

UTILIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL NA INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM MISTURAS PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS PENSADOS E DE ENCAIXE

A.Z. Destefani¹, J. Alexandre¹, G. C. Xavier¹, A. F. Saboya¹, A. V. Bahiense², L. G. Pedroti²

¹Laboratório de Engenharia Civil, ²Laboratório de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Av. Alberto Lamego, 2000 - Campos dos Goytacazes – RJ, CEP 28013-600
andestefani@hotmail.com, jonas@uenf.br

RESUMO

A indústria de rochas ornamentais no Brasil é uma área em crescente desenvolvimento, apresentando uma produção estimada em 8,0 milhões de toneladas em 2007, de acordo com ABIROCHAS (2008). O Estado do Espírito Santo concentra 90% dos investimentos do setor em nível nacional, possuindo aproximadamente 900 teares (máquina de serrar blocos de mármore e granito) em operação, responsáveis por 70% da produção nacional de mármore e 30% da produção nacional de granito. O grande desafio do setor de rochas ornamentais é compatibilizar os benefícios gerados pelo setor e os impactos ambientais resultantes, principalmente devido ao grande volume de resíduo sólido proveniente dos processos do beneficiamento das rochas. A reciclagem destes resíduos como material de construção é uma alternativa para mitigar os impactos ambientais, promovendo a sustentabilidade do setor. Este trabalho visa o estudo da incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em misturas para produção de blocos pensados e de encaixe para alvenaria, a fim de se avaliar as diversas proporções dos constituintes por meio do Planejamento de Experimentos em Rede Simplex, buscando soluções técnicas, sem o tradicional empirismo existente na indústria, com o objetivo de se alcançar um desempenho satisfatório da propriedade analisada (resistência à compressão). Foram tomados dez pontos experimentais, cujos teores máximos de cimento, resíduo e areia são respectivamente de 20, 50 e 60 % em massa, que delimitaram a superfície de resposta.

Palavras-chave: Resíduo, Planejamento Experimental, Simplex.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o centro produtor de rochas ornamentais mais rico em granito ⁽¹⁾ e se destaca porque apresenta uma espetacular “geodiversidade” mineral. Segundo a ABIROCHAS (2008) ⁽²⁾, no ano de 2006, o país colocou-se como 4º maior produtor mundial de rochas, 5º maior exportador em volume físico, 2º maior exportador de granitos brutos, 4º maior exportador de rochas processadas e especiais.

O Espírito Santo é um grande produtor de rochas ornamentais (principalmente granito e mármore) e contribuiu com 43% da produção nacional de rochas ornamentais em 2005, que alcançou 6,9 milhões de toneladas. Já em 2007, o setor totalizou cerca de 8,0 milhões de toneladas produzidas ⁽³⁾.

A indústria deste setor gera um grande volume de resíduos sólidos devido ao seu processo produtivo. Estima-se que em média 25% a 30% dos blocos de rocha são transformados em pó (resíduo) devido à serragem ⁽⁴⁾.

Estes resíduos, na maioria das vezes, vêm sendo dispostos em locais inadequados, causando um sério problema ao meio ambiente da região, o que também acarreta problema junto aos órgãos ambientais.

Buscado a utilização destes resíduos gerados nos processos de beneficiamento das rochas ornamentais, os impactos resultantes da disposição inadequada destes produtos seriam mitigados e até mesmo eliminados, em alguns casos; além de passarem a gerar renda e emprego no processo de transformação em insumos para construção civil, promovendo a sustentabilidade do setor.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Os tijolos prensados de encaixe convencionais geralmente têm como seus constituintes básicos o solo e o cimento, conhecidos como tijolos de solo-cimento. A proposta deste trabalho é a incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em substituição total do solo e parcial a areia utilizada para a correção granulométrica da mistura, devido à elevada finura do resíduo utilizado neste trabalho. Neste item, apresenta-se a identificação das matérias-primas utilizadas para a elaboração das misturas a serem utilizadas posteriormente para a produção dos tijolos.

Areia

Utilizou-se areia de quartzo natural do rio Paraíba do Sul, por ser na prática a mais usualmente empregada na construção civil, em Campos dos Goytacazes-RJ. O material caracterizado, segundo as normas técnicas nacionais NBR 7211 ⁽⁵⁾ e NBR 7251 ⁽⁶⁾, possui módulo de finura de 2,65 g/cm³; massa específica aparente no estado solto de 1,39 g/cm³ e massa específica teórica de 2,65 g/cm³. Essa passou, previamente por um processo de secagem em estufa à temperatura de 105 °C por um período de 24 horas. Após a secagem, foi utilizado peneiramento em peneira de nº 4.

Cimento

Foi utilizado como aglomerante o cimento portland compostos CP V E 32. De acordo com a NBR 11578 ⁽⁷⁾ o cimento possui uma área específica maior que 260 m²/Kg.

Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais

O resíduo utilizado neste trabalho é proveniente da região sul do Estado do Espírito Santo, mais especificamente da cidade de Cachoeiro de Itapemirim-ES. Foi coletado obedecendo aos procedimentos de amostragem de resíduos sólidos da NBR 10007 ⁽⁸⁾, na empresa Decolores Mármore e Granitos, uma indústria de beneficiamento de rochas ornamentais. Este resíduo foi coletado em estado seco ao ar em depósito provisório anexo à empresa.

Em laboratório o resíduo sofreu processo de secagem em estufa a 105 °C por um período de 24 horas, triturado e homogeneizado para ser utilizado.

Métodos

Este trabalho, em busca de um modelo mais adequado para as misturas com resíduos, se baseou na metodologia de modelagem numérico-experimental Rede Simplex (*Simplex-Lattice Design*) ⁽⁹⁾ ⁽¹⁰⁾.

Planejamento de Experimentos em Rede Simplex

Alguns dos problemas encontrados ao realizar ensaios são decorrentes da necessidade de estudar simultaneamente o efeito dos fatores (constituintes das misturas)

com diferentes níveis, o que torna os experimentos industriais inviáveis economicamente, visto que os custos e o tempo de execução são elevados ⁽¹¹⁾.

As proporções dos materiais para realização dos ensaios foram calculadas matematicamente, e após o modelo numérico estabelecido para a resposta de interesse, seguiu-se uma comprovação experimental da eficiência do modelo gerado por meio da Análise de Variância (ANOVA) ⁽¹²⁾.

Modelagem Numérica em Rede Simplex

Em uma mistura, a quantidade total da mistura se mantém constante, variando apenas seus componentes. Se a quantidade total é mantida constante o valor da resposta varia quando mudanças são feitas nas proporções relativas dos componentes ⁽⁹⁾, conforme demonstrado pela Equação A, onde x_i representa a proporção do i -ésimos componente.

$$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1,0 \quad (A)$$

A Figura 1 ilustra o fator espaço de três componentes ($q = 3$), e a Equação (A) torna-se a $x_1 + x_2 + x_3 = 1$.

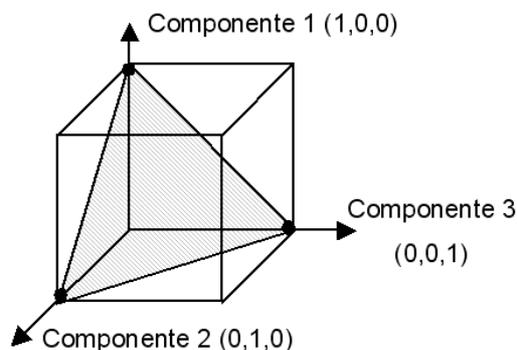


Figura 1 - Espaço simplex para três componentes (superfície de resposta) (CORNELL, 1990).

A superfície de resposta e os pontos experimentais para os respectivos modelos matemáticos são representados pela Figura 2.

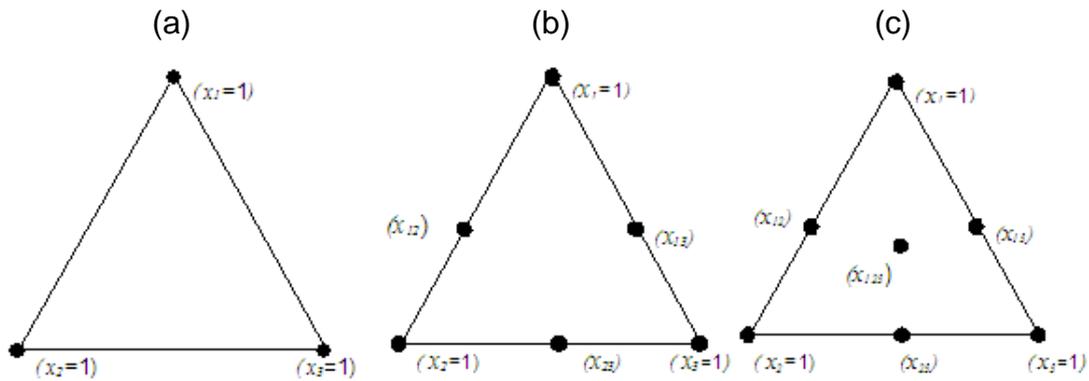


Figura 2 – Pontos para a obtenção dos modelos. (a) linear; (b) quadrático; (c) cúbico especial.

Representação Matricial

O sistema de misturas e respostas pode ser representado matricialmente, e ser escrito na forma:

$$\hat{y} = Xb \quad (B)$$

Onde \hat{y} e b são as matrizes contendo respectivamente, os valores previstos pelo modelo para y e as estimativas dos parâmetros. X representa a matriz de composição das misturas. Sendo assim, os parâmetros b 's são calculados resolvendo-se apenas uma equação matricial (C), podendo ser facilmente comprovado escrevendo as matrizes por extenso.

$$X'Xb = X'y \quad (C)$$

Isolando-se a matriz b têm-se, de forma direta, os valores da estimativa dos parâmetros. Se ampliarmos as matrizes X e y adequadamente, terá a solução geral para o ajuste de um modelo por mínimos quadrados, não importando quanto sejam as observações ou quantos parâmetros sejam necessários para caracterizar o modelo.

Pseudocomponentes

Há situações em que ocorrem restrições experimentais, como na formulação das argamassas, que devem conter simultaneamente os seus três componentes juntos (cimento, resíduo e areia). Isso é feito utilizando-se os pseudocomponentes originais que

delimitam uma sub-região de interesse do simplex, onde o planejamento experimental é aplicado e o modelamento será válido ⁽¹⁰⁾.

Os pseudocomponentes (x'_i) definem as combinações dos componentes originais (x_i) e delimita uma sub-região da superfície de resposta onde é possível realizar os experimentos de interesse. Desta forma, o somatório dos (x'_i)'s não é igual à unidade ⁽⁹⁾, como mostra a Equação D.

$$\sum_{i=1}^q x'_i = x'_1 + x'_2 + \dots + x'_q < 1,0 \quad (D)$$

Para mostrar como as restrições iniciais L-pseudocomponentes (L_i) são definidos em termos dos componentes originais, temos a condição geral que o sistema consiste de q componentes e $L_i \geq 0$ denota os limites inferiores para os componentes i , $i = 1, 2, \dots, q$. Os limites inferiores são expressos na forma geral pela Equação E:

$$0 \leq L_i \leq x_i, \text{ para } i = 1, 2, \dots, q \quad (E)$$

Onde alguns do L_i poderiam ser iguais à zero. Se subtrair dos limites inferiores L_i de x_i e dividir a diferença por $[1 - (\sum L_i)]$, tem-se os L-pseudocomponentes x'_i definidos usando-se a transformação F:

$$x'_i = \frac{x_i - L_i}{1 - L} \quad (F)$$

$$\text{Sendo } L = \sum_{i=1}^q L_i < 1.$$

Foi utilizado o Modelo Cúbico Especial para a determinação da superfície de resposta, conforme a quantidade mínima de pontos para a geração do mesmo: Modelo Cúbico Especial (10 pontos). As restrições experimentais adotadas, conforme a imposição da umidade ótima de compactação de 12% foram:

$$x_1 \geq 0,05, x_2 \geq 0,35, x_3 \geq 0,45$$

Onde x_1 , x_2 e x_3 representam respectivamente o componente cimento, resíduo e areia. Os limites das proporções dos componentes são expressos pela Equação G.

$$0,05 \leq x_1 \leq 0,20; 0,35 \leq x_2 \leq 0,50 \text{ e } 0,45 \leq x_3 \leq 0,60 \quad (G)$$

Umidade Ótima de Compactação

Em virtude da granulometria do resíduo, que absorve grande quantidade de água, foi realizado ensaio de compactação, buscando uma variação de umidade ótima inferior a 1% para os limites (máximo e mínimo de resíduo incorporado).

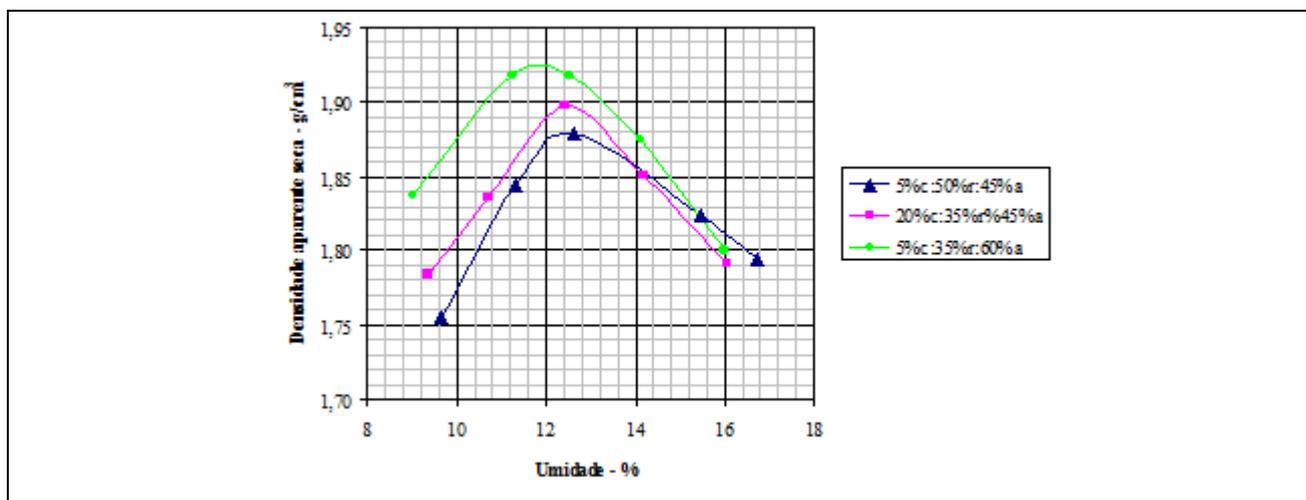


Figura 3 – Curvas de compactação para os limites das misturas.

Observa-se nas curvas de compactação (Figura 3) que os valores mínimos e máximos das umidades ótimas foram respectivamente 11,8% e 12,5%, estando na faixa de variação proposta neste trabalho (igual ou inferior a 1%). Com isso adotou-se uma umidade de 12% para a compactação dos corpos de prova.

Produção dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram confeccionados seguindo as especificações da NBR 12024⁽¹⁴⁾, com as misturas de cimento, resíduo e areia, referentes aos dez pontos experimentais e umidade de 12%, os quais foram curados durante três dias em câmara úmida e conservados em ambiente de laboratório até a idade de rompimento.



Figura 4 – Confeção dos corpos de prova.

Propriedade Analisada – Resistência à Compressão

Chegada à idade de três dias, os corpos de prova foram imersos em água por um período de quatro horas, sendo depois aplicados aos ensaios de compressão simples, segundo a norma NBR 12025 ⁽¹⁵⁾.

Os ensaios de compressão simples foram realizados em uma prensa da marca INSTRON modelo 5582 pertencente ao Laboratório de Materiais (LAMAV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense.



(a)



(b)

Figura 5 – Cura (a) e rompimento dos corpos de prova (b).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A superfície de resposta delimitada pelos pseudocomponentes para a umidade de compactação adotada é representada pela Figura 6. Analisando a Figura 6, podem-se confirmar as restrições (G), com um máximo de cimento, resíduo e areia de 20%, 50% e 65% respectivamente.

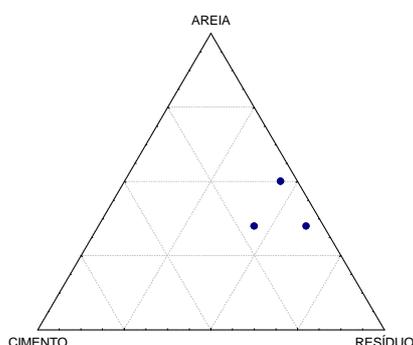


Figura 6 – Região delimitada pelos pseudocomponentes.

Expandindo-se as matrizes representadas em B têm-se as equações dos modelos com seus respectivos parâmetros b calculados. A Tabela 1 lista as nomenclaturas de respostas, usadas para misturas de três elementos.

Tabela 1 – Nomenclatura usada em misturas para $q = 3$ componentes.

Pontos experimentais	Matriz de Composição das Misturas - X			Pontos experimentais	Componentes Originais - X		
	Cimento	Resíduo	Areia		Cimento	Resíduo	Areia
x_1	1	0	0	x_1	0,20	0,35	0,45
x_2	0	1	0	x_2	0,05	0,50	0,45
x_3	0	0	1	x_3	0,05	0,35	0,60
x_{12}	1/2	1/2	0	x_{12}	0,10	0,45	0,45
x_{13}	1/2	0	1/2	x_{13}	0,10	0,35	0,55
x_{23}	0	1/2	1/2	x_{23}	0,05	0,40	0,55
x_{123}	1/3	1/3	1/3	x_{123}	0,15	0,40	0,45
x_{1123}	2/3	1/6	1/6	x_{1123}	0,15	0,35	0,50
x_{1223}	1/6	2/3	1/6	x_{1223}	0,05	0,45	0,50
x_{1233}	1/6	1/6	2/3	x_{1233}	0,10	0,40	0,50

Foram gerados a partir da matriz de composição das misturas os modelos linear, quadrático e cúbico, sendo o modelo cúbico especial que apresentou o maior R^2 (95,03%), mostrando maior homogeneidade e maior confiabilidade.

Modelo Cúbico Especial

$$\hat{y} = 8,79 x'_1 + 2,25 x'_2 + 2,23 x'_3 - 6,46 x'_1 x'_2 - 0,62 x'_1 x'_3 + 0,21 x'_2 x'_3 + 2,14 x'_1 x'_2 x'_3$$

Tabela 2 – Previsão do modelo cúbico completo (\hat{y}) e valores médios de observações (\bar{y}).

Respostas	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	x_{1123}	x_{1223}	x_{1233}
\hat{y}	8,79	2,25	2,23	2,99	4,28	2,28	5,18	6,47	2,29	3,74
\bar{y}	9,04	2,04	2,19	3,48	4,53	2,15	4,69	6,22	2,42	3,74

Tabela 3 - ANOVA do modelo cúbico especial

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade	Média Quadrática	Teste F 95 % de Probabilidade
Regressão	43,70	6	7,28	$MQ_R/MQ_F = 30,33$
Resíduos	0,74	3	0,24	$.F_{6,9} = 3,37$
Total	44,44	9	4,94	$MQ_R/MQ_T > .F_{6,9}$

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 95,03\%$

A Figura 7 mostra a superfície de resposta obtida por meio do modelo cúbico especial, tanto quanto ao teste F quanto à média dos resíduos experimentais, aos dados medidos para a propriedade analisada. Considerando que se $MQ_R/MQ_r > F_{g.l.Regressão; g.l. Residual}$, existe relação linear entre as variáveis y e x ⁽¹⁰⁾.

Os componentes: cimento, resíduo e areia, representados nos vértices do triângulo de superfície de resposta da Figura 7 correspondem às proporções máximas de 20%, 50% e 60% respectivamente em massa, conforme as restrições experimentais (G).

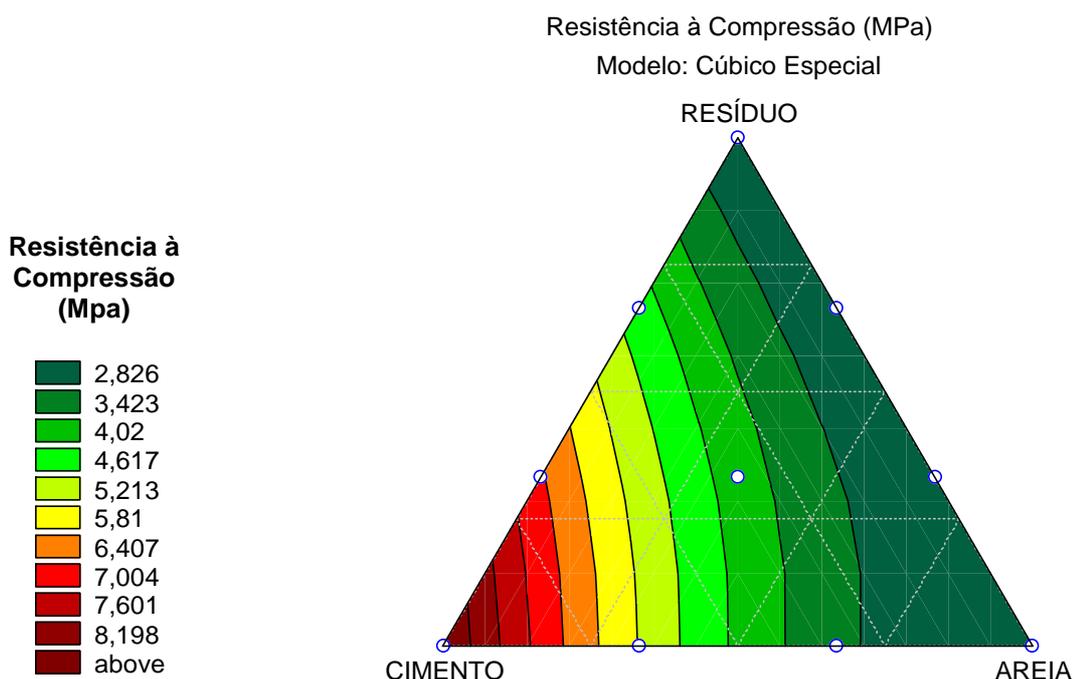


Figura 7 - Superfície determinada pelo modelo cúbico especial.

CONCLUSÕES

Analisando a superfície de resposta gerada pelo software *Statística*, pode-se determinar, de forma otimizada, traços de misturas para a produção de tijolos, com resistências previamente conhecidas.

Utilizando-se da superfície de resposta gerada no planejamento experimental, podem-se determinar faixas de misturas contínuas para um mesmo valor da propriedade, aumentando assim, todas as possíveis faixas de proporção dos materiais para a unidade adotada.

A utilização do Planejamento Experimental em Rede Simplex mostrou-se viável na avaliação das resistências à compressão de misturas para a produção de blocos prensados e de encaixe.

REFERÊNCIAS

- (1) CHIODI, C.F.– Kistemann & Chiodi Assessoria e Projetos, para a ABIROCHAS http://www.ivolution.com.br/news/upload_pdf/4155/Exporta_Janeiro.pdf, em 23/03/2007.
- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). O setor de rochas ornamentais e de revestimento. Informe 005/2006. São Paulo. 2006. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br>>.
- (3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). Situação atual e perspectivas brasileiras no setor de rochas ornamentais. Informe 002/2008. São Paulo. 2008. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br>>.
- (4) VILLASCHI, A. F., SABADINI, M. S. Arranjo Produtivo de Rochas Ornamentais (mármore e granito) no estado do Espírito Santo. Estudos Empíricos – Nota Técnica 15. Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – IE/UFRJ, 2000.
- (5) Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1983. Agregados para concreto – Especificação - NBR 7211. Rio de Janeiro.
- (6) Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1982. Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária - Método de ensaio - NBR 7251. Rio de Janeiro.
- (7) Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Cimento Portland Composto – NBR 11578/1991. Rio de Janeiro.
- (8) Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Amostragem de Resíduos: Procedimento – NBR 10007/1987. Rio de Janeiro.
- (9) CORNELL, J. A. Experiments With Mixtures: Designs, Models, and The Analysis of Mixtures Data - 2nd ed., 1990.
- (10) BARROS NETO, B., SPACINO, I., S., BRUNS, R., E. Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na indústria – 2^a ed. - Campinas-SP: Editora da UNICAMP, 2003.
- (11) GALDAMEZ e CARPINETTI, (2004). Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos no Processo de Injeção Plástica. Gestão e Produção v.11, n.1, p. 121-134 jan/abril, 2004.
- (12) ALEXANDRE, J. (2000). Análise da Matéria-Prima e Composição de Massa Utilizada em Cerâmica Vermelha. Dissertação (Doutorado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF./ Jonas Alexandre – Campos dos Goytacazes, RJ, 2000.
- (13) Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1992. Solo-cimento – Ensaio de Compactação - NBR 12023. Rio de Janeiro.

(14) Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1992. Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndrico - NBR 12024. Rio de Janeiro.

(15) Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1990. Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos - NBR 12025. Rio de Janeiro.

USE OF EXPERIMENTAL DESIGN IN INCORPORATION ORNAMENTAL ROCK WASTE IN MIXTURES BY-PRODUCT BRICKS WITH THE PRESSED PROCESS AND OF JOIN

ABSTRACT

The industry of ornamental stones in Brazil is an area of increasing development, presenting a production estimated at 8.0 million tonnes in 2007, according to ABIROCHAS (2008). The State of Espírito Santo concentrates 90% of investments in the sector nationally, with approximately 900 machines (machine sawing blocks of marble and granite) in operation, responsible for 70% of national production of marble and 30% of national production of granite. The big challenge of ornamental sector is making the benefits generated by the sector and the resulting environmental impacts, mainly due to the large volume of solid residual from the beneficiation process of the stones. The recycling of waste as a construction material is an alternative to mitigate the environmental impacts by promoting sustainability in the sector. This work aims to study the incorporation the residue of treatment of ornamental in mixtures for production of pressed blocks and fit for masonry in order to evaluate the different proportions of constituents through the Planning Experiments in Network Simplex, looking for techniques solutions without the traditional empiricism existing industry, aiming to achieve a satisfactory performance of the property assessed (resistance to compression). Ten experimental points were taken, the maximum of cement, sand and residual are respectively 20, 50 and 60% by weight, to define the area of response.

Keywords: Residue, Planning Experimental, Simplex.