	0	+
8	+	0	+
9	0	–	–
10	0	+	–
11	0	–	+
12	0	+	+
13 (PC)	0	0	0
14 (PC)	0	0	0
15 (PC)	0	0	0

PC = Pontos centrais

## 2.2 Preparação dos corpos de prova

A preparação dos corpos de prova cilíndricos (50x100) mm de concreto com cinza volante para ensaio mecânico foi realizada na Universidade da Região da Campanha, campus Bagé. A resistência do concreto produzido foi obtida do resultado do ensaio de ruptura nos corpos de prova de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018). Os procedimentos de moldagem, adensamento, cura e rompimento se deu de forma padronizada. Foram preparados corpos de prova com traço de referência (sem cinza volante), bem como, corpos de prova contendo 5, 10 e 15% de cinza em substituição ao cimento Portland.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Compressão axial

Os ensaios de compressão axial, resultaram em ruptura cisalhada lateral. O cisalhamento ocorreu em planos inclinados em relação à direção da força cortante que o gerou, por isso a linha de fratura atravessando na diagonal do corpo de prova.

Verificou-se que para os concretos compostos com cinza volante, quanto maior o % de substituição, menor o valor de resistência mecânica.

Com a evolução da hidratação dos materiais cimentícios, em relação ao tempo de cura, aos 42 dias percebe-se um ganho expressivo na resistência mecânica nos concretos produzidos com 10% de cinza volante proporcionado pela hidratação de pozolanas em idades posteriores, podendo ocorrer depois de uma semana ou mais (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Os valores médios de resistência mecânica são mostrados na Figura 1.

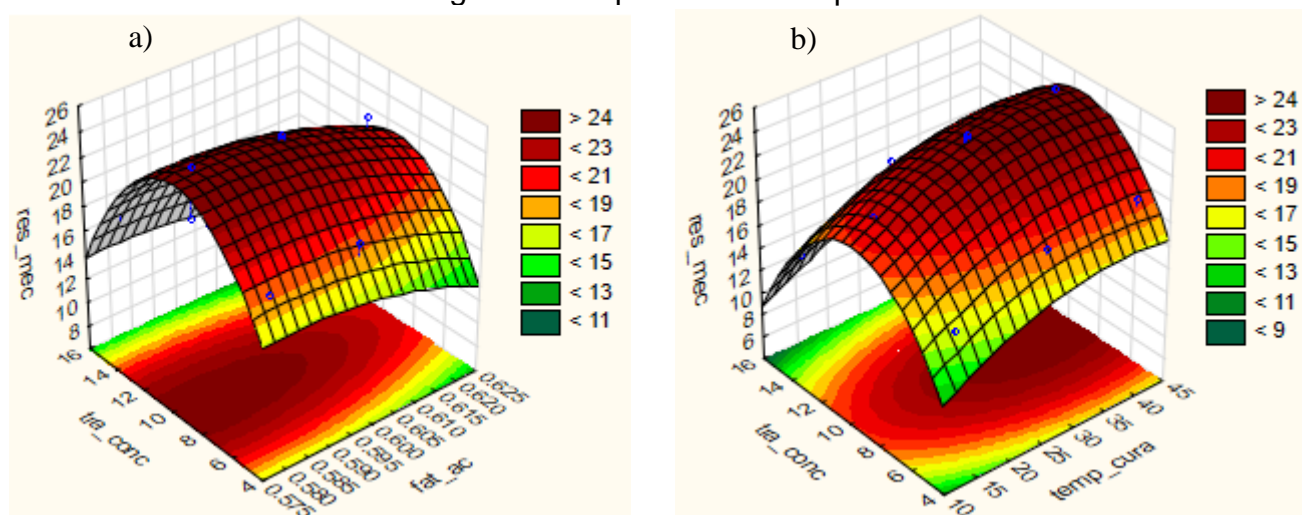
Figura 1 – Resultado do ensaio de compressão axial

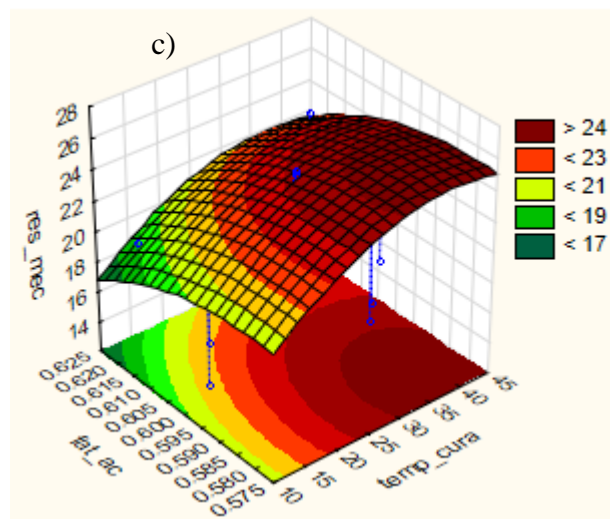


### 3.2 Análise estatística

A metodologia de superfície de resposta (msr) foi aplicada para otimizar a resistência mecânica. O modelo matemático que descreve a resposta, foi capaz de explicar cerca de 95% ( $R^2=0,956$ ) da variação na resistência mecânica, enquanto o p-valor obtido para ele foi de  $5,368 \times 10^{-4}$ , ratificando sua significância estatística ( $p < 0,05$ ), indicando que não há falta de ajuste no modelo. Tendo-se, portanto, um modelo bem ajustado. A Figura 2 apresenta as superfícies de resposta geradas.

Figura 2 – Superfícies de resposta





O objetivo deste delineamento foi otimizar o processo (encontrar uma combinação de níveis dos fatores que levam a resposta para o melhor valor possível). Neste caso, para esta pesquisa o (tra\_conc = 9,525% de cinza, fat\_ac = 0,581 e temp\_cura = 38 dias) levam a uma resistência máxima.

#### 4. CONCLUSÕES

Os metamodelos, obtidos via metodologia de superfícies de resposta foram indispensáveis à verificação da otimização da resistência mecânica. O conjunto de técnicas mostrou-se eficaz na identificação das variáveis explicativas que provocaram efeitos mais significativos sobre a variável resposta. No que tange ao ensaio mecânico, constatou-se que um teor na ordem de 10% de cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland, mantém as suas propriedades físicas e mecânicas, alcançando após 28 dias a faixa de resistência de corpos de prova sem cinza.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

JUNG, S. H.; SARASWATHY, V.; KARTHICK, S.; KATHIRVEL, P.; KNOW, S. J. Microstructure characteristics of fly ash concrete with rice husk ash and lime stone powder. **International Journal of Concrete Structures and Materials** 12, n. 1. 1-9, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. JM. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª edição. São Paulo: IBRACON. 751p, 2014.

MEIRA, G. R e FERREIRA, P. R. R. Revisão sobre ensaios acelerados para indução da corrosão desencadeada por cloretos em concreto armado. **Ambiente Construído**. 19 (4): 223–248.