AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DE MISTURAS COM ADIÇÃO DO RESÍDUO DE GRANITO PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS PRENSADOS E DE ENCAIXE UTILIZANDO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A.Z. Destefani[1], J. Alexandre[1], G. C. Xavier[1], A. F. Saboya[1], P. C. A. Maia[1]
[1]Laboratório de Engenharia Civil, 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 utilização de aditivos minerais na construção civil é conhecida desde a antiguidade. Estudos mais recentes buscam técnicas e alternativas para a utilização de resíduos industriais, como é o caso do resíduo utilizado neste trabalho, na função de aditivos minerais para produtos cimentícios, promovendo efeitos nas propriedades destes. 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 adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em misturas para produção de blocos prensados 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 (densidade aparente seca). 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 de granito, Planejamento Experimental, Simplex.

INTRODUÇÃO

As adições minerais são usadas na construção civil desde a Antiguidade. Na Grécia, em 1500 a.C., adotava-se um material de origem vulcânica para execução de várias obras. Mais tarde, surgiram outros materiais usados como adição, como argila calcinada. Nos dias atuais, as adições minerais normalmente usadas são resíduos provenientes de outras indústrias(1).

De forma geral, pode-se atribuir a efeitos físicos e químicos as mudanças nas propriedades de produtos cimentícios confeccionados com aditivos minerais. Os efeitos físicos podem ser divididos em três: diluição do cimento Portland, efeito fíler e nucleação(2).

O fíler é uma adição mineral finamente dividida sem atividade química, ou seja, sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação, ativando a hidratação dos grãos de cimento. Calcáreo, pó de quartzo e pó de pedra são materiais considerados como fíler[3].

O efeito fíler (figura 1) é consequência da maior compacidade conferida à mistura pela inclusão de partículas finas e ultrafinas do aditivo mineral[4].

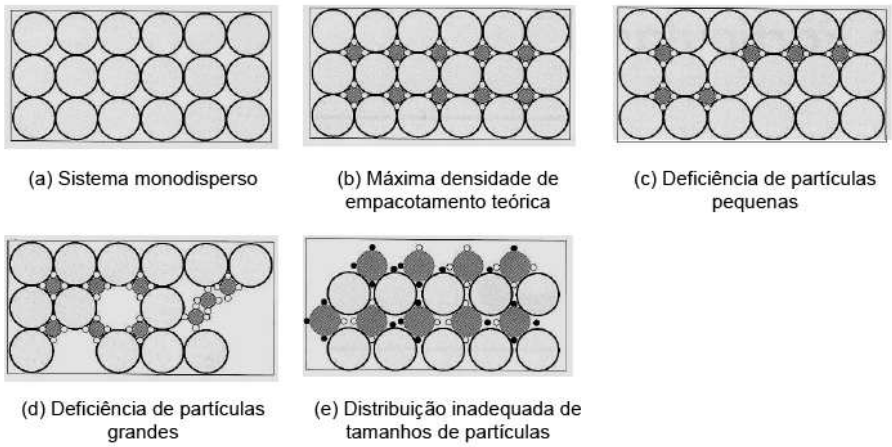

Figura 1 – Sistema de partículas[4].

O estudo do empacotamento de partículas pode ser definido como “o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menore, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menore e assim sucessivamente”[4].

O resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, em grande parte, é um material constiuído de fragmentos de rocha que possui características químicas, físicas, mecânicas e mineralógica que o habilitam para ser usado como adição mineral (agregado, fíler)[5].

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 adição 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, segundos as normas técnicas nacionais NBR 7211[6] e NBR 7251[7], 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 ºC por um período de 24 horas. Após a secagem, foi utilizado peneiramento em peneira ABNT nº 4.

Cimento

Foi utilizado como aglomerante o cimento portland compostos CP V E 32. De acordo com a NBR 11578[8] o cimento possui uma área especifica 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[9], na empresa Decolores Mármores 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 ℃ 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*)[10] [11].

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[12].

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)[13].

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[10], conforme demonstrado pela Equação A, onde x_i representa a proporção do *i*-ésimos componente.

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

A Figura 2 ilustra o fator espaço de três componentes ($q = 3$), e a Equação (A) torna-se a $x_1+x_2+x_3=1$.

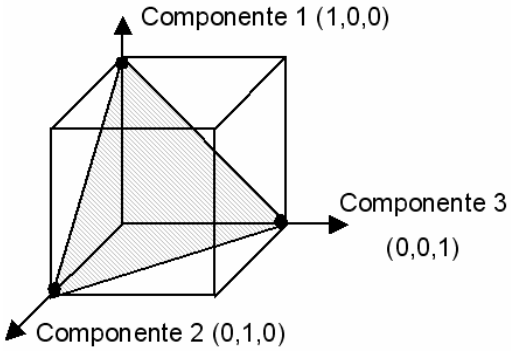

Figura 2 - Espaço simplex para três componentes (superfície de resposta) [11].

A superfície de resposta e os pontos experimentais para os respectivos modelos matemáticos são representados pela Figura 3.

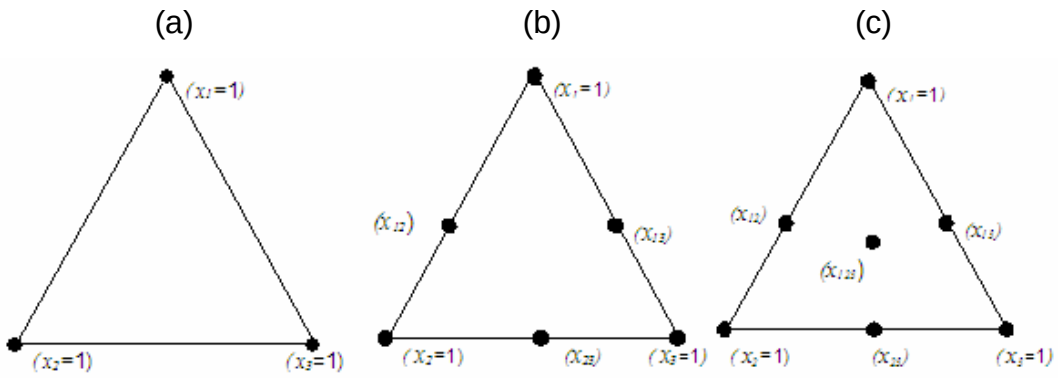

Figura 3 – Pontos para a obtenção dos modelos. (a) linear; (b) quadrático; (c) cúbico especial.

Representação Matricial

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

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

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.

$$X^t Xb = X^t y \quad \text{(C)}$$

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[11].

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[10], como mostra a Equação D.

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

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, $i = 1, 2, ..., q$. Os limites inferiores são expressos na forma geral pela Equação E:

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

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 – (Σ L_i)], tem-se os L-pseudocomponentes x'_i definidos usando-se a transformação F:

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

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

A partir da granulometria do resíduo, que absorve grande quantidade de água, foi realizado ensaio de compactação, de acordo com a NBR 12023[14], buscando uma variação de umidade ótima inferior a 1% para os limites (máximo e mínimo de resíduo incorporado).

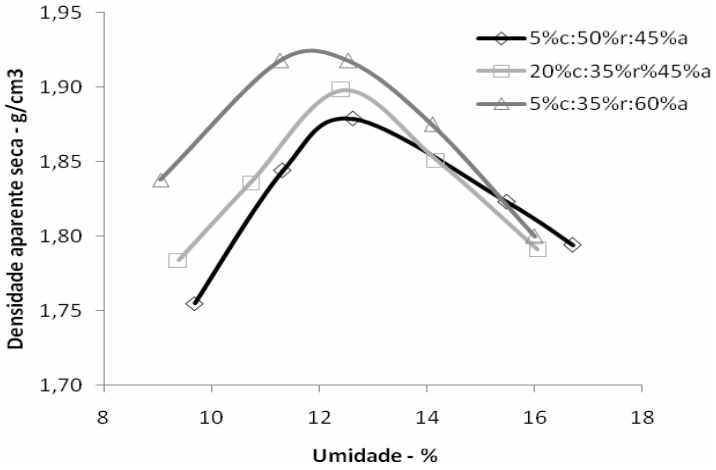

Figura 4 – Curvas de compactação para os limites das misturas.

Observa-se na curvas de compactação (Figura 4) 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[15], com as misturas de cimento, resíduo e areia, referente aos dez pontos experimentais e umidade de 12%.

Propriedade Analisada – Densidade Aparente Seca

Os dez pontos experimentais foram determinados as densidades aparentes no estado seco.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A superfície de resposta delimitada pelos pseudocomponentes para a umidade de compactação adotada é representada pela Figura 6. Analisando a Figura 5, podem-se confirmar as restrições (G), com um máximo de cimento, resíduo e areia de 20%, 50% e 65% respectivamente.

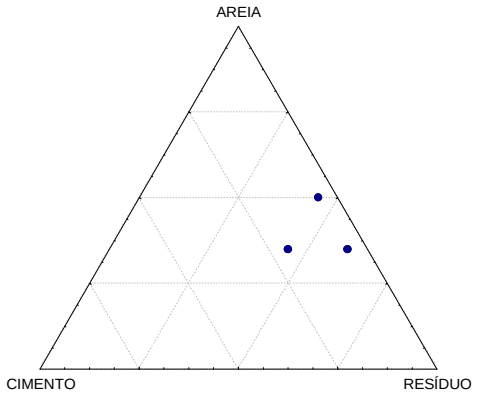

Figura 5 – Região delimitada pelos pseudocomponentes.

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.

Matriz de Composição das Misturas - X

Pontos Experimentais	Cimento	Resíduo	Areia
X_1	1	0	0
X_2	0	1	0
X_3	0	0	1
X_{12}	1/2	1/2	0
X_{13}	1/2	0	1/2
X_{23}	0	1/2	1/2
X_{123}	1/3	1/3	1/3
X_{1123}	2/3	1/6	1/6
X_{1223}	1/6	2/3	1/6
X_{1233}	1/6	1/6	2/3

Componentes Originais – X (%)

Pontos Experimentais	Cimento	Resíduo	Areia
X_1	0,20	0,35	0,45
X_2	0,05	0,50	0,45
X_3	0,05	0,35	0,60
X_{12}	0,10	0,45	0,45
X_{13}	0,10	0,35	0,55
X_{23}	0,05	0,40	0,55
X_{123}	0,15	0,40	0,45
X_{1123}	0,15	0,35	0,50
X_{1223}	0,05	0,45	0,50
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 (99,22%), mostrando maior homogeneidade e maior confiabilidade.

Modelo Cúbico Especial

$$\hat{y} = 1{,}49\ x'_1 + 1{,}48\ x'_2 + 1{,}56\ x'_3 - 0{,}11\ x'_1 x'_2 - 0{,}04\ x'_1 x'_3 + 0{,}06\ x'_2 x'_3 - 0{,}27\ x'_1 x'_2 x'_3$$

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}
$\hat{y}$	1,49	1,48	1,56	1,46	1,53	1,55	1,46	1,50	1,52	1,49
$\bar{y}$	1,49	1,48	1,56	1,46	1,53	1,55	1,46	1,50	1,52	1,49

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	0,011011	6	0,001835	MQ_R/MQ_r= 183,50
Resíduos	0,000029	3	0,000010	$.F_{6,9}$ = 3,37
Total	0,011040	9	0,001227	$MQ_R/MQ_r > .F_{6,9}$

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T$ = 99,22%

A Figura 6 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* [11].

Os componentes: cimento, resíduo e areia, representados nos vértices do triângulo de superfície de resposta da Figura 6 correspondem às proporções máximas de 20%, 50% e 60% respectivamente em massa, conforme as restrições experimentais (G).

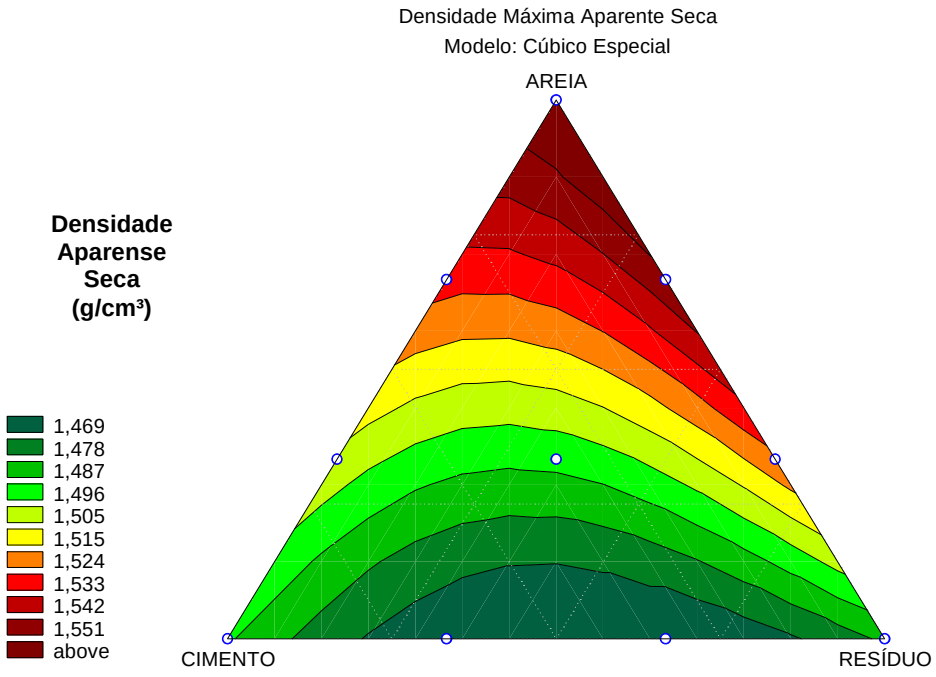

Figura 6 - Superfície determinada pelo modelo cúbico especial.

Densidade Aparente e Porosidade

Através da superfície de resposta e da equação obtida no planejamento experimental, obtiveram-se as curvas de densidade e porosidade aparente (Figura 7) para porcentagem de areia mínima avaliada (45%), variando os teores de cimento e resíduo.

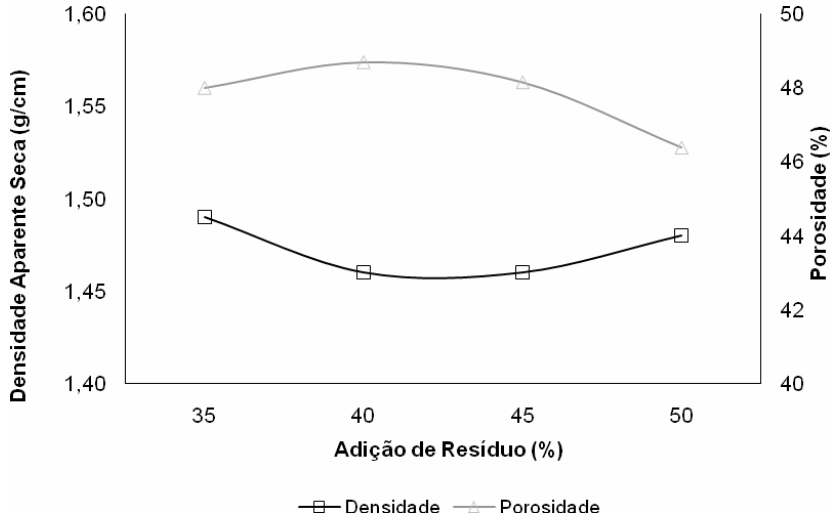

Figura 7 – Curvas de densidade aparente e porosidade aparente.

Observa-se na figura 7 que, para um teor fixo de 45% de areia, as adições do resíduo de 35% e 50% na mistura proporcionaram as maiores densidades aparentes e conseqüentemente as menores porosidades para as misturas, favorecendo o empacotamento das partículas.

CONCLUSÕES

Através da superfície de resposta gerada pelo Planejamento Experimental, observa-se que para todas as faixas de mistura proposta neste trabalho, quanto maior for à porcentagem de areia da mistura, maior será a densidade aparente seca e menor será a porosidade.

Para uma determinada porcentagem de areia, a quantidade de resíduo adicionado em relação ao cimento, exerce influência significativa no empacotamento das partículas, causando efeitos na densidade e porosidade dos corpos de prova.

REFERÊNCIAS

(1) DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Adições minerais para concreto estrutural concreto fresco. In: ISAIA, Geraldo Cechella. COCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 345-379, 1600p, 2005.

(2) LAWRENCE, P., CYR, M., RINGOT, E., 2003, "Mineral admixtures in mortars –Effect of inert materials on short-term hydration"**,** *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 12, pp. 1939-1947.

(3) NEVILLE, Adam M. Propriedades do Concreto. Tradução: Salvador E. Giammusso. 2ª edição. São Paulo: PINI, 828 p., 1997.

(4) OLIVEIRA, I. R., STUDART, A. R., PILEGGI, R. G., PADOLFELLI, V. C., 2000, *Dispersão e empacotamento de partículas*, 2 ed. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 224 p.

(5) BAHEINSE, ALEXANDRE V. Incorporação de Resíduo de Rocha Ornamental em Argamassa Utilizando Planejamento de Experimentos em Rede Simplex. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF / Alexandre Vianna Bahiense – Campos dos Goytacazes, RJ, 2007.

(6) Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1983. Agregados para concreto – Especificação - NBR 7211. Rio de Janeiro.

(7) Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1982. Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária - Método de ensaio - NBR 7251. Rio de Janeiro.

(8) Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Cimento Portland Composto – NBR 11578/1991. Rio de Janeiro.

(9) Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Amostragem de Resíduos: Procedimento – NBR 10007/1987. Rio de Janeiro.

(10) CORNELL, J. A. Experiments With Mixtures: Designs, Models, and The Analysis of Mixtures Data - 2nd ed., 1990.

(11) BARROS NETO, B., SPACINO, I., S., BRUNS, R., E. Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na indústria – 2ª ed. - Campinas-SP: Editora da UNICAMP, 2003.

(12) 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.

(13) 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.
(14) Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1992. Solo-cimento – Ensaio de Compactação - NBR 12023. Rio de Janeiro.
(15) Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1992. Solo-cimento – Produção de Corpos de Prova - NBR 12024. Rio de Janeiro.

DENSITY'S EVALUATION OF MIXTURES WITH THE ADDITION OF GRANITE WASTE BY-PRODUCT BRICKS WITH THE PRESSED PROCESS AND OF JOIN USING OF EXPERIMENTAL DESIGN

ABSTRACT

The use of mineral additives in the construction is known since ancient. More recent studies are looking for techniques to the use of industrial waste, like the case of the waste used in the study, the function of mineral additives for products made with cement, causing effects on the properties of these. 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 waste 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 (dry apparent density). Ten experimental points were taken, the maximum of cement, sand and waste are respectively 20, 50 and 60% by weight, to define the area of response.

Keywords: granite waste, Planning Experimental, Simplex.