

## EFEITO DA DENSIDADE APARENTE NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PEÇAS CERÂMICAS CONTENDO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO\*

Beatryz Cardoso Mendes<sup>1</sup>  
Leonardo Gonçalves Pedrot<sup>2</sup>  
Pedro Henrique Cota Drumond<sup>3</sup>  
Afonso Rangel Garcez de Azevedo<sup>4</sup>

### Resumo

A incorporação do rejeito de minério de ferro como matéria prima para a produção de cerâmica vermelha configura uma nova alternativa para reutilizar o resíduo e, portanto, agregar sustentabilidade ao setor mineral e à construção civil. Para atestar a viabilidade técnica de um novo produto, deve-se avaliar, sobretudo, as suas propriedades físico-mecânicas. Neste trabalho, realizou-se a caracterização física e mecânica de blocos cerâmicos produzidos a partir de uma mistura definida em estudo prévio, contendo rejeito de minério de ferro e dois materiais argilosos (29,1% de rejeito de minério de ferro; 40,9% de argila cinza; 30,0% de argila amarela). As peças foram conformadas por prensagem e adotou-se temperatura de sinterização igual a 950°C. Após a queima, os exemplares foram caracterizados quanto à retração linear na queima, porosidade aparente, densidade aparente, absorção d'água e resistência à compressão axial. O foco do trabalho foi avaliar o efeito da variação da densidade aparente sobre as demais propriedades. Foi constatado que a composição adotada pode ser utilizada para a produção de blocos cerâmicos de vedação sustentáveis, atendendo aos critérios normativos para este produto, desde que este apresente uma densidade aparente pós queima mínima de 1,741 g/cm<sup>3</sup>.

**Palavras-chave:** Blocos Cerâmicos; Rejeito de Minério de Ferro; Densidade Aparente; Cerâmica Vermelha.

### EFFECT OF THE BULK DENSITY ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CLAY BRICKS CONTAINING IRON ORE TAILINGS

#### Abstract

The incorporation of iron ore tailings as a raw material for the production of red ceramic bodies is a new alternative to reuse the waste and add sustainability to the mineral and civil construction sectors. In order to attest the technical feasibility of a new product, it is necessary to evaluate the physical and mechanical properties. In this work, the physical and mechanical characterization of clay bricks produced from a mixture defined in a previous research, containing iron ore tailings and two clayey materials (29.1% of iron ore tailings; 40.9% of gray clay; 30.0% of yellow clay) was performed. The pieces were formed by pressing and fired at 950°C. After the firing, the properties of firing linear shrinkage, apparent porosity, bulk density, water absorption and compressive strength of the specimens were assessed. The purpose of this work was to evaluate the effect of bulk density variation on the other properties. It was verified that the adopted composition can be used to produce sustainable construction clay bricks, meeting the standards for this product, provided that the brick has a minimum bulk density after firing equal to 1.741 g/cm<sup>3</sup>.

**Keywords:** Clay Bricks; Iron Ore Tailings; Bulk Density; Red Ceramic.

<sup>1</sup> Engenheira Civil, graduada, doutoranda, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Civil, doutor, professor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro civil, graduando, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Civil, doutor, professor, Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico, grau de industrialização, taxas de urbanização e o crescimento populacional estão intimamente relacionados ao aumento da geração de resíduos sólidos em todo o mundo. Estes materiais podem ser classificados em duas categorias: resíduos sólidos municipais e industriais. Os resíduos sólidos municipais são aqueles descartados em zonas urbanas. Já os resíduos industriais, como o próprio termo sugere, são originados em indústrias [1,2].

De modo geral, os resíduos sólidos industriais são produzidos em quantidades consideráveis, o que dificulta a disposição final e o manejo, devido à demanda de grandes áreas [3]. Um exemplo é a indústria de produção de minério de ferro. De acordo com dados do Instituto de Pesquisas Tecnológicas [4], para cada tonelada de minério de ferro processado no Brasil, são produzidos 400 kg de rejeitos, resultantes da etapa de beneficiamento. No ano de 2016, a produção de minério de ferro no país alcançou cerca de 350 milhões de toneladas [5], gerando um montante de aproximadamente 140 milhões de toneladas de rejeito.

Tendo em vista a alta quantidade de resíduos sólidos industriais produzida e os impactos causados por uma destinação incorreta, aumenta-se a pressão, por parte das autoridades, em gerir estes materiais de maneira mais sustentável [6]. Uma das tendências recentes é a reciclagem ou reutilização de materiais descartados no desenvolvimento de novos produtos [7] sendo uma boa alternativa a incorporação de resíduos na indústria da construção civil. Dessa forma, pode-se substituir as matérias primas tradicionais por materiais suplementares de maneira rentável, garantindo uma gestão ambientalmente correta [8].

A incorporação de resíduos sólidos industriais em materiais cerâmicos à base de argila é uma opção tecnológica interessante, uma vez que a etapa de queima do processo de fabricação da cerâmica pode promover a eliminação de elementos e compostos potencialmente tóxicos por meio da volatilização, reações químicas e estabilização na fase vítrea formada [9]. Além disso, o resíduo pode contribuir para um melhor desempenho da massa cerâmica nas etapas de produção, secagem e queima.

A adição de materiais residuais pode ainda influenciar positivamente nas propriedades físicas e mecânicas de peças cerâmicas. As propriedades normalmente avaliadas são a retração linear na queima, densidade aparente pós queima, porosidade aparente, absorção d'água e resistência mecânica. Para as duas últimas são estabelecidos critérios de qualidade (limites máximos e mínimos), estabelecidos pelas normatizações brasileiras e internacionais.

O estudo da adição de rejeito proveniente da mineração do ferro em cerâmica vermelha já tem sido desenvolvido por alguns autores. Silva et al. [10] constatou que a adição de 5% do rejeito contribuiu para a redução da absorção d'água, aspecto satisfatório para a produção de blocos cerâmicos. Souza, Vieira e Monteiro [11] verificaram que a incorporação do rejeito resultou na melhora da granulometria e da trabalhabilidade de massas cerâmicas muito plásticas. Os autores também observaram que, em até 10% de adição, o rejeito atuou como um material de preenchimento, reduzindo a porosidade aparente e mantendo valores adequados de absorção d'água e resistência mecânica em relação às normas vigentes.

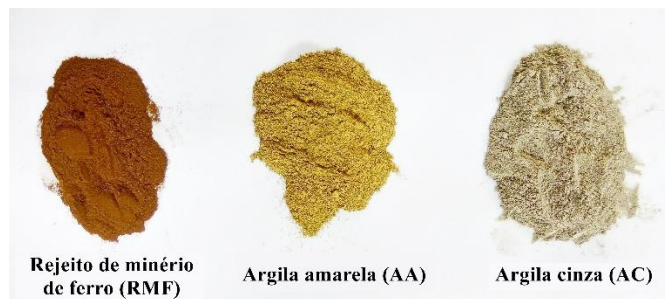
O presente trabalho teve como objetivo a caracterização física e mecânica de uma massa cerâmica contendo rejeito de minério de ferro, com enfoque no efeito da variação da densidade aparente sobre essas propriedades. A composição adotada neste estudo foi definida por Mendes [12], após a aplicação de um planejamento

experimental de misturas em rede simplex, visando ao emprego da mistura em blocos cerâmicos de vedação. Assim, pode-se comprovar a viabilidade técnica e ambiental do produto sustentável proposto a partir dessa mistura, desde que um valor mínimo de densidade aparente seja garantido.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e Métodos

As matérias primas utilizadas na confecção das peças cerâmicas foram dois materiais argilosos já aplicados na indústria, denominados como argila cinza e argila amarela, e o rejeito de minério de ferro, proveniente de um aterro localizado no município de Barra Longa – MG. Os materiais, mostrados na Figura 1, foram previamente preparados, sendo destorroados e passados na peneira ASTM 50 mesh (abertura de 0,300 mm).



**Figura 1.** Matérias primas aplicadas na confecção das peças cerâmicas.

Os materiais foram caracterizados fisicamente quanto à distribuição granulométrica dos grãos, de acordo com as prescrições da NBR 7181 [13], seguindo as etapas de peneiramento fino e sedimentação das partículas inferiores a 2 mm; a massa específica dos grãos, segundo a NBR 6508 [14]; e os limites de *Atterberg*, por meio do método de Casagrande, com base nas normas NBR 6459 [15] e NBR 7180 [16]. Em um trabalho prévio, Mendes [12] desenvolveu um planejamento experimental de misturas em rede simplex com o rejeito de minério de ferro e as duas argilas – argila cinza e argila amarela. Foram obtidos modelos matemáticos que descrevem as propriedades físico-mecânicas avaliadas e permitiram a determinação de uma composição considerada ideal, por atender às especificações técnicas e incorporar o máximo teor de rejeito possível.

De posse da proporção considerada ideal entre os três componentes (29,1% RMF, 40,9% AC e 30,0% AA), preparou-se a mistura e esta foi submetida à secagem em estufa, sob temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  e por um período de 24 horas, para a perda da umidade presente. Posteriormente, a mistura foi retirada da estufa e adicionou-se a quantidade de água de acordo com o teor de umidade definido anteriormente, igual a 10%. Após a completa homogeneização, iniciou-se a produção de quinze corpos de prova, conformados por prensagem uniaxial através de uma prensa hidráulica da marca *Nowak* (Figura 2). Adotou-se formato cilíndrico, com dimensões aproximadas de (3,0 x 5,0) cm (diâmetro x altura), para que a resistência à compressão axial pudesse ser avaliada.



**Figura 2.** Prensagem com destaque para o molde cilíndrico.

Segundo Kulokas, Kazys e Mazeika [17], a densidade dos exemplares no estado verde está intimamente relacionada à resistência mecânica desenvolvida após a queima. Dessa forma, o ideal é que os corpos cerâmicos apresentem densidade aparente na faixa de 1,8 a 2,1 g/cm<sup>3</sup> após a conformação. Nesse estudo, desejou-se avaliar o efeito da densidade aparente nas propriedades dos corpos de prova após a queima. Os exemplares foram produzidos, então, a partir de massas e cargas de prensagem variáveis, entre 3 e 5 tf (40-70 MPa).

Após a prensagem, os corpos de prova foram secos em temperatura ambiente por 48 horas e em seguida levados para secagem em estufa, a 105 ± 5°C. Após 24h, os corpos de prova foram retirados para pesagem e medição das dimensões no estado seco, possibilitando a determinação das propriedades de densidade aparente a seco e retração linear na queima.

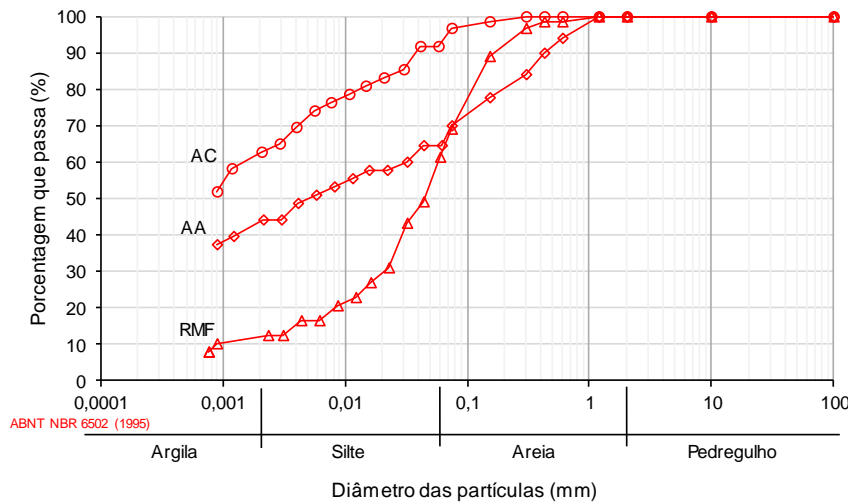
Após a produção dos corpos de prova, procedeu-se à etapa de queima, realizada no forno laboratorial da marca *LINN*, modelo *Elektro Term*. Adotou-se temperatura de queima igual a 950°C. Os exemplares queimados foram caracterizados quanto à: retração linear na queima, sendo medidas as dimensões nos estados queimado e seco por meio de um escalímetro digital (precisão 0,01 mm); absorção d'água, de acordo com as prescrições da NBR 15270-2 [18] para imersão em água fria; porosidade aparente, com o auxílio de balança hidrostática para obtenção da massa imersa; densidade aparente; e resistência à compressão axial, utilizando prensa *Marshall*.

Após a obtenção dos resultados, foi aplicado o teste de *Chauvenet* como ferramenta estatística para a eliminação dos *outliers*.

## 2.1 Resultados e Discussão

Na Figura 3 e Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos na caracterização física das matérias primas. Observa-se que a massa específica do rejeito de minério de ferro é superior à das argilas, provavelmente devido à maior quantidade de ferro, metal de massa elevada, presente no material. Em relação à granulometria, a argila cinza é o componente com maior porcentagem da fração argila, o que pode estar relacionado à sua alta plasticidade. A argila amarela também apresenta um alto teor de fração argila, além de uma parcela considerável da fração areia (areia fina). O rejeito possui uma granulometria mais grosseira, sendo composto basicamente por

silte e areia. O diâmetro médio das partículas é cerca de 26 vezes superior ao das argilas.



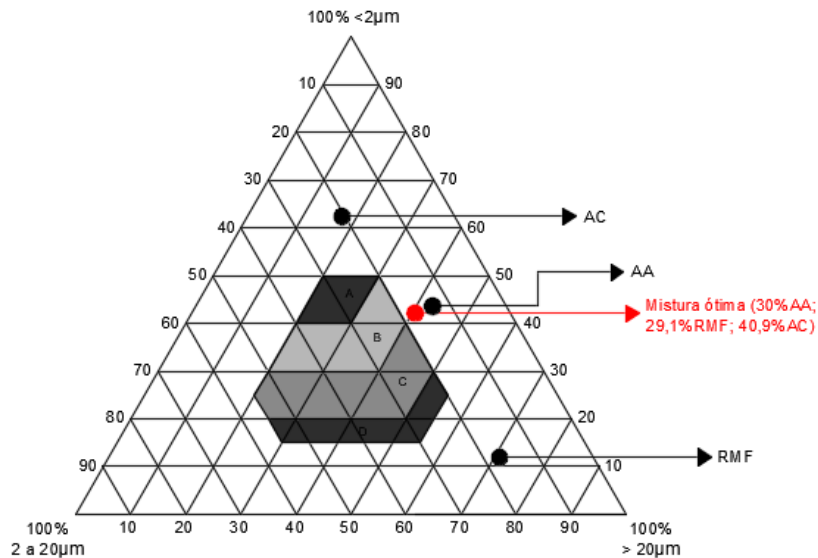
**Figura 3.** Curvas de distribuição granulométrica dos materiais.

**Tabela 1.** Resultados da caracterização física dos materiais

Material	Massa específica dos sólidos (g/cm <sup>3</sup> )	Diâmetro médio (µm)	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
Rejeito de minério de ferro	2,933	47	0*	0*	0*
Argila Cinza	2,609	< 1	60	44	16
Argila Amarela	2,748	1,8	56	35	21

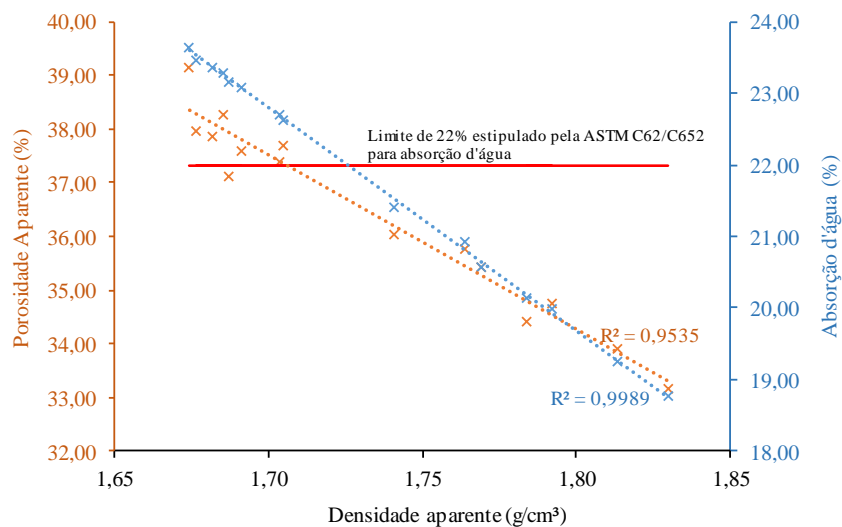
Em relação aos limites de consistência, As duas argilas podem ser consideradas como muito plásticas, uma vez que os índices de plasticidade foram superiores a 15%. O limite de plasticidade está relacionado à umidade mínima necessária para que a condição plástica seja atingida. Observa-se que a argila cinza necessita de um teor superior (44%) ao da argila amarela (35%). Um limite de plasticidade alto indica maior dificuldade de secagem dos corpos de prova, o que pode ocasionar problemas nas etapas de secagem e queima [19]. Dessa forma, a adição do rejeito, material não plástico, pode favorecer o processo de produção de peças cerâmicas, reduzindo a plasticidade da massa cerâmica.

Com base nos dados de granulometria das matérias primas, a composição ótima utilizada nesse trabalho foi localizada no diagrama de Winkler (Figura 4), uma ferramenta clássica utilizada para avaliar as características granulométricas de matérias primas para a produção de peças cerâmicas [20]. Nota-se nenhum dos três materiais estão localizados na zona C, considerada como a ideal para a produção de blocos cerâmicos furados. A mistura ótima também não se enquadra nessa zona, mas resultou em uma combinação granulométrica mais próxima da faixa pretendida.

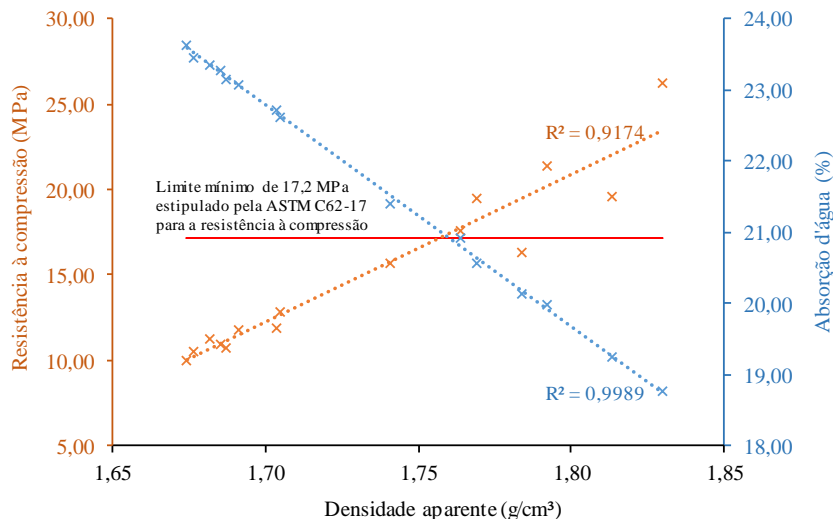


**Figura 4.** Localização das matérias primas e mistura ótima no diagrama de Winkler.

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados, graficamente, os resultados obtidos para as propriedades de absorção d'água, porosidade aparente e resistência à compressão axial, em função da densidade aparente pós queima. Na Tabela 2 são mostrados os valores individuais relacionados a cada propriedade supracitada, incluindo ainda os resultados da retração linear na queima e densidade aparente a seco.



**Figura 5.** Gráfico que relaciona as propriedades de absorção d'água e porosidade aparente com a densidade aparente dos exemplares após a queima.



**Figura 6.** Gráfico que relaciona as propriedades de absorção d'água e resistência à compressão com a densidade aparente dos exemplares após a queima.

Observa-se, por meio dos resultados obtidos, que as propriedades de absorção d'água, porosidade aparente e resistência à compressão estão fortemente relacionadas à densidade aparente do corpo de prova cerâmico após a queima. A variação da densidade aparente no estado verde, na etapa de produção dos exemplares, foi proposital justamente para verificar e confirmar tal influência. A partir dos gráficos nota-se que as correlações entre as variáveis podem ser explicadas através de modelos lineares, cujos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) apresentam valores elevados, próximos a 1.

**Tabela 2.** Resultados obtidos para os exemplares conformados por prensagem

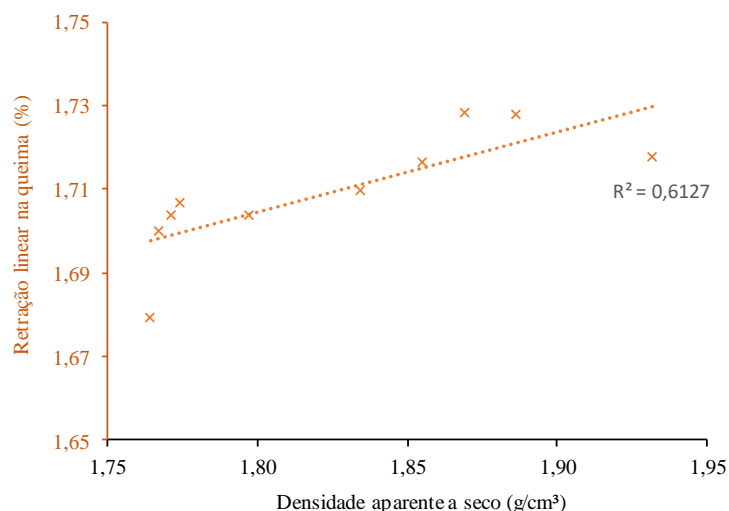
Exemplar	Densidade aparente a seco (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade aparente pós queima (g/cm <sup>3</sup> )	Retração linear na queima (%)	Absorção d'água (%)	Porosidade aparente (%)	Resistência à compressão (MPa)
MO1	1,879	1,784	1,633	20,13	34,43	16,32
MO2	1,915	1,813	1,663	19,26	33,91	19,61
MO3	1,932	1,830	1,718	18,76	33,15	26,20
MO4	1,855	1,764	1,717	20,91	35,78	17,63
MO5	1,834	1,741	1,710	21,41	36,04	15,73
MO6	1,793	1,703	1,621	22,71	37,40	11,92
MO7	1,767	1,676	1,700	23,45	37,96	10,55
MO8	1,783	1,691	1,616	23,08	37,60	11,81
MO9	1,774	1,685	1,707	23,27	38,27	10,91
MO10	1,771	1,682	1,704	23,35	37,87	11,24
MO11	1,886	1,792	1,728	19,98	34,76	21,37
MO12	1,869	1,769	1,728	20,57	35,42	19,51
MO13	1,797	1,705	1,704	22,63	37,70	12,80
MO14	1,764	1,674	1,679	23,64	39,16	9,97
MO15	1,777	1,687	1,643	23,16	37,10	10,73

Maiores valores de densidade aparente após a queima implicam em uma matriz vítrea com menor incidência de vazios. Conseqüentemente, ocorre a redução do índice de absorção d'água e porosidade aparente. A absorção d'água é um fator que influencia fortemente a durabilidade de peças cerâmicas; ou seja, quanto maior é o índice de absorção d'água, menor é a durabilidade [21]. Dessa forma, a densidade aparente deve ser tal que garanta um índice de absorção d'água adequado. A normatização ASTM C62 [22] estabelece que o limite máximo para blocos cerâmicos furados seja 22%. Dos quinze exemplares produzidos, apenas sete apresentaram valores satisfatórios, cujas respectivas densidades foram superiores a 1,741 g/cm<sup>3</sup>. A norma brasileira NBR 15270-1 [23], por sua vez, define como critério o limite máximo de 25%, que é atendido por todos os exemplares. Como o valor prescrito pela ASTM C62 é mais conservador, este será adotado como referência.

Em relação à resistência à compressão, observa-se que esta propriedade é inversamente proporcional à porosidade aparente. Como a porosidade diminui com o aumento da densidade – maior grau de empacotamento, há menos pontos onde possa haver concentrações de tensões, resultando em maiores valores de resistência mecânica. Tendo em vista o limite mínimo de resistência à compressão especificada pela ASTM C62 [22] igual a 17,2 MPa, tanto para blocos maciços como furados, apenas cinco exemplares atenderam a este requisito, também com densidades superiores a 1,741 g/cm<sup>3</sup>.

A propriedade de retração linear na queima não está diretamente relacionada à densidade aparente pós queima. Os valores obtidos variaram de 1,616% a 1,728%, e podem ser considerados baixos devido à incorporação do rejeito de minério de ferro, material não plástico que atua no controle da retração [24].

A densidade aparente a seco, por sua vez, influencia na retração linear. Por meio deste parâmetro, pode-se ter uma ideia a respeito dos níveis de compactação e empacotamento da massa cerâmica. Relacionando as duas propriedades (Figura 7), observa-se que maiores valores de retração linear estão associados a maiores valores de densidade a seco. De fato, quanto maior o grau de empacotamento, maior é o gradiente de umidade no interior de peças cerâmicas, resultando em maiores contrações volumétricas [25].



**Figura 7.** Gráfico que relaciona as propriedades retração linear na queima e densidade aparente a seco.

Para confrontar os resultados obtidos experimentalmente com os obtidos numericamente, por meio das equações desenvolvidas no trabalho de Mendes [12],



foram selecionados os sete corpos de prova com densidades aparentes iguais ou superiores a 1,741 g/cm<sup>3</sup>, que atenderam ao critério de absorção d'água. Considerando a temperatura de queima igual a 950°C, tem-se as seguintes equações para as propriedades avaliadas (Tabela):

**Tabela 3.** Equações obtidas no delineamento experimental de misturas, para a temperatura de 950°C

Propriedade	Equação	R <sup>2</sup>
Retração linear na queima (%)	$y = -3,907*RMF + 4,687*AC + 3,585*AA$	95,83%
Densidade aparente pós queima (%)	$y = 1,448*RMF + 1,858*AC + 1,912*AA + 0,709*RMF*AC - 0,729*AC*AA$	86,47%
Porosidade aparente (%)	$y = 99,7*RMF + 33,2*AC + 37,0*AA - 197,7*RMF*AC - 188,4*RMF*AA + 605*RMF*AC*AA$	71,74%
Absorção d'água (%)	$y = 32,36*RMF + 17,19*AC + 15,74*AA - 23,29*RMF*AC + 20,41*AC*AA$	79,74%
Resistência à compressão (MPa)	$y = 87,5*RMF + 55,3*AC + 92,3*AA - 384,2*RMF*AC - 500,7*RMF*AA - 174,1*AC*AA + 1390,4*RMF*AC*AA + 188,9*AC*AA*(AC-AA)$	99,99%

Fonte: Mendes [12].

Considerando os percentuais de argila cinza (AC), argila amarela (AA) e rejeito de minério de ferro (RMF) iguais a 40,9%, 30,0% e 29,1%, respectivamente, pode-se determinar os valores estimados para cada propriedade. Os valores experimentais consistiram nas médias obtidas para os sete exemplares, após a eliminação dos *outliers* por meio da aplicação do teste de *Chauvenet*. Os resultados finais são mostrados na Tabela 4.

Observa-se que as diferenças percentuais (absolutas) entre os valores estimados e obtidos experimentalmente são inferiores a 8%, o que configura uma boa aproximação dos resultados. Coronado, Segadães e Andrés [26], que utilizaram o planejamento experimental de misturas em peças cerâmicas retangulares, obtiveram erros percentuais nesta mesma ordem, sendo a maioria dos valores inferior a 8%. A propriedade cuja diferença foi mais expressiva é a retração linear na queima. Esta alta variação pode estar associada a erros cometidos durante as medições, quando do uso do escalímetro.

**Tabela 1.** Comparação entre os valores estimados e obtidos experimentalmente para os exemplares cilíndricos

Propriedade	Valor estimado	Média experimental	Diferença (%)
Retração linear na queima (%)	1,856	1,710	-7,85
Densidade aparente pós queima (%)	1,750	1,785	2,00
Porosidade aparente (%)	35,32	34,78	-1,51
Absorção d'água (%)	20,90	20,15	-3,61
Resistência à compressão (MPa)	17,58	18,36	4,45

Experimentalmente, ocorreu a diminuição da retração linear na queima, porosidade aparente e absorção d'água, e aumento da resistência à compressão axial, o que é vantajoso para a aplicação em blocos cerâmicos. O pequeno aumento da densidade aparente pós queima pode justificar este comportamento.

### 3 CONCLUSÃO

Por meio da metodologia aplicada e com base nos resultados obtidos na presente pesquisa, pode-se concluir que:

- As propriedades de absorção d'água, porosidade aparente e resistência à compressão estão diretamente relacionadas com a densidade aparente pós queima das peças cerâmicas, sendo possível estabelecer modelos lineares com altos valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ). Quanto maior a densidade aparente pós queima, melhor foi o comportamento dos exemplares;
- Apenas os corpos de prova cilíndricos com densidade aparente pós queima superior a  $1,741 \text{ g/cm}^3$  atenderam ao critério de absorção d'água especificado pela ASTM C62. Portanto, em uma eventual produção de blocos cerâmicos a partir da composição proposta, o processo deve garantir que a densidade pós queima seja igual ou superior a este valor para que o produto apresente a qualidade técnica necessária;
- A comparação entre os valores obtidos experimentalmente e numericamente para as propriedades avaliadas atestou o uso do planejamento experimental de misturas como uma boa ferramenta para predição e otimização das características de peças cerâmicas;
- É possível a obtenção de um produto sustentável, produzido a partir de um rejeito industrial, que atenda aos requisitos técnicos necessários, desde que haja uma investigação acerca do teor adequado de incorporação.

### Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001. Os autores também agradecem à agência FAPEMIG pelo suporte financeiro, e ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Viçosa pelo suporte técnico dado ao decorrer da pesquisa.

### REFERÊNCIAS

- 1 Chen YC. Evaluating greenhouse gas emissions and energy recovery from municipal and industrial solid waste using waste-to-energy technology. *Journal of Cleaner Production*. 2018;192: 262–269.
- 2 Guerrero LA, Maas G, Hogland W. Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*. 2013;33(1): 220–232.
- 3 Ngoc UN, Schnitzer H. Sustainable solutions for solid waste management in Southeast Asian countries. *Waste Management*. 2009;29(6): 1982–1995.
- 4 IPT. Rejeitos de mineração [acesso em: 23 jun. 2017]. Disponível em: <[http://www.ipt.br/noticias\\_interna.php?id\\_noticia=1043](http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1043)>.
- 5 Vale. Produção da Vale no 4T16. Rio de Janeiro: [s.n.]; 2017.
- 6 Song Q, Li J, Zeng X. Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy. *Journal of Cleaner Production*. 2015;104: 199–210.

- 7 Kumar S, Kumar R, Bandopadhyay A. Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries. *Resources, Conservation and Recycling*. 2006;48(4): 301–314.
- 8 Pappu A, Saxena M, Asolekar SR. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. *Building and Environment*. 2007;42(6): 2311–2320.
- 9 Pinatti DG et al. Incorporation of the ash from cellulignin into vitrified ceramic tiles. *Journal of the European Ceramic Society*. 2006;26(3): 305–310.
- 10 Silva FL et al. Study of the recovery and recycling of tailings from the concentration of iron ore for the production of ceramic. *Ceramics International*. 2014;40(10): 16085–16089.
- 11 Souza CC, Vieira CMF, Monteiro SN. Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro. *Matéria (Rio de Janeiro)*. 2008;13(1): 194–202.
- 12 Mendes BC. Reaproveitamento do rejeito de minério de ferro, liberado no desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão (MG), na produção de blocos cerâmicos. *Dissertação (mestrado)*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 2019.
- 13 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT; 2016.
- 14 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT; 1984.
- 15 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT; 2016.
- 16 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT; 2016.
- 17 Kulokas M, Kazys R, Mazeika L. Non-Destructive Evaluation of Green Ceramic Body Density by Ultrasonic Technique. *Electronics and Electrical Engineering*. 2011;5: 71–76.
- 18 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15270-2: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria. Parte 2: Métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT; 2017.
- 19 Celik H. Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry. *Applied Clay Science*. 2010;50(2): 245–254.
- 20 Dondi M, Fabbri B, Guarini G. Grain-size distribution of Italian raw materials for building clay products" a reappraisal of the Winkler diagram. *Clay Minerals*. 1998;33: 435–442.
- 21 Sutcu M. et al. Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials. *Construction and Building Materials*. 2015;82: 1–8.
- 22 American Society for Testing and Materials. ASTM C62-08 - Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale). West Conshohocken: ASTM; 2008.
- 23 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15270-1: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT; 2017.
- 24 Vieira CMF, Monteiro SN. Effect of grog addition on the properties and microstructure of a red ceramic body for brick production. *Construction and Building Materials*. 2007;21(8): 1754–1759.
- 25 Pracidelli S, Melchiades FG. Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial*. 1997;2: 31–35.
- 26 Coronado M, Segadães AM, Andrés A. Combining mixture design of experiments with phase diagrams in the evaluation of structural ceramics containing foundry by-products. *Applied Clay Science*. 2014;101: 390–400.