

## Uso de técnicas estatísticas para modelar a resistência à flexão de corpos cerâmicos contendo resíduo de granito

SILVA, B.J.<sup>I</sup>, MENEZES, R.R.<sup>I</sup>, SANTANA, L.N.L.<sup>I</sup>, MELO, L.R.L.<sup>II</sup>, NEVES, G.A.<sup>I</sup>, FERREIRA, H.C.<sup>I</sup>

<sup>I</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, Campina Grande, PB.

e-mail: [bartojorge@yahoo.com.br](mailto:bartojorge@yahoo.com.br) ; [romualdomenezes@dema.ufcg.edu.br](mailto:romualdomenezes@dema.ufcg.edu.br) ; [lisiane@dema.ufcg.edu.br](mailto:lisiane@dema.ufcg.edu.br) ; [gelmires@dema.ufcg.edu.br](mailto:gelmires@dema.ufcg.edu.br) ; [heber@dema.ufcg.edu.br](mailto:heber@dema.ufcg.edu.br)

<sup>II</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará, Unidade de Ensino Descentralizada de Juazeiro do Norte, Juazeiro do Norte, CE  
e-mail: [lisboa@cefetce.br](mailto:lisboa@cefetce.br)

---

### RESUMO

A reciclagem do resíduo da serragem do granito como matéria-prima alternativa em formulações cerâmicas vem sendo muito estudada nos últimos anos. Por outro lado, o uso de ferramentas matemáticas para otimizar o comportamento mecânico de corpos cerâmicos contendo resíduos também vem sendo muito aplicado. Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo utilizar técnicas estatísticas aliadas à metodologia de delineamento de mistura para analisar a resistência à flexão de corpos cerâmicos contendo resíduo de granito. Foram estabelecidas composições utilizando um planejamento em rede simplex e foram conformados corpos-de-prova por prensagem uniaxial a 25MPa. Em seguida os corpos de prova foram queimados a 1.000, 1.100 e 1.150 °C. Foi determinado o módulo de ruptura à flexão dos corpos de prova em ensaio de três pontos. Com base nos resultados pode-se concluir que a metodologia de planejamento experimental associada à superfície de resposta é uma ferramenta que possibilita analisar o módulo de ruptura dos corpos cerâmicos frente a adição de resíduo de granito e por conseguinte desenvolver composições com elevados teores de resíduos sem perdas no seu módulo de ruptura.

**Palavras-chave:** Delineamento de mistura, reciclagem, resíduo de granito, resistência mecânica.

---

## Use of statistical techniques to model the flexural strength of ceramic bodies containing granite waste

### ABSTRACT

Granite sawing waste recycling as alternative raw material for ceramic formulations has been very much studied in the last years, however it was not observed the use of mathematical tools to understand the mechanical behavior of the ceramic bodies containing waste. Thus, this work used statistical tools associated with the mixture design methodology to model the flexural strength of the ceramic bodies containing granite waste. Compositions were developed using a simplex-lattice design and test samples were obtained by uniaxial pressing. The test samples were fired at 1.000, 1.100 and 1.150°C and their modulus of rupture was determined in a three point bend test. The results indicated that the statistical design of mixture experiments associated with the response surface is a tool that permits to model the modulus of rupture of the ceramic bodies in relation to the amount of incorporated waste and, consequently, to develop formulations containing high amounts of wastes without the decrease of the modulus of rupture.

**Keywords:** Mixture design, recycling, granite waste, mechanical strength.

---

## 1 INTRODUÇÃO

O elevado crescimento demográfico e da industrialização, combinados com a falta de planejamento ambiental para um desenvolvimento sustentável, têm gerado milhões de toneladas de resíduos por ano em todo o mundo. Em geral, os processos indústrias geram elevadas quantidades de resíduos que poderiam ser reciclados ou reutilizados, tanto por sua incorporação no processo produtivo original como pela sua utilização como uma matéria-prima alternativa em outros processos industriais [1, 2].

Atualmente em virtude das legislações mais exigentes a cerca das questões ambientais e da demanda de mercado por produtos ecologicamente corretos, os fabricantes estão a cada dia mais interessados em desenvolver pesquisas visando reduzir os impactos ambientais da geração de resíduos através de sua reutilização [3]. Por outro lado, o custo crescente com as matérias-primas, motivados pela elevada demanda globais, os danos ambientais provados por sua extração e a escassez de recursos naturais de boa qualidade, vêm motivando também a reciclagem de resíduos industriais como matérias-primas alternativas.

Diante desse cenário, o desenvolvimento de novas tecnologias para a reciclagem de resíduos sólidos consistentes com as necessidades atuais é do maior interesse econômico e ambiental [4]. Nesse sentido, atenção especial vem sendo dada a incorporação de resíduos industriais em produtos cerâmicos para a construção civil [2, 4-14], em virtude principalmente do elevado volume em potencial de resíduos que podem ser absorvidos por esse setor industrial.

Em virtude da simplicidade experimental para sua determinação e sensibilidade às matérias-primas e variáveis de processamento a resistência à flexão é frequentemente utilizada como um parâmetro de controle de qualidade dos corpos cerâmicos produzidos utilizando resíduos industriais como matérias-primas alternativas. Isso configura um cenário ideal para a aplicação da técnica de delineamento de misturas para modelar a resistência de corpos cerâmicos contendo resíduos.

O delineamento de mistura é um caso especial da técnica de planejamento experimental que utilizando ferramentas estatísticas e matemáticas em conjunto com a metodologia de superfície de resposta possui importantes aplicações não apenas no desenvolvimento de novos produtos, mas também, na melhora e otimização de produtos existentes [15-17].

A partir de um delineamento de misturas pode-se verificar como as propriedades de interesse são afetadas pela variação das proporções dos componentes da mistura e a partir do conhecimento prévio das propriedades de cada componente original e de algumas misturas é possível a previsão quantitativa das propriedades do sistema estudado [18-20]. A modelagem de uma propriedade usando essa metodologia de otimização é muito comum em diversas áreas e tem permitido, em todos os casos relatados, obter uma maior confiança nos resultados e eficiência em termos de racionalização de custos [16, 20].

O planejamento experimental utilizado para misturas difere dos planejamentos fatoriais, uma vez que as propriedades de uma mistura são determinadas pelas proporções de seus componentes, e não pela quantidade total. Além disso, as proporções dos diversos componentes de uma mistura não são independentes. Com os resultados obtidos no delineamento de misturas pode-se utilizar polinômios simplificados para relacionar a propriedade de interesse às diversas proporções utilizadas, sendo esse procedimento particularmente útil quando se pretende desenvolver um determinado produto com propriedades específicas.

Na literatura abordando a reciclagem de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas vêm-se observando estudos [9, 21, 22] utilizando a técnica de delineamento de mistura. Nesse sentido, seguindo essas metodologias de pesquisa, o presente trabalho tem como objetivo utilizar técnicas estatísticas aliadas à metodologia de delineamento de misturas para analisar a resistência à flexão de corpos cerâmicos contendo resíduo de granito.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Durante o desenvolvimento desse trabalho foram utilizados os seguintes materiais: resíduo da serragem do granito, cedido pela empresa Poligran S/A, Campina Grande, PB; argila vermelha cedida pela empresa Cerâmica Espírito Santo, PB e quartzo, cedido pela empresa Armil Minérios, Parelhas, RN. O resíduo da serragem do granito foi caracterizado anteriormente [2, 23], sendo observado que o resíduo é constituído por quartzo, mica, calcita e feldspato, possui um tamanho médio de partícula de 24,5  $\mu\text{m}$  e larga distribuição de tamanho de partícula, com  $D_{10} = 2 \mu\text{m}$  e  $D_{90} = 60 \mu\text{m}$ .

Utilizando a metodologia de delineamento de misturas [19, 20] foram formuladas composições contendo argila, quartzo e resíduo de granito. A técnica de delineamento de misturas utiliza resultados das matérias-primas puras e de suas misturas para inferir valores estatisticamente significativos de outras composições dentro do universo composicional analisado. Para a aplicação da metodologia de delineamento foi utilizado um planejamento em rede simplex {3,2} com ponto central. Na Tabela 1, a seguir, estão apresentadas as composições obtidas e utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa. Os ensaios foram realizados em três replicatas.

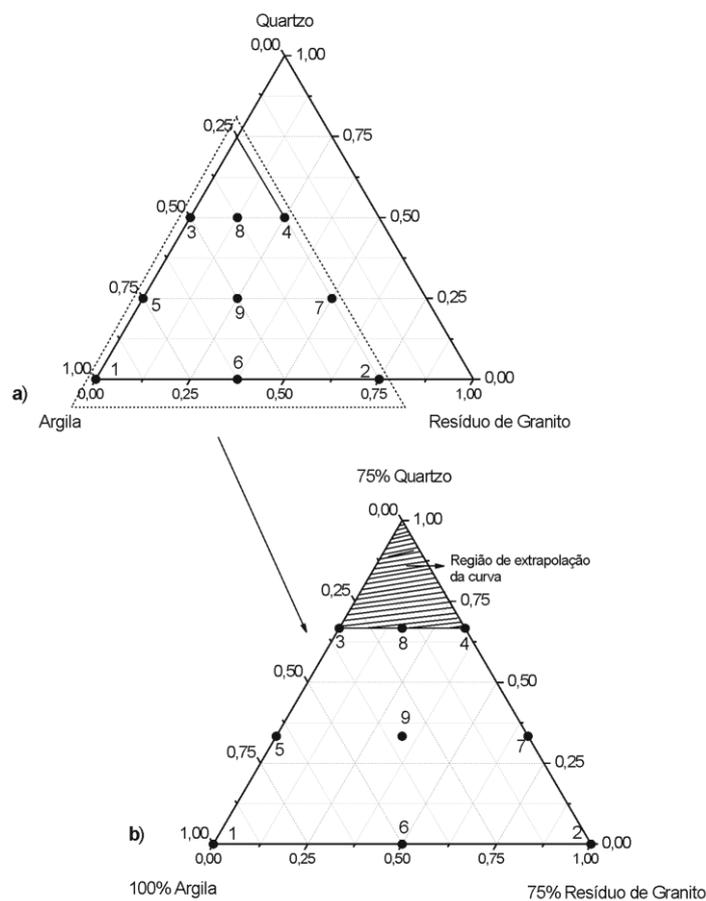
Foram estabelecidos, por exigências de processamento, limites máximo de 50% de quartzo e mínimo de 25% de argila, criando assim um “trapézio” de composições restrito dentro do triângulo de composições. A Figura 1, a seguir, ilustra esse trapézio e as composições formuladas presentes na Tabela 1.

Foram confeccionados corpos-de-prova de 50 mm x 20 mm x 5 mm por prensagem uniaxial a 25 MPa. Os corpos-de-prova foram queimados a 1.000, 1.100 e 1.150 °C em ciclos de queima rápida com taxas de aquecimento variando de 36 a 39 °C/min e patamares de queima de 5 minutos (de modo que o ciclo de

aquecimento não ultrapassasse 30 minutos). Em seguida, os corpos-de-prova foram submetidos a ensaio de flexão para determinação do módulo de ruptura à flexão (MR) em três pontos, utilizando uma velocidade 0,5 mm/min no braço de aplicação da carga.

**Tabela 1:** Composições obtidas através do planejamento em rede simplex {3,2} com ponto central.

Formulações	Proporção (%)		
	Argila	Res. Granito	Quartzo
1	100,0	0,0	0,0
2	25,0	75,0	0,0
3	50,0	0,0	50,0
4	25,0	25,0	50,0
5	75,0	0,0	25,0
6	62,5	37,5	0,0
7	25,0	50,0	25,0
8	37,5	12,5	50,0
9	50,0	25,0	25,0



**Figura 1:** Esquema das formulações no diagrama ternário, trapézio de composições, a) e a região do diagrama onde se obteve as superfícies de resposta b)

Com base nos valores de resistência obtidos foram utilizados o modelo o quadrático (1) e o cúbico especial (2), em termos dos componentes originais (não dos pseudo-componentes). Na construção das equações de ajuste dos valores de resposta do MR foi utilizada a seguinte nomenclatura: A, G e Q representando a quantidade usada na formulação de argila (A), resíduo de granito (G) e quartzo (Q), respectivamente.

$$Y(A, G, Q) = b_1A + b_2G + b_3Q + b_4AG + b_5AQ + b_6GQ (A) \tag{1}$$

$$Y(A, G, Q) = b_1A + b_2G + b_3Q + b_4AG + b_5AQ + b_6GQ + b_7AGQ \tag{2}$$

sendo Y a estimativa da resposta do MR e  $b_x$  os coeficientes da equação, determinados conforme a literatura [19, 20] e A, G e Q as proporções das matérias-primas presentes nas formulações.

O modelo linear foi analisado durante o desenvolvimento desse trabalho, entretanto os modelos quadrático e cúbico especial mostraram-se estatisticamente mais significativos e preditivos, em virtude, provavelmente, do maior número de termos nas equações o que permite um melhor ajuste aos valores experimentais.

Para a realização dos cálculos de regressão, análise estatística dos modelos e construção das superfícies de resposta foi utilizado o programa Statistica 6.0, StatSoft. Os modelos e coeficientes foram determinados estatisticamente em um nível de significância de 5%.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 a seguir, estão apresentados os valores obtidos para o módulo de ruptura à flexão (MR) dos corpos-de-prova após queima. A partir dos resultados obtidos foi possível obter equações de regressão correlacionando as proporções dos componentes na mistura com esses parâmetros, sendo escolhidas as equações estatisticamente significantes em um nível de significância de 5%. As equações (3) a (5) apresentam os modelos matemáticos obtidos correlacionando o MR com as proporções dos componentes.

**Tabela 2:** Valores dos módulos de ruptura à flexão dos corpos-de-prova após queima (em MPa).

Formulações		Composições								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.000°C	Rep <sup>a</sup> . 1	19,19	6,60	5,28	8,93	13,55	18,68	5,38	5,93	10,38
	Rep <sup>a</sup> . 2	18,80	6,66	6,09	7,69	15,37	17,50	5,18	6,17	10,54
	Rep <sup>a</sup> . 3	20,00	6,58	5,78	9,00	16,15	16,50	5,71	5,85	10,68
1.100°C	Rep <sup>a</sup> . 1	39,40	21,29	8,52	14,66	31,77	36,43	17,52	12,48	30,19
	Rep <sup>a</sup> . 2	40,19	21,79	7,99	14,95	27,38	35,00	15,37	11,97	29,25
	Rep <sup>a</sup> . 3	39,59	22,71	8,43	15,19	30,32	37,00	16,47	12,77	30,89
1.150°C	Rep <sup>a</sup> . 1	50,54	43,23	11,35	20,65	28,37	38,51	28,11	19,67	39,99
	Rep <sup>a</sup> . 2	55,93	37,65	9,69	20,34	31,60	39,40	27,96	16,58	39,17
	Rep <sup>a</sup> . 3	52,37	39,61	9,91	19,60	28,76	38,34	27,28	16,32	39,33

<sup>a</sup> replicata

Na Tabela 3 estão apresentados os parâmetros estatísticos principais das equações (3) a (5). Foi usada a nomenclatura estatística usual: teste F, valor p, coeficiente de múltipla determinação, R<sup>2</sup>. Pode-se observar que os modelos foram estatisticamente significantes ao nível estipulado e preditivos (valor do teste F > cinco vezes o valor Tabelado [24] e valor p ≤ nível de significância). Os modelos apresentaram variabilidade baixa.

**Tabela 3:** Estatísticas relevantes da análise de variância do módulo de ruptura.

Temperatura	Modelo	Teste F	Valor p <sup>a</sup>	R <sup>2</sup>
1.000 °C	Quadrático	6,59	0,002603	0,9080
1.100 °C	Quadrático	9,80	0,000302	0,9349
1.150 °C	Cúbico Especial	58,45	0,000000	0,9742

<sup>a</sup> nível de significância de 5%

Com o intuito de avaliar a precisão dos modelos calculados, foi desenvolvida uma composição e em seguida comparados os valores de módulo de ruptura após a queima, obtidos experimentalmente, com aqueles obtidos com o uso dos modelos (equações (3) a (5)). Na Tabela 4 estão apresentadas a composição formulada e os valores previstos e os observados experimentalmente. Pode-se observar que os valores previstos e os experimentais apresentaram pequena diferença, particularmente após queima a 1.100 e 1.150° C.

$$MR_{1.000}^{\circ C} = 20,32A + 26,61AG - 25,22AQ \quad (3)$$

$$MR_{1.100}^{\circ C} = 40,26A - 31,55Q + 49,95AG + 82,21GQ \quad (4)$$

$$MR_{1.150}^{\circ C} = 53,41A + 48,05G - 52,98AG - 61,81AQ - 174,27GQ + 802,45AGQ \quad (5)$$

Com base na análise de variância, Tabela 3, e nos dados presentes na Tabela 4 verifica-se que os modelos calculados podem ser usados para a análise do módulo de ruptura das composições com confiabilidade. A precisão experimental foi maior para as temperaturas de 1.100 e 1.150 °C.

**Tabela 4:** Composição do teste dos modelos e os valores observados e previstos para módulo de ruptura à flexão.

Temperatura	Composição (%)			Valores Previstos	Valores Observados
	Argila	Res. <sup>a</sup> Granito	Quartzo	MR	MR
1.000 °C	58,33	8,33	33,33	13,12	10,90
1.100 °C	58,33	8,33	33,33	17,68	18,63
1.150 °C	58,33	8,33	33,33	28,73	26,13

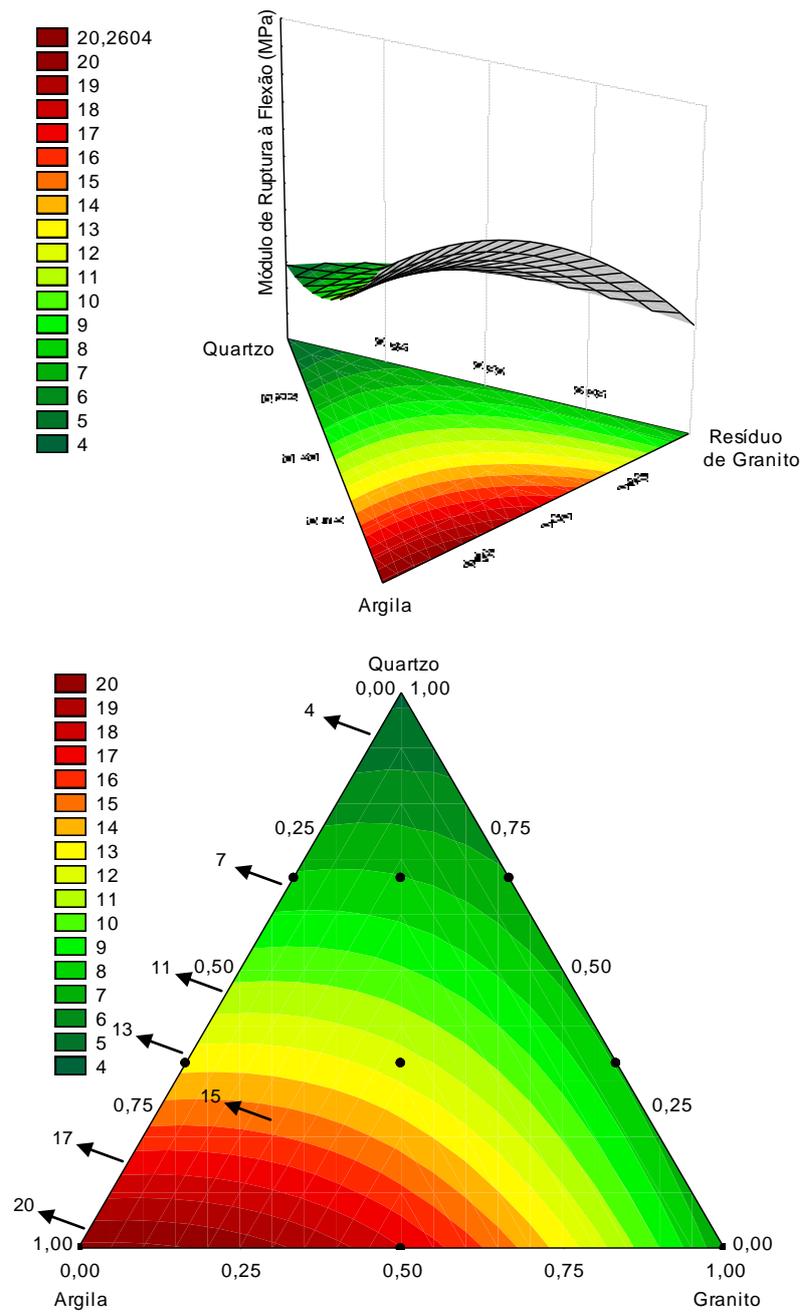
<sup>a</sup> resíduo

Nas Figuras 2 a 4 a seguir, são apresentadas as superfícies de respostas para o módulo de ruptura após queima a 1.000, 1.100 e 1.150 °C, respectivamente. As superfícies foram calculadas tomando como referência o diagrama ternário da Figura 1b. Pode-se observar que após queima a 1.000 °C as composições com elevados teores de resíduo estão entre as que apresentam os menores módulos de ruptura. Este comportamento pode estar associado às características físico-mineralógicas do resíduo, observando-se que nessa composição ele se comporta basicamente como um material de enchimento, não contribuindo para a melhora no comportamento mecânico dos materiais produzidos. Verifica-se que os corpos-de-prova com os maiores módulos após queima a 1.000 °C são os que apresentam elevados teores de material plástico (argila).

Após queima a 1.100 °C, observa-se na Figura 3 que já se torna possível a produção de corpos com altos teores de resíduo, mas com elevado módulo de ruptura, superiores a 28MPa. O que indica que o resíduo passa a contribuir para a resistência do corpo cerâmico. Esse comportamento de estar associado à fusão de feldspatos presentes em sua constituição. O efeito sinérgico do resíduo após queima a 1.100 °C, pode ser observado através da equação (4), onde se verifica o efeito positivo no aumento do módulo tanto na sua interação com a argila como com o quartzo.

Analisando a Figura 4 observa-se que os corpos-de-prova contendo elevada quantidade de resíduos apresentam altos módulos de ruptura, superiores a 38MPa, o que indica que conforme se eleva a temperatura de queima ocorre um aumento na contribuição do resíduo a resistência dos corpos produzidos. Ao analisar a Figura 4 e a equação (5) verifica-se que após queima a 1.150 °C o resíduo tem forte influência positiva no aumento da resistência, todavia ainda menor que a observada para a argila. As interações do resíduo com a argila e com o quartzo têm efeitos antagônicos ao módulo de ruptura o que não é desejável, por outro lado, a interação das três matérias-primas tem apresentado um efeito sinérgico no módulo de ruptura à flexão.

Com base nos resultados pode-se observar que é possível a produção de corpos para revestimentos cerâmicos contendo elevados teores de resíduo da serragem do granito sem a diminuição da resistência mecânica do produto final quando da adequada combinação de matérias-primas, a qual é facilmente evidenciada através do uso do delineamento de mistura e da modelagem do módulo de ruptura. Comprova-se assim, a eficiência das ferramentas matemáticas para otimizar e dinamizar as tecnologias de reciclagem que visam produzir matérias-primas alternativas para o setor cerâmico.



**Figura 2:** Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 1.000 °C.

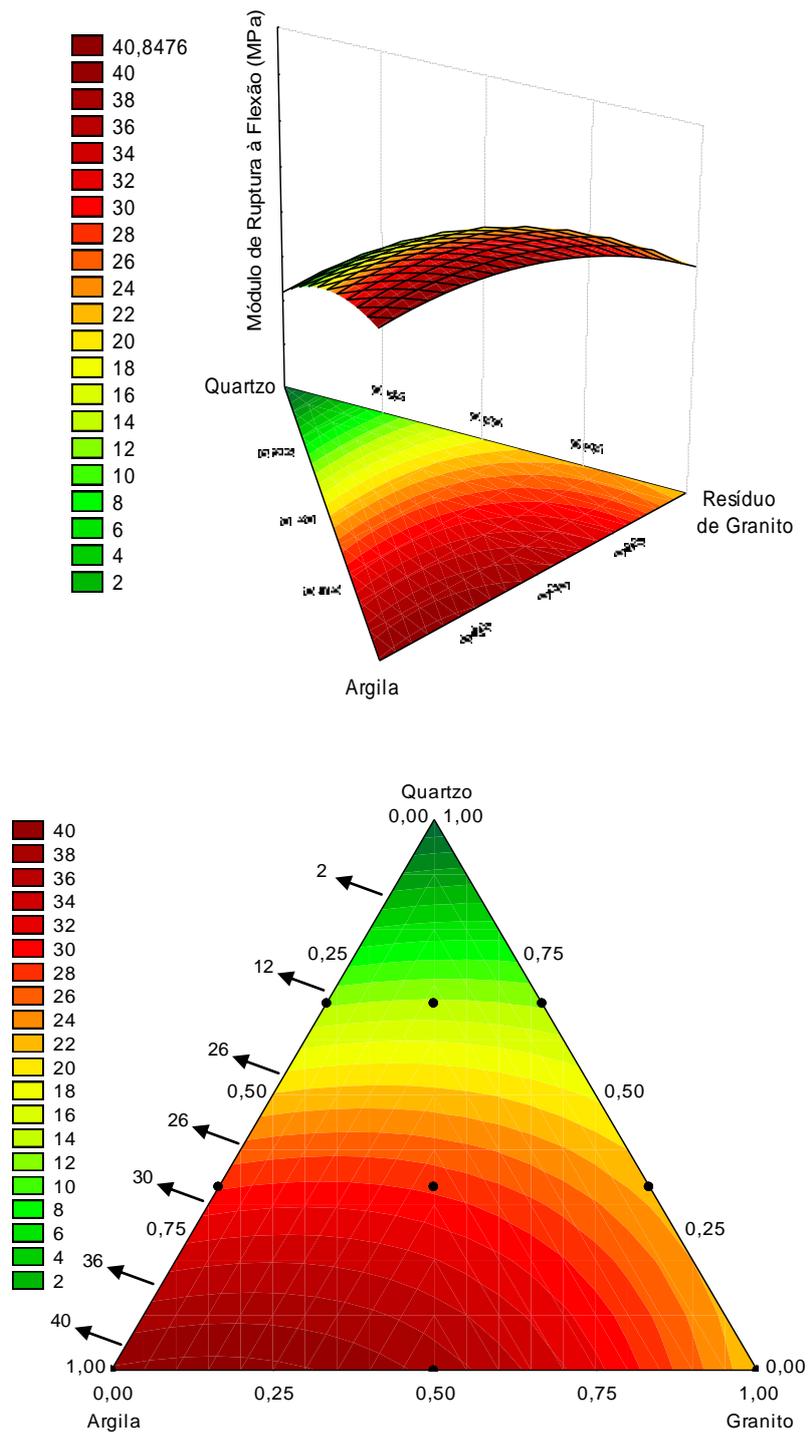
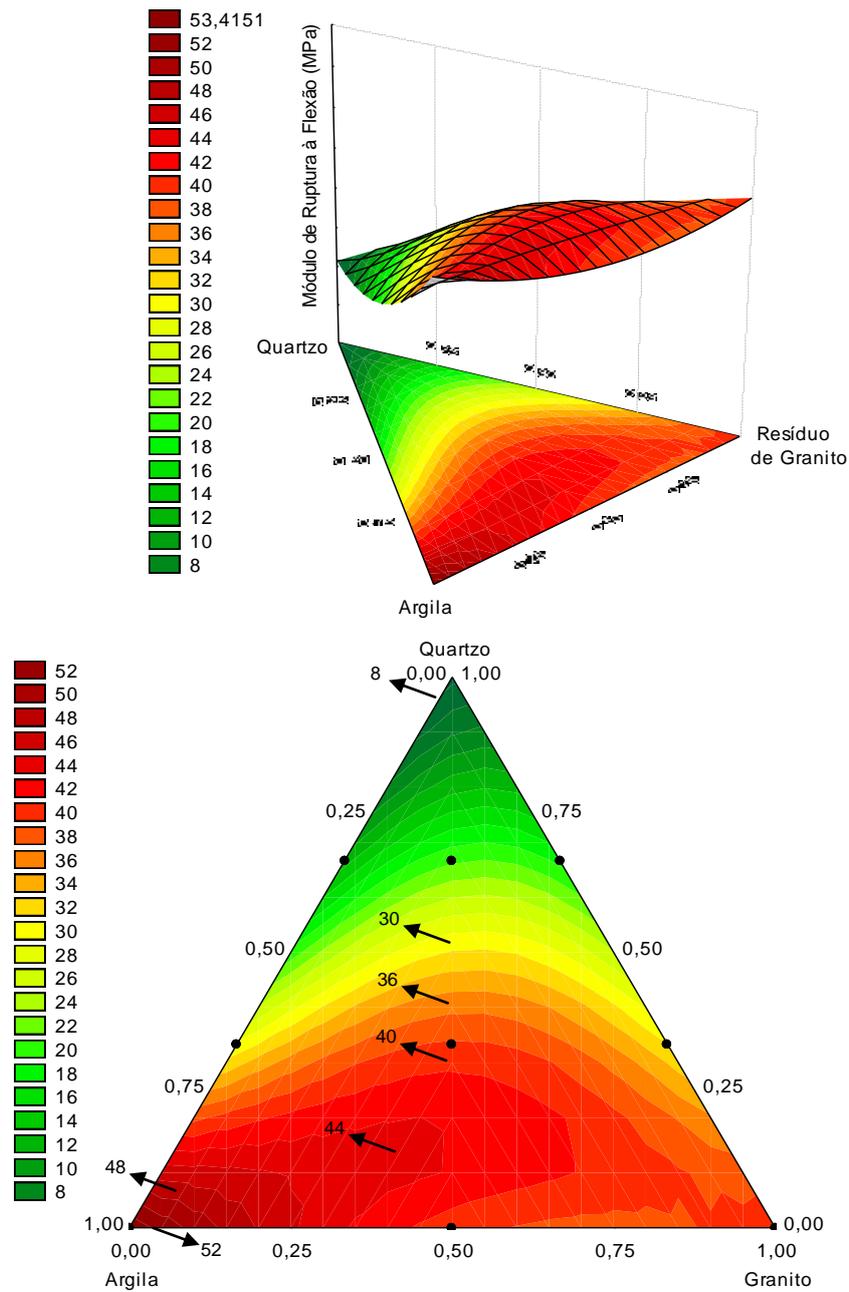
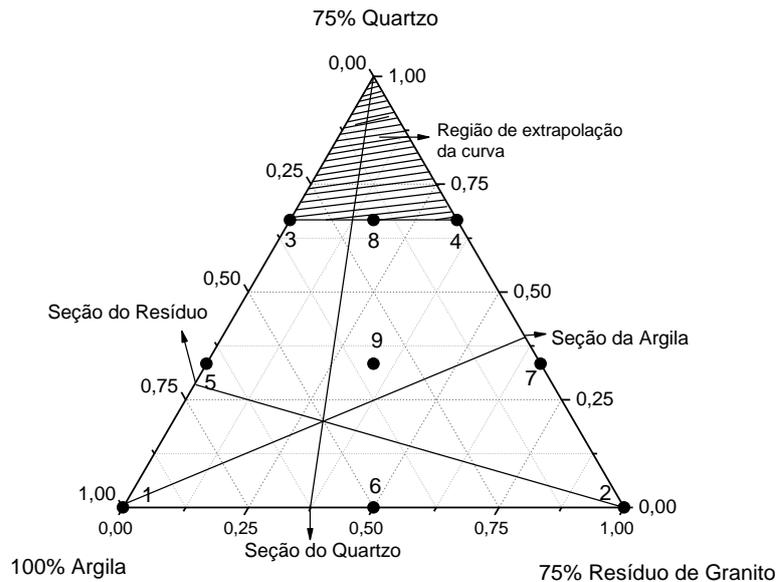


Figura 3: Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 1.100 °C.



**Figura 4:** Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 1.150 °C.

Outra maneira de analisar o comportamento do módulo de ruptura à flexão é através de seções das superfícies de resposta. Assim, foram analisadas seções das superfícies de resposta a fim de se ter uma melhor visão da resposta do módulo frente às matérias-primas utilizadas. A Figura 5 ilustra, com relação à Figura 1b, as seções utilizadas.



**Figura 5:** Ilustração das seções utilizadas.

A Figura 6, a seguir, apresenta as seções das superfícies de resposta, com os valores previstos para o módulo de ruptura à flexão.

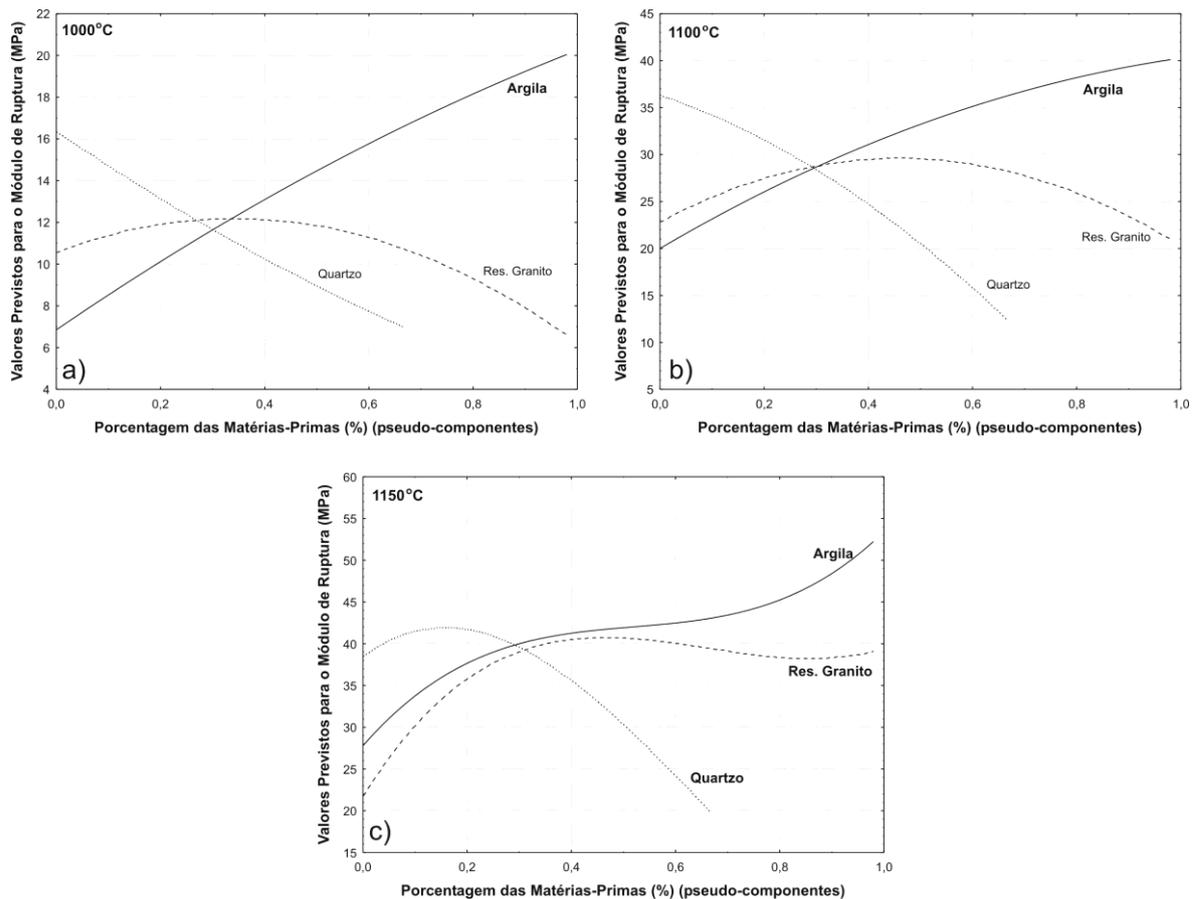
Observa-se na Figura 6 que a alteração nas proporções das matérias-primas modifica significativamente o módulo de ruptura dos corpos produzidos, tal como esperado. Verifica-se que o aumento na quantidade de quartzo, na faixa das composições estudadas, conduz a uma diminuição do módulo quando da queima a 1.000 e 1.100 °C. Na temperatura de 1.150 °C observa-se que a adição de pequena quantidade de quartzo possibilita um pequeno incremento no módulo de ruptura, no entanto, maiores aumentos decrescem o módulo. A Figura 6 possibilita observar também que independentemente da temperatura de queima o incremento no teor de argila (material plástico) conduz ao aumento do módulo.

Os resultados indicam que com a 1.000 °C e a utilização de teores de resíduo de granito de 30-35% (em pseudocomponentes – 22,5 a 26,3% em teores reais, respectivamente) nas formulações não há decréscimo no módulo de ruptura. Já na queima a 1.100°C, verifica-se que é possível incorporar teores superiores a 40% (em pseudocomponentes – 30% em teores reais) de resíduo, obtendo-se melhoras no módulo de ruptura em comparação com as composições sem resíduo. Essa melhora no módulo pode estar associada ao desenvolvimento de uma maior quantidade de fase vítrea nos corpos contendo resíduo, em virtude do início da fusão dos feldspatos presentes no resíduo quando da queima a 1.100°C.

É interessante observar que corpos contendo elevados teores de resíduo, superiores a 60% (em pseudocomponentes – 45% em teores reais), apresentam módulos de ruptura significativamente inferiores aos dos corpos produzidos com formulações contendo elevada quantidade de argila (superior a 60%, em pseudocomponentes) quando da queima a 1.000 e 1.100 °C. O que evidencia que quando se utilizam essas temperaturas de queima para a confecção do corpo cerâmico deve-se utilizar uma maior proporção de material plástico, caso se deseje o melhor desempenho mecânico possível.

Na temperatura de queima de 1.150 °C é possível incorporar maiores teores de resíduo às formulações, sem perdas ou decréscimos acentuados do módulo de ruptura. Verifica-se que é possível utilizar teores de resíduos próximos dos 100% (em pseudocomponentes – 75% em teores reais) nas composições obtendo-se corpos com elevada resistência. O que, novamente, deve estar associado ao elevado teor de fundentes presentes no resíduo [2] e sua fusão quando da queima [9].

Com a queima a 1.150 °C observa-se que a diferença entre os módulos dos corpos contendo elevados teores de resíduo e argila é diminuída significativamente em relação ao observado quando da queima a 1.000 e 1.100 °C. Entretanto, os corpos com elevados teores de argila ainda apresentam módulos superiores aos observados nos corpos de prova produzidos com grandes quantidades de resíduo.



**Figura 6:** Seções com os valores previstos para o módulo de ruptura: a) 1.000 °C, b) 1.100 °C e c) 1.150 °C.

Verifica-se que conforme se aumenta a temperatura de queima é possível aumentar o teor máximo de resíduo de granito que se pode adicionar às formulações sem ocorrer decréscimos do módulo de ruptura. O que é importante para direcionar a utilização dos resíduos em processos produtivos que utilizem temperaturas de queima superiores às necessárias para início do processo de fusão dos constituintes do resíduo, de forma que o resíduo possa atuar como um fundente, e não apenas como um constituinte não plástico de enchimento (“filler”), contribuindo para a melhora no módulo de ruptura do corpo produzido.

#### 4 CONCLUSÕES

Esse trabalho teve como objetivo utilizar técnicas estatísticas aliadas à metodologia de delineamento de mistura para analisar a resistência à flexão de corpos cerâmicos contendo resíduo de granito. Com base nos resultados pode-se concluir que a metodologia de planejamento experimental associada à superfície de resposta é uma ferramenta que permite avaliar o módulo de ruptura à flexão de corpos cerâmicos contendo resíduo de granito, possibilitando analisar e compreender o seu comportamento e evolução frente aos teores de resíduo e à temperatura de queima, o que possibilita o desenvolvimento de composições com a maximização do teor de resíduo da serragem de granito. A adição de quartzo, no intervalo de composições estudado, provoca, de forma geral, o decréscimo do módulo de ruptura à flexão dos corpos cerâmicos. O aumento da temperatura de queima possibilita elevar os teores de resíduos incorporados às formulações, podendo-se atingir teores superiores a 50% de resíduo de granito sem o decréscimo do módulo de ruptura quando da queima a 1.150 °C. O incremento no teor de argila (material plástico) conduziu ao aumento do módulo de ruptura à flexão independentemente da temperatura de queima.

## 5 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (471414/04-9) e à FAPESQ/MCT/CNPq (003/03 e 001/06) pelo apoio financeiro.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- [1] BASEGIO, T., MACHADO, A., BERNARDES, A.M., *et al*, “Electrostatic painting residues as an alternative raw material for red clay industry”, *Waste Manage Res.*, v. 24, pp. 537–544, 2006.
- [2] MENEZES, R.R., FERREIRA, H.S., NEVES, G.A., *et al*, “Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles”, *Journal of the European Ceramic Society*, v. 25, n. 7 pp. 1149–1158, May 2005.
- [3] BRAGANÇA, S.R., VICENZI, J., GUERINO, K., *et al*, “Recycling of iron foundry sand and glass waste as raw material for production of white ware”, *Waste Manage Res.*, v. 24, pp. 60–66, February 2006.
- [4] OLIVEIRA, G.E., HOLANDA, J.N.F., “Use of mix of clay/solid waste from steel works for civil construction materials”, *Waste Manage Res.*, v. 22, pp. 358–363, 2004.
- [5] VIEIRA, C.M.F., SOARES, T.M., SÁNCHEZ, R., *et al*, “Incorporation of granite waste in red ceramics”, *Materials Science and Engineering: A*, v. 373, n.1-2, pp. 115–121, May 2004.
- [6] MONTEIRO, S.N., PEÇANHA, L.A., VIEIRA, C.M.F., “Reformulation of roofing tiles body with addition of granite waste from sawing operations”, *Journal of the European Ceramic Society.*, v. 24, n. 8, pp. 2349–2356, July 2004.
- [7] MOREIRA, J.M.S., FREIRE, M.N., HOLANDA, J.N.F., “Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha”, *Cerâmica*, v. 49, n. 312, pp. 262-267, 2004.
- [8] RAUPP-PEREIRA, F., HOTZA, D., SEGADÃES, A.M., *et al*, “Ceramic formulations prepared with industrial wastes and natural sub-products”, *Ceramics International*, v. 32, n. 2, pp. 173-179, 2006.
- [9] MENEZES, R.R., MALZAC NETO, H.G., SANTANA, L.N.L., *et al*, “Optimization of wastes content in ceramic tiles using statistical design of mixture experiments”, *Journal of the European Ceramic Society*, v. 28, n. 16 pp. 3027–3039, December 2008.
- [10] MENEZES, R.R., BRASILEIRO, M.I., SANTANA, L.N.L., *et al*, “Utilization of kaolin processing waste for the production of porous ceramic bodies”, *Waste Manage Res.*, v. 26, pp. 362-368, August 2008.
- [11] MENEZES, R.R., FARIAS, F.F., OLIVEIRA, M.F., *et al*, “Kaolin processing waste applied in the manufacturing of ceramic tiles and mullite bodies”, *Waste Manage Res.*, v. 27, pp. 78-86, February 2009.
- [12] HOJAMBERDIEVA, M., EMINOVIC, A., XUB, Y., “Utilization of muscovite granite waste in the manufacture of ceramic tiles”, *Ceramics International*, v. 37, n. 3, pp. 871-876, April 2011.
- [13] ELICHE-QUESADA, D., MARTÍNEZ-GARCÍA, C., MARTÍNEZ-CARTAS, M.L., *et al*, “The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks”, *Applied Clay Science*, v. 52, n. 3, pp. 270-276, May 2011.
- [14] BILGINA, N., YEPREMB, H.A., ARSLANC, S., *et al*, “Use of waste marble powder in brick industry”, *Construction and Building Materials*, v. 29, pp. 449-457, April 2012.
- [15] CORREIA, S.L., CURTO, K.A.S., HOTZA, D., *et al*, “Using statistical techniques to model the flexural strength of dried triaxial ceramic bodies”, *Journal of the European Ceramic Society*, v. 24, n. 9, pp. 2813–2818, August 2004.

- [16] CORREIA, S.L., HOTZA, D., SEGADÃES, A.M., “Uso de técnicas de planejamento experimental e programação não linear para otimização de massas cerâmicas triaxiais”, *Revista Matéria*, v. 9, n. 4, pp. 271-279, 2004.
- [17] CORREIA, S.L., OLIVEIRA, A.P.N., HOTZA, D., *et al.*, “Properties of triaxial porcelain bodies: Interpretation of statistical modeling”, *Journal of the European Ceramic Society*, v. 89, pp. 3356–3365, November 2006.
- [18] MONTGOMERY, D.C., *Design and Analysis of Experiments*, 5th ed., New York, Wiley Interscience, 2001.
- [19] CORNELL, J.A., *Experiments with Mixtures: Designs, Models and the Analysis of Mixture Data*, 3rd edition, New York, Wiley Interscience, 2002.
- [20] MYERS, R.H., MONTGOMERY, D.C., *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, New York, John Wiley and Sons, 2002.
- [21] NARDI, J.V., ACCHAR W., HOTZA, D., “Enhancing the properties of ceramic products through mixture design and response surface analysis”, *Journal of the European Ceramic Society*, v. 24, n. 2, pp. 375-379, 2004.
- [22] ABDRAKHIMOVA, E.S., ABDRAKHIMOV, V.Z., “Optimization of the content of light fraction ash in ceramic tile mixtures”, *Glass and Ceramics*, v. 63, n. 3-4, pp. 95-96, 2006.
- [23] MENEZES, R.R., FERREIRA, H.S., NEVES, G.A., *et al.*, “Uso de rejeitos de granitos como matérias-primas cerâmicas”, *Cerâmica*, v. 48, pp. 1–9, 2002.
- [24] BARROS NETO, B., SCARMINIO, I.E., BRUNS, R.E., *Planejamento e otimização de experimentos*, 2ª Ed., São Paulo, Editora Unicamp, 1996.