

Estudo da Utilização do Resíduo Proveniente do Beneficiamento do Carvão Mineral como Matéria-Prima Alternativa na Fabricação de Blocos de Vedação

Alexandre Zaccaron^{a*}, Vitor de Souza Nandi^{b,c,d}, Douglas Borges da Silva^c, André Biava Comin^c

^a Engenharia Ambiental, Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, SC, Brasil

^b Tecnologia em Cerâmica e Vidro, Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, SC, Brasil

^c Engenharia Cerâmica, Centro Universitário Barriga Verde – UNIBAVE, Cocal do Sul, SC, Brasil

^d Programa de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais – PGMAT, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC, Brasil

*e-mail: alexandrezaccaron@hotmail.com

Resumo

Este estudo visou a adição de resíduos de beneficiamento de carvão mineral em massas de cerâmica vermelha, em adições mássicas entre 2 a 10%. Em uma primeira etapa foram estudadas as propriedades físico-mecânicas e químicas das matérias-primas e ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo B. Como o objetivo principal foi a viabilidade do uso dos resíduos A e B de carvão como matéria-prima alternativa, realizou-se uma segunda etapa de estudo, sendo utilizada a amostra padrão (STD) e outras duas amostras contendo 6 e 10% do resíduos. Na segunda etapa foi feita uma comparação entre os valores obtidos para a absorção de água e resistência mecânica das formulações contendo os resíduos A e B com os requisitos técnicos específicos. Os resultados demonstraram que ambos os resíduos são viáveis no fabrico de blocos de vedação.

Palavras-chave: sustentabilidade, reciclagem, resíduo, cerâmica vermelha.

1. Introdução

A sustentabilidade ambiental é um dos assuntos que têm se destacado nas pesquisas e nas mídias na atualidade. O processo de reciclagem é fundamental para uma sociedade apoiada no desenvolvimento sustentável. Este deve ser capaz de satisfazer as necessidades da população do presente sem comprometer a capacidade de sobrevivência das gerações futuras^{1,2}.

As pesquisas acerca de reciclagem de resíduos têm se tornado grande objeto de estudos, impulsionadas pelo esgotamento das reservas de matérias-primas naturais. A reciclagem de resíduos se torna tão evidente quanto o crescente volume destes, fazendo frente à indisponibilidade cada dia maior de locais para descarte desse material, particularmente em grandes centros urbanos devido à elevada densidade demográfica³. Os conhecimentos na área de materiais assumem um papel relevante no desenvolvimento de soluções tecnologicamente viáveis, devido principalmente à abrangência de competências em produtos e processos⁴.

Aliado a este fato a indústria cerâmica merece destaque na reciclagem de resíduos, principalmente em virtude de possuir elevado volume de produção, possibilitando o consumo de grandes quantidades de resíduo. Além disso, é um dos poucos setores industriais capazes de obter vantagens no seu processo produtivo devido à utilização de resíduos, como por exemplo: economia de matérias-primas de elevada qualidade; diversificação da oferta de matérias-primas; redução do consumo de energia; e redução de custos⁵.

Já o carvão mineral é um combustível natural fóssil formado a partir da transformação de matéria vegetal de grandes florestas que sofreram soterramento por matéria mineral como areia e argila, por exemplo. Este processo de soterramento acontece de forma gradativa gerando aumento de pressão e temperatura na matéria orgânica, provocando a expulsão de átomos de oxigênio e hidrogênio e concentrando o carbono, principal elemento presente no carvão. Este processo é conhecido como carbonificação^{5,6}. As reservas brasileiras de carvão encontram-se localizadas no sul do país junto à Bacia Sedimentar do Paraná, formação que engloba geologicamente os estados de PR, SC e RG, somando assim uma reserva total de 32 milhões de toneladas de carvão do tipo energético, CE (Carvão Energético).

A qualidade do carvão costuma ser medida pelo seu poder calorífico (kcal/kg), sendo que o carvão nacional se caracteriza por apresentar um baixo poder calorífico em elevado teor de enxofre e matéria inorgânica, dependendo da região que é explorado. A presença de enxofre e matéria inorgânica no carvão acarreta uma série de inconvenientes para o meio ambiente⁷.

O carvão da região paranaense tende a possuir maiores concentrações de enxofre e menores concentrações de matéria inorgânica, por sua vez nos outros dois estados, os teores dos mesmos elementos é menor quando se trata do enxofre e maior de material inorgânico. Por exemplo, no carvão do estado de Santa Catarina o teor de matéria inorgânica é de 40% e o de enxofre 3%. O carvão do

Rio Grande do Sul possui 0,5% de enxofre e 52% de matéria inorgânica⁵.

O beneficiamento do carvão tem por objetivo reduzir o teor de matéria inorgânica (formadora das cinzas) e do enxofre contido no carvão. O beneficiamento do carvão ROM encontrado no Brasil gera entre 40 a 70% de resíduo, composto por matéria carbonosa misturada com outros elementos como a pirita, argilas, arenitos, etc. A pirita (FeS_2) é um material extremamente oxidante quando exposto à umidade e oxigênio, sendo um causador de chuvas ácidas. Os impactos deste elemento ocorrem em maior ou menor grau nas minas dos estados produtores, sendo que a região carbonífera de Santa Catarina apresenta a situação mais crítica^{5,8}. Devido ao aumento da demanda por carvão energético, o aumento de produção por parte das mineradoras torna necessária a implementação de novos projetos para atender esta situação. Isto acarreta conseqüentemente no volume de resíduos gerados na etapa de beneficiamento, fazendo-se necessário desenvolver e avaliar os métodos visando algum uso para estes materiais, diminuindo os impactos ambientais⁹.

O Brasil possui uma população em torno de 200 milhões de habitantes, distribuídos geograficamente entre cinco regiões, sendo que as maiores concentrações estão localizadas nas zonas urbanas das regiões sul e sudeste, fator este que é de suma importância na análise da distribuição das empresas do setor cerâmico^{10,11}.

O setor de cerâmica vermelha é uma atividade industrial que serve de base para a construção civil, desde as construções mais simples às mais sofisticadas, incluindo tijolos furados, tijolos maciços, tabelas ou lajes, blocos de vedação e estruturais, telhas, manilhas e pisos rústicos. As empresas do setor se distribuem por todo país, em micro e pequenas empresas, quase sempre de organização simples e familiar¹⁰.

De acordo com o relatório anual feito pela Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) em 2011, o setor de cerâmica vermelha possui 6.903 empresas distribuídas pelo país, sendo que 90% são classificadas como micro e pequenas empresas. Geram 400 mil empregos diretos e 1,25 milhão de indiretos, faturando aproximadamente 18 bilhões de reais anualmente (representa 4,8% do macro setor da construção civil). O setor de cerâmica vermelha totalizou em 2011 5,8 bilhões de peças produzidas das quais 77,6% são tijolos, consumindo um montante de 108 Mt de argila anualmente¹².

Os processos cerâmicos dos diversos segmentos (vermelho, revestimento, refratário, branca, etc.) possuem estrutura similar entre si, diferindo, em alguns casos, apenas as matérias-primas. Esses processos de fabricação variam de acordo com o produto final desejado, compreendendo de modo genérico, uma etapa de preparação de matéria-prima e de massa, uma etapa para conformação das peças, tratamento térmico e por fim, nem sempre necessária, uma etapa de acabamento. Em alguns casos os produtos cerâmicos são submetidos a processos de esmaltação e decoração¹³.

Os requisitos normativos estabelecidos pela ABNT aos blocos de vedação estão determinados pela

NBR 15270 1: 2005¹⁴ para fabricação de blocos cerâmicos, e correspondem a uma padronização essencial na obtenção de produtos com qualidade suficiente e que atendam às necessidades técnicas de seu emprego.

2. Material e Métodos

Na execução do experimento prático para o estudo de adição de resíduo do beneficiamento de carvão em massa de cerâmica vermelha foram utilizadas matérias-primas argilosas e rejeito de beneficiamento de carvão.

Foram utilizados três tipos de argilas e um argilito, considerados matérias-primas regionais, que foram coletados de um produtor ceramista da região.

- As matérias-primas foram denominadas: Argila A, Argila B, Argila C e Argilito.

Os resíduos são provenientes de uma etapa secundária do beneficiamento do carvão, que utiliza um jigüe. O jigüe é o processo mais utilizado no beneficiamento do carvão, que opera através de pulsações em um depósito contendo água e carvão, obtendo a separação através do sedimentação das partículas mais densas do carvão. Os produtos residuais desta etapa passam por um processo de filtro-prensagem, de onde se retiram as tortas contendo os resíduos. O resíduo foi obtido de duas minas distintas da região e cedido por uma carbonífera.

- Os resíduos foram denominados: Resíduo A e Resíduo B.

Na primeira etapa, as matérias-primas (argilas e resíduos) foram secas em estufa a 110 ± 10 °C e laminadas a fim de destorroar partículas mais grosseiras. Em seguida foram realizadas as pesagens e dosagens com posterior umidificação para conformação manual das peças. As massas formuladas sofreram um descanso de 24 horas para homogeneização da umidade. Para a segunda etapa, as matérias-primas foram dosadas *in natura*, conforme os percentuais determinados na primeira etapa para cada formulação. Foram posteriormente umidificadas, sofrendo um descanso de 24 horas, seguida da etapa de laminação. As matérias-primas e os resíduos foram submetidos à análise química por fluorescência de raio X, com intenção de quantificar os óxidos presentes. O resíduo de carvão foi analisado quanto a sua natureza, por intermédio de ensaio de lixiviação e solubilização, pela norma NBR 10004/2004¹⁵ que define o grau de periculosidade do resíduo em questões ambientais.

Na primeira etapa, desenvolveram-se seis formulações de cerâmica vermelha utilizando os resíduos do processo de beneficiamento do carvão e uma amostra padrão. A amostra padrão foi desenvolvida utilizando como base os percentuais utilizados na empresa cerâmica que forneceu as argilas, em seguida, os teores de resíduos foram incorporados em percentuais de 2, 6 e 10% (conforme Tabela 1) e então recalculados os valores percentuais de cada matéria-prima. As composições das amostras foram formuladas em base de massa seca.

Tabela 1. Composições das formulações cerâmicas com os resíduos incorporados.

<i>Matéria-prima</i>	<i>Composições (%massa)</i>						
	STD	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Argilito	30	29,4	28	27	29,4	28	27
Argila A	35	34,3	33	31,5	34,3	33	31,5
Argila B	17,5	17,1	16,5	15,8	17,1	16,5	15,8
Argila C	17,5	17,1	16,5	15,8	17,1	16,5	15,8
Resíduo A	-	2	6	10	-	-	-
Resíduo B	-	-	-	-	2	6	10
Total	100	99,9	100	100,1	99,9	100	100,1

Tabela 2. Formulações realizadas na segunda etapa.

<i>Matéria-Prima</i>	<i>Formulações (g)</i>		
	STD	F2	F6
Argilito	7500,00	7000,00	6687,50
Argila A	8750,00	8250,00	7812,50
Argila B	4375,00	4125,00	4000,00
Argila C	4375,00	4215,00	4000,00
Resíduo A	-	1500,00	-
Resíduo B	-	-	2500,00
Água in natura	1368,75	1140,47	1802,81
Água Adicionada	5890,53	6188,93	5323,12
Total	32259,28	32329,94	32125,93

Para a segunda etapa apenas três composições da primeira foram utilizadas, STD, F2 e F6 (vide Tabela 2), porém estas foram preparadas em base úmida, com teor de umidade de 23,5%, (Indicando um índice de deformação plástica ideal).

Respeitando o tempo de homogeneização das massas formuladas, deu-se início ao processo de confecção dos corpos-de-prova, assim em primeiro momento em escala laboratorial, os corpos-de-prova foram preparados manualmente em formato cilíndrico com auxílio de um tubo de alumínio com diâmetro aproximado de 47,6 mm. Já em uma segunda etapa, em escala de produção piloto as massas foram laminadas e posteriormente passaram pelo processo de extrusão conforme descrito a seguir:

- I. Dois ciclos consecutivos de massa passante na extrusora (Sem câmara de vácuo em funcionamento, garantindo uma ótima homogeneização da massa);
- II. Câmara de vácuo é acionada e a massa é extrusada em uma pressão de vácuo que variou entre 0,5 a 0,84 atm;
- III. Com utensílio de uma mesa transportadora com rolos de madeira, pode-se atingir um tamanho ideal em que o tarugo formado pudesse ser cortado, obtendo assim os corpos-de-prova nas dimensões desejadas.

Após a conformação dos corpos-de-prova, as peças ficaram em repouso em secagem natural num intervalo de 24 horas. Em seguida foram levadas em estufa a uma temperatura de 110 ±10 °C por mais 24 h. Após etapa

de secagem, as amostras foram queimadas no forno, nas seguintes condições:

- Taxa de aquecimento de 2 °C/min;
- Temperatura de queima de 900 °C; e
- Tempo de patamar de 2 horas.
- Resfriamento ocorreu com o desligamento do forno.

As formulações foram caracterizadas quanto à retração de secagem, retração de queima, perda ao fogo, densidade aparente, densidade relativa, porosidade, absorção de água e resistência mecânica à compressão diametral pós queima. O resíduo bruto foi realizado apenas nos resíduos e na massa padrão.

O processo de classificação de resíduos foi realizado em relação aos seus constituintes e características através da comparação com listas de resíduos e substâncias nocivas determinados por norma. A norma NBR 10004:2004¹⁵ classifica os resíduos sólidos quanto a seus riscos ao meio ambiente e à saúde pública. Os ensaios utilizados nesta etapa de caracterização do resíduo foram os ensaios de lixiviação e solubilização.

3. Resultados e Discussões

A primeira etapa possui a intenção de avaliar as mudanças ocorridas nas propriedades da massa cerâmica, devido à incorporação dos resíduos de carvão. Os resultados de caracterização das amostras STD, F1, F2, F3, F4, F5 e F6, correspondem às sete formulações desenvolvidas para esta etapa, sendo, STD a formulação padrão, que

servirá de parâmetro para avaliação destas variações. As formulações F1, F2 e F3, foram desenvolvidas incorporando-se o resíduo A nas proporções de 2, 6 e 10% em massa, respectivamente. Da mesma forma, as formulações F4, F5 e F6, correspondem à incorporação do resíduo B nas mesmas proporções. Para a etapa 2, visou-se verificar a viabilidade do uso de resíduo do carvão em massas de cerâmica vermelha.

A Tabela 3 mostra a composição química das matérias-primas obtida por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX).

Sob avaliação dos resultados percebe-se a predominância de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) em todas as matérias-primas. A sílica é encontrada em diversas fases mineralógicas argilosas e não argilosas, destacando-se o quartzo (sua forma natural mais pura) e a caulinita ($\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$). A alumina geralmente está associada também à caulinita, sendo uma fase mineralógica muito característica das argilas^{4,16,17}.

Em teores menores estão presentes também em todas as matérias-primas, o óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de potássio (K_2O), variando entre 4,34-7,10% e 3,8-1,59%, respectivamente. O óxido de ferro é conhecido por favorecer tonalidades avermelhadas nas peças queimadas e pelo efeito fundente na cerâmica. O óxido de potássio também possui efeito fundente na massa, formando eutéticos e diminuindo a temperatura de sinterização, contribuindo

para a densificação do material em temperaturas abaixo de 1100 °C^{18,19,20}.

A perda ao fogo das matérias-primas argilosas está de acordo com os valores encontrados na literatura^{18,20,21}, contudo, os resultados encontrados nos resíduos A e B, aparecem em teores elevados >11%, provavelmente em virtude de matéria orgânica presente nos resíduos, o que pode influenciar no aumento das propriedades plásticas da argila²².

A Tabela 4 demonstra o resumo das atividades desenvolvidas na primeira etapa, onde as amostras ensaiadas estão dispostas de acordo com suas respectivas propriedades físico-mecânicas analisadas.

Utilizando as informações obtidas na caracterização das matérias-primas, analisando o quadro da Tabela 4 podem-se fazer algumas suposições correlacionando algumas propriedades.

As variações mais evidentes foram na porosidade, absorção de água e perda ao fogo, provavelmente, devido ao elevado conteúdo de matéria orgânica nos resíduos. Com o aumento dos teores destes, ocorreram maiores perdas de massa, gerando mais espaços vazios dentro da peça. Contudo, devido ao caráter fundente de alguns constituintes presentes nos resíduos, como foi observado pela análise química, durante a fase de sinterização estes espaços acabaram diminuindo em virtude da maior densificação do material.

Tabela 3. Resultado da análise química.

Óxido	Amostras					
	Argila A	Argila B	Argila C	Argilito	Resíduo A	Resíduo B
SiO_2	70,04	68,85	66,19	61,10	63,06	64,68
Al_2O_3	14,20	17,27	17,94	17,40	25,80	23,30
Fe_2O_3	6,82	5,09	5,37	7,10	4,73	4,34
K_2O	1,59	1,70	2,50	3,80	2,36	3,16
Na_2O	0,40	0,05	0,08	-	0,21	0,61
CaO	0,23	0,07	0,09	0,30	1,70	2,04
MgO	0,41	0,47	0,62	2,00	0,64	0,74
TiO_2	1,08	0,64	0,82	1,00	0,47	0,13
MnO	0,04	0,01	0,01	-	0,02	0,05
P_2O_5	0,07	0,04	0,04	0,20	-	-
PF	5,12	5,82	6,35	6,10	14,52	11,77

Tabela 4. Resumo geral para os ensaios realizados na primeira etapa.

Propriedade Avaliada	Amostras						
	STD	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Retração de secagem (%)	4,32	4,24	4,44	4,08	4,40	4,41	5,38
Retração de queima (%)	0,64	1,02	0,95	1,25	0,80	0,84	0,88
Perda ao Fogo (%)	6,23	6,74	7,91	9,50	6,48	7,38	8,46
Densidade Aparente (g/cm^3)	1,79	1,78	1,77	1,70	1,80	1,79	1,76
Densidade relativa (%)	0,67	0,68	0,67	0,64	0,67	0,69	0,68
Absorção de água (%)	15,59	15,16	15,69	17,40	15,59	14,87	15,40
Porosidade (%)	33,11	31,74	32,85	35,75	33,31	31,30	32,10
Resistência mecânica à compressão diametral (MPa)	4,37	4,61	4,66	4,60	4,62	4,34	5,47

A composição química do resíduo B demonstra a presença de óxidos alcalinos e alcalino-terrosos em grande quantidade, podendo estar relacionados à presença de feldspatos, o que explicaria a maior retração de secagem presente na amostra F6, que contém 10% em massa de resíduo.

Pela análise de resíduo bruto verifica-se a maior incidência de partículas maiores (150 µm) nos resíduos de carvão, sendo que o resíduo A apresentou diferença em relação ao resíduo B, tendo maior influência no empacotamento da massa cerâmica. O menor empacotamento permitiu a maior concentração de espaço não ocupado durante a formulação e conformação das peças, o que contribuiu para o aumento da porosidade, uma vez que as partículas não puderam interagir de forma plena em virtude da menor área específica das partículas grandes, o que implica em

menor reatividade destas partículas, porém, desempenharam papel de reforço na matriz cerâmica, gerando um aumento na resistência mecânica após a queima.

A Tabela 5 mostra os resultados para o ensaio de lixiviação e a Tabela 6 mostra os resultados para a solubilização do resíduo avaliado.

De acordo como os valores descritos na tabela 5 para o ensaio de lixiviação do resíduo B, os resultados ficaram abaixo dos limites máximos permitidos pela norma NBR 10004:2004¹⁵, caracterizando este resíduo como Classe II – Não perigoso.

Também os valores obtidos no ensaio de solubilização do resíduo B ficaram abaixo dos limites máximos permitidos pela norma NBR 10004:2004¹⁵, caracterizando este resíduo como Classe II B – Não perigoso Inerte.

Tabela 5. Resultado do ensaio de lixiviação.

<i>Parâmetro analisado (mg/L)</i>	<i>Resíduo B</i>	<i>Limite máximo permitido pela NBR 10004:2004¹⁵ (mg/L)</i>
Chumbo	ND*	1,0
Cromo total	ND*	5,0
Bário	0,6	70,0
Cádmio	ND*	0,5
Prata	0,01	5,0
Arsênio	< 0,001	1,0
Fluoreto	0,18	150
Mercúrio	< 0,001	0,1
Selênio	< 0,001	1,0

*Não detectado.

Tabela 6. Resultado ensaio de solubilização.

<i>Parâmetro analisado (mg/L)</i>	<i>Resíduo B</i>	<i>Limite máximo permitido pela NBR 10004:2004¹⁵ (mg/L)</i>
Sulfatos	90,18	250
Cloretos	2,14	250
Fenol	ND*	0,01
Ferro Total	0,01	0,3
Manganês	0,05	0,1
Cobre	ND*	2,0
Zinco	0,01	5,0
Alumínio	0,16	0,2
Chumbo	ND*	0,01
Sódio	26,77	200
Cádmio	ND*	0,005
Cromo total	ND*	0,05
Prata	ND*	0,05
Bário	< 0,5	0,7
Arsênio	< 0,001	0,01
Fluoreto	0,48	1,5
Mercúrio	< 0,001	0,001
Nitrogênio nitrato	0,30	10,0
Selênio	< 0,001	0,01

*Não detectado.

Tabela 7. Valores de absorção de água, perda ao fogo e resistência mecânica.

Propriedade Avaliada	Amostras			Limites da norma técnica NBR 15270-1:2005 ¹⁴
	STD (S/ Resíduo)	F2 (6% Resíduo A)	F6 (10% Resíduo B)	
Absorção de água (%)	10,05	12,22	11,62	8-22
Perda ao fogo (%)	6,37	7,92	8,94	--
Resistência mecânica (MPa)	11,04	6,81	10,18	≥ 1,5

A etapa 2 foi executada a fim de verificar a viabilidade do uso dos resíduos de carvão, provenientes da etapa de beneficiamento, como fonte alternativa de matéria-prima para a indústria de cerâmica vermelha.

As composições analisadas nesta etapa (F2 e F6) foram escolhidas, pois foram as que obtiveram os melhores resultados de resistência mecânica, uma vez que esta propriedade é de fundamental necessidade em norma, pois garante o uso da peça cerâmica sem comprometer a segurança da obra quando estiver em serviço. O estudo da viabilidade foi realizado em análise comparativa com os valores dos requisitos físico-mecânicos específicos, determinados pela norma NBR 15270-1:2005¹⁴, que podem ser visualizados na Tabela 7.

Algumas considerações podem ser observadas com os dados obtidos nos ensaios realizados. Com relação à absorção de água nota-se um aumento devido à adição dos resíduos de carvão. Assim provavelmente, o menor empacotamento e o teor mais elevado de matéria orgânica da amostra F2, permitiram maior concentração de poros presentes na amostra, o que gerou maior percentual de absorção (12,22%). As amostras também apresentaram aumento na perda ao fogo, justificado na etapa 1 devido ao elevado teor de matéria orgânica presente nos resíduos, sendo maior na amostra F6, o que já era esperado, pois esta apresentava maior presença de resíduo na massa.

Com base nos valores de resistência mecânica à compressão, comprova-se que todas as amostras ensaiadas apresentaram valores superiores ao determinado pela norma técnica. A amostra F2 mostrou valores de resistência de 6,81 MPa, valor abaixo da amostra padrão que apresentou 11,04 MPa, podendo ter sido influenciado pela maior porosidade dessa composição e a má conformação das amostras devido à alta variabilidade do vácuo na etapa de extrusão. Por outro lado, a amostra F6, apresentou um resultado satisfatório de resistência mecânica, aumentando seu potencial como matéria-prima para massas cerâmicas visando o fabrico de blocos de vedação.

Ressalta-se assim que todos os valores encontram-se dentro daqueles permitidos pela norma técnica NBR 15270-1:2005¹⁴, justificando seu possível uso como matéria-prima cerâmica.

4. Considerações Finais

As massas com adição do resíduo apresentaram boa plasticidade de conformação, devido principalmente ao tamanho de partícula e pelo próprio excesso de matéria orgânica, além de um comportamento térmico satisfatório.

Este comportamento é apreciável pois se trata de uma etapa crítica no processamento cerâmico, causador de muitos defeitos mecânicos que se tornam evidentes somente após a etapa de sinterização.

Para tal afirmação, o ensaio de resíduo bruto ajudou a perceber a variação dos tamanhos de partículas que os resíduos apresentavam em relação à massa padrão. O resíduo A continha uma maior quantidade de partículas grandes, tanto em comparação com a massa padrão como também com o resíduo B. Isto gerou mudanças no empacotamento e conseqüentemente, na homogeneização e conformação das massas, o que causaria maiores alterações nas propriedades se as quantidades usadas fossem maiores.

Observa-se ainda que para retração térmica de queima, a adição de resíduo A e B às composições acarretaram um leve aumento de retração em relação à amostra STD. A retração de queima das amostras na etapa 2 apresentaram menor importância do que na etapa 1. A retração poderia ter sido maior caso os teores de resíduo também aumentassem. Isto deve ter sido favorecido pelo teor de óxidos fundentes presentes nos resíduos.

Também é demonstrado que as perdas ao fogo das massas contendo resíduo apresentaram uma relação com o teor adicionado, uma vez que, pelos resultados das análises químicas, percebeu-se a elevada presença de matéria orgânica (>11%), gerando mais voláteis durante a queima. Associados à saída dos gases de queima, estão os espaços deixados por eles. A porosidade foi uma propriedade que aumentou, sendo comprovada pela alteração da densidade aparente e pela absorção de água, principalmente na amostra F3, que continha 10% de resíduo A.

Na etapa 1 onde foi analisada a resistência mecânica das formulações, as amostras contendo resíduos apresentaram um aumento nesta propriedade em relação à massa padrão, surgindo ali uma possível utilização destes resíduos como matéria-prima alternativa. Já na etapa 2 as retrações térmicas das amostras apresentaram comportamento divergente dos resultados obtidos na etapa 1. A amostra F2 apresentou valores superiores (6,41%) ao da amostra STD (5,64%), em contra partida, a amostra F6 teve valor abaixo (5,55%). Na secagem, quanto mais baixas forem as variações dimensionais, menores tensões internas serão geradas nesta etapa, isto diminui a possibilidade do aparecimento de defeitos, como as trincas.

Comparando também os resultados de absorção de água e de resistência mecânica à compressão das amostras com os requisitos estipulados por norma, constatou-se o enquadramento às normas. Assim a amostra F2, para as

mesmas propriedades, apresentou 12,22% e 6,81 MPa e a amostra F6 11,62% e 10,18 MPa.

O efeito fundente na massa, aumento de plasticidade verificado nas etapas de conformação e o enquadramento das propriedades físicas e mecânicas na norma técnica viabiliza o uso destes resíduos como matéria-prima na fabricação de cerâmica vermelha. Desta forma, com base nos resultados obtidos na etapa 2 observa-se que o resíduo B apresentou o melhor comportamento, sendo o mais promissor no uso como matéria-prima para o fabrico de tijolos de cerâmica vermelha.

Agradecimentos

O grupo agradece ao CNPq, à CAPES e as empresas envolvidas no estudo pelo apoio ao trabalho.

Referências

1. SOUZA, J. C. **Reciclagem e sustentabilidade**: a importância da logística. Rio de Janeiro: Ed. SPOLM, 2008.
2. LUCAS, D.; BENATTI, C. T. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente*, v. 1, n. 3, p. 405-418, 2008.
3. MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduo como matérias-primas cerâmicas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, n. 2, p. 303-313, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662002000200020>.
4. CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 724 p.
5. VIGANICO, E. M. **Produção de sulfato ferroso a partir de rejeitos da mineração de carvão**. 2010. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Premio Jovem Cientista, tema: Energia e Meio Ambiente – Soluções para o futuro.
6. SIQUEIRA, J. S. **Reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral**: produção de argamassas. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
7. FEIL, N. F., KLIEMANN NETO, F. J. Produção Conjunta no Processo de Beneficiamento de Carvão Mineral: Custos Conjuntos. *Produto & Produção*, v. 9, n. 2, p. 136-152, 2008.
8. OSÓRIO, E.; VILELA, A. C. F.; SAMPAIO, C. H. **Estudo prospectivo do setor siderúrgico**. Brasília: ABM, 2008.
9. RUIZ, A. S. **Flotação do carvão contido no rejeito da barragem El Cantor**. 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado em engenharia)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
10. BUSTAMANTE, G. M., BRESSIANI, J. C. A indústria cerâmica brasileira. *Cerâmica Industrial*, v. 5, n. 3, p. 31-36, 2000.
11. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEORGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censos demográficos**: Censo 2010. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>. Acesso em: 25 maio 2013.
12. DUARTE, F., FRANÇA, A., SOUZA, M. **ANICER**: relatório anual 2011. Rio de Janeiro: ANICER, 2012. p. 49.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABCERAM. **Informações técnicas**: processos de fabricação. São Paulo: ABCERAM, 2011. Disponível em: <http://www.abceram.org.br/site/?area=4&submenu=50>. Acesso em: 25 maio 2013.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15270-1:2005**: Componentes Cerâmicos. Parte 1: Blocos Cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005. 11 p.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004:2004**: Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.
16. OLIVEIRA, A. A. **Tecnologia em cerâmica**. Criciúma: Ed. Lara, 2011. 176 p.
17. LUCENA, M. M. **Efeito da Introdução de resíduo de cinza de forno cerâmico em massa para cerâmica estrutural**. 2007. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.
18. PUREZA, J. C. C. **Utilização de resíduos de baixa granulometria em massa cerâmicas de argila vermelha: aspectos tecnológicos e ambientais**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
19. FRASSON, B. B. **Valorização de resíduo de fundição – aplicabilidade em massa de cerâmica vermelha**. 2013. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cerâmica)-Universidade Barriga Verde, Cocal do Sul, 2013.
20. MENEZES, R. R. et al. Análise da co-utilização do resíduo do beneficiamento do caulim e serragem de granito para produção de blocos e telhas cerâmicos. *Cerâmica*, v. 53, n. 326, p. 192-199, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132007000200014>.
21. MELLO, R. M. **Utilização de resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha**. 2006. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências)-Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006.
22. REEVES, G. M.; SIMS, I.; CRIPPS, J. C. (Eds.). **Clay materials used in construction**. London: The Geological Society, 2006. (Engineering Geology Special Publications, v. 21).