

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E CERÂMICO DE CERÂMICA ESTRUTURAL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS

Alessandra Savazzini-Reis ¹

Viviana Possamai Della Sagrillo ²

Francisco Rolando Valenzuela-Diaz ³

Resumo

A indústria brasileira de cerâmica vermelha, que consome 10 milhões de toneladas de argila por mês, pode contribuir para a sustentabilidade com a incorporação de resíduos na massa cerâmica. Com isso, o objetivo da pesquisa é analisar a incorporação de três resíduos industriais em cerâmica vermelha. Os materiais foram caracterizados por: FRX, DRX, MEV, limites de Atterberg e granulometria. A metodologia das esferas foi usada para moldagem dos corpos de prova das massas argilosas com resíduos. Os teores de resíduo variaram de 10% a 50% (massa) nas misturas que foram queimadas em olaria para verificação de: resistência mecânica e propriedades cerâmicas. Os resultados mostram que as massas cerâmicas com resíduo de rocha e com lama de alto forno no teor de 10% apresentaram maior resistência mecânica. Já o resíduo de massa argilosa crua proporcionou melhorias na massa argilosa em até 50%.

Palavras-chave: Resíduo de rocha; Lama de alto forno; Massa argilosa crua; Cerâmica vermelha.

ANALYSIS OF MECHANICAL AND CERAMIC BEHAVIOR OF ESTRUTURAL CERAMIC WITH INCORPORATION OF WASTES

Abstract

The Brazilian clay ceramic industry, which demands 10 million tons per month of clay, can contribute to sustainability with the incorporation of wastes in the ceramic paste. With this, the objective of the research is to analyze three different industrial wastes for use in clay ceramics. The materials were characterized by XRF, XRD, SEM, Atterberg limits and granulometry. The spheres methodology was used to mold the specimens of the clay pastes with wastes. Waste contents ranged from 10% to 50% (mass) in the mixtures that were burned in pottery to check: mechanical strength and ceramic properties. The results show that the clayey pastes with rock waste and blast furnace sludge at 10% presented higher mechanical strength. On the other hand, the waste of raw clayey paste provided improvements by up to 50%.

Keywords: Rock waste; Blast furnace sludge; Raw clayey paste; Structural ceramic.

I INTRODUÇÃO

A indústria brasileira de cerâmica estrutural, que demanda cerca de 10 milhões de toneladas de argila ao mês [1], pode contribuir para a sustentabilidade com a incorporação de resíduos na massa cerâmica. A argila é um material natural, fino e terroso, que adquire plasticidade na presença de água [2] em proporções adequadas para fabricação de telhas e blocos [3]. Existe uma grande variedade de argilas com plasticidade e composição química variáveis em função da formação e consolidação [4], as quais possibilitam a incorporação de resíduos de diferentes indústrias na massa

cerâmica. Além disso, a extração de argila é feita em jazidas de pequeno porte a céu aberto com produção de 1.000 a 20.000 toneladas por mês com alto custo de transporte [5]. Neste contexto, vê-se a necessidade de incorporar resíduos para diminuir o consumo da argila e diminuir o volume de resíduos dispostos em aterros [6]. Uma metodologia simples de moldagem de corpos de prova em formato de esferas pode ser usada para verificação do comportamento mecânico e cerâmico em testes de massa cerâmica com resíduos nas pesquisas de laboratório e principalmente nas olarias.

¹Coordenadoria de Edificações, Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Vitória, ES, Brasil. E-mail: alessandrar@ifes.edu.br

²Coordenadoria de Metalurgia, Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Vitória, ES, Brasil.

³Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – PMT, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil.



Assim, o objetivo da pesquisa é analisar a incorporação de três resíduos industriais em cerâmica vermelha.

1.1 Resíduo de Rocha na Cerâmica Vermelha

O resíduo de rocha (RR) é proveniente das indústrias de beneficiamento de rochas ornamentais na etapa do corte dos blocos em chapas e no polimento dessas. O volume de resíduo gerado representa 30% do volume total do bloco [7-10]. A quantidade de resíduo gerado no Brasil em 2018 foi 3,26 milhões de toneladas [11]. Pesquisas feitas com o resíduo em massa cerâmica mostram que nos teores entre 20% e 30% (massa) aumenta a densificação das peças [12-14], podendo chegar o teor chegar a 60% [15].

1.2 Lama de Alto Forno na Cerâmica Vermelha

A lama de alto forno (LAF) é gerada na produção do aço na etapa de limpeza a úmido dos gases gerados no alto forno. A empresa Arcelor Mittal-ES gera 4,5 mil toneladas de lama ao mês [16] e cerca de 3,0 mil toneladas são vendidas para olarias do ES [17]. Em pesquisas com a lama em massas cerâmicas os melhores resultados das propriedades cerâmicas ocorreram entre 3% e 5% (massa) [18,19].

1.3 Resíduo de Massa Argilosa Crua na Cerâmica Vermelha

O resíduo da massa argilosa crua (RMC) é gerado na própria indústria cerâmica na etapa de conformação das peças, sendo composto por rebarbas de prensagem de telhas e da extrusão dos blocos representando cerca de 40% do volume produzido.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras coletadas das matérias-primas (Figura 1) foram secas ao ar livre, destorroadas, homogeneizadas e quarteadas. A caracterização dos materiais foi feita por meio de: fluorescência de raios X (FRX) em espectrômetro marca Philips modelo PW2400; difração de raios X (DRX) com fonte de cobre (radiação $K\alpha$) em aparelho Philips X-PERT MPD. A análise mineralógica foi feita por meio do difratograma de

raios X (DRX) das amostras, obtidas pelo método do pó, em aparelho Philips X-PERT MPD, nas seguintes condições de operação: fonte de cobre (radiação $K\alpha$), velocidade de varredura de $0,02^\circ (2\theta)$ por passo com tempo de contagem de 1 segundo por passo. A identificação das amostras foi feita por comparação com arquivos do padrão Crystallographic Open Database – COD. MEV foi feito em microscópio eletrônico de varredura marca Philips XL-30; limites de Atterberg [20,21]; e análise granulométrica por difração a laser em equipamento Mastersizer 2000 da Malvern.

Após preparação inicial das matérias-primas, os três resíduos foram misturados à argila em teores variando de 10% a 50% (massa); para conformação dos corpos de prova em formato de esferas.

Segundo a metodologia das esferas desenvolvida no “Laboratório de Materiais Não Metálicos Prof. Persio de Souza Santos” (LPSS) do PMT/EPUSP-BR, para conformação das esferas, as matérias-primas foram passadas na peneira ABNT n° 40 (abertura de malha 0,42 mm). Foram medidos 10 g de material seco e sobre ele foi borrifada água suficiente para mistura com auxílio de espátula em cadinho de porcelana até se conseguir conformar manualmente a esfera de diâmetro médio de 2 cm. Após a conformação da esfera foi medida a massa úmida e o diâmetro da esfera (com paquímetro) em 3 pontos pré-determinados para posterior cálculo da média das 3 determinações. As esferas foram identificadas delicadamente com auxílio de uma agulha em até 24 h após moldagem e foram mantidas em temperatura ambiente por 48 h em bandejas metálicas cobertas com papel sulfite.

Esse método de conformação dos corpos de prova é bem simples e de baixo custo podendo servir para análise das propriedades cerâmicas na própria olaria [22].

As esferas conformadas foram secas em estufa por 24h a 110°C e após isso queimadas em forno industrial contínuo tipo túnel em olaria por 24h a 850°C , assim mantendo condições ambientais e técnicas de fabricação das esferas semelhantes às dos produtos cerâmicos. As esferas queimadas foram submetidas a ensaios de absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, perda de massa, segundo Souza Santos [1], além da avaliação da retração volumétrica após queima e determinação da resistência à compressão.



(a) Resíduo de rocha



(b) RMC



(c) Lama de alto forno

Figura 1. Resíduos coletados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos Resíduos e da Argila

Na Tabela I pode-se ver que a argila é constituída essencialmente de sílica e alumina, com caráter refratário, indicando presença de caulinita e quartzo, com valores dentro do intervalo estipulado para SiO_2 (43,2% a 77,6%); e para o Al_2O_3 (6,8% e 38%) [1]. O resíduo de rocha apresenta predominância de sílica e alumina, além de óxidos alcalinos fundentes K_2O e Na_2O que podem contribuir na queima da massa argilosa. A lama de alto forno apresentou um elevado teor de ferro de 61,1%, além de conter SiO_2 , CaO e Al_2O_3 . O resíduo de massa argilosa crua apresentou composição química similar a argila para os principais óxidos, além de um aumento nos teores de CaO , K_2O e Na_2O por conter o resíduo de rochas em sua composição.

A perda ao fogo da argila de 12,62% e do resíduo de massa argilosa crua de 12,85% estão próximos ao limite máximo do intervalo de 6,0% a 15,7% para argilas caulínicas [1]. Esta perda ao fogo relativamente alta da argila e do resíduo está associada à desidroxilação dos argilominerais (caulinita) e à oxidação de matéria orgânica [23], e pode ocasionar alta porosidade nas peças após queima [24,25]. A perda ao fogo do resíduo de rocha de 2,97%, considerado baixo, resulta em baixa variação dimensional

em peças submetidas à queima. Já a lama de alto forno apresenta alta perda ao fogo de 25,92%, o que pode ser devido à combustão dos finos de coque [26], aumentando a porosidade nas peças queimadas.

No difratograma de raios X (Figura 2), a argila apresenta picos predominantes de caulinita, tendo sido detectados também ilita e quartzo; e indícios da presença de goetita e de gibsitita. A caulinita obtida no DRX confirmou o resultado da FRX, pois em geral, a argila com elevado teor de alumina apresenta a caulinita como principal argilomineral [27]. Quanto a gibsitita, ela sofre uma transformação pseudomórfica em 260°C, o que pode aumentar a refratariedade da argila e a perda de massa [7]. A fase cristalina goetita corrobora o alto teor de ferro detectado na FRX e confere cor avermelhada, pois oxida em hematita. O resíduo de rocha apresentou quartzo, feldspato, mica e calcita; principais minerais constituintes do granito [28]. O quartzo pode reduzir a plasticidade da argila; a calcita confirma o CaO encontrado na FRX; enquanto o feldspato e a mica podem atuar como fundentes. O DRX da lama de alto forno identificou fases cristalinas associadas a magnetita e hematita corroborando o alto teor de Fe_2O_3 da FRX; sendo identificados ainda quartzo e calcita.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos materiais (Figura 3) mostra uma morfologia menos compacta e uma distribuição variada de dimensões dos grãos, aglomerados e poros não homogêneos. A argila e o resíduo de rocha

Tabela I. Composição química das matérias-primas por FRX

	Composição em óxidos (% em peso)										
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	Na_2O	MgO	TiO_2	P_2O_5	BaO	MnO
Argila	43,62	28,15	12,04	0,16	1,02	0,23	0,38	1,34	0,23	0	<0,05
RR	62,88	14,11	5,72	4,42	4,36	2,54	1,02	0,67	0,38	0,22	0,07
RMC	44,70	27,57	8,96	1,01	1,56	0,65	0,72	1,22	0,16	0,26	0,06
LAF	5,11	1,80	61,16	3,73	0,23	0,06	0,70	0,09	0,13	0,31	0,27

Nota: RR=resíduo de rocha; RMC=resíduo de massa crua; LAF=lama de alto forno.

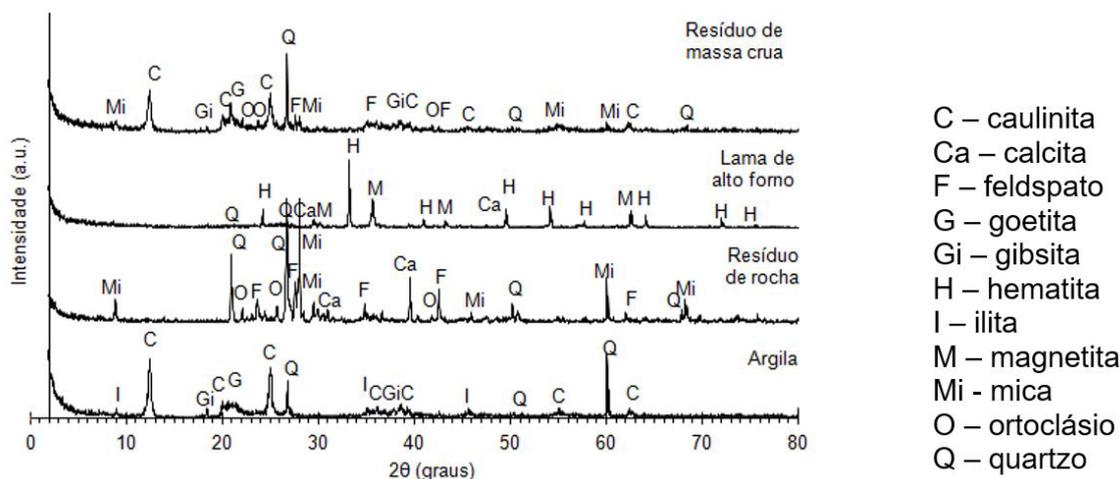


Figura 2. DRX das matérias-primas. Nota: C - caulinita (COD 1011045); Ca - calcita (COD 9009667); F - feldspato (COD 9001898); G - goetita (COD 1008768); Gi - gibsitita (COD 1200016); H - hematita (COD 1011240); I - ilita (COD 9013718); M - magnetita (COD 9013530); Mi - mica (COD 9000819); O - ortoclásio (COD 9006347); Q - quartzo (COD 9012602).

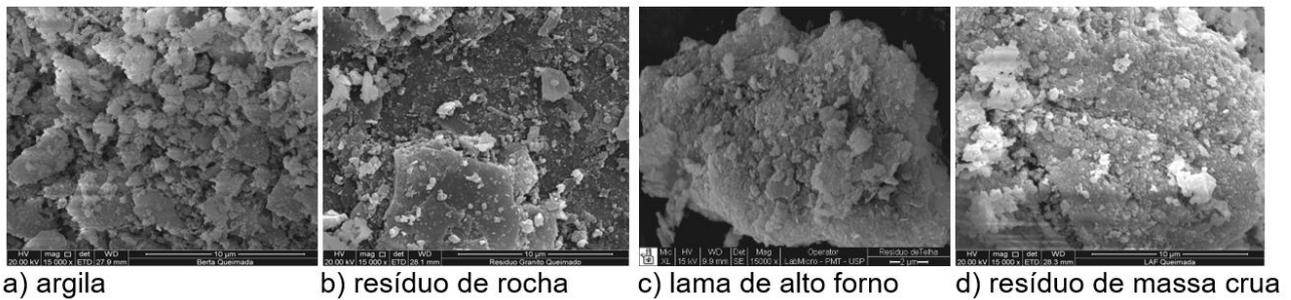


Figura 3. MEV das matérias-primas.

Tabela 2. Caracterização física das matérias-primas

Características	Limites de Atterberg (%)			Granulometria (%)		
	LL	LP	IP	< 2 μ m	2-20 μ m	> 20 μ m
Argila	58,62	37,50	21,12	7	48	45
Residuo de Rocha	28,07	N.D.	N.P.	10	50	40
Residuo de massa crua	50,20	29,45	20,75	11	64	25
Lama de alto forno	44,20	35,08	9,12	10	45	45

Nota: LL=limite de liquidez; LP=limite de plasticidade; IP=índice de plasticidade; N.D.=não determinado; N.P.=não plástico.

Tabela 3. Propriedades das esferas com as matérias primas

Matérias primas	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	RV(%)	σ (MPa)
Argila	11,86	25,21	37,41	1,52	3,80	1,31
Residuo Rocha	3,63	26,21	38,47	1,50	-0,41	0,07
Residuo de massa crua	11,23	21,18	35,39	1,66	5,83	3,42
Lama de alto forno	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Nota: PF = perda ao fogo; AA = absorção de água; PA = porosidade aparente; MEA = massa específica aparente; RV= retração volumétrica; σ = resistência à compressão; n.d.= não determinado.

apresentam grãos com formato lamelar, alguns dispersos e outros aglomerados. A lama de alto forno apresenta grãos de formato heterogêneo com textura mais rugosa que a argila. O resíduo de massa crua apresenta grãos e aglomerados de formato irregular, textura rugosa e irregular.

Pode-se observar na Tabela 2 que os índices de plasticidade (IP) da argila e do resíduo de massa argilosa crua se situam no intervalo de 8,9% a 56,3% para argilas caulínicas [1] corroborando resultados de FRX e DRX. Esse valor do IP maior que 15, indica alta plasticidade [29], o que demanda mais água para extrusão da massa cerâmica e maior tempo de secagem. Não foi possível determinar o limite de plasticidade do resíduo de rocha, que se comportou como material não plástico, assim como em Moreira et al. [30]. A lama de alto forno apresentou IP entre 7 e 15 [29] e menor que 10 [25], o que indica ser pouco plástica e de difícil extrusão. Na granulometria das matérias-primas (Tabela 2) verifica-se que os resíduos e a argila possuem baixa “fração argila” (grãos menores que 2 μ m). Com isso, a alta plasticidade apresentada pela argila pode ser função da presença de matéria orgânica e da fração de silte (grãos entre 2 μ m e 20 μ m).

3.2 Propriedades Cerâmicas e Resistência Mecânica das Matérias-primas

Na Tabela 3, a argila e o resíduo de massa argilosa crua apresentam menores valores de absorção de água e porosidade aparente; além de perda ao fogo, massa específica aparente (MEA) e resistência à compressão maiores, quando comparados ao resíduo de rocha. As esferas de lama de alto forno se quebraram durante a queima.

Foi feita a incorporação de cada resíduo na argila nos teores de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% (massa) para avaliar propriedades cerâmicas e mecânica nas esferas após a queima. Na Tabela 4, que apresenta os resultados da massa argilosa com resíduo de rocha, observa-se que perda ao fogo (PF), retração volumétrica (RV), absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) diminuíram com o aumento do teor do resíduo de rocha sendo mínimas em 50% enquanto a MEA foi máxima. Essa densificação ocorreu em função do preenchimento dos poros intersticiais dos grãos das argilas pelo resíduo promovendo o empacotamento físico dos grãos. O resíduo de rocha promoveu maior estabilidade dimensional na queima, em função da retração volumétrica e da perda ao fogo mínimas, fato relatado em outras pesquisas [31,32].

Tabela 4. Propriedades das esferas com argila e resíduo de rocha

Teor de resíduo(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	RV(%)	σ (MPa)
10	11,05	26,33	37,87	1,50	3,47	1,56
20	9,83	25,20	37,57	1,52	3,32	0,88
30	9,65	24,87	37,49	1,54	3,10	0,87
40	7,99	24,02	36,32	1,54	1,84	0,84
50	6,96	23,61	36,09	1,54	1,08	0,73

Nota: PF = perda ao fogo; AA = absorção de água; PA = porosidade aparente; MEA = massa específica aparente; RV= retração volumétrica; σ = resistência à compressão.

Tabela 5. Propriedades das esferas com argila e resíduo de massa argilosa crua

Teor de resíduo(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	RV(%)	σ (MPa)
10	12,64	26,25	39,25	1,52	6,41	2,04
20	12,62	25,34	38,56	1,52	6,25	2,81
30	12,35	25,48	38,28	1,52	5,81	3,15
40	12,26	24,04	37,03	1,54	4,93	3,16
50	11,85	23,63	36,92	1,60	4,73	3,18

Nota: PF = perda ao fogo; AA = absorção de água; PA = porosidade aparente; MEA = massa específica aparente; RV= retração volumétrica; σ = resistência à compressão.

Tabela 6. Propriedades das esferas com argila e lama de alto forno

Teor de resíduo(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	RV(%)	σ (MPa)
10	14,05	27,84	39,41	1,44	4,59	1,62
20	15,42	28,14	40,02	1,42	4,73	1,36
30	18,75	30,21	42,86	1,40	4,93	1,35
40	18,91	30,29	42,54	1,40	5,83	1,33
50	20,60	32,57	42,41	1,38	5,90	0,69

Nota: PF = perda ao fogo; AA = absorção de água; PA = porosidade aparente; MEA = massa específica aparente; RV= retração volumétrica; σ = resistência à compressão.

A resistência à compressão (σ) diminuiu com o aumento do teor do resíduo, provavelmente devido ao aumento do teor de quartzo que gera pontos de fratura na peça.

A Tabela 5 apresenta o comportamento das esferas com resíduo de massa argilosa crua incorporado à argila. Observa-se que PF, AA, PA, RV diminuíram com o aumento do teor de resíduo enquanto a MEA aumentou, indicando melhoria na densificação das esferas com o resíduo, o qual contém resíduo de rochas em sua composição, que contribui para aumento da densidade. A resistência à compressão (σ) aumentou com o aumento do teor do resíduo, o que indica possibilidade de uso de altos teores.

De acordo com a Tabela 6, que mostra o comportamento das esferas de argila com lama de alto forno, observa-se que PF, AA, PA, RV aumentaram com o aumento do teor da lama, e a MEA diminuiu. A máxima resistência à compressão (σ) ocorreu em 10% (massa) de resíduo. A partir daí, os valores de resistência diminuíram com o aumento do teor de lama. Este comportamento pode ser atribuído à composição mineralógica da lama, pois a hematita permanece inerte na queima e os finos de coque aumentam a porosidade, o que indica o uso de baixos teores de lama.

Os resultados obtidos nesta pesquisa com as esferas podem ser corroborados por trabalhos [33,34], onde foi

feita comparação entre resultados obtidos nos corpos de prova na forma de esferas e na forma de barras prismáticas de dimensões 2cmx6cmx0,5cm especificadas no método de Souza Santos [2]. Assim, a metodologia das esferas pode ser uma técnica simples a ser adotada na própria olaria para testes iniciais de incorporação de resíduos em massa cerâmica.

4 CONCLUSÃO

A argila incorporada com o resíduo de rocha e com resíduo de massa argilosa crua no teor de 50% (massa) apresenta melhoria na densificação das peças. Já na lama de alto teor ideal é de 10% (massa). Com isso, a incorporação dos resíduos analisados na massa cerâmica é viável tecnicamente e pode ser uma alternativa ambientalmente sustentável para as indústrias de cerâmica vermelha, de rochas ornamentais e da siderurgia.

É importante ressaltar a importância de desenvolver estudos das massas cerâmicas incorporadas com resíduos a serem usadas nas olarias com a metodologia das esferas, técnica simples e de baixo custo que pode resultar em produtos que atendam às Normas pertinentes.

REFERÊNCIAS

- 1 Associação Nacional da Indústria Cerâmica – ANICER. Dados do setor. Rio de Janeiro: ANICER; 2018 [acesso em 13 maio 2018]. Disponível em: <http://anicer.com.br/setor/>.
- 2 Souza Santos P. Tecnologia das argilas. Vol. 1-2. São Paulo: Edgard Blucher; 1975.
- 3 Callister WD. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC; 2002. 589 p.
- 4 Petrucci EGR. Materiais de construção. 4. ed. Porto Alegre: Editora Globo; 1979. 435 p.
- 5 Brasil. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior do BR – MDIC. Cerâmica vermelha - Termo de referência [acesso em 14 abr. 2016]. Disponível em: http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl_1295436730.pdf.
- 6 Reis AS, Della-Sagrillo VP, Valenzuela-Díaz FR. Green structural ceramic with addition of raw clay waste. In: TMS 145th Annual Meeting & Exhibition; 2016; Nashville, Tennessee - EUA. Nashville: TMS The Minerals, Metals & Materials Society; 2016. 6 p.
- 7 Vieira CMF, Sales HF, Monteiro SN. Effect of illitic flux clay addition in red ceramic of kaolinitic clays. *Revista Cerâmica*. 2004;50:239-246.
- 8 Mello ISC, Cuchierato G, Motta JFM, Consoni ÂJ, Reis FAGV, Muniz JMC. Aproveitamento dos resíduos sólidos das serrarias de rochas ornamentais e para revestimento. Estudo de caso: emigran pisos e revestimentos em granitos. São Paulo: IPT; 2006.
- 9 Cavalcanti DJH. Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais [dissertação de mestrado]. Maceió: Universidade Federal de Alagoas; 2006.
- 10 Reis AS, Alvarez CE. A sustentabilidade e o resíduo gerado no beneficiamento das rochas ornamentais. *Anais do II Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis – ELECS*; 2007; Mato Grosso do Sul, Brazil. Porto Alegre: ANTAC; 2007. CD-ROM.
- 11 Associação Brasileira Da Indústria De Rochas Ornamentais – ABIROCHAS. Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2018. São Paulo: ABIROCHAS; 2019. Informe 01/2019 [acesso em 30 jan. 2020]. Disponível em: https://www.abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Informes/Informe_01_2019_Balanco_2018.pdf
- 12 Souza AJ, Pinheiro BCA, Holanda JNF. Efeito da adição de resíduo de rocha ornamental nas propriedades tecnológicas e microestrutura de piso cerâmico vitrificado. *Revista Cerâmica*. 2011;57:212-218.
- 13 Ferreira LC. Potencial de utilização de resíduos industriais na formulação de massa de cerâmica vermelha para a fabricação de blocos de vedação [dissertação de mestrado]. Universidade Federal do Paraná, Paraná; 2012.
- 14 Bildhauer DC, Bruxel FR, Santana ERR, Oliveira EC. Tijolos maciços com características refratárias a partir da incorporação de resíduo de mármore e granito. *Revista Liberato*. 2015;16(25):73-83.
- 15 Reis AS, Sagrillo VPD, Valenzuela-Díaz FR. Influência da adição de resíduo de granito em massa argilosa usada na produção de telhas cerâmicas. In: *Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMAT*; 2014; Cuiabá, Brazil. São Paulo: Metallum Congressos Técnicos e Científicos; 2014.
- 16 ArcelorMittal Brasil. [página da internet]. [acesso em 12 ago 2014]. Disponível em: http://cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/lama/lama.asp
- 17 Mothé AV. Utilização da lama de alto forno em cerâmica vermelha [dissertação de mestrado]. Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense; 2008.
- 18 Reis AS, Sagrillo VPD, Valenzuela-Díaz FR. Estudo da viabilidade técnica de incorporação de lama de alto forno em massa argilosa. In: *Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 69º Congresso Anual da ABM*; 2014, São Paulo, Brazil. São Paulo: ABM; 2014.
- 19 Lima LHM, Reis SC, Borges LR. Aproveitamento de resíduo siderúrgico em blocos cerâmicos argilosos. *Revista E-xacta*. 2013;5(2):69-78.
- 20 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 6459: Solo – determinação de limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT; 1984.
- 21 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 7180: Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT; 1984.
- 22 Miyahara RY, Furlan GHRH, Valenzuela-Díaz FR, Toffoli SM. Correlação entre medidas de resistência mecânica de corpos de prova de argila conformados manualmente e por prensagem uniaxial. In: *Anais do 48º Congresso Brasileiro de Cerâmica*; 2004; Curitiba, Brazil. Curitiba: ABCERAM; 2004.

- 23 Dias CACM. Reciclagem de lama de alto-forno em cerâmica vermelha [tese de doutorado]. Rio de Janeiro: Universidade Estadual Norte Fluminense; 2011.
- 24 Vieira CMF, Peçanha LA, Monteiro SN. Efeito da incorporação de resíduo de serragem de granito em massa de cerâmica vermelha. *Vértices*. 2003 [acesso em 10 mar. 2017];5(3):143-157. Disponível em: <http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/1809-2667.20030024/114>
- 25 Vieira CMF, Pinheiro RM. Evaluation of kaolinitic clays from Campos dos Goytacazes used for red ceramic fabrication. *Revista Cerâmica*. 2011;57:319-323.
- 26 Vieira CMF, Dias CACM, Mothé AV, Sánchez R, Monteiro SN. Incorporation of blast furnace sludge into red ceramic. *Revista Cerâmica*. 2007;53:381-387.
- 27 Sales JCC Jr. Avaliação da potencialidade de argilas de queima clara como matérias-primas para o desenvolvimento de novos produtos cerâmicos [dissertação de mestrado]. Lagoa Nova: Universidade Federal do Rio Grande do Norte; 2008.
- 28 Manhães JPVT, Moreira JMS, Holanda JNF. Variação microestrutural de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental. *Revista Cerâmica*. 2009;55:371-378.
- 29 Caputo HP. Mecânica dos solos e suas aplicações. 6. ed. Vol. 1. Rio de Janeiro: LTC; 2011. 234 p.
- 30 Moreira JMS, Freire MN, Holanda JNF. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do Espírito Santo em cerâmica vermelha. *Revista Cerâmica*. 2003;49:262-267.
- 31 Taguchi SP, Santos JC, Gomes TM, Cunha NA. Evaluation of technological properties of red ceramics incorporated with dimension Stones waste from diamond wire loom. *Revista Cerâmica*. 2014;60:291-296.
- 32 Reis AS. Produção de telha cerâmica com incorporação simultânea de resíduo de beneficiamento de granito, lama de alto forno e resíduo de massa cerâmica crua [tese de doutorado]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2015.
- 33 Savazzini-Reis A, Della Sagrillo VP, Oliveira JN, Teixeira PG, Valenzuela-Diaz FR. Characterization and evaluation of ceramic properties with spherical and prismatic samples of clay used in red ceramics. *Materials Research*. 2017;20(supl. 2):543-548.
- 34 Savazzini, AS, Sagrillo VPD, Valenzuela-Diaz, FR. Analysis of the spheres and bars molded with blast furnace sludge incorporation in clayey mass. *Research & Reviews: Journal of Material Sciences*. 2016;4(3):25-33.

Recebido em: 15 Fev. 2019

Aceito em: 3 Fev. 2020