

RECICLAGEM DE RESÍDUO DA PRODUÇÃO DA ALUMINA ELETROFUNDIDA VISANDO SUA UTILIZAÇÃO COMO MATÉRIA-PRIMA CERÂMICA ALTERNATIVA

Henri Geraldo Malzac Neto¹, Romualdo Rodrigues Menezes², Gelmires de Araújo Neves³, Lisiane N. L. Santana⁴

RESUMO

A inclusão de resíduos em ciclos produtivos representa uma forma alternativa de reutilização, que é interessante tanto no aspecto ambiental como no econômico. Neste trabalho, foi realizada a caracterização do resíduo da produção de alumina eletrofundida e avaliada sua viabilidade como matéria-prima cerâmica alternativa utilizando a metodologia de delineamento de mistura. O resíduo foi caracterizado por EDX, DRX e determinação do tamanho de partículas. Nove formulações usando o resíduo, feldspato, caulim e ball clay foram selecionadas e utilizadas no planejamento das misturas. Corpos-de-prova foram queimados e caracterizados para determinar sua absorção de água, retração linear de queima e módulo de ruptura. Concluiu-se que o resíduo é constituído basicamente por Al_2O_3 , que apresenta elevada quantidade de óxidos fundentes e possui elevada finura. Os modelos de regressão, correlacionando as propriedades com a composição das formulações, foram calculados com êxito. O significado e a validade dos modelos foram confirmados por análise estatística. Os modelos de regressão podem ser usados para otimizar a quantidade de resíduos contidos nas composições cerâmicas. Os resultados mostraram que formulações contendo até 50% de resíduo poderiam ser usadas na produção de corpos cerâmicos.

Palavras-chave: reciclagem, resíduos, delineamento de mistura

RECYCLING OF ELECTROFUSED ALUMINA PRODUCTION WASTE FOR USE AS ALTERNATIVE CERAMIC RAW MATERIAL

ABSTRACT

Inclusion of wastes into productive cycles represents an alternative form of restoration, which is interesting from both environmental and economic standpoints. In this work electrofused alumina production waste was characterized and its suitability as alternative ceramic raw material analyzed using statistical design of mixture experiments methodology. The waste was characterized through EDX, DRX and particle size distribution determination. Nine formulations using the raw materials, waste, feldspar, kaolin and ball clay, were selected and used in the mixture design. Test specimens were fired and characterized to determine their water absorption and modulus of rupture. The results indicated that the waste was composed mainly by Al_2O_3 , that presented high amount of fluxing oxides and have high amount of fine particles. Regression models, correlating the properties with the composition, were successfully calculated. The significance and validity of the models were confirmed by statistical analysis. The regression models can be used to optimize the waste content in ceramic compositions. The results showed that formulations containing up to 50% of waste could be used in the production of ceramic tiles.

Keywords: recycling, wastes, design of mixture experiments

¹ Aluno do Curso de Engenharia de Produção, Unid. Acad. de Engenharia de Produção, UFCG, Campina Grande, PB, E-mail: henri@uaep.ufcg.edu.br

² Engenheiro de Materiais, Pesquisador Dr., Unid. Acad. Engenharia de Materiais, UFCG, Campina Grande, PB, E-mail: romualdomenezes@dema.ufcg.edu.br

³ Engenheiro de Minas, Prof. Dr. Unid. Acad. Engenharia de Materiais, UFCG, Campina Grande, PB, E-mail: gelmires@dema.ufcg.edu.br

⁴ Engenheira de Materiais, Profª. Drª. Unid. Acad. Engenharia de Materiais, UFCG, Campina Grande, PB, E-mail: lisiane@dema.ufcg.edu.br

INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, milhões de toneladas de resíduos inorgânicos são produzidos a cada dia nas atividades de mineração e beneficiamento mineral. Tradicionalmente esses resíduos são descartados em aterros e, muito comumente, são jogados diretamente no meio ambiente, sem qualquer processo de tratamento ou imobilização. Todavia, alternativas de reciclagem e/ou reutilização devem ser investigadas e, sempre que possível, implementadas (TULYAGANOV et al., 2002; RAUPP-PÉREIRA et al., 2006).

A abordagem ambiental mais recente, objetiva exatamente o desenvolvimento sustentável, com a minimização do descarte dos materiais, enfatizando que no século 21 o gerenciamento dos resíduos é uma das questões mais importantes tanto para a saúde pública como para o desenvolvimento industrial (SOUZA & MANSUR, 2004; OZEL et al., 2006)

A inserção dos resíduos em ciclos alternativos de produção deve representar uma importante opção de reaproveitamento tanto da perspectiva ambiental como da econômica. A reutilização e a reciclagem são as melhores soluções para a economia de matérias-primas e a redução na quantidade de resíduos industriais produzidos (ANDREOLA et al., 2002; ZANTETI & FIORI, 2003; SÁNCHEZ et al., 2006). O que faz com que o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem de resíduos sólidos tenha grande importância não apenas ambiental, mas também econômica nos dias atuais (MENEZES et al., 2002; OLIVEIRA & HOLANDA, 2004; PINATTI et al., 2005).

A reciclagem de resíduos sólidos através de sua incorporação em formulações cerâmicas para produção de cerâmicas tradicionais, como tijolos, revestimentos e porcelanas, vem ganhando a cada dia mais destaque devido à possibilidade de aproveitamento de grandes quantidades de resíduos e pelos excelentes resultados técnicos que vêm sendo apresentados na literatura (HERNÁNDEZ-CRESPO & RINCÓN, 2001; MONTEIRO et al., 2004; VIEIRA et al., 2004; TORRES et al., 2004; MENEZES et al., 2005). Nesse sentido, a utilização de planejamentos experimentais para o estudo de misturas tem encontrado larga aplicação tanto em pesquisas laboratoriais como em desenvolvimentos industriais (CORNELL, 1990; CAMPOS, et al., 2007). A partir de um planejamento experimental utilizando delineamento de misturas (um caso especial da metodologia do cálculo de superfícies de resposta, a qual utiliza ferramentas estatísticas e matemáticas para modelar, simular e otimizar uma determinada propriedade) 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, bem como das misturas, em proporções definidas, é possível a previsão quantitativa das propriedades do sistema estudado (Cornell, 1990; BARROS NETO et al., 1996)

A indústria de produção de alumina eletrofundida gera atualmente um resíduo durante o seu processamento, que consiste em um pó, de granulometria fina, rico em óxido de alumínio, cujo manuseio provoca a formação de névoa e poeiras dificultando sua reutilização no processo produtivo, por ser arrastado facilmente pelas correntes de gases e possuir um rendimento extremamente baixo. Em consequência disso, esse produto, é descartado pelas empresas em aterros particulares, todavia em virtude do volume gerado passará a ser descartado em aterros industriais, seguindo as normas técnicas. O resíduo gerado provoca uma série de implicações econômicas, associadas a sua adequada manipulação, descarte e monitoramento no aterro, o que vem se tornando uma fonte de custos para o setor.

A quantidade de resíduo gerado por apenas uma fábrica, mesmo após sua reutilização algumas vezes no processo, está em torno de 100 ton/mês. O que evidencia o montante de despesas que advêm com seu descarte, bem como as excelentes possibilidades de sua utilização como uma matéria-prima alternativa em virtude da grande quantidade gerada.

Por outro lado, observa-se que apesar da conscientização de pesquisadores, agências de fomento e empresas geradoras de resíduo, expressa nos vários trabalhos que vêm sendo realizados visando a reutilização de resíduos industriais como matérias-primas alternativas em diversos setores, praticamente nenhum estudo voltou-se para a análise da reciclagem do resíduo da produção da alumina eletrofundida.

Assim, o presente trabalho tem por objetivo caracterizar e avaliar as possibilidades de utilização do resíduo gerado durante a produção da alumina eletrofundida (pó de coletor da produção de alumina eletrofundida marrom), oriundo dos filtros de tratamento, como matéria-prima cerâmica alternativa para a produção de materiais cerâmicos.

MATERIAL E MÉTODOS

O resíduo da produção da alumina eletrofundida utilizado nessa pesquisa fé oriunda dos filtros de tratamento de ar. O resíduo foi seco a 110°C, desaglomerado em almofariz e passado em peneira ABNT N° 80 (0,180mm). As outras matérias-primas utilizadas na pesquisa foram: feldspato, caulim e argila ball clay, cedidas pela Armil Minérios, Parelhas, RN.

O resíduo foi submetido à caracterização física e mineralógica através de: fluorescência de raios X, em equipamento Shimadzu (EDX 720), para determinação da composição química semi-quantitativa;

determinação da distribuição do tamanho de partículas por difração de laser, em equipamento Cilas (Cilas 1064 LD). Para realização do ensaio as amostras foram dispersas utilizando a metodologia para análise granulométrica de solos (ABNT, 1984) usando agitador de alta rotação e hexametáfosfato de sódio como agente dispersante; difração de raios X, em equipamento Shimadzu (XRD 6000), realizada utilizando-se radiação $K\alpha$ do Cu com varredura de 2θ de 5 a 70°.

Visando avaliar a viabilidade de utilização do resíduo da produção de alumina eletrofundida como matéria-prima cerâmica alternativa um planejamento simplex com ponto central {3,2} foi utilizado para formular misturas das matérias-primas. As misturas foram formuladas utilizando o resíduo, feldspato, caulim e ball clay, com o caulim e a ball clay adicionados conjuntamente sob a denominação de componente "argila" e sendo mantida uma proporção de 70% de caulim e 30% de ball clay no componente "argila". Os componentes da formulação foram submetidos a limitações composicionais: máxima quantidade de resíduo de 50%, máxima quantidade de feldspato de 10% e quantidade de argila entre 40 e 75%. A região do diagrama ternário, resíduo-feldspato-argila está ilustrada na Figura 1.

As misturas com as composições selecionadas seguiram as seguintes etapas: mistura a seco (usando moinho de bolas), desaglomeração, umidificação (6,5%) e granulação. Os corpos-de-prova (40 mm x 8 mm x 5 mm), foram obtidos por prensagem uniaxial a 78MPa e queima rápida em um forno de laboratório a 1150, 1200 e 1220°C com taxa de aquecimento de 36°C/min e patamar de queima de 5min. Foram preparadas quatro replicatas independentes de cada composição.

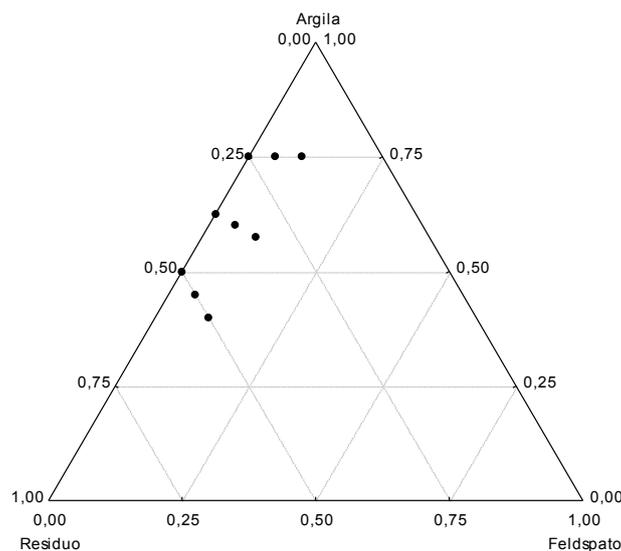


Figura 1. Região (delimitada por pontos) do diagrama ternário resíduo-feldspato-argila onde executada a análise de acordo com as restrições composicionais impostas

A absorção da água (AA) foi determinada utilizando o princípio de Arquimedes com imersão em água por 24 h. O módulo de ruptura à flexão (MR) foi determinado através de ensaio de flexão em três pontos, com velocidade de deslocamento do braço de aplicação de carga de 0,5mm/min.

Os resultados das quatro repetições foram usados para calcular os coeficientes da equação de regressão por interação até se obter modelos e superfícies de respostas estatisticamente relevantes relacionando a AA e o MR com as proporções de matéria-prima. Os cálculos foram realizados com o auxílio do software Statistica 6.0 (StatSoft Inc., 2001). A Figura 2 ilustra a região do diagrama ternário resíduo-feldspato-argila que foram plotadas as superfícies de resposta, bem como a região de extrapolação dos dados, onde as equações determinadas não são aplicáveis.

O resultado das análises estatísticas envolve montagem de equações matemáticas para os resultados experimentais (i. e., de absorção de água, retração linear de queima e módulo da ruptura) para obter toda a superfície resposta, e validação do modelo através de uma análise de variância

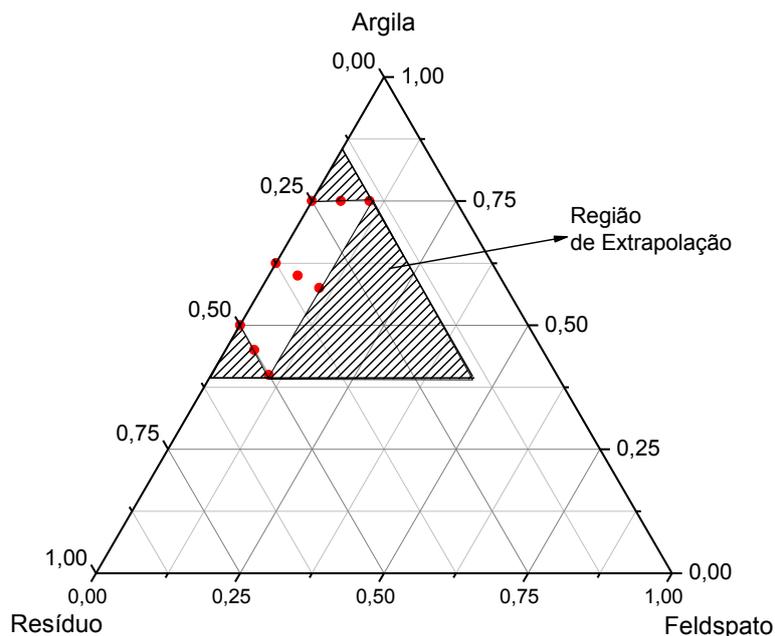


Figura 2. Região do diagrama ternário resíduo-feldspato-argila onde foram plotadas as superfícies de resposta ea a região de extrapolação dos dados

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela I está apresentada a composição química semi-quantitativa resíduo analisado. Verifica-se que o resíduo é constituído majoritariamente por Al_2O_3 , mas que também apresenta elevada quantidade de SiO_2 , K_2O e Fe_2O_3 . Nesse sentido, é importante ressaltar que a elevada quantidade de potássio é importante para a aplicação do resíduo como uma alternativa de material fundente no processamento cerâmico. A quantidade de óxidos fundentes (K_2O , Fe_2O_3 e MgO) atingi aproximadamente 8,5%. O resíduo apresenta também em sua constituição outros óxidos metálicos em menores proporções, no entanto, de grande importância por se tratarem de óxidos de metais pesados.

Tabela 1. Composição química do resíduo da produção de alumina eletrofundida

Resíduo	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	Fe_2O_3	SO_3	MgO	MnO	TiO_2	ZnO	PbO	Ga_2O_3	DO^a
	77,19	9,99	5,12	2,59	2,25	0,75	0,534	0,49	0,41	0,31	0,22	0,16

^a Demais óxidos

Na Figura 1 está apresentada a curva de distribuição granulométrica do resíduo analisado. Com base na Figura 1 pode-se observar que o resíduo apresenta uma larga distribuição de tamanhos de partícula, quase monomodal, entretanto, em virtude de um pequeno cotovelo no histograma por volta de $1 \mu\text{m}$, a distribuição tem um caráter bi-modal. Nesse sentido, observa-se que o resíduo apresenta concentração de partículas em torno de 1 e $10 \mu\text{m}$, possuindo um tamanho médio de partícula de $9,55 \mu\text{m}$. O resíduo apresenta elevada finura com 50% das partículas com diâmetro inferior a $8 \mu\text{m}$ e 99,6% das partículas com diâmetro inferior a $45 \mu\text{m}$. A fração sub-micrométrica também é significativa, em torno de 10% do material.

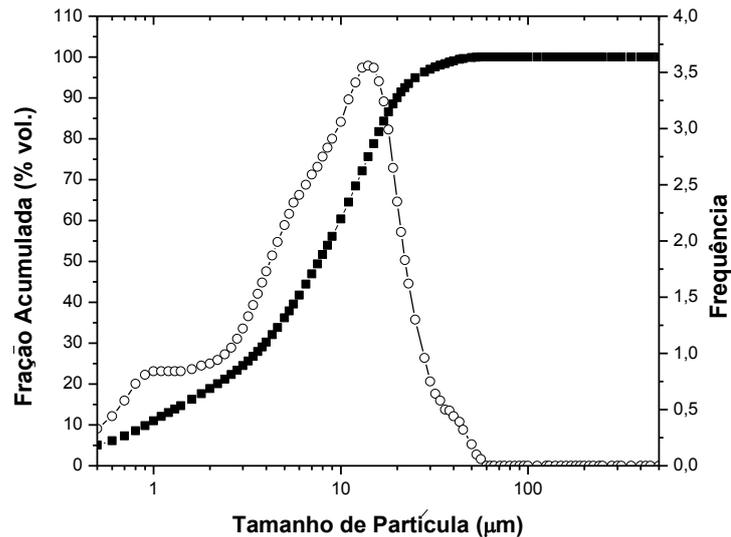


Figura 1. Curva de distribuição granulométrica do resíduo da produção da alumina eletrofundida

O difratograma de raios X do resíduo estudado está apresentado na Figura 2. Através do difratograma de raios X pode-se observar que o resíduo apresenta como fases cristalinas, alumina alfa (corundo) e alumina delta (indicada no difratograma apenas como Al_2O_3), alumínio metálico, um sulfeto de potássio, $\text{H}_3\text{K}_6\text{N}_7\text{S}_2$, e uma liga ferro-titânio, $\text{Fe}_{9,64}\text{Ti}_{0,36}$. Entretanto, com base na intensidade dos picos de difração verifica-se que o constituinte cristalino predominante é a alumina alfa, o corundo. Esses constituintes indicam que o resíduo pode ser utilizado como uma fonte de alumina nas formulações cerâmicas, além de uma fonte de fundente, assim, ele concilia duas ações consideradas, em geral, antagônicas com a utilização de matérias-primas convencionais. Vale salientar que a presença de metais favorecerá a formação de fases líquidas em baixas temperaturas.

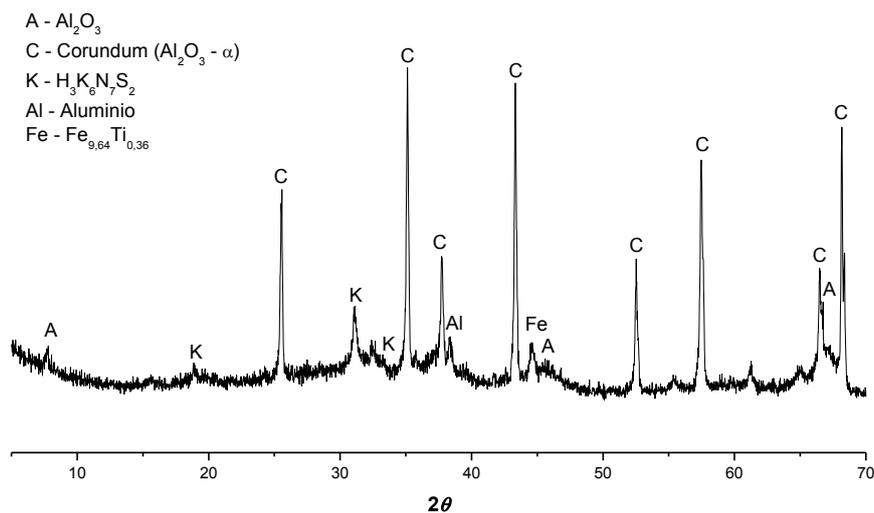


Figura 2. Difratograma de raios X do resíduo da produção de alumina eletrofundida

As composições das nove misturas (M_i , $i = 1, 2, \dots, 9$) formuladas utilizando o delineamento de mistura estão listadas na Tabela 2. Na Tabela 3 são apresentados os valores medidos de absorção de água (AA), e módulo de ruptura à flexão em três pontos (MR) dos corpos-de-prova queimados a 1150, 1200 e 1220°C.

Tabela 2. Planejamento das misturas das composições criadas pelo simplex {3,2} aumentado

Matéria-prima (% peso)	Planejamento das misturas								
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9
Resíduo	50,0	50,0	25,0	15,0	37,5	50,0	32,5	20,0	35,0

Feldspato	0,0	10,0	0,0	10,0	0,0	5,0	10,0	5,0	5,0
Argila ^a	50,0	40,0	75,0	75,0	62,5	45,0	57,5	75,0	60,0

^a mistura de caulim e ball clay, com proporção constante de 70% de caulim e 30% de ball clay

Tabela 3. Absorção de água, retração linear de queima e módulo de ruptura medidos nas 10 misturas simplex

Planejamento da mistura		Temperatura-1150°C		Temperatura-1200°C		Temperatura-1220°C	
		AA (%)	MR (MPa)	AA (%)	MR (MPa)	AA (%)	MR (MPa)
Replicação 1	M1	19,06	21,01	17,82	24,40	17,51	22,01
	M2	9,76	53,27	5,94	70,18	4,56	69,02
	M3	16,38	20,01	15,01	24,00	14,08	20,28
	M4	10,83	40,09	7,71	42,92	7,84	41,50
	M5	17,40	18,17	16,72	18,11	16,08	25,54
	M6	9,92	50,50	7,67	59,48	6,61	63,71
	M7	10,37	45,86	8,21	37,40	8,76	44,20
	M8	11,73	38,07	10,23	41,53	10,00	40,20
	M9	12,00	40,92	10,42	45,32	9,94	45,25
Replicação 2	M1	19,07	20,40	17,85	27,94	17,42	24,96
	M2	9,06	53,46	5,41	70,91	4,62	65,94
	M3	16,44	18,31	14,81	20,99	14,67	22,58
	M4	10,39	40,75	7,83	44,11	7,80	41,19
	M5	17,42	18,21	16,51	21,79	16,08	22,69
	M6	10,27	49,49	7,24	69,76	6,25	64,22
	M7	10,27	43,19	8,51	37,86	8,18	43,68
	M8	11,60	38,05	10,15	42,73	8,87	38,19
	M9	11,92	45,79	10,13	45,38	10,08	46,20
Replicação 3	M1	18,57	23,62	18,89	26,10	17,38	21,14
	M2	8,96	52,17	5,81	70,58	5,15	65,22
	M3	15,68	17,71	14,50	23,72	14,68	19,05
	M4	11,16	38,66	8,56	42,41	7,92	38,97
	M5	17,16	19,88	16,26	22,09	15,73	25,88
	M6	10,08	50,88	7,56	73,29	6,13	65,93
	M7	9,83	44,48	8,60	36,12	8,41	40,83
	M8	11,11	36,14	10,31	43,86	9,36	41,46
	M9	11,94	46,06	10,43	47,58	9,92	46,23
Replicação 4	M1	19,48	21,66	18,50	24,78	17,58	19,86
	M2	8,68	54,42	5,80	74,95	5,41	68,86
	M3	16,46	19,04	14,91	21,72	15,06	20,75
	M4	10,67	38,33	7,73	41,95	8,69	38,70
	M5	17,55	21,64	16,55	21,56	16,03	25,38
	M6	10,23	52,55	6,79	74,17	6,28	64,53
	M7	10,34	43,06	9,01	35,59	8,65	41,56
	M8	11,73	38,82	10,13	41,26	9,26	41,55
	M9	11,81	42,96	9,77	41,36	9,55	44,05

Com base nos dados obtidos (Tabela 3), equações de regressão foram obtidas para cada temperatura de queima, relacionando as propriedades analisadas com os teores de matérias-primas, a um nível de significância de 5%. As Eqs. (1) - (6) mostram o comportamento das propriedades em estudo em função da proporção de matérias-primas (contendo resíduos). Essas equações foram as estatisticamente mais adequadas a um nível de significância de 5%. As designações R, F e A representam as frações de resíduo da produção de alumina eletrofundida, feldspato e argila, respectivamente.

Na Tabela 4 são apresentadas as principais propriedades estatísticas das regressões obtidas através da análise de variância, utilizando a nomenclatura comumente relacionada na literatura (CORNELL, 1990; MYERS & MONTGOMERY, 2002). Como pode-se observar, todos os modelos de regressão (Eqs. (1) - (6)) utilizadas aqui são estatisticamente significativas ao nível exigido (valor de p abaixo do nível significância) e apresentam pouca variabilidade (elevados múltiplos dos coeficientes de determinação). Os múltiplos dos coeficientes de determinação indicam a porcentagem de variação da resposta que seja explicada pela variação deliberada dos fatores (frações de matérias-primas) no decorrer do experimento (MONTGOMERY, 2001).

A significância dos modelos pode também ser avaliada através da comparação do valor do teste F e o valor F tabulado na distribuição Fisher-Snedecor (CORNELL, 1990; MYERS & MONTGOMERY, 2002). A regressão é considerada estatisticamente significativa, ou seja, as variações devidas às variáveis independentes são, em grande parte explicadas pelo modelo, se os valores de F são mais elevados do que os valores tabelados (ao nível exigido de significância). Todos os valores F apresentados na Tabela 4 são maiores que cinco vezes os valores tabelados.

Tabela 4. Análise de variância para significância do modelo de regressão

Propriedades	Temp. (°C)	Modelo de Regressão	Teste F	Valor de p	R^2 (%)
AA ^b	1150	Cúbico	228,3854	< 0,0000	98,43
AA ^b	1200	Cúbico	141,1431	< 0,0000	99,31
AA ^b	1220	Cúbico	303,0794	<0,0000	98,51
MR ^c	1150	Quadrático	154,9771	0,0000	98,13
MR ^c	1200	Cúbico	120,0317	<0,0000	96,78
MR ^c	1220	Cúbico	217,3798	<0,0000	97,32

^a R^2 : coeficiente de determinação múltipla.

^b Absorção de água.

^c Módulo de ruptura.

$$AA_{1150^{\circ}\text{C}} = 24,44R - 21,72F + 13,43A + 1997,70RF - 1309,39RFA - 1506,46RF(R - F) \quad (1)$$

$$AA_{1200^{\circ}\text{C}} = 25,17R - 592,80F + 11,34A + 2367,13RF + 589,20FA - 2028,06RFA - 2677,50RF(R - F) \quad (2)$$

$$AA_{1220^{\circ}\text{C}} = 22,93R - 73,88F + 11,89A + 1309,73RF - 1338,90RFA - 2138,81RF(R - F) \quad (3)$$

$$MR_{1150^{\circ}\text{C}} = 32,48R - 3786,78F + 12,47A + 4670,52RF + 4431,41FA \quad (4)$$

$$MR_{1200^{\circ}\text{C}} = 135,72R + 291,39F + 57,16A - 6653,10RF - 283,00RA + 6642,38RFA + 10391,62RF(R - F) \quad (5)$$

$$MR_{1220^{\circ}\text{C}} = 23,23R + 380,38F + 22,27A - 5999,87RF + 5804,26RFA + 9629,67RF(R - F) \quad (6)$$

As equações matemáticas (1) a (6), que descrevem a mudança e evolução das propriedades em função da composição (contendo argila e resíduos), são expressas em suas formas canônicas como polinômios de baixo grau, mas o modelo mais adequado estatisticamente variou de acordo com a propriedade analisada e a temperatura de queima. Em geral, as propriedades dos corpos queimados tanto a 1150, como a 1200 e 1220°C foram expressos por modelos cúbicos.

Comparando os valores e os sinais dos coeficientes dos modelos nas Eqs. (1)-(3) pode-se deduzir que a maior parte das interações sinérgicas contribuindo para a redução da AA, após a queima a 1150, 1200 e 1220°C ocorreram entre os três materiais. É interessante que a contribuição do resíduo por si só, ou nas misturas binárias com o feldspato não atua de forma sinérgica para a redução da AA. A própria argila nas temperaturas de queima utilizadas não atua contribuindo para a redução da absorção segundo os modelos obtidos (Eqs. (1)-(3)).

No que se refere ao módulo de ruptura, verifica-se, com base nas Eqs. (4)-(6), que após queima a 1150°C que o resíduo e sua interação com o feldspato contribuem para o aumento do módulo, por outro lado o feldspato por si só não atua de forma sinérgica para a melhora do módulo, o que não é comum em composições cerâmicas nessa temperatura de queima. Após queima a 1200 e 1220°C, observa-se que tanto o resíduo, como os demais materiais e, principalmente, a interação entre os três atua melhorando o módulo de ruptura dos corpos-de-prova. Vale ressaltar, que a interação resíduo-feldspato atua de forma não convencional, por um lado diminuindo o módulo (na interação quadrática) e por outro melhorando o módulo (interação cúbica).

As Figuras 3 a 8 apresentam as superfícies de resposta calculadas e suas projeções sobre o triângulo de composições para a AA e o MR. A superfície 3D é a representação gráfica das Eqs. (1) – (6) e permite fáceis e rápidas estimativas preditivas sobre toda a composição estudada.

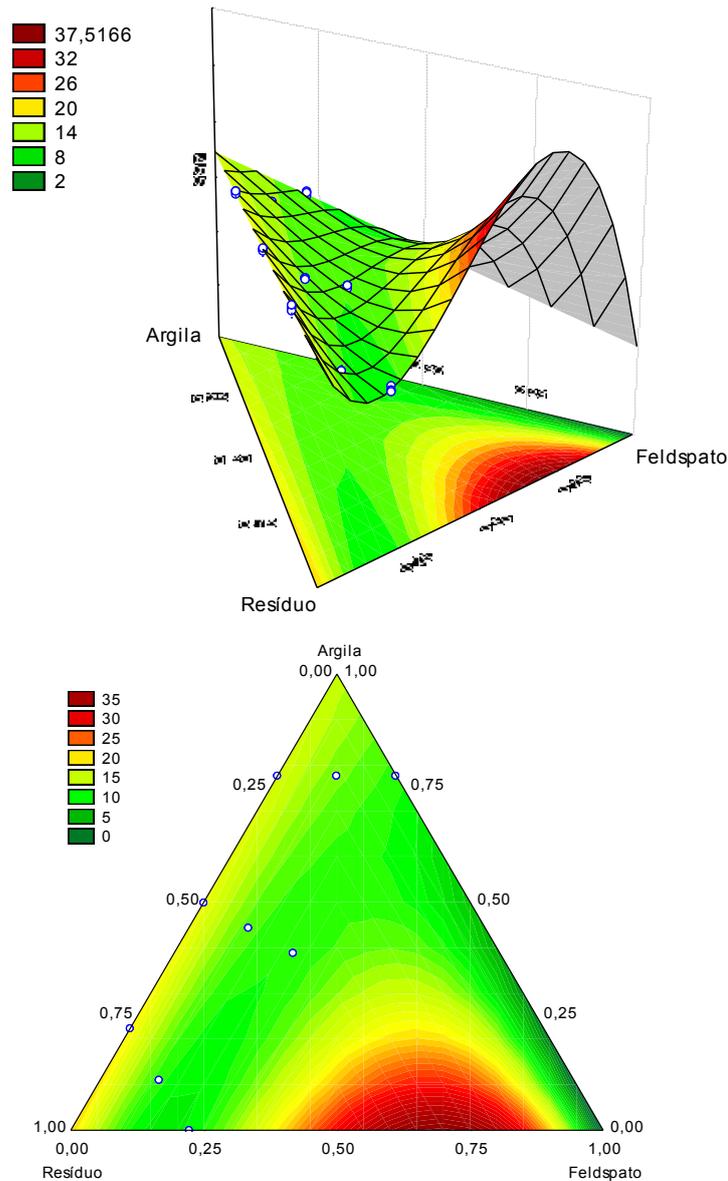


Figura 3. Superfície de resposta e projeção sobre o triângulo de composições da absorção de água após queima a 1150°C

Através das Figuras 3, 5 e 7 pode-se observar de forma rápida e clara que a adição de elevadas quantidade de resíduo (até 50%, conforme analisado nesse estudo) em composições binária resíduo-argila, não altera significativamente as características de absorção dos corpos queimados nas temperaturas estudadas. Por outro lado, verifica-se que pequenas adições de feldspato reduzem significativamente as absorções de água, evidenciando o efeito sinérgico com o resíduo e a possibilidade de utilização de elevadas quantidade de resíduo quando da adequada combinação com o feldspato.

Com base nas Figuras 4, 6 e 8 verifica-se, de forma geral, que a adição de elevadas quantidades de resíduo em composições binárias resíduo-argila provoca um leve decréscimo nos valores dos módulos de ruptura. No entanto, quando da utilização de pequenas quantidades de feldspato observa-se que há um aumento no módulo nas composições com altos teores de resíduos, com os maiores módulos sendo atingidos nas composições com teores de resíduo em torno de 50%. Isso vem ao encontro do observado na absorção de água e indica o elevado potencial de utilização de elevadas quantidades de resíduo quando da adequada formulação das massas com adições de feldspato. Esse comportamento é mais significativo após queima a 1200 e 1220°C, o que indica que possíveis interações entre o resíduo e o feldspato, como a formação de eutéticos, são mais pronunciadas, quando da queima rápida, em temperaturas superiores a 1200°C.

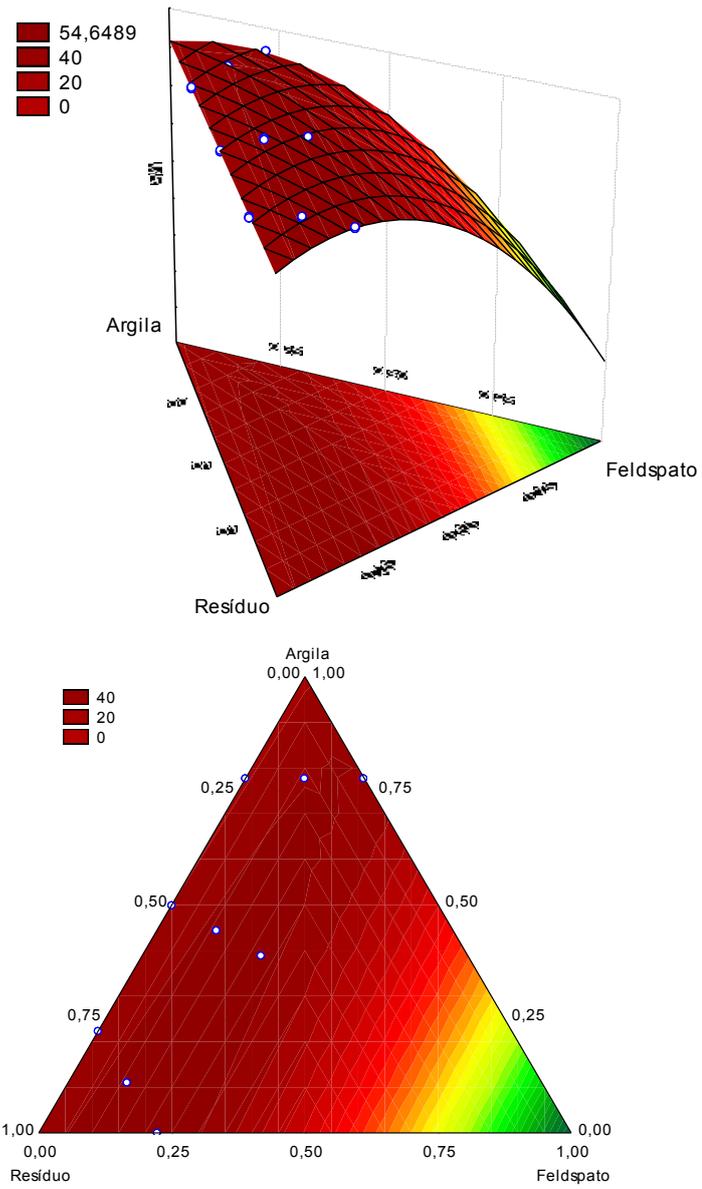


Figura 4. Superfície de resposta e projeção sobre o triângulo de composições do módulo de ruptura após queima a 1150°C

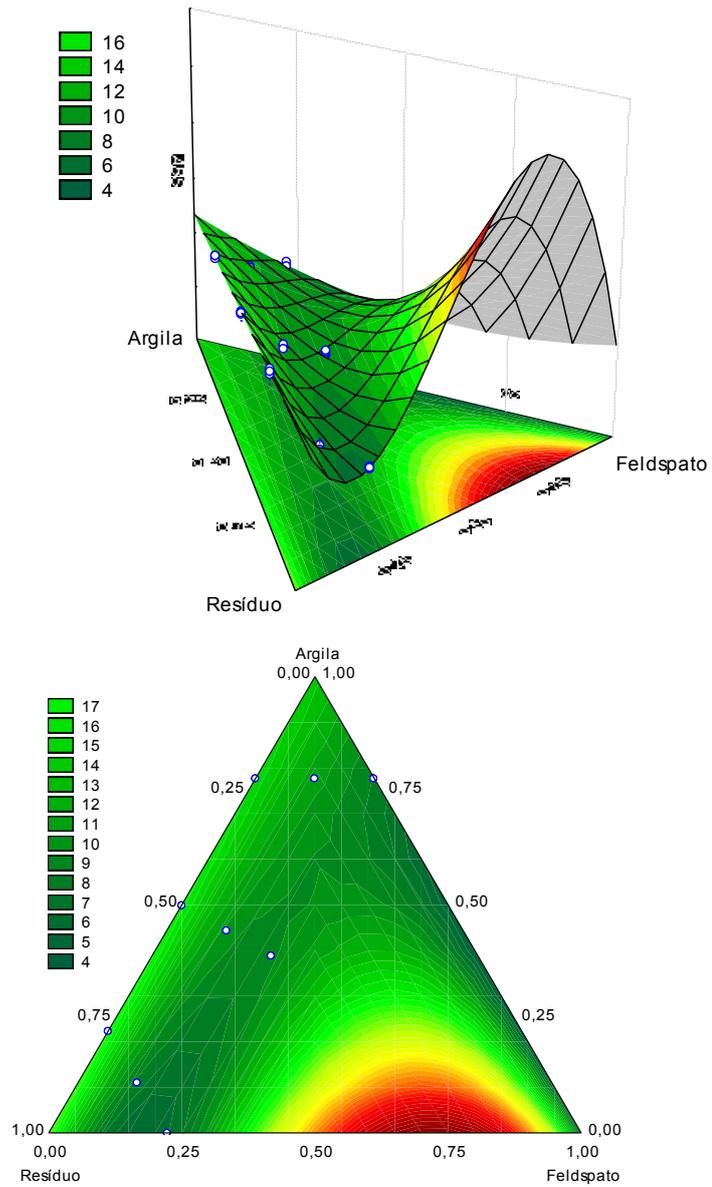


Figura 5. Superfície de resposta e projeção sobre o triângulo de composições da absorção de água após queima a 1200°C

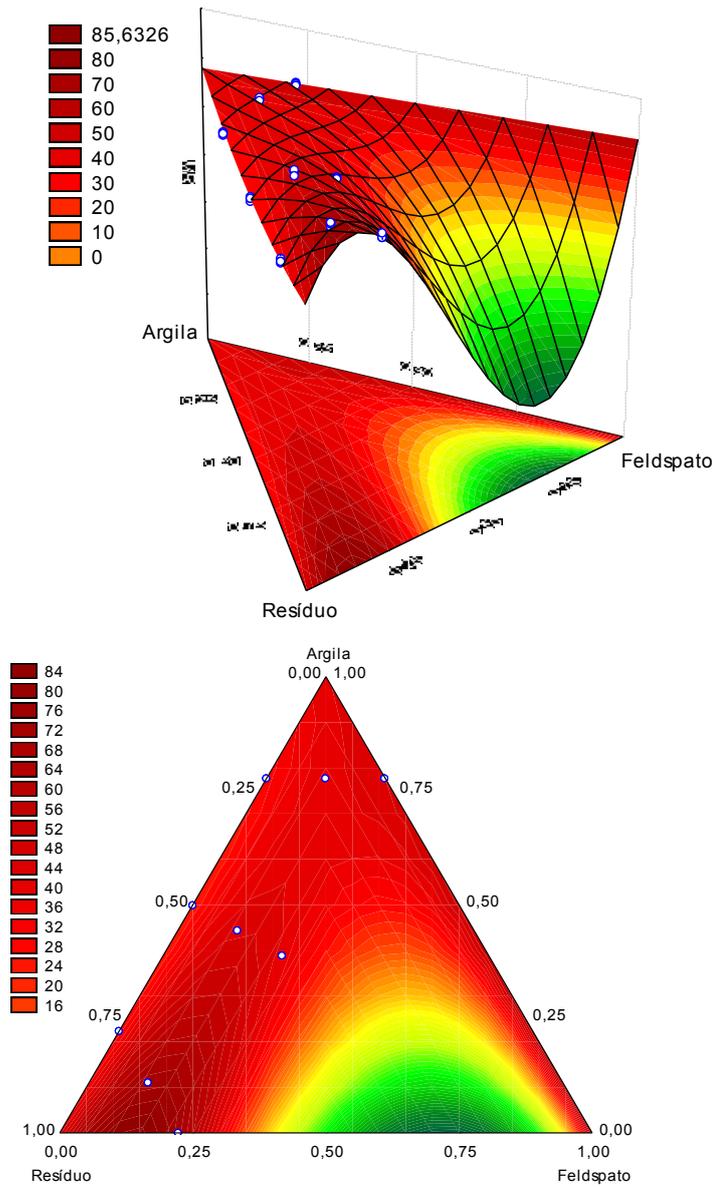


Figura 6. Superfície de resposta e projeção sobre o triângulo de composições do módulo de ruptura após queima a 1200°C

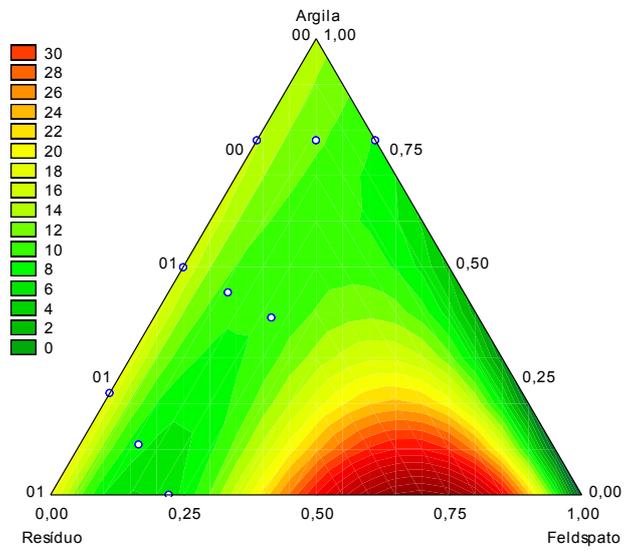
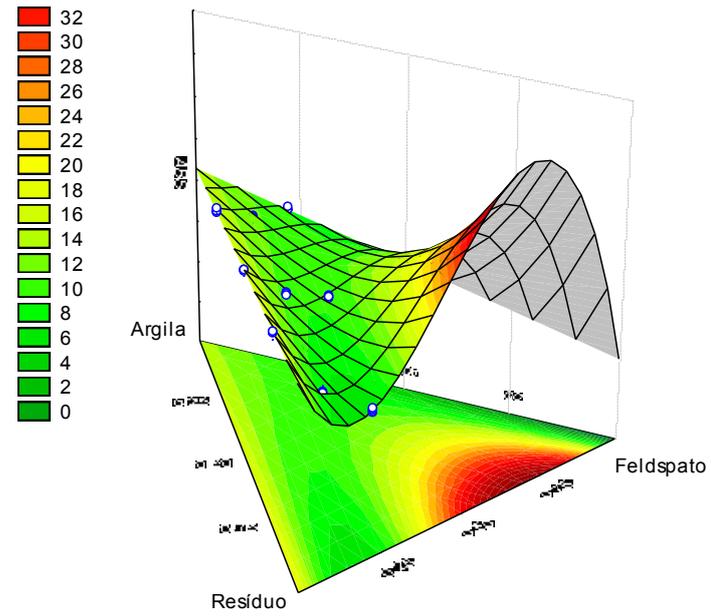


Figura 7. Superfície de resposta e projeção sobre o triângulo de composições da absorção de água após queima a 1220°C

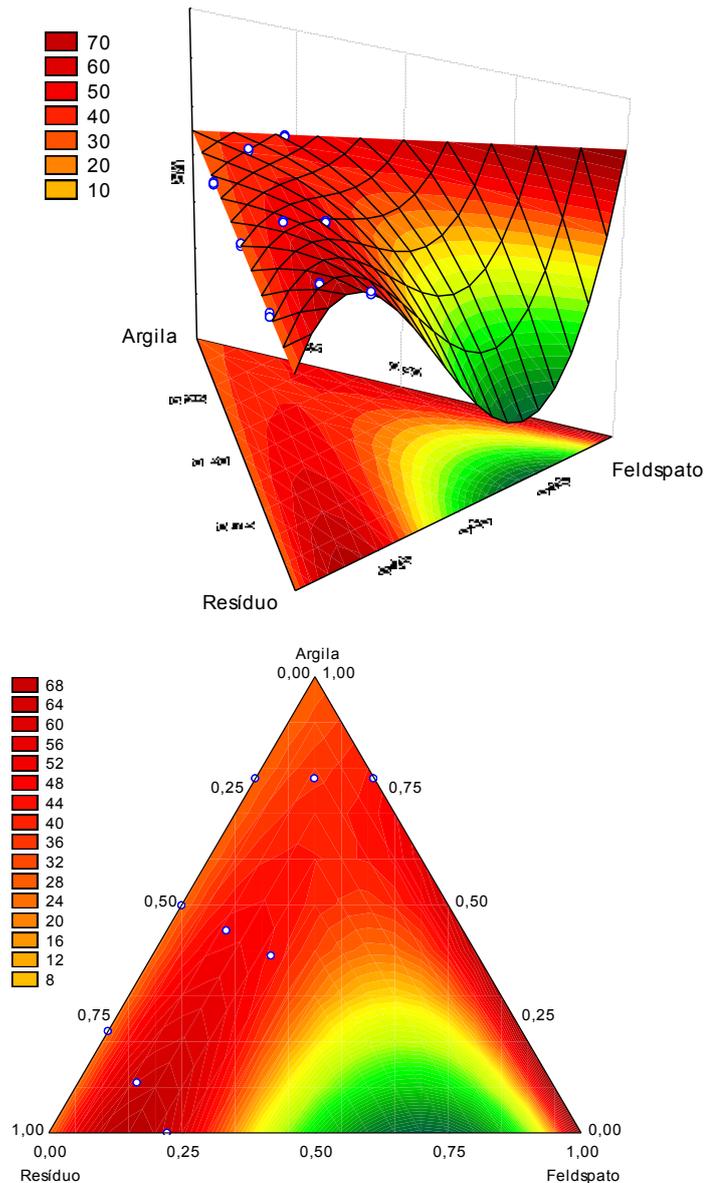


Figura 8. Superfície de resposta e projeção sobre o triângulo de composições do módulo de ruptura após queima a 1220°C

CONCLUSÕES

O resíduo é constituído predominantemente por Al_2O_3 , mas possui também frações significativas de SiO_2 e óxidos fundentes, e apresenta como fases cristalinas o corundo, alumina gama, materiais metálicos e um sulfeto de potássio. O resíduo apresenta praticamente 100% de suas partículas com dimensões inferiores a $45\mu m$. A metodologia do planejamento estatístico utilizando delineamento de mistura e superfície de resposta revelou-se como uma poderosa ferramenta de planejamento e análise de experimentos para verificar a influência do conteúdo de resíduo sobre as propriedades tecnológicas dos corpos cerâmicos. Os modelos de regressão calculados foram estatisticamente significativos no nível exigido e apresentaram pouca variabilidade. Estes modelos de regressão podem ser utilizados para selecionar a quantidade ótima de resíduos para produzir revestimentos cerâmicos com propriedades específicas. Os resultados mostraram que a adequada combinação de resíduo e feldspato pode permitir o uso de formulações contendo até 50% de resíduo na produção de corpos cerâmicos

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, **Solo – Análise granulométrica – Método de Ensaio**, NBR 7181, Rio de Janeiro, 1984.
- ANDREOLA, F.; BARBIERI, L.; CORRADI, A.; LANCELLOTTI, I.; MANFREDINI, T. Utilisation of municipal incinerator grate slag for manufacturing porcelainized stoneware tiles manufacturing. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 22, p. 1457–1462, 2002.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. E.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**, 2ª Ed. São Paulo: Editora Unicamp, 1996. 187p.
- CAMPOS, L. F. A.; MENEZES, R. R.; LISBOA, D.; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Planejamento experimental no estudo da maximização do teor de resíduos em blocos e revestimentos cerâmicos. **Cerâmica**, v. 53, n. 328, p. 373-380, 2007.
- CORNELL, J. A., **Experiments with mixtures-designs, models, and the analysis of mixtures data**. 2nd Ed. New York: John Wiley and Sons, 1990. 670p.
- HERNÁNDEZ-CRESPO, M. S.; RINCÓN, J. Ma. New porcelainized stoneware materials obtained by recycling of MSW incinerator fly ashes and granite sawing residues. **Ceramics International**, v. 27, p. 713–720, 2001.
- MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Uso de rejeitos de granitos como matérias-primas cerâmicas. **Cerâmica**. v. 48, n. 306, p. 1–9, 2002.
- MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 25, n. 7, p. 1149–1158, 2005.
- 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, p. 2349-2353, 2004.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments (5th Edition)**. Wiley Interscience, New York, 2001.
- MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. Wiley Interscience. New York. 2002. 460p
- OLIVEIRA, G. E.; HOLANDA, J. N. F. Use of mix of clay/solid waste from steel works for civil construction materials. **Waste Management & Research**, v. 22, p. 358-363, 2004
- OZEL, E.; TURAN, S.; ÇORUH, S; ERGUN, O. N. Production of brown and black pigments by using flotation waste from copper slag. **Waste Management & Research**, v. 24, p. 125–133, 2006.
- PINATTI, D. G.; CONTE, R. A.; BORLINIC, M. C.; SANTOS, B. C.; OLIVEIRA, I.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Incorporation of the ash from cellulignin into vitrified ceramic tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 26, n. 3, p. 305-310, 2005.
- RAUPP-PEREIRA, F.; HOTZA, O.; SEGADÃES, A. M.; LABRINCHA, J. A. Ceramic formulations prepared with industrial wastes and natural sub-products. **Ceramics Internacional**, v. 32, n. 2, p. 173-179, 2006.
- SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; MARIN, F.; RIVERA, J.; FRÍAS, M. Morphology and properties in blended cements with ceramic wastes as a pozzolanic material. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 89, p. 3701-3705, 2006.
- SOUZA, L. P. de F.; MANSUR, H. S. Production and characterization of ceramic pieces obtained by slip casting using powder wastes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 145, n.1, p. 14-20, 2004.
- TORRES, P.; FERNANDES, H. R.; AGATHOPOULOS, S.; TULYAGANOV, D. U.; FERREIRA, J. M. F. Incorporation of granite cutting sludge in industrial porcelain tile formulations. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 24, p. 3177–3185, 2004.
- TULYAGANOV, D. U.; OLHERO, S. M. H.; RIBEIRO, M. J.; FERREIRA, J. M. F.; LABRINCHA, J. A. Mullite-alumina refractory ceramics obtained from mixtures of natural common materials and recycled Al-rich anodizing sludge.