

Coprocessamento de rejeito do Garimpo Areinha (Diamantina/MG) para produção de cerâmica vermelha

Coprocessing of tailings of the Garimpo Areinha (Diamantina/MG) for red ceramics production

Jayne Francielle Santana Gurgel ¹, Stéffany Carolina Rocha Xavier ¹,
Igor Brumano Coelho Amaral ², Amanda Dias Araújo ³, Arlete Barbosa dos Reis ⁴

¹ Bacharelado em Ciência e Tecnologia. ICET/UFVJM, CEP: 39803-371, Teófilo Otoni, MG, Brasil.

² Bacharelado em Ciência e Tecnologia. ICT/UFVJM, CEP: 39100-000, Diamantina, MG, Brasil.

³ Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG), CEP: 39100-000, Diamantina, MG, Brasil.

⁴ Engenharia Química. ICT/UFVJM, CEP: 39100-000, Diamantina, MG, Brasil.

e-mail: jaynefrancielle@hotmail.com, steffanycarolina1@hotmail.com, igor.brumano@ict.ufvjm.edu.br, a-dias@live.com, arlete.reis@ict.ufvjm.edu.br

RESUMO

A indústria extrativa mineral é responsável pela produção de rejeitos em larga escala que, quando descartados de forma incorreta, podem gerar danos à natureza e à saúde pública. Sabendo disso, estudou-se a viabilidade da adição de rejeitos de garimpo na produção de cerâmica vermelha, buscando-se uma alternativa sustentável para a utilização e descarte desses rejeitos. O rejeito usado para o trabalho foi extraído de três bacias de retenção na região do garimpo Areinha, em Diamantina-MG, e trata-se de lama composta basicamente por silicatos e metais pesados. Objetivou-se fabricar corpos de prova de cerâmica estrutural com adição desses rejeitos e avaliar suas propriedades tecnológicas, tais como: retração linear, perda ao fogo, estudo da cor, absorção de água, porosidade aparente e resistência à compressão simples. Em comparação aos corpos de prova produzidos com solo puro, os resultados apontaram importantes melhorias nessas propriedades com adição dos rejeitos, diminuindo a absorção de água e aumentando a resistência à compressão, apontando a viabilidade da sua utilização para incorporação dos rejeitos de mineração e estabilização de metais pesados.

Palavras-chave: rejeito, cerâmica, argila, mineração, reaproveitamento.

ABSTRACT

The mineral extractive industry is responsible for the production of large-scale waste which, when discarded incorrectly, can cause damage to nature and public health. Knowing this, the feasibility of the addition of tailings was studied in the production of red ceramics, seeking a sustainable alternative for the use and disposal of these wastes. The residue used for the work was extracted from three holding basins in the region of the Areinha gold mining, in Diamantina-MG, and is a mud composed of silicates and some heavy metals. The objective of this study was to manufacture structural test specimens with addition of these tailings and to evaluate their technological properties, such as: linear retraction, loss on ignition, color study, water absorption, apparent porosity and compressive strength. In comparison to the test specimens produced with pure soil, the results pointed out important improvements in these properties with addition of the tailings, reducing the water absorption and increasing the compressive strength, pointing out the viability of its use for the incorporation of the mining tailings and stabilization of heavy metals.

Keywords: tailings, ceramics, clay, mining, reuse.

1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade que se iniciou no Brasil juntamente com sua descoberta, iniciando com a exploração de ouro e pedras preciosas, principalmente o diamante, hoje com foco no petróleo e minério de ferro, sendo esse setor industrial de grande importância econômica para o país. Entretanto, essa atividade produz um grande volume de rejeitos, podendo causar grandes danos à fauna, à flora e à saúde humana. Na região do Arraial do Tijuco, que se tornou a cidade de Diamantina, em Minas Gerais, foi descoberto grande volume de diamante aluvial por volta do ano de 1700, sendo intensificada a exploração e o controle de Portugal, com a imposição de altas taxas sobre a mineração [1]. Atualmente, mesmo após dois séculos de exploração, ainda há intenso trabalho de dragagem e mineração dos rios em torno de Diamantina, exigindo trabalho manual pesado por parte dos garimpeiros (mineradores independentes). Esse tipo de mineração é muito agressivo aos rios por estar relacionado à extração de diamantes aluviais, cristais livres diretamente no leito dos rios ou sedimentados, exigindo a dragagem e peneiramento de sedimentos, muitas vezes com utilização de metais pesados.

Dessa forma, o rejeito do garimpo em Diamantina tem despertado a preocupação quanto a seu descarte, sobretudo pela composição química e dano ao Rio Jequitinhonha, principal rio na região, utilizado inclusive para abastecimento de cidades à jusante [2]. Com o objetivo de reduzir o volume dos rejeitos do Garimpo Areinha, localizado em Diamantina/MG, foi estudado o coprocessamento do rejeito junto a solo argiloso para produção de cerâmica vermelha. Os rejeitos são definidos como o remanescente de atividades humanas, classificado muitas vezes como sem uso ou sem valor, sobretudo por falta de conhecimento de suas propriedades físicas e químicas [3]. Há diversos estudos com a utilização de cerâmica estrutural com incorporação de resíduos de várias indústrias, como lodo têxtil [4], lodo de estações de tratamento de água [5], desperdício de pedras preciosas [6], quartzitos [7] e basaltos [8], cinzas de resíduos sólidos [9] e outros.

A cerâmica estrutural é um material de tom avermelhado, sendo amplamente utilizada na construção civil sob a forma de tijolos, telhas e blocos. A cerâmica geralmente é obtida após o tratamento térmico em altas temperaturas de solo argiloso plástico, podendo ser misturado a outros componentes em diferentes teores. Como componente a ser adicionado na massa cerâmica, o rejeito do Garimpo Areinha foi considerado como matéria-prima pela se tratar de um solo arenoso com alto teor de quartzo e de alguns metais pesados prejudiciais à fauna e saúde humana (como cobre, níquel, chumbo e zinco) [2], que são estabilizados sob a forma de material cerâmico após o tratamento térmico. Além da expectativa de estabilização desses metais pesados [3, 10, 11, 12], é importante o atendimento às normas para garantia da qualidade dos produtos: retração linear, absorção de água, porosidade aparente, coloração e resistência à compressão simples.

No processo de sinterização, queima dos corpos de prova em temperaturas elevadas, ocorre a perda de massa do material devido algumas substâncias volatizarem. Para o cálculo dessa perda de massa utilizaram-se as massas dos corpos de prova após o processo de secagem em estufa a 110°C e após o processo de sinterização em mufla a 950°C. De maneira análoga, o material também passa comumente por uma retração a partir das variações dimensionais dos corpos de provas após os processos térmicos aos quais são submetidos, dividida em três tipos: retração linear de secagem (RLs), retração linear de queima (RLq) e retração linear total (RLt). A retração de secagem não deve ultrapassar o limite máximo de 6% [13], enquanto a retração de queima e retração total apresentam limites de 6% e 12%, respectivamente [13, 14]. O controle da retração linear sofrida pelos materiais cerâmicos durante os processos térmicos é de extrema importância, pois, a qualidade do produto se relaciona diretamente com as propriedades dimensionais da peça, consequências das etapas de produção, com início na moldagem e finalização após o processo de queima [15]. Além disso, há a necessidade de garantir produtos com mesmas características dimensionais, como disposto na NBR 15270 e NBR 15310 [15, 16] para blocos e telhas cerâmicos.

A absorção de água corresponde, em porcentagem, à massa de água absorvida pelos corpos de prova após o processo de sinterização. Após a queima, os corpos de prova são pesados para o peso seco e, após imersão em água destilada por 24 h, é removido o excesso de água com tecido úmido e são pesados novamente para verificar a porcentagem de absorção de água. Essa avaliação é importante por estar relacionada à resistência final do produto, bem como à capacidade de difusão através do material. A NBR 15310 [16] especifica o percentual máximo de 20% de absorção para telhas cerâmicas, e a NBR 15270 [15], a faixa de 8 a 22% para blocos cerâmicos. Relacionada à absorção de água, a porosidade aparente é definida como o volume percentual de poros abertos existentes no material cerâmico, e tende a se reduzir com o aumento da temperatura de sinterização, melhorando a resistência do material [16]. Por outro lado, o material cerâmico pode não conter grande volume de poros abertos aparentes, mas possuir um interior poroso, o que pode comprometer as propriedades mecânicas do material.

A coloração da cerâmica estrutural é um atributo importante na fabricação de telhas e tijolos, não apenas por aspectos estéticos, mas também como indicativo de um bom processo de queima. As peças cerâmicas apresentam essa tonalidade devido à presença de óxidos e hidróxidos de ferro na amostra de solo, sendo que a cor pode variar de acordo com as características físicas e químicas do solo [17].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No trabalho de Araújo *et al.* (2017) [2] foram coletadas amostras ao longo da área de estudo destacada na Figura 1, localizada dentro da poligonal da COOPERGADI (Cooperativa Regional de Garimpeiros de Diamantina), região conhecida como Garimpo Areinha. Destes pontos, amostras de quatro deles, especificamente aquelas coletadas em bacias de retenção de rejeitos, foram cedidas para utilização neste trabalho. No entanto, do primeiro deles o volume pequeno de amostra não possibilitou sua utilização, sendo utilizados três amostras, que aqui foram renomeadas para facilitar o entendimento deste trabalho: Rejeito A (Ponto 2 Extra), Rejeito B (Ponto 3 Extra) e Rejeito C (Ponto 7 Extra) [2]. A coleta foi realizada em março de 2016, com a quantidade média de 1 kg em cada ponto, coletada manualmente com coletor de aço inox, acondicionado em sacos plásticos e conservados à temperatura de 4 °C.

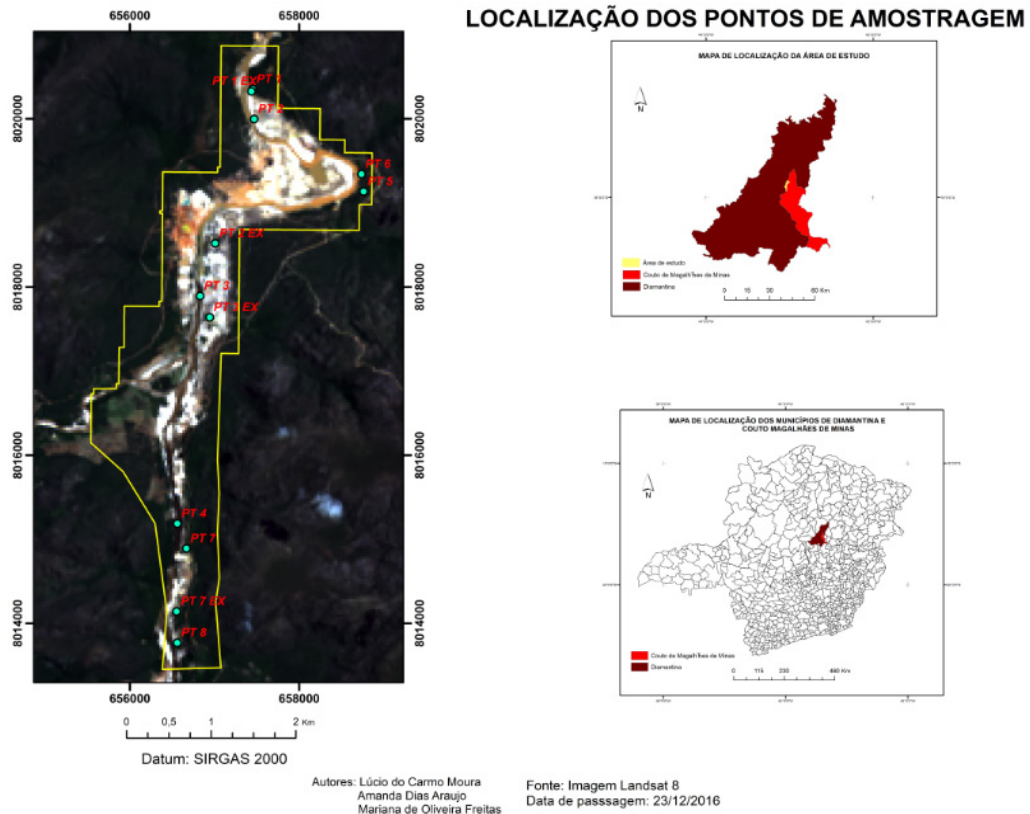


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo e dos pontos de amostragem na região do garimpo Areinha, em Diamantina/MG [2]

Para a formulação das massas cerâmicas, devido à baixa quantidade de material disponível, o teor máximo das três amostras dos rejeitos foi definido como 20%, sendo testados também a metade (10%) e a quarta parte (5%). Esses teores foram adicionados à amostra de solo oriunda das jazidas da olaria Cerâmica Rio Paraúna, localizada em Presidente Juscelino/MG, a cerca de 90 km de Diamantina/MG. O solo foi coletado na olaria diretamente na área de produção da cerâmica, após a etapa de moagem, garantindo a uniformidade das amostras e correspondência exata à matéria-prima utilizada na fábrica, armazenados em sacos dois sacos de 20 kg. A Figura 2 apresenta o solo coletado na olaria e os rejeitos coletados no garimpo Areinha.



Figura 2: Amostras de solo e rejeitos utilizados

As matérias-primas foram destorroadas e secas em estufa LUCA-82 a 40 °C durante 24 h. Após isso, as amostras foram caracterizadas quanto à granulometria, por peneiramento e sedimentação, composição química, por fluorescência de raios-X, e mineralógica, por difração de raios-X. A análise granulométrica foi feita inicialmente com a utilização de um conjunto de peneiras de 10 a 200 mesh, e posteriormente com a utilização do processo de sedimentação para separação da fração < 2 µm segundo a Lei de Stokes [18, 19]. A análise de composição química foi realizada nas amostras com diâmetro menor que 74 µm (200 mesh) no espectrômetro Shimadzu EDX-720, detectando elementos químicos com número atômico entre o sódio (Z = 11) e o urânio (Z = 92), no Laboratório Multiusuário LIPEMVALE/UFVJM. E as fases cristalinas foram identificadas por difratometria de raios-X do pó usando difratômetro Rigaku D/MAX Ultima Plus com varredura de 10 a 80° (2θ), com velocidade de 2°min⁻¹, tubo de cobre (λ = 1,541838 Å), tensão de 40 kV e corrente de 30 mA no Laboratório Multiuso de Microscopia Avançada LMMA/UFVJM.

Para confecção dos corpos de prova foram definidos os teores de 5, 10 e 20% em massa de cada amostra de rejeito, com exceção do Ponto B, pois não havia quantidade suficiente para produção de vários espécimes, sendo utilizado apenas em concentrações de 10 e 20%. Para garantir a repetitividade dos ensaios foram moldados quatro corpos de prova em cada um dos teores. O molde foi confeccionado em aço em formato cilíndrico de 3 cm de diâmetro e 12 cm de altura com fundo vazado. Para cada corpo de prova foram necessários 100 g da mistura de solo com os rejeitos, peneirados em tamis 35 mesh para uniformização granulométrica, com teor de umidade de 10% e prensagem realizada com prensa hidráulica manual (Standard 60TON) com força de intensidade 200kgf/cm² durante 3 minutos, resultando em corpos de prova com 6 cm de altura. As dimensões foram definidas seguindo normativa de corpos de prova cilíndricos [20], diminuindo a escala do ensaio e adaptando-o para materiais cerâmicos, uma vez que o objetivo foi comparar os resultados entre as formulações.

O tratamento térmico dos materiais cerâmicos é realizado em três etapas: secagem, queima ou sinterização e resfriamento. A secagem dos corpos de prova foi realizada em estufa LUCA-82 a 105 °C durante 12 h, a queima em mufla MAGNU'S com taxa de aquecimento de 6 °C/min até o patamar de 950 °C, mantido por 3 horas. O resfriamento, por sua vez, é realizado de maneira natural desligando-se a mufla e deixando-a fechada até atingir a temperatura ambiente.

Após a produção dos corpos de prova foram realizados os ensaios para caracterização dos materiais produzidos para avaliação da perda ao fogo, retração linear, cor, absorção de água, porosidade aparente e resistência à compressão axial. Os ensaios realizados no Laboratório de Operações Unitárias do curso de Engenharia Química/UFVJM foram a perda ao fogo, retração linear, cor, absorção de água e porosidade aparente. A perda ao fogo (PF) foi aferida com a realização da pesagem dos corpos de prova em balança analítica Shimadzu AUY220 com capacidade para 220 g com precisão de 0,1 mg após a secagem e após a queima, sendo representada pela diferença de massa entre as duas etapas. A dimensão linear foi medida com paquímetro digital com resolução de 0,01 mm após as etapas de moldagem, secagem e queima, resultando na retração linear de secagem (RLs), de queima (RLq) e total (RL). A coloração dos corpos de prova foi analisada com a utilização da Carta de Munsell de acordo com a nomenclatura, valor e croma [21]. A absorção de água (AA) foi analisada após a sinterização dos corpos de prova, sendo a diferença entre as massas dos corpos de prova secos e após a imersão em água destilada por 24 horas.

Por fim, a ruptura à compressão axial, realizada no Laboratório Tecnologia de Produtos Florestais/UFVJM, foi feita na máquina universal EMIC 100 kN, com velocidade de análise de 1 mm/min. O ensaio de compressão foi realizado adaptando-se o ensaio realizado em argamassas de cimento Portland [20] para corpos de prova cilíndricos para comparação dos corpos de prova entre si, e consiste em um esforço axial distribuído uniformemente sobre o corpo de prova a fim de conhecer seu limite de resistência a compressão, o qual é determinado pela carga máxima dividida pela seção do corpo de prova. Após os ensaios, a superfície de ruptura foi revestida com ouro para avaliação por microscopia eletrônica de varredura (MEV), identificando a porosidade superficial e ocorrência de microfissuras. Utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura Shimadzu, modelo SSX-550, no Laboratório de Difração de Raios-X do Departamento de Química da UFVJM, com aceleração eletrônica entre 20 kV.

3. RESULTADOS

Para conhecimento da granulometria das matérias-primas, a faixa mais importante para a produção de cerâmica estrutural é a faixa que representa o teor de argila nas amostras ($< 2 \mu\text{m}$) [22, 23]. Portanto, o maior teor de argila foi encontrado na amostra de solo da olaria, com 22,89%, o Ponto B e o Ponto C apresentaram teores mais baixos, de 12,60% e 9,05% respectivamente, e a amostra do Ponto A apresentou uma quantidade de argila muito baixa em sua composição, apenas 1,85%.

O solo utilizado nas indústrias brasileiras para produção de cerâmica vermelha é, geralmente, escolhido empiricamente, sem que sejam realizados estudos de caracterização e classificação, o que dificulta a uniformidade de qualidade do produto [17]. Neste trabalho, a primeira caracterização foi realizada com o processo de sedimentação para separação do teor de argila nas amostras. O teor desejado de argila deve estar entre 12 e 30% [28] ou 20 e 30% [26] para produção de tijolos furados comuns, materiais produzidos pela olaria estudada, uma vez que o decréscimo do tamanho das partículas tende a diminuir a absorção de água dos produtos [27]. Dessa forma, matematicamente, a formulação A20, devido ao baixo teor de argila na amostra do Ponto A, é a que possui menor teor de argila (18,7%), no entanto permanece na faixa indicada por EKOSSE e MULABA-BAFIBIANDI [25]. Para o solo da olaria o Limite de Plasticidade encontrado foi de 22,1%.

A composição química das matérias-primas analisada por FRX para o solo puro e os rejeitos A, B e C é apresentada na Tabela 1. Alguns metais pesados encontrados nessa análise, como o zinco, cobre, prata e ouro, enfatizam importância de se destinar este rejeito em um material inerte, no qual os metais não terão interação com o ambiente e com os usuários. Araújo *et al.* (2017) analisaram em seu trabalho a concentração de cada metal pesado identificado em mg/kg de resíduo, apontando o teor de zinco, cádmio, ouro e prata dentro dos limites indicados pelo CONAMA n° 344/04, e de cobre, chumbo e níquel acima dos limites estabelecidos.

Tabela 1: Composição química das matérias-primas medida por meio da técnica de Fluorescência de Raios-X

Componentes químicos	Concentrações (%)			
	Solo	Ponto A	Ponto B	PONTO C
SiO ₂	51,31	84,52	45,65	74,48
Al ₂ O ₃	36,96	7,35	29,07	15,12
K ₂ O	5,07	0,84	5,87	4,08
Fe ₂ O ₃	4,84	6,05	16,65	4,89
TiO ₂	1,20	0,75	1,92	1,20
CaO	0,46	0,25	0,11	-
ZnO	0,01	-	0,07	0,02
Cu\O	0,01	-	0,04	0,02
MnO	0,01	0,11	0,32	0,03
Ag ₂ O	0,01	0,07	-	-
Au ₂ O ₃	-	-	-	0,03
Outros	0,16	0,06	0,30	0,13

As três amostras de rejeito analisadas e a amostra de solo apresentaram composição química com alta concentração de sílica (45,65 a 84,52%), fator comprovado pela análise mineralógica que apontou teores elevados de quartzo (41,4 a 93,6). Por sua vez, os maiores teores de alumínio no solo e no rejeito do Ponto B indicam a presença de muita caulinita nessas amostras (36,6 e 50,3%, respectivamente). Por outro lado, alguns metais pesados foram identificados no solo e nos rejeitos, porém em teores baixos o suficiente para não oferecer riscos de contaminação [2, 28]. O teor de fundentes (Fe, Ti e K), sobretudo do ferro, responsável coloração avermelhada nas cerâmicas estruturais [11, 29], é maior no Ponto B (24,44%), no qual foram detectadas goethita e hematita (Tabela 2), e menor no Ponto A (7,64). A presença desses elementos contribui para densificação e formação da fase líquida na sinterização provocando diminuição da porosidade (Figura 6) e aumento da retração linear de queima (Figura 4) [30, 31, 32].

A análise da composição mineralógica das amostras das matérias-primas por DRX refinado pelo método de Rietveld aponta os Pontos A e C como possuidores do maior teor de quartzo, enquanto o Ponto B apresenta teor mais elevado de caulinita. Outros minerais componentes foram identificados em concentrações um pouco menores, conforme apresentado nos difratogramas da Figura 3 e na Tabela 2.

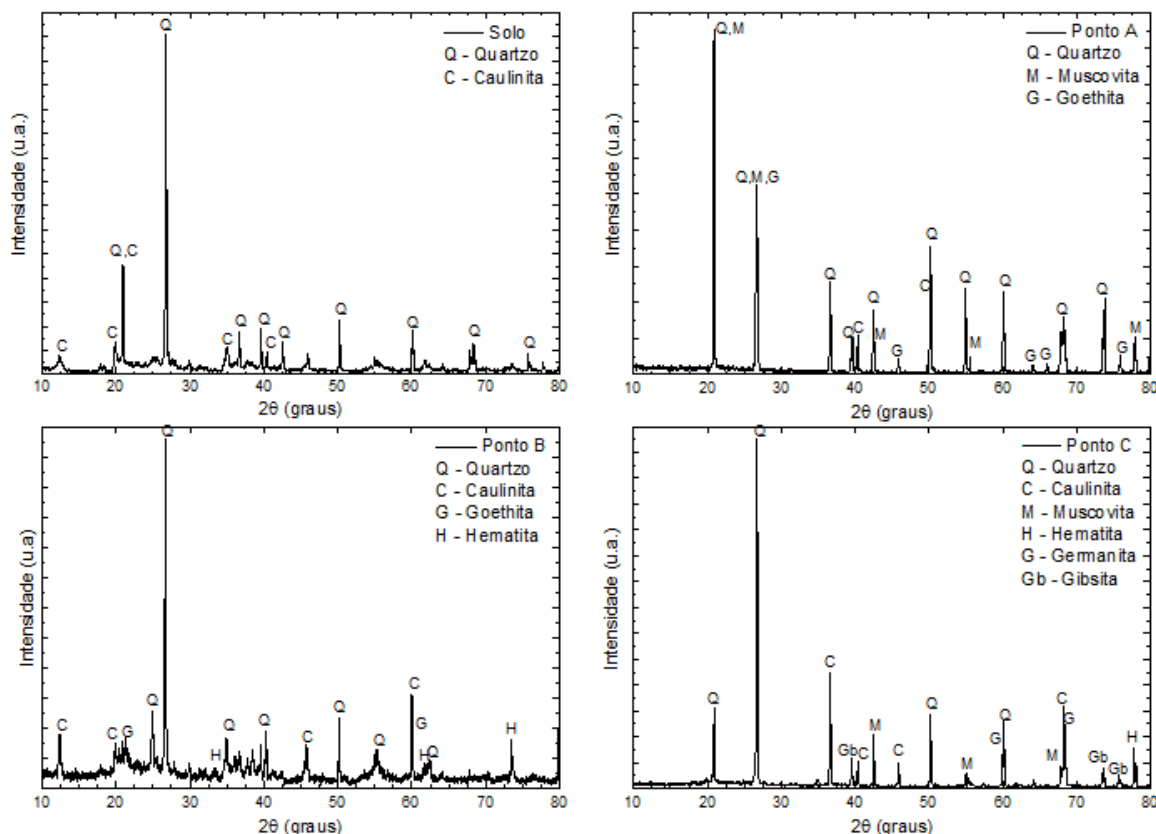


Figura 3: Difratoformas de Raios-X das matérias-primas

Tabela 2: Composição mineralógica das matérias-primas medida por meio da técnica de Difração de Raios-X e refinamento Rietveld

Minerais	Concentrações (% do cristalino)			
	Solo	Ponto A	Ponto B	PONTO C
Quartzo	63,4	93,6	41,4	93,0
Caulinita	36,6	-	50,3	3,6
Muscovita	-	5,6	-	1,1
Goethita	-	0,8	5,2	-
Hematita	-	-	3,1	0,3
Germanita	-	-	-	3,1
Gibsita	-	-	-	2,1
Amorfo	12,45	7,34	15,66	6,39
Chi ² ¹	4,3	4,6	4,5	4,7

Notas: ¹ Chi² – Parâmetro estatístico do refinamento Rietveld.

De acordo com as análises mineralógicas, o quartzo é o mineral mais abundante nas matérias-primas, com exceção do rejeito do Ponto B (41,4%), e proporciona melhorias quanto às propriedades mecânicas de resistência [33, 34]. Nas amostras de solo e dos Pontos A, B e C foi encontrado 36,6%, 0,0%, 50,3% e 3,6% de caulinita, respectivamente, segundo constituinte mais expressivo, com exceção do Ponto A. Esse teor de caulinita contribui para a melhoria das propriedades térmicas e mecânicas das cerâmicas [35], por outro lado, contribui significativamente para o encolhimento linear de queima das composições [36], como visto na Figura 4, na qual B10 e B20 apresentam os maiores valores de Rlq.

Após a dosagem das formulações conforme os teores de rejeito e a realização dos processos de moldagem e trata-

mento térmico, foram obtidos os resultados das análises das propriedades tecnológicas dos corpos de prova. Na Figura 4 é possível observar a variação da retração linear de secagem, de queima e total em relação às concentrações de cada um dos rejeitos utilizados.

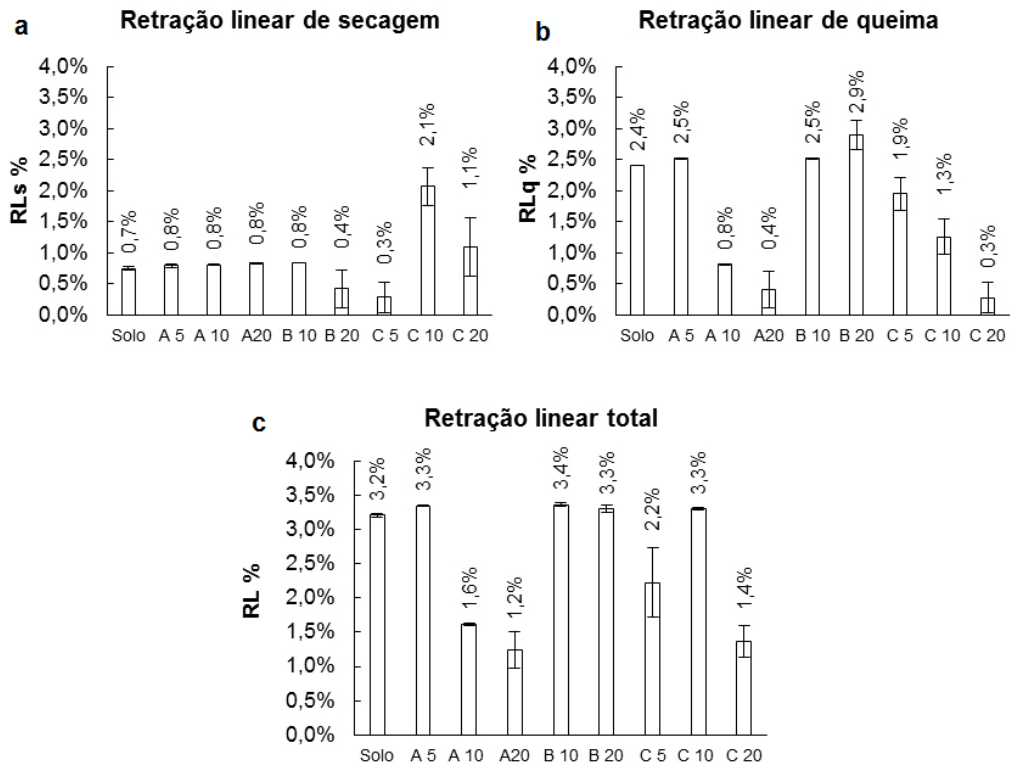


Figura 4: Retração linear dos corpos de prova produzidos com diferentes teores de rejeito (a) retração de secagem, (b) retração de queima e (c) retração total

Notas: Solo - corpos de prova produzidos apenas com solo; A5, A10, A20 - corpos de prova produzidos com 5, 10 e 20% do rejeito A; B10, B20 - corpos de prova produzidos com 10 e 20% do rejeito B; C5, C10, C20 - corpos de prova produzidos com 5, 10 e 20% do rejeito C.

Com relação às propriedades tecnológicas dos corpos de prova, pôde-se observar a melhoria em sua maioria com a adição dos rejeitos. A retração linear, de maneira geral, apresentou-se em baixos níveis indicando que o encolhimento dos corpos de prova está dentro do limite indicado na literatura [13, 14]. Os corpos de prova com rejeito dos Pontos A e C, com maior teor de quartzo, os que apresentaram menor retração na queima [3, 36].

Por possuírem água e matéria orgânica em sua composição e ao serem expostos a altas temperaturas durante o processo de sinterização, as peças cerâmicas perdem massa devido à liberação da umidade, água de hidratação, produtos voláteis da queima de matéria orgânica, fazendo com que a peça sofra alterações em seu peso e dimensões [24]. A avaliação da perda ao fogo é de suma importância para a padronização do material produzido, pois grandes perdas de massa podem fazer com que o produto não atenda às especificações dimensionais estabelecidas, podendo afetar na qualidade do produto. Na Figura 5 são apontadas as variações médias de perda ao fogo para os corpos de prova produzidos com as diferentes concentrações de rejeito. Nota-se que, com exceção do rejeito B, a perda ao fogo se reduz ao serem adicionados os rejeitos nas formulações, o que indica que os rejeitos possuem baixo teor de matéria orgânica e água higroscópica e estrutural, contribuindo para a diminuição da perda de massa na queima e, comumente, diminuição da porosidade.

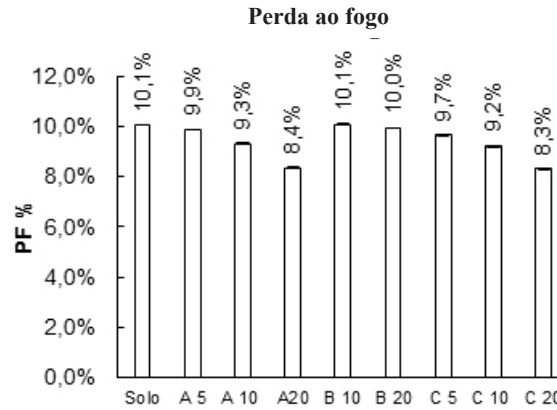


Figura 5: Perda ao fogo dos corpos de prova produzidos com diferentes teores de rejeito

Notas: Solo - corpos de prova produzidos apenas com solo; A5, A10, A20 - corpos de prova produzidos com 5, 10 e 20% do rejeito A; B10, B20 - corpos de prova produzidos com 10 e 20% do rejeito B; C5, C10, C20 - corpos de prova produzidos com 5, 10 e 20% do rejeito C.

A perda ao fogo dos materiais variou entre 8,3% e 10,1%, diminuindo à medida que o teor de rejeito foi aumentado, indicando menor teor de matéria orgânica e de água adsorvida [17, 24, 31].

Os resultados de absorção de água para os corpos de prova variaram entre 12,8% e 15,7% e os valores de porosidade aparente, entre 18,2% e 20,7% (Figura 6). Além disso, os resultados de absorção indicam que o corpo de prova tem uma baixa porosidade, pois a ausência de poros faz com que a absorção de água seja reduzida. Uma baixa porosidade pode indicar que o material tem uma maior resistência mecânica e está, geralmente, associada a uma menor perda ao fogo.

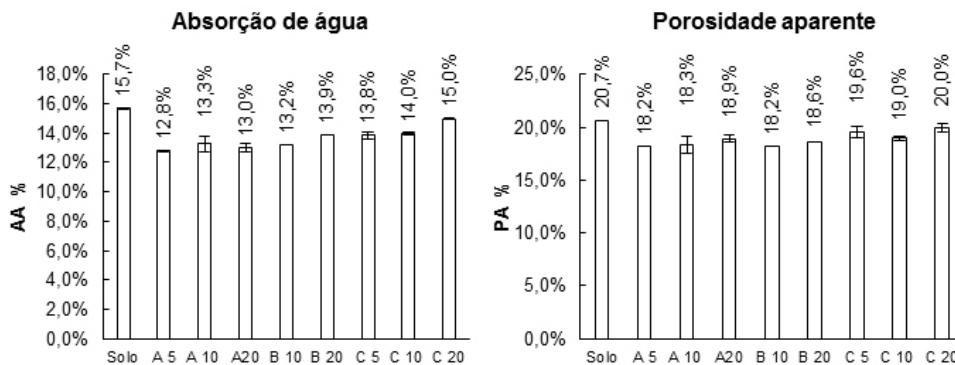


Figura 6: Absorção de água e porosidade aparente dos corpos de prova produzidos com diferentes teores de rejeito

Notas: Solo - corpos de prova produzidos apenas com solo; A5, A10, A20 - corpos de prova produzidos com 5, 10 e 20% do rejeito A; B10, B20 - corpos de prova produzidos com 10 e 20% do rejeito B; C5, C10, C20 - corpos de prova produzidos com 5, 10 e 20% do rejeito C.

A porosidade aparente manteve-se abaixo do limite máximo de 20% indicado pela literatura, sendo menor nos corpos de prova que apresentaram maior teor de fundentes [30, 31, 32]. A absorção de água nos corpos de prova com adição de rejeito apresentou os valores mais baixos, podendo estar relacionado à densificação ocasionada ao maior teor de fundentes e de quartzo nessas amostras [30, 31, 32], nenhum corpo de prova ultrapassou os limites para telhas (menor que 20%) e blocos cerâmicos (8 a 22%) [15, 16]. A relação entre a porosidade aparente e a absorção de água, evidenciada pela Figura 7, é direta, uma vez que o aumento da porosidade nas peças acarreta o aumento da absorção de água.

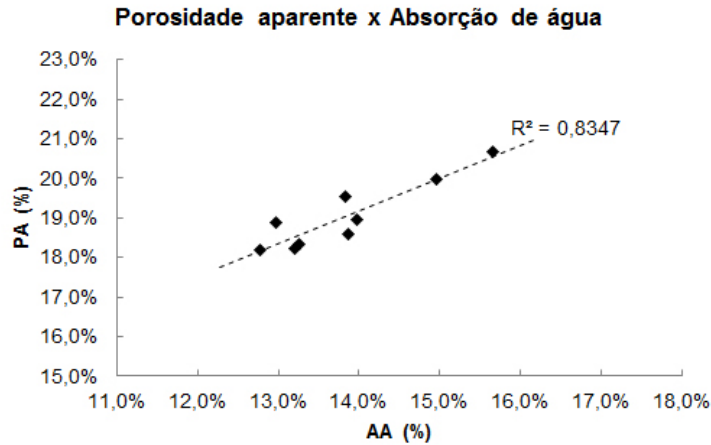


Figura 7: Relação linear entre Porosidade Aparente e Absorção de Água

Com relação à coloração, a adição dos rejeitos não produziu alteração significativa na tonalidade da cerâmica, sendo todos os corpos de prova classificados no diagrama de Munsell como amarelo avermelhados (2.5 YR 6/8), como visto na Figura 8.

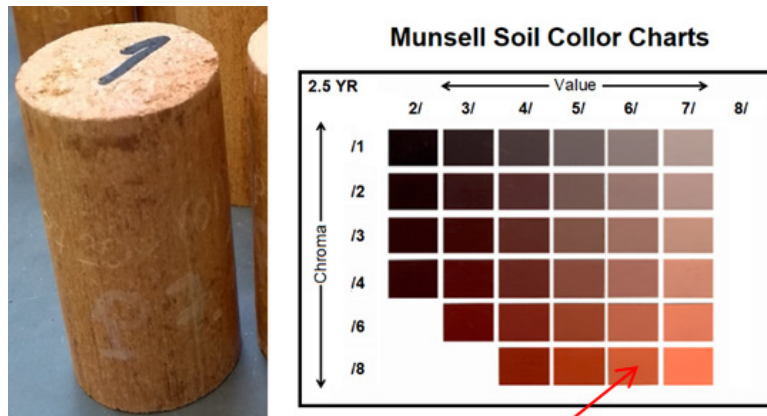


Figura 8: Esquema com o diagrama de Munsell e uma amostra de corpo de prova

Após a realização dos ensaios não destrutivos, os corpos de prova foram rompidos à compressão axial para verificação da resistência à compressão, calculada em função da área da superfície dos corpos de prova, os resultados comparativos são mostrados na Figura 9.

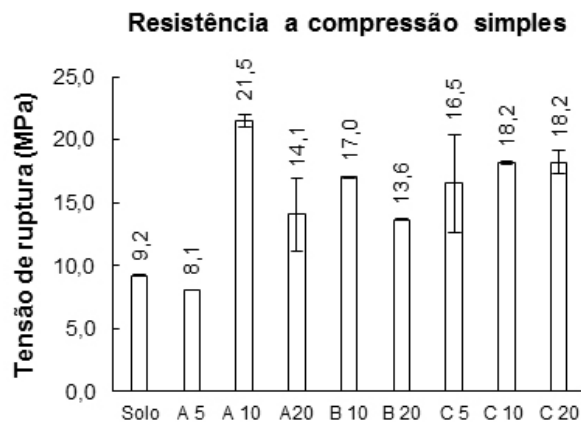


Figura 9: Variação da resistência à compressão dos corpos de prova produzidos com diferentes rejeitos em teores variados

Notas: Solo - corpos de prova produzidos apenas com solo; A5, A10, A20 - corpos de prova produzidos com 5, 10 e 20% do rejeito A; B10, B20 - corpos de prova produzidos com 10 e 20% do rejeito B; C5, C10, C20 - corpos de prova produzidos com 5, 10 e 20% do rejeito C.

Os corpos de prova com a adição de 5% do rejeito do Ponto A apresentaram resistência à compressão menor que o corpo de prova sem rejeito, mas apresentaram aumento da resistência em teores de 10 e 20%. De maneira análoga, os corpos de prova com adição dos rejeitos dos Pontos B e C apresentaram aumento da resistência à compressão, fato que pode ser explicado pelo aumento do teor de quartzo nos Pontos A e C (Tabela 2) [33, 34] e, no Ponto B, pela maior densificação provocada pelo aumento do teor de fundentes e caulinita na mistura [30, 31, 32, 35].

Por fim, foram observadas as microestruturas de superfície de amostras superficiais dos corpos de prova com a composição de 0, 5, 10 e 20%, analisadas por microscopia eletrônica de varredura. Na Figura 10 apresentam-se as micrografias das superfícies de fratura de um corpo de prova produzido com a amostra de solo puro com ampliação de 500 e 1000 vezes, pode-se observar a presença de alguns poros e microfissuras. Na Figura 11 mostram-se as superfícies de corpos de prova produzidos com 5, 10 e 20% do rejeito do Ponto A, essas imagens revelam um material com textura ligeiramente rugosa, com maior presença de poros na Figura 11c. Nas Figuras 12 e 13 são apresentadas as micrografias de superfície dos corpos de prova com adição de rejeito dos pontos B e C, respectivamente, observam-se materiais pouco porosos e pouco rugosos, com maior densificação e com perfis semelhantes.

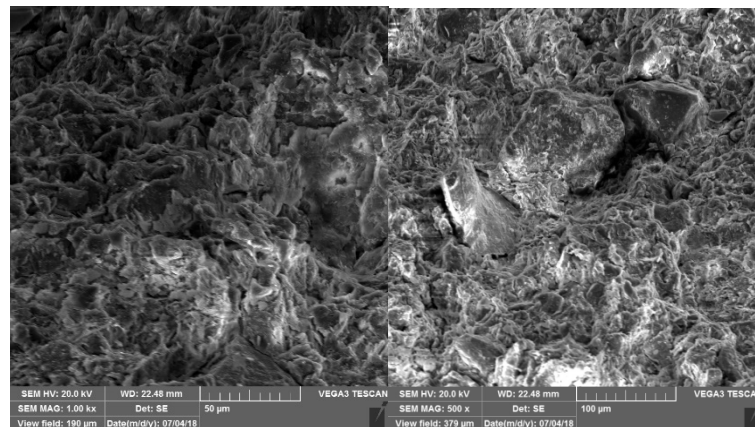


Figura 10: Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura de um corpo de prova produzido com a amostra de solo puro com aumento de 500 e 1.000 vezes

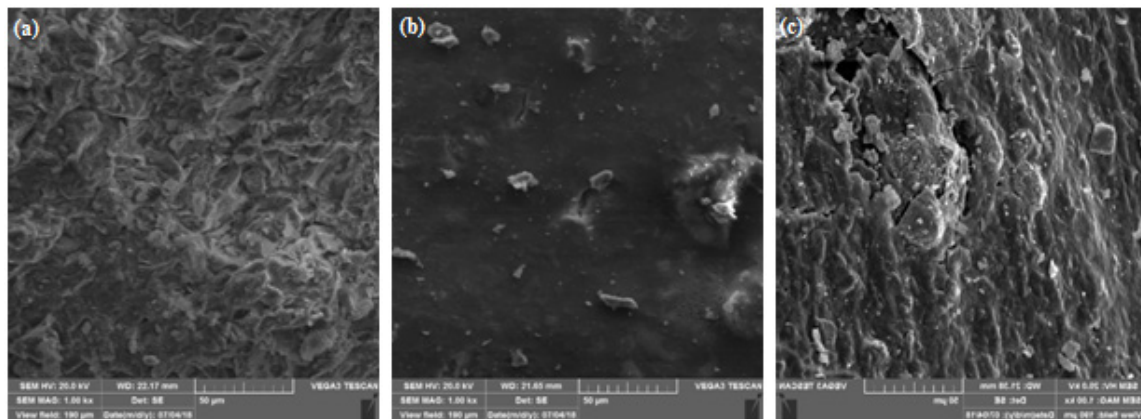


Figura 11: Microscopia eletrônica de varredura da superfície de corpos de prova produzidos com adição do rejeito coletado no Ponto A com aumento de 1.000 vezes nas porcentagens (a) 5%, (b) 10% e (c) 20%

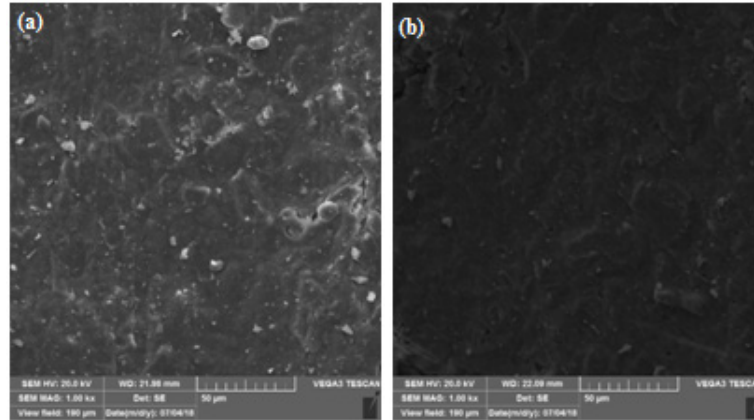


Figura 12: Microscopia eletrônica de varredura da superfície de corpos de prova produzidos com adição do rejeito coletado no Ponto B com aumento de 1.000 vezes nas porcentagens (a) 10% e (b) 20%

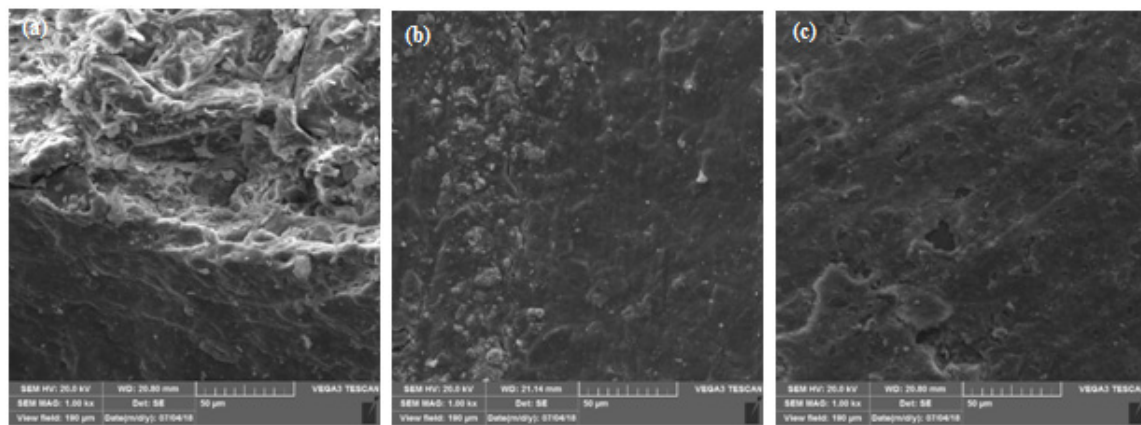


Figura 13: Microscopia eletrônica de varredura da superfície de corpos de prova produzidos com adição do rejeito coletado no Ponto C com aumento de 1.000 vezes nas porcentagens (a) 5%, (b) 10% e (c) 20%

4. CONCLUSÕES

Com base nos estudos realizados, o aproveitamento de rejeitos de garimpo na composição de materiais cerâmicos contribui de maneira significativa na diminuição dos impactos ambientais e sociais causados pelo descarte inadequado desses rejeitos na região. Apesar disso, a estabilização dos poluentes, sobretudo dos metais pesados, é muito vantajosa, devendo ser comprovada se há incorporação na fase vítrea do material e inibição da mobilidade desses componentes. Por outro lado, as propriedades físicas e mecânicas dos corpos de provas produzidos com rejeito foram, de maneira geral, melhoradas quando comparadas aos corpos de prova produzidos sem adição de rejeito. Indica-se que sejam realizadas novas coletas nas bacias de retenção e extrusão de cerâmica padronizada para verificar o atendimento às normas brasileiras de cerâmica estrutural. Por fim, destaca-se a importância da realização de pesquisas em escala industrial e com teores mais elevados desses rejeitos, de maneira a incentivar as indústrias cerâmicas próximas à região do garimpo Areinha quanto à utilização desse material, possibilitando uma limpeza e recuperação da área.

5. AGRADECIMENTOS

Ao LMMA fomentado pela FAPEMIG (CEX-112-10), SECTES/MG e RQ-MG (FAPEMIG: CEX-RED-00010-14), ao GEPAEQ - Grupo de Estudos e Pesquisas Aplicadas à Engenharia Química, ao Laboratório Saúde Sociedade Ambiente, ao LIPEMVALE/UFVJM e ao Laboratório Tecnologia de Produtos Florestais/UFVJM.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] SVISERO, D. P., SHIGLEY, J. E.; WELDON, R., “Brazilian diamonds: a historical and recent perspective”, *Gems & Gemology*, v. 53, n. 1, 2017.

- [2] ARAÚJO, A. D., FREITAS, M. O., MOURA, L. C., *et al.* “Avaliação geoquímica ambiental do garimpo areinha: estudo da concentração e distribuição de metais pesados nos sedimentos e os danos à saúde humana”, *Hygeia Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde*, v. 13, n. 26, pp. 98-113, Dez. 2017.
- [3] BIFF, S., SILVA, M. R., “Uso do resíduo sólido proveniente do processo de beneficiamento de areia na indústria de revestimentos cerâmicos e sua influência nas propriedades físicas dos produtos cerâmicos”, *Revista Matéria*, v. 21, n. 4, pp. 853-865, Dez. 2016.
- [4] ALMEIDA, P.H.S.; FRANCO, J.M.; TAVARES, C. R. G, “Influência do tipo de argila no processo de solidificação/estabilização de lodo têxtil”, *Cerâmica*, v. 61, n. 357, pp. 137-144. 2015.
- [5] AREIAS, I.O.R., VIEIRA, C.M.F., MANHÃES, R.S., *et al.* “Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) em cerâmica vermelha”, *Cerâmica*, v. 63, n. 367, pp. 343-349. 2018.
- [6] BRUXEL, F. R., OLIVEIRA, E.C., STULP, S., *et al.*, “Study of the gem residue (sludge) addition in bulk red ceramics”, *Cerâmica*, v. 58, n. 346, pp. 211-215. 2012.
- [7] CARREIRO, M.E.A., SANTOS, R.C., SILVA, V.J., *et al.*, “Resíduo de quartzito-matéria-prima alternativa para uso em massas de cerâmica estrutural”, *Cerâmica*, v. 62, n. 362, pp. 170-178. 2016.
- [8] MENDES, T.M., MORALES, G., REIS, P.J., “Use of basaltic waste as red ceramic raw material”, *Cerâmica*, v. 62, n. 362, pp. 157-162. 2016.
- [9] COUTINHO, N.C., VIEIRA, C.M.F., “Caracterização e incorporação de cinza de resíduo sólido urbano em cerâmica vermelha”, *Cerâmica*, v. 62, n. 363, pp. 249-255. 2016.
- [10] VILLAREJO, L. P., MARTÍNEZ, S. M., HURTADO, B. C., QUESADA, D. E., NIETO, C. U., SOTO, P. J. S., “Valorization and inertization of galvanic sludge waste in clay bricks”, *Applied Clay Science*, v. 105-106, pp. 89-99, Mar. 2015.
- [11] CORONADO, M., SEGADÃES, A. M., ANDRÉS, A., “Using mixture design of experiments to assess the environmental impact of clay-based structural ceramics containing foundry wastes”, *Journal of Hazardous Materials*, v. 299, pp. 529-539, Dec. 2015.
- [12] MAGALHÃES, J. M., SILVA, J. E., CASTRO, F. P., *et al.* “Effect of experimental variables on the inertization of galvanic sludges in clay-based Ceramics”, *Journal of Hazardous Materials*, v. 106, pp. 139-147, Jan. 2004.
- [13] INSTITUTO DE PESQUISAS TÉCNICAS – IPT, *Ensaio de argila visando a utilização em cerâmica vermelha*, São Paulo, 1985.
- [14] SANTOS, P. S., *Ciência e tecnologia de argilas*, 2 ed., São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1989.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270: Componentes cerâmicos - Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação, Rio de Janeiro, 2005.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15310: Componentes cerâmicos - Telhas - Terminologia, requisitos e métodos de ensaio, Rio de Janeiro, 2005.
- [17] SAVAZZINI-REIS, A. *et al.*, “Characterization and Evaluation of Ceramic Properties with Spherical and Prismatic Samples of Clay Used in Red Ceramics”, *Materials Research*, v. 20, pp. 543-548, Nov. 2017.
- [18] CREMASCO, M. A., “Agitação e mistura”, In: *Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos*, Blucher, 2012.
- [19] EMBRAPA, *Manual de métodos de análise de solos*, 2 ed., Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2011.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2019.
- [21] MUNSELL SOIL COLOR COMPANY, *Munsell soil color chats*, Baltimore, Macbeth Division of Kollmorgen Corporation, 2009.
- [22] BOUSSEN, S., SGHAIER, D., CHAABANI, F. *et al.*, “Characteristics and industrial application of the Lower Cretaceous clay deposits (Bouhedma Formation), Southeast Tunisia: Potential use for the manufacturing of ceramic tiles and bricks”, *Applied Clay Science*, v. 123, pp. 210-221, Abr. 2016.
- [23] ABDELMALEK, B., REKIA, B., YUCEF, B. *et al.*, “Mineralogical characterization of Neogene clay areas from the Jijel basin for ceramic purposes (NE Algeria-Africa)”, *Applied Clay Science*, v. 136, pp. 176-183, 2017.
- [24] HE, H., YUE, Q., OI, Y. *et al.* “The effect of incorporation of red mud on the properties of clay ceramic bodies”. *Applied Clay Science*, v. 70, pp. 67-73, 2012.

- [25] EKOSSE, G. E.; MULABA-BAFIBIANDI, A. “Granulometric evaluation of continental bentonites and kaolin for ceramic applications”. *Journal of Applied Sciences*, v. 8, n. 6, pp. 1021-1027, 2008.
- [26] PRACIDELLI, S., MELCHIADES, F. G., “Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha”, *Cerâmica Industrial*, v. 2, n. 1/2, pp. 31-35, 1997.
- [27] ZONG, Y. B., CHEN, W. H., LIU, Y. X., *et al.*, “Influence of slag particle size on performance of ceramic bricks containing red clay and steel-making slag”, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, v. 127, n. 2, pp. 105-110, 2019.
- [28] SILVA, A.; CAVALCANTE, L. C. D., FABRIS, J. D. *et al.*, “Chemical, mineralogical and physical characteristics of a material accumulated on the river margin from mud flowing from the collapse of the iron ore tailings dam in Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brazil”, *Revista Espinhaço*, v. 5, n. 2, pp. 44-53, Mai. 2017.
- [29] DONDI, M., RAIMONDO, M., ZANELLI, C., “Clays and bodies for ceramic tiles: Reappraisal and technological classification”, *Applied Clay Science*, v. 96, pp. 91-109, 2014.
- [30] SANTOS, R. C.; SILVA, T. R.; NEVES, G. A. *et al.* “Interação entre características de argilas e parâmetros de processamento sobre propriedades tecnológicas de corpos cerâmicos”. *Cerâmica*, v. 63, n. 367, pp.361-368, 2017.
- [31] BRITO, I. P.; ALMEIDA, E. P.; NEVES, G. A.; *et al.* “Avaliação de novos depósitos de argilas do estado da Paraíba visando sua aplicação como matérias-primas cerâmicas”. *Cerâmica*, v. 61, n. 360, pp.391-398, 2015.
- [32] CÂMARA, A. P. C., MEDEIROS, L. C., MACEDO, D. A. *et al.*, “Caracterização Físico-mecânica e Ambiental de Cerâmica Estrutural com Imobilização do Íon Manganês”, *Cerâmica Industrial*, v. 18, n. 1, pp.39-42, 2013.
- [33] CARREIRO, M. E. A.; SANTOS, R. C.; SILVA, V. J.; *et al.* “Resíduo de quartzito - matéria-prima alternativa para uso em massas de cerâmica estrutural”. *Cerâmica*, v. 62, n. 362, pp.170-178, 2016.
- [34] SOLER, V. C., HOTZA, D., JUNIOR, A. N. *et al.*, “Effect of quartz particle size on the mechanical behaviour of porcelain tile subjected to different cooling rates”, *Journal of the European Ceramic Society*, v. 29, pp. 1039-1046, Abr. 2009.
- [35] SABURIT, A., GRACIA-TEN, J., ORTS, M. J. *et al.*, “Thermal conductivity of traditional ceramics Part II: Influence of mineralogical composition”, *Ceramics International*, v. 36, pp. 2017-2024, Set. 2010.
- [36] VIEIRA, C. M. F.; PINHEIRO, R. M. “Avaliação de argilas caulínicas de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha”. *Cerâmica*, v. 57, pp. 319-323, 2011.

ORCID

Jayne Francielle Santana Gurgel

<https://orcid.org/0000-0003-4084-4585>

Stéffany Carolina Rocha Xavier

<https://orcid.org/0000-0002-3506-0164>

Igor Brumano Coelho Amaral

<https://orcid.org/0000-0003-3580-0289>

Amanda Dias Araújo

<https://orcid.org/0000-0002-5899-9617>

Arlete Barbosa dos Reis

<http://orcid.org/0000-0002-0721-2810>