

Uma aplicação de projeto de experimentos no desenvolvimento de produtos: o caso de concretos de alto desempenho

Viviane Leite Dias de Mattos (UCPel) vldm@atlas.ucpel.tche.br

Pedro Alberto Barbeta (UFSC) barbeta@inf.ufsc.br

Maria Luisa Cañas Martins canas@brturbo.com.br

Robert Wayne Samohyl (UFSC) samohyl@eps.ufsc.br

Resumo

O presente trabalho analisa os resultados de um experimento realizado para avaliar o comportamento da resistência à compressão de concretos moldados em betoneiras basculantes com adição de cinza de casca de arroz, identificando os fatores que afetam a locação e os fatores que afetam a dispersão da resistência à compressão de concretos de alto desempenho moldados com a adição de cinza de casca de arroz. A análise realizada mostrou que esta adição interage com o tempo de mistura, afetando o valor esperado; e com o fator água/cimento, afetando a variabilidade da resistência à compressão.

Palavras-chave: planejamento de experimentos; efeitos de dispersão; otimização de produtos; cinza de casca de arroz; concreto de alto desempenho

1. Introdução

Nas últimas décadas tem sido dada muita ênfase ao desenvolvimento econômico, aliado à preservação do meio ambiente. Cada vez mais, exige-se que as empresas desenvolvam sua tecnologia, visando a obtenção de produtos de qualidade ao menor custo possível, sem a deterioração do meio ambiente. Entretanto, a geração de resíduos, fato extremamente freqüente em processos produtivos, pode ser considerada como uma das responsáveis pela degradação do meio ambiente. Por outro lado, as atividades da engenharia civil são fontes potenciais de emprego de resíduos industriais.

A região da Planície Costeira do Rio Grande do Sul possui características ambientais extremamente propícias ao cultivo de arroz. De acordo com informações fornecidas pelo IBGE, este estado é o maior produtor nacional de arroz, produzindo anualmente cerca de 4.800.000 toneladas, sendo, no município de Pelotas, realizado o beneficiamento de cerca de 960.000 toneladas anuais deste produto.

É prática usual nos locais de beneficiamento de arroz ou qualquer outro tipo de cereal, a queima de sua casca para solucionar o problema da sua disposição no meio ambiente. Porém, considerando que, 20% do peso do grão é devido à casca, e que, após a combustão completa se obtém, em média, 20% de cinza, são geradas anualmente em torno de 38.400 toneladas de cinza, que terminam originando sérios problemas ambientais.

Segundo MEHTA (1992), a cinza da casca de arroz é atrativa como um material cimentante suplementar, pois, por ser rica em sílica, pode ser utilizada como uma pozolana altamente reativa. Estudos têm sido desenvolvidos para utilizar esta cinza como material alternativo na fabricação de concretos e argamassas. O presente trabalho procurou consolidar estes estudos, analisando por meio da estratégia proposta em Mattos (2004), dados provenientes de experimento realizado com o objetivo de investigar o desempenho do concreto com a adição de cinza de casca de arroz por meio de sua resistência à compressão, levantando alguns aspectos ainda pouco investigados.

2. Estratégia utilizada para analisar o experimento

A estratégia proposta em Mattos (2004) tem por objetivo identificar efeitos de dispersão em experimentos com poucas replicações, mas também pode ser utilizada para construir modelos de locação e dispersão. Inicialmente, ajusta-se um modelo de locação por meio do método dos mínimos quadrados ordinários (MQO), avaliando-se a qualidade deste e a possibilidade de utilização de transformações matemáticas.

Se o modelo de locação estiver bem ajustado aos dados, estimam-se os efeitos de dispersão pelo método BM (Box e Meyer, 1986), que se utiliza os resíduos do modelo de locação. A identificação dos efeitos de dispersão pode ser feita pelo gráfico de probabilidade normal dos efeitos. Se forem identificados mais de um efeito de dispersão, refaz-se a análise pelo método H (Harvey, 1976).

Se houver dúvidas quanto à adequação do modelo de locação, estimam-se os efeitos de dispersão pelo método R (Nair e Pregibon, 1988), com base em variâncias amostrais, identificando os efeitos ativos pelo gráfico de probabilidade normal dos efeitos. Se for identificado mais de um efeito de dispersão, refaz-se a análise pelo método S (Nair e Pregibon, 1988).

Quando houver efeitos de dispersão aparentemente significativos, o modelo de locação pode ser refeito pelo método dos mínimos quadrados generalizados (MQG).

3. Estudo de caso

O experimento foi planejado na forma de um projeto fatorial completo com 5 fatores (A, B, C, D e E), ensaiados em dois níveis (-1 e +1). A amostra foi composta por 96 ensaios, sendo que em cada uma das 32 condições experimentais foram realizadas três replicações.

O fator *A* representa a relação água/aglomerante, indicando a quantidade de água a ser adicionada à mistura. As relações utilizadas foram: 0,35, menor quantidade de água (-1), e 0,60, maior quantidade de água (1). O fator *B* representa a utilização (1) ou não (-1) da adição cinza de casca de arroz que, em caso positivo, foi utilizada com o teor de 10%. O fator *C* refere-se ao tempo de mistura, medido em segundos. Os tempos considerados foram de 100 segundos (-1) e 300 segundos (1). O fator *D* considera o tipo de adensamento, realizado manualmente, com o auxílio de um soquete metálico (-1), ou mecanicamente, com a utilização de um vibrador de imersão (1). O fator *E* representa a idade dos corpos-de-prova, medida em dias, rompidos aos 7 dias (-1) e aos 28 dias (1).

Na confecção dos corpos de prova foram utilizados os seguintes materiais: agregado graúdo de origem granítica; agregado miúdo de origem quartzoza; cimento Portland de alta resistência inicial CPV-ARI; aditivo superplastificante à base de naftaleno sulfonado e água proveniente da rede de abastecimento local. A cinza de casca de arroz utilizada foi proveniente de uma indústria beneficiadora de arroz de Pelotas/RS.

Os traços utilizados foram determinados levando-se em conta a relação água-aglomerante desejada e o teor de adição a ser incorporado. Utilizou-se a metodologia de dosagem do IPT/EPUSP, descrito por HELENE e TERZIAN (1992), sendo que os parâmetros de dosagem utilizados foram a obtenção de um abatimento de cone de 7 ± 1 cm e a manutenção de um teor de argamassa de 51%.

A resistência à compressão simples foi medida de acordo com as prescrições da NBR 5739 (ABNT 1980), em corpos-de-prova cilíndricos de concreto, de dimensões 10 x 20 cm. A ruptura foi realizada numa prensa hidráulica WPM, enquanto que a cura foi realizada em câmara úmida com 95% de umidade e temperatura de 22 ± 3 °C.

4. Discussão e análise de resultados

Inicialmente, buscou-se identificar os efeitos de locação ativos para ajustar um modelo, por meio do método MQO, aplicado aos valores da resistência à compressão, sendo consideradas interações de até terceira ordem. Um teste F identifica os fatores A , D e E , além das interações AE e BCD , como apresentando efeitos significativos. O modelo de locação, obtido pelo método dos mínimos quadrados, foi:

$$\hat{\mu}_y = 42,422 - 10,488A - 2,330D + 1,842E + 1,456AE - 1,292BCD . \quad (1)$$

A significância do modelo ajustado é avaliada pelo teste F ($F = 101,63$; $df_1 = 5$; $df_2 = 90$; $valor-p = 0,0000$), sendo testada a hipótese nula de que todos os coeficientes do modelo são nulos. Como o experimento apresenta replicações, também é utilizado um teste de falta de ajuste ($F = 1,56$; $df_1 = 26$; $df_2 = 64$; $valor-p = 0,0754$) para testar a hipótese nula de o modelo ser adequado. Em ambos os testes, os resultados encontrados são satisfatórios, embora no teste de falta de ajuste, o $valor-p$ seja muito baixo, mostrando que a qualidade do modelo ajustado é apenas regular. Cabe também ressaltar, que esses testes supõe variância constante, o que não se verifica na presença de efeitos de dispersão. Assim, seus resultados devem ser avaliados com cautela.

A análise é complementada pela construção de dois gráficos: um gráfico de resíduos, que sugere a existência de maior variabilidade entre os resíduos associados a valores preditos maiores e um de probabilidade normal desses resíduos, o qual sugere que esses resíduos seguem uma distribuição normal.

Foi verificada uma possível modificação na métrica da resposta, através da transformação logarítmica, mas também não se obteve um modelo de qualidade satisfatória. Como a inferência sobre efeitos de dispersão é muito influenciada pela qualidade do modelo de locação ajustado, optou-se por avaliá-los por meio de métodos que se baseiam em variâncias amostrais.

Seguindo a estratégia utilizada, a identificação dos efeitos de dispersão é feita pelo método R que os estima com base em quocientes entre médias aritméticas de variâncias amostrais. Os resultados encontrados são mostrados em um gráfico de probabilidade normal (Figura 1a), o qual não sugere de forma clara a existência de efeitos de dispersão, mas fortes suspeitas sobre os efeitos principais A e E . Também identifica como suspeitos os efeitos das interações AB e BD , embora existam efeitos com sinal negativo de magnitude superior.

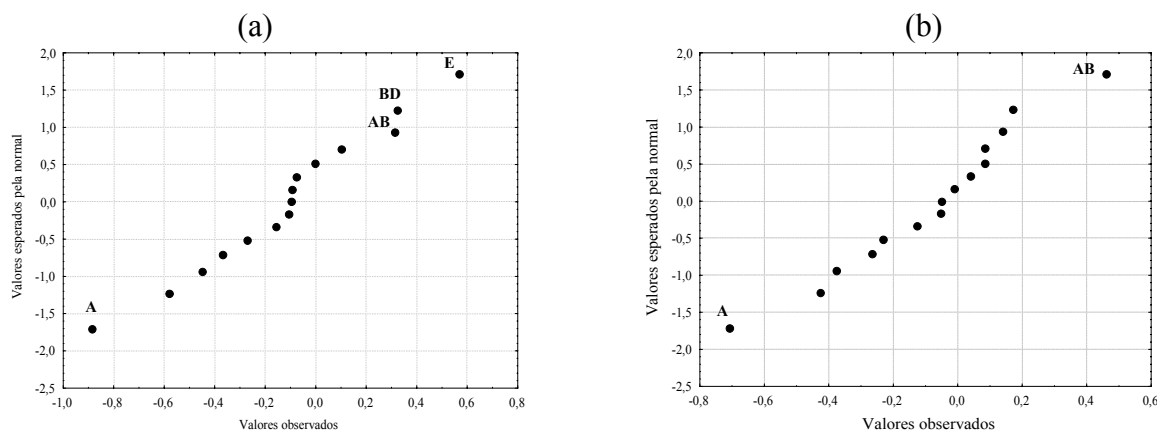


FIGURA 1 – Gráfico de probabilidade normal de efeitos de dispersão, construídos com base em estimativas provindas dos métodos R (gráfico a) e S (gráfico b)

Como pode haver mais de um efeito de dispersão, a avaliação é refeita por meio do método S . O gráfico de probabilidade normal (Figura 1b) sugere a existência de dois efeitos de

dispersão: o efeito principal do fator A e o efeito da interação AB , embora, se forem considerados os valores absolutos das estimativas dos efeitos, parece haver apenas o efeito principal do fator A .

Considerando a análise visual da Figura 1 e o princípio da hereditariedade, o conjunto de fatores com efeito de dispersão é definido como: $\mathcal{D} = \{I, A, B \text{ e } AB\}$. Com estes efeitos pode ser feita a modelagem do logaritmo natural das variâncias amostrais (aplicando MQO), resultando em:

$$\hat{\sigma}_y^2 = \exp\{1,95 - 0,58A - 0,05B + 0,46AB\} \quad (2)$$

Esta equação permite prever a variância para diferentes valores dos fatores A e B . Considerando que a variância não é a mesma em toda a região experimental, Agora, o modelo de locação pode ser refinado pelo método dos mínimos quadrados generalizados (MQG). Cada observação é ponderada pelo inverso do desvio-padrão, cuja variância é predita pelo modelo 2. Os resultados dessa segunda análise definem o seguinte conjunto de fatores com efeitos de locação: $\mathcal{L} = \{I, A, D, E, AE, BC \text{ e } ACD\}$, definindo o modelo:

$$\hat{\mu}_y = 42,422 - 10,488A - 2,330D + 1,842E + 1,456AE + 0,859BC + 1,140ACD \quad (3)$$

5 Discussão e considerações sobre os resultados

A análise permitiu identificar que a resistência à compressão média do concreto está relacionada com o fator água/cimento (Fator A), com a forma de adensamento (Fator D) e com sua idade (Fator E), conforme evidencia a Figura 2. Maiores valores são esperados aos 28 dias para corpos-de-prova moldados com menor quantidade de água e adensados manualmente.

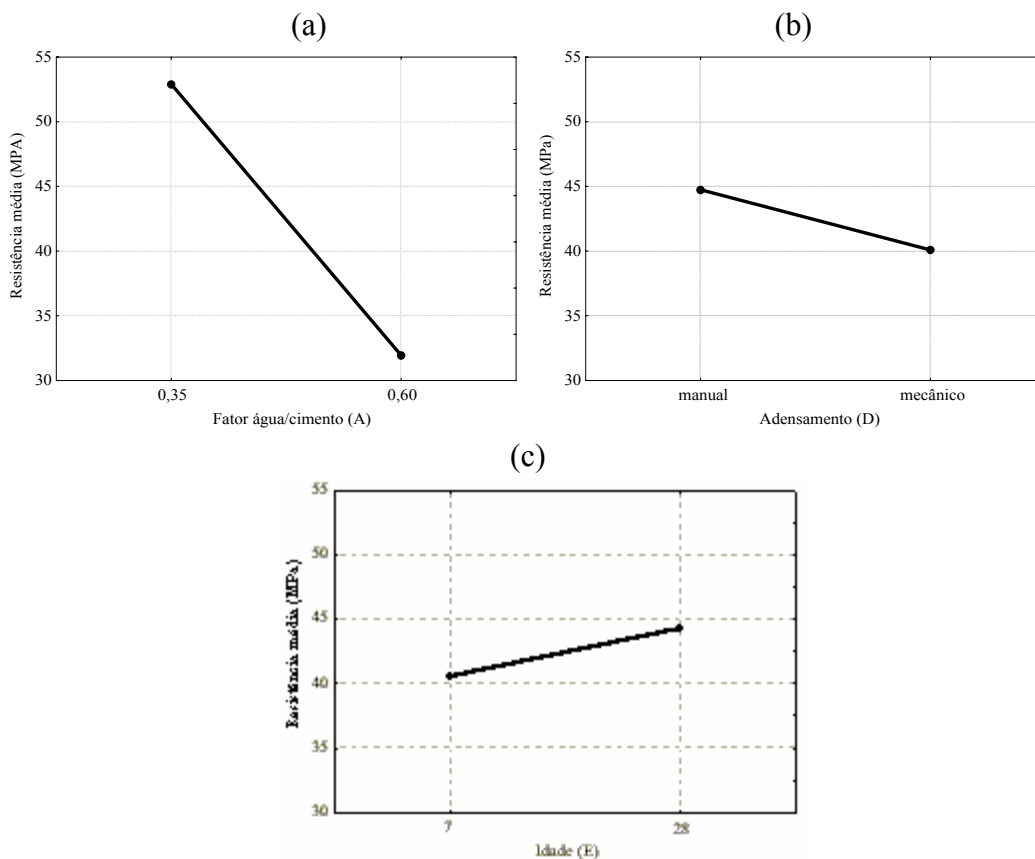


FIGURA 2 – Efeito principal dos fatores A , D e E sobre a resistência à compressão

Os resultados encontrados para a quantidade de água e idade estão dentro do previsto. Apenas o resultado relativo ao adensamento não foi o esperado: o adensamento mecânico,

teoricamente, deveria fornecer melhores resultados. Isto talvez se deva ao fato de, no ensaio, o adensamento ser realizado em um corpo-de-prova de tamanho pequeno, mais adequado ao tamanho do soquete metálico. O tamanho do vibrador de imersão torna a execução do adensamento mais difícil.

Também é constatado que o fator A (fator água/cimento) interage com o fator E (idade), conforme o gráfico (a) da Figura 3, evidenciando que, quando é utilizada menor quantidade de água (Fator A no nível $-I$), o concreto enrijece mais rapidamente, adquirindo, aos 7 dias, uma resistência quase igual à resistência aos 28 dias, o mesmo não acontecendo ao ser utilizada maior quantidade de água (Fator A no nível $+I$). Já o fator B (quantidade de adição), foco deste estudo, interage com o fator C (tempo de mistura), conforme o gráfico (b) da mesma figura. Quando a adição não é utilizada (Fator B no nível $-I$), menos tempo de mistura fornece maior resistência, o mesmo não acontecendo quando a adição é utilizada (Fator B no nível $+I$).

Existe também uma interação tripla entre os fatores A , C e D , que representam, respectivamente, o fator água/cimento, o tempo de mistura e o tipo e adensamento. Os resultados, mostrados na Figura 4, evidenciam que: quando é utilizada menor quantidade de água, a resistência média do concreto fabricado com adensamento mecânico é maior quando o tempo de mistura é menor (100 s), o mesmo não acontecendo quando é utilizado adensamento manual. Quando o concreto é fabricado com maior quantidade de água, a resistência média é maior quando o tempo de mistura é maior (300 s), tanto para adensamento mecânico como manual.

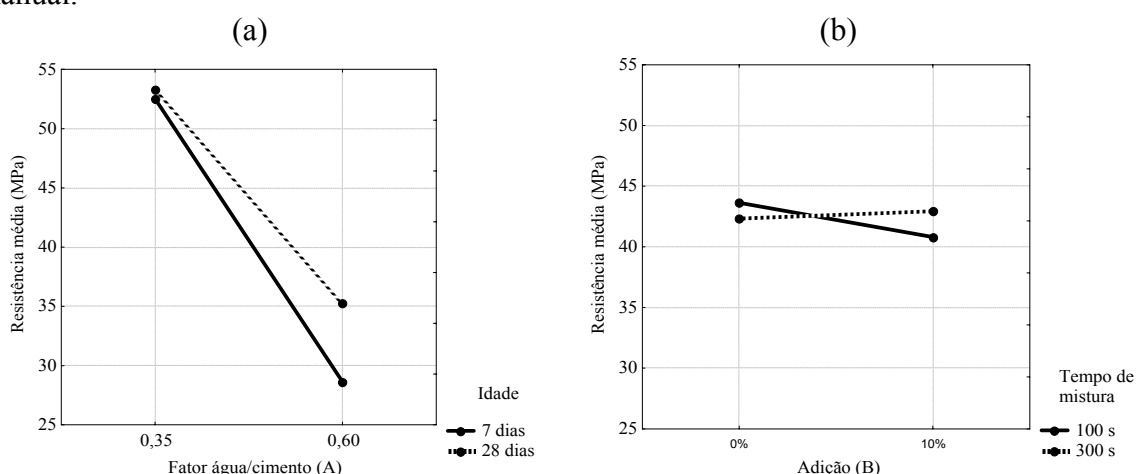


FIGURA 3 – Efeito das interações entre os fatores A e E e entre os fatores B e C sobre a resistência à compressão

A variabilidade da resistência à compressão é influenciada pelos fatores A e B (fator água/cimento e uso de adição), conforme mostra a Figura 5. A variabilidade da resistência à compressão é menor nos corpos-de-prova moldados com fator água/cimento 0,60 (Fator A no nível $+I$) e teor de adição de 10% (Fator B no nível $+I$). Entretanto, estes fatores interagem entre si, conforme evidenciado no gráfico (c) desta mesma figura.

Quando é utilizado um fator água/cimento 0,35 (Fator A no nível $-I$), a variabilidade é menor nos corpos-de-prova moldados com adição (Fator B no nível $+I$), enquanto se utilizado um fator água/cimento 0,60 (Fator A no nível $+I$), a variabilidade é menor nos corpos-de-prova moldados sem adição (Fator B no nível $-I$). Isto talvez ocorra em função dos efeitos pozolânico e microfíler decorrentes do uso da adição na mistura ficarem mais evidentes quando uma menor quantidade de água é utilizada.

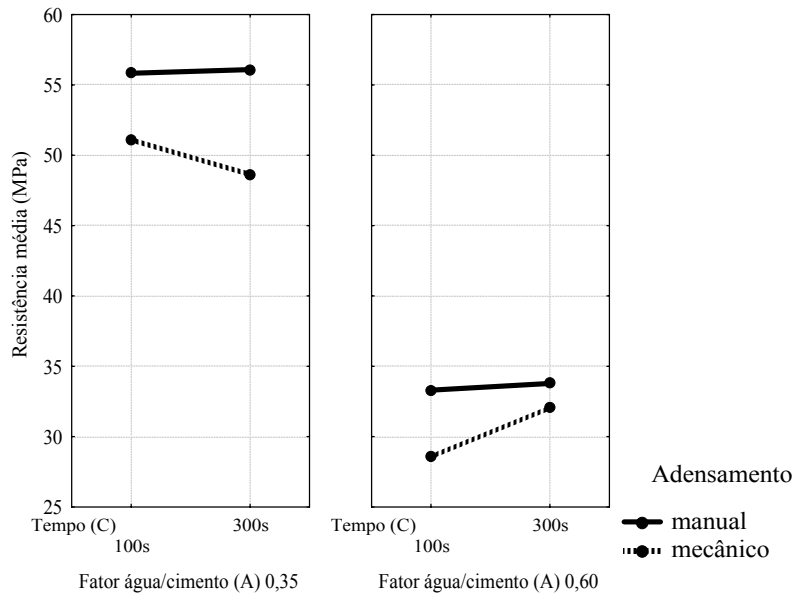


FIGURA 4 – Efeito da interação entre os fatores *A*, *C* e *D* sobre a resistência à compressão

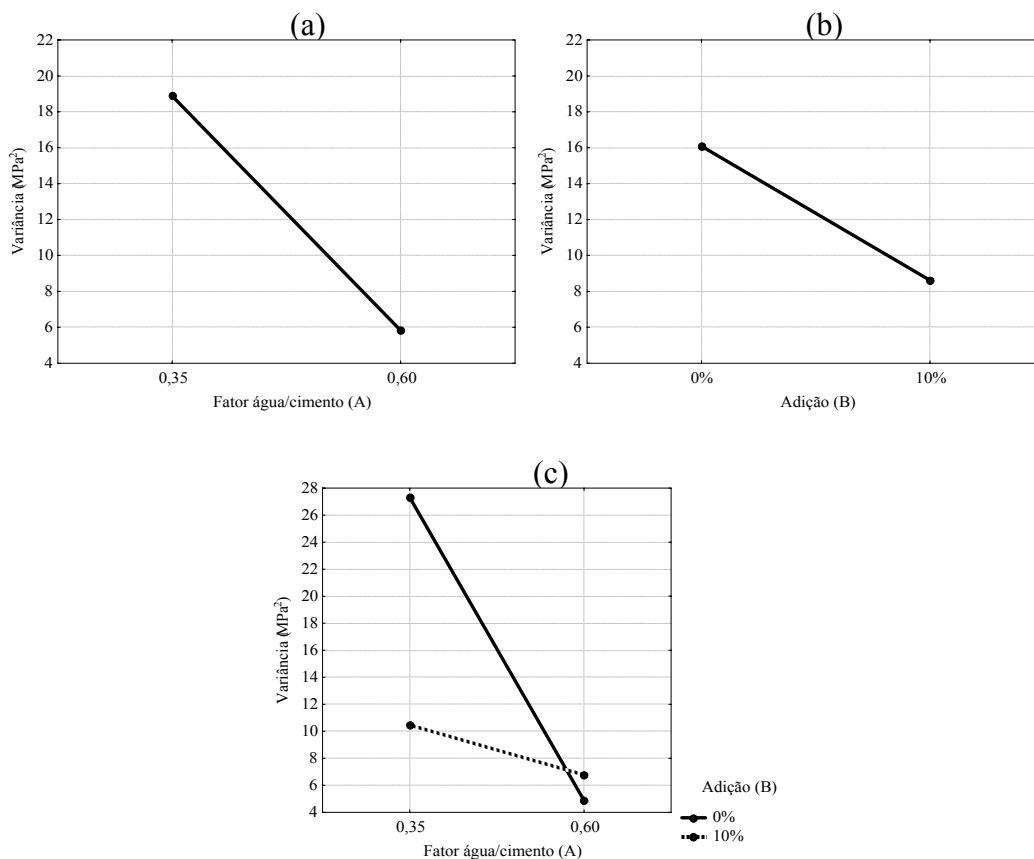


FIGURA 5 – Efeito principal do fator *A* (gráfico a), do fator *B* (gráfico b) e de sua interação (gráfico c) sobre a variabilidade da resistência à compressão

6 Considerações finais

O principal objetivo da realização do experimento foi avaliar o desempenho do concreto moldado com a adição de cinza de casca de arroz, bem como relacioná-lo com alguns parâmetros do processo produtivo. A resistência à compressão média e a homogeneidade são

duas características extremamente importantes na avaliação da qualidade de um concreto, onde se busca uma resistência elevada com mínima variabilidade.

A metodologia utilizada inicia com a identificação de efeitos de locação pelos métodos clássicos. Usa-se, inicialmente, o teste F para identificar os efeitos de locação e o método de mínimos quadrados ordinários (MQO) para construir o modelo. Após a avaliação da qualidade do modelo, feita por meio de técnicas formais e técnicas gráficas, escolhe-se avaliar a variabilidade por meio das variâncias amostrais. Usa-se, inicialmente, o método R . Como a análise sugere a possibilidade de mais de um efeito de dispersão, esta é refeita com o método S , que é mais apropriado para esta situação. Realiza-se, então, o refinamento do modelo de locação por meio do método dos mínimos quadrados generalizados (MQG).

A análise mostrou que a hipótese de a adição aumentar a resistência à compressão do concreto não é comprovada. Também foi possível constatar que, dentre os parâmetros controlados no experimento, esta característica interage com o tempo de mistura, interferindo no valor esperado da resistência à compressão, e com o fator água/cimento, interferindo na variabilidade da resistência à compressão.

Quando é utilizada a adição cinza de casca de arroz, o tempo de mistura do concreto deve ser maior para obtenção de uma maior resistência, devendo-se usar maior quantidade de água para obtenção de maior homogeneidade.

7 Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1974) - *Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto*: NBR 5739. Rio de Janeiro.

BOX, G.E.P.& MEYER, R.D. (1986) - Dispersion Effects From Fractional Design. *Technometrics*, v.28, n1, p.19-27.

HARVEY, A. C. (1976) - Estimating regression models with multiplicative heterocedasticity. *Econometrica*, v. 44, n3, p.461-465.

HELENE, P.& TERZIAN, P. (1992) - *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*, São Paulo: Editora Pini. 349 p.

MATTOS, V.L.D. (2004) - *Identificação de efeitos de dispersão em experimentos com poucas replicações*. Tese (Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. <http://teses.eps.ufsc.br/tese.asp>

MEHTA, P.K. (1992) - *Rice Husk Ash - A Unique Supplementary Cementing Material*. *Advances in Concrete Technology*. CANMET - Canada Centre for Mineral and Energy Technology, p 407-431.

NAIR, V.N.& PREGIBON, D. (1988) - Analysing Dispersion Effects From Replicated Factorial Experiments. *Technometrics*, v.30, n.3, p.247-257

8 Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pelo Núcleo de Normalização e Qualimetria (NNQ) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – <http://www.qualimetria.ufsc.br>, pelo Laboratório de Resistência dos Materiais (LRM) da Escola de Engenharia e Arquitetura, pelo Centro de Criatividade em Educação (CCEduc) da Escola de Educação da Universidade Católica de Pelotas (UCPel). – <http://www.ucpel.tche.br> e pela Fundação de Amparo à Pesquisa de Santa Catarina (FAPESC).