

# METODOLOGIA DAS ESFERAS NO ESTUDO DE RESÍDUOS EM CERÂMICA VERMELHA\*

Alessandra Savazzini-Reis<sup>1</sup>  
Viviana Possamai Della Sagrillo<sup>2</sup>  
Francisco Rolando Valenzuela-Diaz<sup>3</sup>

## Resumo

A indústria brasileira de cerâmica vermelha, que demanda um alto consumo de argila de 10 milhões de toneladas/mês, pode contribuir para a sustentabilidade com a incorporação de resíduos na massa argilosa. Vários resíduos têm sido testados em pesquisas científicas ou empiricamente nas olarias. É importante que as misturas argilosas contendo resíduos sejam moldadas por meio de metodologia simples que possa ser empregada na própria olaria, tal como a metodologia das esferas. Com isso, o objetivo da pesquisa é utilizar a metodologia das esferas para avaliar 3 resíduos para uso em cerâmica vermelha. O resíduo de rocha ornamental, lama de alto forno e resíduo de massa argilosa crua da olaria se tornam passivos ambientais quando não reaproveitados. Os resíduos foram caracterizados por: FRX, DRX, limites de Atterberg e granulometria. Massas argilosas com resíduos em teores variando de 5% a 50% (massa) foram conformadas, queimadas em forno da olaria à 850°C para verificar: absorção de água, porosidade e massa específica aparentes; e resistência mecânica. Os resultados mostram que a massa argilosa com o 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 ornamental; Lama de alto forno; Massa argilosa crua; Cerâmica vermelha; Incorporação.

## METHODOLOGY OF SPHERES IN THE WASTE STUDY IN RED CERAMICS

### Abstract

The Brazilian red ceramic industry, which demands a high consumption of clay of 10 million tons per month, can contribute to sustainability with the incorporation of wastes in the clayey mass. Various wastes have been tested in scientific research or empirically in potteries. It is important that the clayey mixtures containing wastes are shaped by simple methodology that can be employed in the pottery itself, such as the sphere methodology. With this, the objective of the research is to use the spheres methodology to evaluate 3 wastes for use in red ceramics. Waste from the dimension stone, blast furnace sludge and the waste of raw clayey mass can become environmental liabilities if not reused. The wastes were characterized by XRF, XRD, Atterberg limits and granulometry. The clay and wastes in contents ranging from 5% to 50% (mass) were mixed and shaped into specimens for burning in industrial pottery oven at 850°C to check: water absorption, apparent porosity and specific mass and mechanical strength. The results show that the clayey masses with dimension stone waste and blast furnace sludge at 10% presented higher mechanical strength. On the other hand, the waste of raw clayey mass provided improvements in the clay mass by up to 50%.

**Keywords:** Dimension stone waste; Blast furnace sludge; Raw clayey mass; Structural ceramic; Incorporation.

<sup>1</sup> Engenheira Civil, Doutora, professora, Coordenadoria de Edificações, IFES, Vitória, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Química Industrial, Doutora, professora, Coordenadoria de Metalurgia e Materiais, IFES, Vitoria, ES, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Químico, Doutor, professor, PMT-EPUSP, São Paulo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria brasileira de cerâmica vermelha, que demanda um alto consumo de argila de cerca de 10 milhões de toneladas ao mês [1], pode contribuir para a sustentabilidade com a incorporação de resíduos na massa argilosa. A argila é um material natural de granulometria fina e terroso, o qual adquire plasticidade na presença de água [2] e em proporções corretas forma uma massa plástica adequada à modelagem para fabricação de produtos cerâmicos, tais como, telhas e blocos [3]. Em função da formação e fatores de alteração durante a sua consolidação, existe uma grande variedade de argilas com toda gama de cores, plasticidade e composição química [4], fatores esses que possibilitam a incorporação de resíduos de diferentes indústrias na mistura argilosa usada na cerâmica vermelha. Com isso, vários resíduos têm sido testados em pesquisas científicas ou empiricamente nas olarias. É importante que as misturas argilosas contendo resíduos sejam moldadas por meio de metodologia simples que possa ser empregada na própria olaria, tal como a metodologia das esferas.

A extração de argila para suprir as olarias é feita em jazidas de pequeno porte a céu aberto com escala de produção variando de 1.000 a 20.000 toneladas por mês com baixo valor de matéria-prima e alto custo de transporte [5].

Neste contexto, vê-se a necessidade de incorporar resíduos na massa argilosa para se fabricar produtos que consumam menos matéria-prima argilosa e, que também contribuam para diminuição do volume de resíduos dispostos em aterros [6]. Assim, o objetivo da pesquisa é utilizar a metodologia das esferas para avaliar 3 resíduos para uso em cerâmica vermelha.

### 1.1 Resíduo de rocha ornamental na cerâmica vermelha

O resíduo de rocha ornamental é proveniente das indústrias de beneficiamento de granitos e mármore. Ele é gerado no corte dos blocos em chapas e no polimento dessas. O corte do bloco pode ser feito em tear de fios diamantados, neste caso o resíduo é constituído de pó da rocha e água. E no caso do corte em tear de lâminas metálicas acrescenta-se ao resíduo: cal e granalha de aço. O volume de resíduo gerado no corte do bloco representa cerca de 30% do seu volume total [7-10]. O resíduo do polimento é gerado na fase de tratamento superficial da chapa para dar brilho e fechar poros, esse resíduo é constituído por uma grande quantidade de água, pó de rocha e restos dos abrasivos utilizados, tal como, o carbetto de silício. Os dois resíduos são armazenados em silos e depois transportados e dispostos em aterros industriais ou lagoas de sedimentação. Uma disposição inadequada pode ocasionar danos ao meio ambiente. A quantidade de resíduo gerado na indústria brasileira de beneficiamento de rochas em 2014 foi de 3,65 milhões de toneladas [11].

Os resultados de pesquisas feitas com a incorporação de resíduo de rocha em massas argilosas mostram que nos teores entre 20% e 30% (massa) gera-se um aumento na densificação das peças com a melhoria na microestrutura; e o atendimento à resistência mecânica de blocos cerâmicos testados com 20% de resíduo [12-14].

O resíduo de rocha foi testado também em teores variando de 10% a 90% (massa) em massas argilosas, tendo sido obtido maior valor de resistência à flexão de corpos de prova no teor de 10%. Contudo, no teor de 60% de resíduo de rocha a

porosidade, a absorção de água e a perda ao fogo foram mínimas, e a massa específica foi máxima resultando em aumento de densificação [15].

### 1.2 Lama de alto forno na cerâmica vermelha

A lama de alto forno é um dos resíduos gerados na produção do aço. A lama é proveniente da etapa de limpeza à úmido dos gases gerados no alto forno. A empresa Arcelor Mittal, localizada em Serra no ES, gera mensalmente 4,5 mil toneladas de lama de alto forno [16] e cerca de 3,0 mil toneladas desse resíduo são comercializados para olarias do ES [17]. Em geral, as olarias usam pequenos teores da lama de alto forno na mistura argilosa baseando-se em testes empíricos.

Em pesquisas feitas com a lama de alto forno incorporada em massas argilosas os melhores resultados de resistência mecânica e propriedades cerâmicas foram obtidos nos teores entre 3% e 5% (massa) [18-19].

### 1.3 Resíduo de massa argilosa crua na cerâmica vermelha

O resíduo da massa argilosa crua é gerado na própria indústria cerâmica durante a etapa de conformação das peças, sendo composto por rebarbas de prensagem de telhas e da extrusão dos blocos e por peças recém-moldadas descartadas devido a defeitos visuais. Grande parte da massa argilosa crua é desperdiçada durante o processo, podendo-se estimar em cerca de 40% do volume produzido. Assim é necessário seu reaproveitamento para diminuir o impacto ambiental e o custo financeiro envolvidos.

## 2 DESENVOLVIMENTO

O resíduo de rocha utilizado na pesquisa é proveniente das etapas de corte do bloco e polimento da chapa e foi cedido por indústria de beneficiamento de rochas ornamentais localizada na região noroeste do Espírito Santo, enquanto a lama de alto forno é coproduto da siderúrgica Arcelor Mittal localizada em Serra, ES. A argila e o resíduo de massa argilosa crua são provenientes de olaria na região noroeste do Espírito Santo. Amostras do resíduo de rocha, de lama de alto forno, resíduo de massa argilosa crua e da argila foram coletadas em pilha de armazenagem de matérias-primas em fábrica de cerâmica vermelha situada no Espírito Santo (Figura 1).



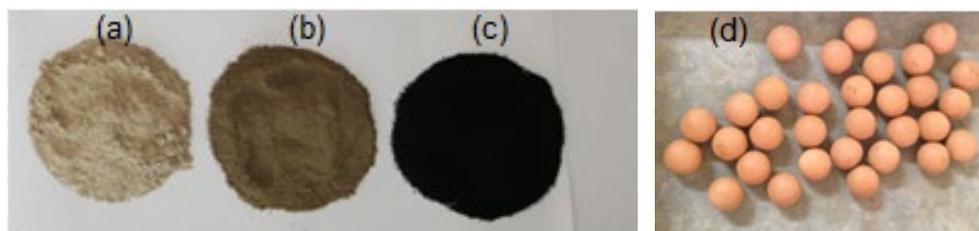
**Figura 1.** (a) Resíduo de rocha; (b) Resíduo de massa argilosa crua; (c) Lama de alto forno

As amostras foram secas ao ar livre, destorroadas, homogeneizadas e quarteadas. Parte do material foi destinada para realização de ensaios de caracterização, e parte foi utilizada para confecção dos corpos de prova.

A caracterização das matérias-primas 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; limites de Atterberg segundo normas da ABNT [20-21]; e análise granulométrica por difração a laser em equipamento Mastersizer 2000 da Malvern. A identificação das amostras da DRX foi feita por comparação com arquivos do padrão Crystallographic Open Database (COD).

Após preparação inicial das matérias-primas, o resíduo de rochas ornamentais (Figura 2a), o resíduo de massa argilosa crua (Figura 2b) e a lama de alto forno (Figura 2c) foram passados na peneira nº 40 da ABNT (abertura de 0,42mm) para serem feitas misturas de argila com os resíduos em teores de no máximo 50% (massa); que foram conformadas manualmente para obtenção de corpos de prova esféricos com massa seca de 10 g, diâmetro médio de 2 cm e água suficiente para conformação, seguindo metodologia de conformação de esferas argilosas desenvolvida no Laboratório de Materiais Não Metálicos Professor Persio de Souza Santos (LPSS) do PMT/EPUSP-BR.

O uso da metodologia de conformação de esferas para análise das propriedades cerâmicas em misturas argilosas se dá em função de ser uma metodologia simples e de baixo custo que pode ser desenvolvida na própria olaria [22]. As esferas (Figura 2d) foram queimadas em forno industrial contínuo tipo túnel por 24h a uma temperatura máxima na zona de queima de 850°C em fábrica de cerâmica vermelha situada no Espírito Santo.



**Figura 2.** (a) Resíduo de rocha; (b) Resíduo de massa argilosa crua; (c) Lama de alto forno, passados na peneira ABNT nº 40; (d) Esferas após queima

A utilização do forno industrial da olaria teve como objetivo estabelecer condições ambientais e técnicas de fabricação para os corpos de prova da pesquisa semelhantes às utilizadas para os produtos cerâmicos.

As esferas queimadas foram submetidas a ensaios de absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, perda de massa, de acordo com metodologia de Souza Santos [1], além da avaliação da retração volumétrica após queima e resistência à compressão.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização dos resíduos e da argila

O resultado da análise química das matérias-primas está na Tabela 1. A argila é constituída essencialmente de sílica e alumina, característica da matéria-prima de cerâmica vermelha com caráter refratário, indicando a presença de caulinita e quartzo, com valores dentro do intervalo estipulado para  $SiO_2$  entre 43,2% e 77,6%; e para o  $Al_2O_3$  entre 6,8% e 38% [1].

O teor de ferro de 12% confere a cor avermelhada das peças após a queima, característica dos produtos de cerâmica vermelha.

Pode-se verificar que o resíduo de rocha apresenta uma composição química com predominância de sílica e alumina, com valores 62,8% e 14,1%, respectivamente evidenciando ser um material sílico-aluminoso. A quantidade significativa de SiO<sub>2</sub> está associada a fase cristalina do quartzo. Verifica-se também a presença dos óxidos alcalinos K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O que por serem óxidos fundentes 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<sub>2</sub>, CaO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

O resíduo de massa argilosa crua apresentou composição química similar a argila para os principais óxidos. Verificou-se um aumento nos teores de CaO e os óxidos alcalinos K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O em função de conter o resíduo de rochas ornamentais em sua composição.

A perda ao fogo obtida da argila (12,62%) e do resíduo de massa argilosa crua (12,85%) se situaram próximos ao limite máximo do intervalo de 6,0% a 15,7% específico para argilas caulínicas [1]. Esta perda ao fogo relativamente alta apresentada pela argila e pelo resíduo está associada à desidroxilação dos argilominerais (caulinita) e à oxidação de matéria orgânica [23] e pode ocasionar elevada porosidade nas peças cerâmicas após queima [24-25].

O valor da perda ao fogo do resíduo de rocha de 2,97%, pode ser considerado baixo comparado ao valor da argila de 12,62%, o que indica ser um material que ocasiona baixa variação dimensional em peças submetidas à queima. Já a lama de alto forno apresenta uma alta perda ao fogo de 25,92%, o que pode ser devido à combustão dos finos de coque que contém [26], resultando em aumento da porosidade nas peças queimadas.

**Tabela 1.** Composição química das matérias-primas por FRX

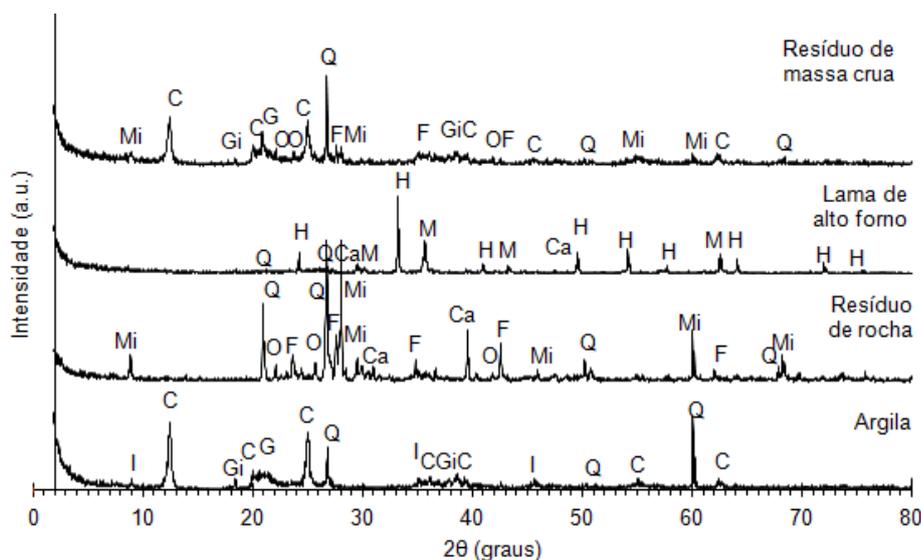
Constituintes	Composição em óxidos (% em peso)			
	Argila	Resíduo de rocha	Resíduo de massa argilosa crua	Lama de alto forno
SiO <sub>2</sub>	43,62	62,88	44,70	5,11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28,15	14,11	27,57	1,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,04	5,72	8,96	61,16
CaO	0,16	4,42	1,01	3,73
K <sub>2</sub> O	1,02	4,36	1,56	0,23
Na <sub>2</sub> O	0,23	2,54	0,65	0,06
MgO	0,38	1,02	0,72	0,70
TiO <sub>2</sub>	1,34	0,67	1,22	0,09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,23	0,38	0,16	0,13
BaO	0	0,22	0,26	0,31
MnO	<0,05	0,07	0,06	0,27
ZnO	0	<0,1	0,22	0,44
PbO	0	<0,1	<0,1	<0,1
SrO	0	<0,1	<0,1	<0,1
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	<0,1	<0,1	<0,1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	<0,1	<0,1	<0,1
ZrO <sub>2</sub> +HfO <sub>2</sub>	0	<0,1	<0,1	<0,1
Perda ao fogo	12,62	2,97	12,85	25,92

O difratograma de raios X das matérias-primas está apresentado na Figura 4. Na argila, pode-se observar que os picos de difração predominantes correspondem a caulinita, tendo sido detectados também illita e quartzo. Além de indícios da presença de goetita e de gibsita. A presença de 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], além da plasticidade encontrada.

Quanto a gibsita, ela sofre uma transformação pseudomórfica em temperaturas em torno de 260°C, o que pode contribuir para aumentar a refratariedade da argila e a perda de massa [7]. A fase cristalina goetita foi justificada pelo alto teor de ferro detectado na FRX e confere cor avermelhada, pois oxida em hematita.

Quanto ao resíduo de rocha, verificou-se a presença de quartzo, feldspato, mica e calcita; principais minerais constituintes das rochas ornamentais, tal como, o granito [28]. O quartzo (forma cristalina do SiO<sub>2</sub> encontrado na análise química) pode causar redução na plasticidade de massas argilosas; a calcita confirma o CaO encontrado na FRX; enquanto o feldspato e a mica podem atuar como fundentes na queima das peças cerâmicas.

O DRX da lama de alto forno identificou fases cristalinas associadas aos compostos de ferro, tais como a magnetita e hematita corroborando o alto teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> da FRX. Foram identificados ainda quartzo e calcita.



**Figura 4.** DRX das matérias-primas

Nota: C – caulinita (COD 1011045); Ca – calcita (COD 9009667); F – feldspato (COD 9001898); G – goetita (COD 1008768); Gi – gibsita (COD 1200016); H – hematita (COD 1011240); I – illita (COD 9013718); M – magnetita (COD 9013530); Mi – mica (COD 9000819); O – ortoclásio (COD 9006347); Q – quartzo (COD 9012602)

Os limites de Atterberg das matérias-primas são apresentados na Tabela 2. O índice de plasticidade (IP) da argila, de 21,12%, e do resíduo de massa argilosa crua, de 20,75%, se situam dentro da faixa estipulada de variação de 8,9% e 56,3% para argilas cauliniticas [1]. Esse valor do índice de plasticidade (IP), maior que 15, indica que a argila e o resíduo possuem alta plasticidade [29], o que pode demandar maior quantidade de água para extrusão e maior tempo de secagem.

Foram feitas tentativas para se determinar o limite de plasticidade do resíduo de rocha, mas os experimentos foram impraticáveis corroborando Moreira, Freire e Holanda (2003) [30]. Com isso, o resíduo de rocha se comporta como um material não plástico.

A lama de alto forno apresentou um IP de 9,12%, valor entre 7 e 15 [29], o que indica ser pouco plástica. Além disso, por ser um valor menor que 10, pode ser difícil o processo de extrusão de peças com a lama de alto forno [25].

Na distribuição de tamanho de partículas (granulometria) das matérias-primas apresentada na Tabela 2 verifica-se que os resíduos e a argila possuem baixa “fração argila” (grãos menores que 2  $\mu\text{m}$ ). Com isso, a alta plasticidade apresentada pela argila pode ser função da presença de matéria orgânica e da fração de tamanhos de partículas associadas ao silte (2  $\mu\text{m}$  a 20  $\mu\text{m}$ ).

**Tabela 2.** Caracterização física das matérias-primas

Características	Limites de Atterberg (%)			Granulometria (%)		
	LL	LP	IP	< 2 $\mu\text{m}$	2-20 $\mu\text{m}$	> 20 $\mu\text{m}$
Argila	58,62	37,50	21,12	7	48	45
Resíduo de rocha	28,07	N.D.	N.P.	10	50	40
Resíduo de massa argilosa 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

### 3.2 Propriedades das matérias-primas

Os resultados encontrados das propriedades cerâmicas e da resistência mecânica das esferas feitas com as matérias-primas estão apresentados na Tabela 3.

Pode-se verificar que a argila e o resíduo de massa argilosa crua apresentam menores valores de absorção de água e porosidade aparente, além de maiores valores de perda ao fogo, massa específica aparente e resistência à compressão, quando comparados aos valores do resíduo de rocha. O resíduo de massa argilosa crua apresentou a resistência de 3,42 MPa, sendo a maior resistência mecânica dentre todos.

Já os corpos de prova feitos com lama de alto forno se quebraram durante a queima em várias tentativas, não sendo assim possível a determinação das suas propriedades.

**Tabela 3.** Propriedades das esferas com as matérias primas

Matérias primas	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm <sup>3</sup> )	RV(%)	$\sigma$ (MPa)
Argila	11,86	25,21	37,41	1,52	3,80	1,31
Resíduo de rocha	3,63	26,21	38,47	1,50	-0,41	0,07
Resíduo de massa argilosa 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;  $\sigma$  = resistência à compressão; n.d.=não determinado

Foi feita a incorporação de cada resíduo na massa argilosa nos teores de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% (massa) para avaliação das propriedades cerâmicas e mecânica nas esferas. As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam os resultados encontrados.

Na Tabela 4, que apresenta os resultados da massa argilosa incorporada com resíduo de rocha ornamental, observa-se que os valores de perda ao fogo (PF), retração volumétrica após queima (RV), absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA), diminuíram com o aumento do teor do resíduo. Os mínimos valores de absorção e porosidade foram encontrados para o teor de adição de 50% (massa), enquanto a massa específica aparente (MEA) foi máxima nesse teor. Com isso, pode-se dizer que com 50% (massa) de resíduo de rocha na massa argilosa, os corpos de prova apresentaram uma maior densificação, que pode ter ocorrido em função do preenchimento dos poros intersticiais dos grãos das argilas pelo resíduo, que atua como um “enchimento” promovendo o empacotamento físico dos grãos.

O resíduo de rocha pode ter promovido uma maior estabilidade dimensional nos corpos de prova durante a queima, em função da diminuição nos valores apresentados de retração volumétrica e perda ao fogo, fato relatado também em outras pesquisas [31-32].

Os valores de resistência à compressão após a queima ( $\sigma$ ) diminuíram com o aumento do teor do resíduo de rocha, provavelmente devido ao aumento do teor de quartzo, presente no resíduo, que causa pontos de fratura na peça diminuindo a resistência mecânica nos corpos de prova.

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

Teor de resíduo (%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm <sup>3</sup> )	RV(%)	$\sigma$ (MPa)
10	11,05	26,33	37,87	1,50	3,47	<b>1,56</b>
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	<b>6,96</b>	<b>23,61</b>	<b>36,09</b>	<b>1,54</b>	<b>1,08</b>	0,73

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

A Tabela 5 apresenta o comportamento dos corpos de prova com resíduo de massa argilosa crua incorporado à argila. Observa-se que os valores de perda ao fogo (PF), absorção de água (AA), porosidade aparente (PA), retração de queima (RV), diminuíram com o aumento do teor de resíduo. Os valores de MEA aumentaram com o aumento do teor de resíduo, indicando melhoria na densificação dos corpos de prova com a incorporação do resíduo, o qual contém resíduo de rochas ornamentais em sua composição, que contribui para essa densificação.

Os valores de resistência à compressão ( $\sigma$ ) aumentaram com o aumento do teor do resíduo. Tais resultados favoráveis indicam a possibilidade de utilização de teores maiores de resíduo de massa argilosa crua na argila.

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

Teor de resíduo (%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm <sup>3</sup> )	RV(%)	$\sigma$ (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	<b>11,85</b>	<b>23,63</b>	<b>36,92</b>	<b>1,60</b>	<b>4,73</b>	<b>3,18</b>

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

De acordo com a Tabela 6, que ilustra o comportamento dos corpos de prova da argila com incorporação da lama de alto forno, observa-se que os valores de perda ao fogo (PF), absorção de água (AA), porosidade aparente (PA), retração volumétrica de queima (RV) aumentaram com o aumento do teor da lama de alto forno. Já o valor da massa específica aparente (MEA) diminuiu. A máxima resistência à compressão ( $\sigma$ ) nos corpos de prova foi encontrada no teor de 10% (massa) de resíduo. A partir daí os valores de resistência à compressão diminuíram com o aumento do teor de lama de alto forno. Este comportamento pode ser atribuído à composição mineralógica da lama de alto forno, pois a hematita permanece inerte durante a queima e os finos de coque aumentam a porosidade da massa argilosa. Esses resultados indicam o uso de baixos teores de lama de alto forno em massa argilosa.

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

Teor de resíduo(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm <sup>3</sup> )	RV(%)	$\sigma$ (MPa)
10	<b>14,05</b>	<b>27,84</b>	<b>39,41</b>	<b>1,44</b>	<b>4,59</b>	<b>1,62</b>
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;  $\sigma$  = resistência à compressão*

Os resultados obtidos nesta pesquisa com as esferas podem ser corroborados por trabalhos [33-34], onde foi feita a comparação entre resultados das propriedades cerâmicas de corpos de prova de misturas argilosas feitas com esferas de diâmetro 2 cm e com barras prismáticas de 2cmx6cmx0,5cm especificadas em Souza Santos (1975) [2]. Assim, a metodologia das esferas pode ser uma técnica simples a ser adotada na própria olaria para testes iniciais de dosagens.

#### 4 CONCLUSÃO

A caracterização química e mineralógica da argila e do resíduo de massa argilosa crua demonstrou que o argilomineral predominante é a caulinita, podendo ser considerados como materiais sílico-aluminosos, que contém teores de quartzo e de ferro adequados para fabricação de cerâmica vermelha, com um valor de perda ao fogo relativamente alto.

O resíduo de rocha ornamental apresenta alto teor de sílica, que promove a estabilidade dimensional nos corpos de prova, confirmada com os baixos valores encontrados de retração de queima e perda ao fogo. Entretanto, pontos de fratura podem ser gerados devido a presença do quartzo, o que resulta em perda da resistência mecânica, apesar da densificação que promove.

A lama de alto forno possui alto teor de ferro e alta perda ao fogo, que pode ocasionar aumento de porosidade nas peças queimadas.

As matérias-primas apresentam granulometria com baixo teor da fração argila, sendo que a argila e o resíduo de massa argilosa crua possuem alta plasticidade. No caso da argila muito plástica, tal fator pode ser corrigido com a utilização de dois dos três resíduos em questão, em função da lama de alto forno apresentar baixa plasticidade e o resíduo de rocha ornamental não ser plástico.

Os resultados mostram que os corpos de prova da massa argilosa, incorporada com o resíduo de rocha ornamental no teor de 50% (massa), apresentaram melhoria na densificação das peças, porém diminuição da resistência mecânica. Já a lama de alto forno apresenta melhores valores das propriedades analisadas no teor de 10% (massa). Tais resultados poderiam ser melhorados com o aumento da temperatura de queima acima de 850°C, a qual é utilizada no forno da olaria, onde foram queimados os corpos de prova, entretanto tal medida resultaria em aumento do custo de produção.

Com isso, a incorporação dos resíduos analisados na massa argilosa pode ser uma alternativa ambientalmente sustentável para a indústria de cerâmica vermelha, a de rochas ornamentais e a siderúrgica. É importante ressaltar a importância de desenvolver estudos das misturas argilosas incorporadas com resíduos a serem usadas nas olarias com a metodologia das esferas, para resultarem em produtos que atendam às Normas pertinentes.

### Agradecimentos

Agradecimentos ao IFES e ao PMT/EPUSP.

### REFERÊNCIAS

- 1 Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER). Dados oficiais. RJ. 2018. [Acesso em 13 mai. 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. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589p.
- 4 Petrucci EGR. Materiais de construção. 4ª Edição. Porto Alegre: Editora Globo; 1979. 435p.
- 5 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](http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl_1295436730.pdf).
- 6 Reis AS, Della-Sagrillo VP, Valenzuela-Diaz FR. Green structural ceramic with addition of raw clay waste. In: TMS145th Annual Meeting & Exhibition. Nashville –Tennessee - EUA. 2016. 6p.
- 7 Vieira CMF, Sales HF, Monteiro SN. Effect of illitic flux clay addition in red ceramic of kaolinitic clays. Revista Cerâmica, São Paulo, n. 50, p. 239-246, 2004.
- 8 Mello ISC, Cuchierato G, Motta JFM, Consoni Â J, 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. IPT. São Paulo. 2006.
- 9 Cavalcanti DJH. Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais. 2006. 141 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.
- 10 Reis AS, Alvarez CE. A sustentabilidade e o resíduo gerado no beneficiamento das rochas ornamentais. In: II Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis – ELECS, 2007, Mato Grosso do Sul. Anais... Mato Grosso do Sul: ANTAC, 2007. CD-ROM.
- 11 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). Balanço das exportações, importações, produção e consumo interno brasileiro de rochas ornamentais em 2014. Informe 01/2015. São Paulo. 2015. [acesso em 13 mai. 2018]. Disponível em: [http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/3397/Informe\\_01\\_2015.pdf](http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/3397/Informe_01_2015.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*, São Paulo, v. 57, p. 212-218, 2011.
- 13 Ferreira LC. Potencial de utilização de resíduos industriais na formulação de massa de cerâmica vermelha para a fabricação de blocos de vedação. 2012. 76 p. Dissertação (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*, v.16, n.25, p.73-83, 2015.
- 15 Reis AS, Sagrillo VPD, Valenzuela-Diaz FR. Influência da adição de resíduo de granito em massa argilosa usada na produção de telhas cerâmicas. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMAT, 2014, Cuiabá. Anais... Cuiabá: CBECIMAT, 2014.
- 16 ARCELOR MITTAL BRASIL (2014). [acesso em 12 agosto 2014]. Disponível em: [http://cst.com.br/produtos/co\\_produtos/catalogo\\_produtos/lama/lama.asp](http://cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/lama/lama.asp).
- 17 Mothé AV. Utilização da lama de alto forno em cerâmica vermelha. 2008. 100f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense – RJ. 2008.
- 18 Reis AS, Sagrillo VPD, Valenzuela-Diaz FR. Estudo da viabilidade técnica de incorporação de lama de alto forno em massa argilosa. In: 69º Congresso Anual da ABM, 2014, São Paulo. Anais... São Paulo: ABM, 2014.
- 19 Lima LHM, Reis SC, Borges LR. Aproveitamento de resíduo siderúrgico em blocos cerâmicos argilosos. *Revista E-xacta*, Belo Horizonte, v.5, n.2, p.69-78. 2013.
- 20 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6459: Solo – determinação de limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- 21 \_\_\_\_\_. NBR 7180: Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- 22 Miyahara RY, Furlan GHRH, Valenzuela-Diaz FR, Toffoli SM. Correlação entre medidas de resistência mecânica de corpos de prova de argila conformados manualmente e por prensagem uniaxial. In: 48º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2004, Curitiba. Anais... Curitiba: ABCERAM, 2004.
- 23 Dias CACM. Reciclagem de lama de alto-forno em cerâmica vermelha. 2011. 142 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2011.
- 24 Vieira CMF, Peçanha LA, Monteiro SN. Efeito da incorporação de resíduo de serragem de granito em massa de cerâmica vermelha. *Vértices*. Ano 5. n.3, p.143-157, set/dez 2003. [acesso em 10 març. 2017]. 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*, São Paulo, n. 57, p. 319-323, 2011.
- 26 Vieira CMF, Dias CACM, Mothé AV, Sánchez R, Monteiro SN. Incorporation of blast furnace sludge into red ceramic. *Revista Cerâmica*, São Paulo, n. 53, p. 381-387, 2007.
- 27 Sales Jr JCC. Avaliação da potencialidade de argilas de queima clara como matérias-primas para o desenvolvimento de novos produtos cerâmicos. 2008. 94 p. Dissertação (Mestrado) – 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*, São Paulo, v. 55, p. 371-378, 2009.
- 29 Caputo HP. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 6ª edição. v1. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 234p.
- 30 Moreira JMS, Freire MN, Holanda JNF. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do Espírito Santo em cerâmica vermelha. *Revista Cerâmica*. São Paulo, v. 49, p.262-267, 2003.
- 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*, São Paulo, v.60, p. 291-296, 2014.

- 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. 2015. 122 p. Tese (Doutorado) – PMT/EPUSP- Universidade de São Paulo (USP). SP. 2015.
- 33 Savazzini-Reis, A et al . Characterization and Evaluation of Ceramic Properties with Spherical and Prismatic Samples of Clay Used in Red Ceramics. Materials Research, São Carlos, v. 20, supl. 2, p. 543-548, 2017 . Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392017000800543&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392017000800543&lng=en&nrm=iso)>. access on 13 May 2018. Epub Nov 09, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0915>.
- 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. Vol.4, Issue 3, p. 25-33, 2016.