

Estudo da Aplicação de Resíduos Gerados pelo Setor Siderúrgico na Produção de Materiais Cerâmicos

**Sérgio Arnosti Jr.^{1*}, Patrícia Tolaine do Amaral¹, Cecília Bilatto¹,
Wesley Gonzaga Cavalcanti², Gustavo Ribeiro de Carvalho²**

¹Escola de Engenharia de Piracicaba (EEP), Piracicaba, SP, 13414-040, Brasil

²ArcelorMittal Brasil, Piracicaba, SP, 13414-040, 13412-010, Brasil

Resumo

O objetivo desse trabalho foi verificar a possibilidade de aplicação da Terra de Shredder (TSH) e da Terra de Sucata (TS), geradas em usinas semi-integradas do setor siderúrgico durante o processo de fabricação do aço, como matérias-primas na composição da massa para a produção de placas cerâmicas que podem ser utilizadas como revestimento de pisos e paredes. Para tanto, foram analisados os comportamentos dos materiais, assim como sua interação com dois aditivos, denominados nesse estudo como Argila A e Argila B. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios visando determinar a resistência mecânica à flexão, a retração linear e a absorção de água, e os resultados obtidos foram comparados com os valores estabelecidos em norma, desejáveis para placas cerâmicas. Existe um grande potencial para o uso das terras de sucata pela indústria cerâmica, pois as composições com 75% de terras de sucata (TSH + TS) e 25% de argilas proporcionaram cerâmicas que atendem aos valores normativos e àqueles encontrados na literatura, referentes ao módulo de ruptura à flexão ($R > 20$ MPa), à retração linear ($RL < 10\%$), e à absorção de água ($AA < 10\%$).

Palavras-chave: Terra de Shredder, Terra de Sucata, resíduos siderúrgicos, placas cerâmicas, resistência mecânica.

INTRODUÇÃO

A busca por maneiras de reduzir o impacto ambiental é essencial para as indústrias no cenário atual. É cada vez mais importante encontrar soluções para reduzir a interferência à natureza pela qual a produção industrial é responsável, assim como a geração de resíduos e rejeitos durante seus processos. Apesar de sua grande importância econômica, o setor siderúrgico é responsável por uma grande geração de resíduos durante sua produção. Porém, segundo a *World Steel Association* o setor conseguiu em 2024 converter 92,79% de seus resíduos sólidos em produtos ou coprodutos [1]. De acordo com o banco de dados da empresa ArcelorMittal em Piracicaba, no ano de 2024, mesmo com uma taxa de 79,3% de reciclagem, para cada tonelada de aço fabricada, 0,21 tonelada de resíduos fora produzida [2].

O aço pode ser reciclado infinitas vezes, portanto, muitas indústrias siderúrgicas (usinas semi-integradas) utilizam a sucata de ferro como matéria-prima para a fabricação de novos produtos. Contudo, para que isso seja possível, a sucata deve passar por um processo de beneficiamento, o qual é responsável pela geração de alguns tipos de resíduos, dentre os quais encontram-se a Terra de Sucata, gerada durante o peneiramento da sucata ferrosa, e a Terra de Shredder, originada no processo de trituração da sucata pelo equipamento usualmente denominado de Shredder na área industrial. Atualmente, ambos os resíduos são comumente destinados a aterros industriais.

A Terra de Sucata, segundo Siviero *et al*, é um material muito heterogêneo. De acordo com a caracterização física e química realizada pelos autores, a Terra de Sucata é composta principalmente por partículas de 2 a 4,75 mm (36,4%), sendo 10% do total de partículas com até 27 μ m, indicando a presença de silte e argila. O material possui pH de aproximadamente 6,43, teor de unidade 4,53% e massa específica igual a 2,25 g/cm³. Por Difração de Raios X (DRX) foram identificadas as fases SiO₂ (quartzo), Fe₂O₃ (hematita), CaCO₃ (calcita) e FeO (wustita). A análise de carbono mostrou baixo teor de matéria orgânica (aproximadamente 3%) e a análise morfológica/química identificou a predominância dos elementos O (45-60%), Fe (10-30%), Al (5-10%), Si (8-15%), Ca (5-6%), Zn (2-3%) e Mg (1-3%) [3].

Embora o triturador seja utilizado usualmente para trituração de veículos inservíveis, na indústria siderúrgica são trituradas sucatas provenientes dos mais diversos setores industriais, como o de eletrodomésticos, por exemplo, o que contribui de forma significativa para que o resíduo gerado após o processo seja também bastante heterogêneo.

Vermeulen *et al*, em revisão sobre resíduos provenientes do processamento de sucata em trituradores, constataram a heterogeneidade do material e encontraram, compilando as informações encontradas, a seguinte composição aproximada: 20 a 49% de plásticos (Polipropileno (PP), Poliuretano (PU), Policloreto de Vinila (PVC) e Acronitrila Butadieno e Estireno (ABS)), 3 a 38% de borracha e elastômeros, 4 a 45% de têxteis e outras fibras, 5 a 23% de metais residuais, 2 a 18% de vidro e 2 a 5% de outros materiais (papel, cortiça, terra, areia e poeira)[4]. O resíduo de trituração pode ainda ser dividido em fração leve (*light*

*sergioarnosti@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0000-6283-0104>

fluff), que representa cerca de 75% do total gerado e é composta majoritariamente pelos materiais mais leves e de baixa densidade, como espumas de poliuretano, tecidos, fibras, plásticos e borracha, e fração pesada (*heavy fluff*) que representa os 25% restantes e contém uma proporção maior de materiais densos, como vidro, finos metálicos, borracha pesada, solo e areia [4, 5]. A denominada Terra de Shredder corresponde a fração pesada (*heavy fluff*) do resíduo de trituração.

Pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de encontrar possíveis aplicações para tais resíduos, aproveitando e transformando-os em parte ou em sua totalidade em coprodutos, contribuindo de forma significativa para a economia circular. Técnicas alternativas, como recuperação de energia (incineração), recuperação termoquímica (pirólise/gaseificação) ou incorporação direta do resíduo de trituração em produtos são, portanto, necessárias para evitar ou pelo menos minimizar o envio para aterros [4, 5].

Mayyas *et al* investigaram a síntese de nanocerâmicas de nitreto de titânio (TiN) utilizando o resíduo de Shredder como agente redutor sustentável. O objetivo foi converter a fração plástica do resíduo, que se decompõe em carbono e gases redutores como o metano, em subprodutos de alto valor por meio da nitretação carbotérmica de óxido de titânio (TiO₂) em temperaturas de até 1550 °C. A pesquisa obteve nanocerâmicas com baixo teor de carbono e eficiência de conversão de 86% em apenas uma hora, permitindo o controle da morfologia do material para diversas aplicações industriais [6].

Figueiredo analisou a utilização da Terra de Shredder como componente de blocos cerâmicos, obtendo resultados satisfatórios para porções do resíduo com granulometria menor que 2 mm [7].

Rao *et al* estudaram a substituição parcial da areia natural por plásticos rígidos do resíduo de trituração (15% a 45% vol.). A 45% de substituição, obteve-se resistência à compressão de 36,79 MPa e à flexão de 6,06 MPa, atendendo a requisitos para pavimentação e concreto estrutural leve. A durabilidade após um ano mostrou menor perda de massa sob ataque ácido (43%) do que o controle (49%), devido à natureza inerte dos agregados plásticos. No entanto, a trabalhabilidade caiu 76% (*slump* de 40 mm) e o módulo de elasticidade reduziu 36% na substituição máxima [8].

Caetano estudou a aplicação do resíduo de trituração em matrizes de cimento Portland para a confecção de peças de concreto para pavimentação. Nessa pesquisa, o autor constatou a possibilidade de substituir entre 15% e 20% a argila por Terra de Shredder e com isso atingir os parâmetros necessários para a aplicação desejada [9].

Constatam-se importantes contribuições no sentido de destinar adequadamente o resíduo de Shredder, mesmo assim verifica-se a necessidade de um número maior de trabalhos visando diversificar as possíveis aplicações desse material devido a quantidade gerada e sua complexidade, principalmente no que concerne a fração pesada, Terra de Shredder. Quanto à Terra de Sucata, os trabalhos encontrados ainda se limitam a entender e caracterizar o material.

A partir das características químicas da Terra de Sucata e da Terra de Shredder, nota-se que existem semelhanças com materiais que são utilizados na indústria cerâmica, por apresentarem sílica e alumínio em suas composições, dentre outros óxidos interessantes. Assim, a aplicação de tais materiais nessa área poderia contribuir como alternativa para evitar o seu descarte em aterros e diminuir a exploração de recursos naturais não renováveis utilizados pela indústria cerâmica.

Desse modo, o objetivo desse trabalho foi verificar o potencial de utilização dos resíduos denominados Terra de Sucata e Terra de Shredder, provenientes do beneficiamento da sucata utilizada pela indústria siderúrgica para a produção de aço, como matérias-primas constituintes da massa cerâmica, visando a produção de placas cerâmicas que podem ser utilizadas como revestimento de pisos e paredes. Para tanto, testou-se a resistência mecânica à flexão, a retração linear e a absorção de água de corpos de prova produzidos com diferentes composições e temperaturas de queima.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dessa pesquisa foram utilizados como materiais para produção dos corpos de prova (CPs) os resíduos gerados pelos processos industriais da empresa ArcelorMittal. A Terra de Shredder (TSH) foi coletada na planta localizada na cidade de Iracemápolis-SP, e a Terra de Sucata (TS) foi coletada na planta de Piracicaba-SP. Também foram utilizados como matérias-primas constituintes da massa cerâmica formulada, materiais denominados aqui como “Argila A”, que é proveniente da Formação Corumbataí e que foi doada por uma indústria da região, e “Argila B”, a qual foi obtida comercialmente. As amostras das terras utilizadas no estudo foram coletadas por colaboradores da empresa devido a questões de segurança relacionadas ao acesso à área industrial onde os resíduos foram gerados.

Por se tratar de materiais pouco conhecidos, optou-se por realizar um estudo prévio exploratório com as terras de sucata. No início foram produzidos CPs com as terras como único material e foram realizados testes de prensagem e de resistência à ruptura à flexão pré e pós queima, com o intuito de estabelecer as condições de granulometria, umidade e temperatura de queima. Dessa forma foi possível estabelecer se as terras de sucata deveriam passar por algum processo de beneficiamento e se poderiam ser usadas separadas, juntas ou se haveria a necessidade de comporem com as Argilas A ou B. As Argilas A e B foram escolhidas por serem matérias-primas tradicionais utilizadas pela indústria cerâmica e que normalmente compõem massas de boa qualidade quanto a conformação e características do produto final. As denominações exatas ou nomes comerciais das argilas foram omitidos por questões de sigilo.

As propriedades físicas e químicas dos materiais foram determinadas a partir de ensaios realizados por laboratório credenciado. A massa específica foi determinada

pelo método de picnometria gasosa (gás hélio), sendo a composição química baseada em óxidos e a perda ao fogo obtidas pelo método de Fluorescência de Raio X (FRX). Os ensaios foram realizados pelo Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) [10]. Os valores das propriedades para cada material utilizado para a produção dos CPs são apresentados na Tabela I.

Com base no estudo prévio realizado, os corpos de prova foram produzidos de acordo com a composição e características granulométricas e de umidade com as quais se obteve uma conformação adequada e foram obtidos bons resultados preliminares de resistência à ruptura. A Figura 1 ilustra as etapas de produção dos CPs.

A Figura 2 apresenta uma imagem ilustrativa dos diferentes materiais grosseiros encontrados na Terra de Shredder, que foram previamente separados e descartados.

Portando, conforme a Figura 2, observa-se uma grande variedade de materiais, sendo que na categoria “outros” foram classificados materiais que não puderam ser identificados visualmente.

Para a Terra de Sucata a condição foi bastante semelhante quanto à diversidade de materiais, mas enquanto na Terra de Shredder há uma predominância de materiais leves (espuma, por exemplo), na Terra de Sucata predominam materiais

Tabela I – Propriedades físicas e químicas dos materiais utilizados.

Propriedades / Elementos (*)	Terra de Shredder	Terra de Sucata	Argila A	Argila B
Fe ₂ O ₃	34,093	50,036	6,820	1,600
SiO ₂	24,903	19,718	62,770	71,720
CaO	5,766	5,542	0,460	0,810
Al ₂ O ₃	5,138	6,018	15,690	14,460
ZnO	2,968	0,524	-	-
MgO	2,212	3,170	1,530	2,740
TiO ₂	1,566	1,114	0,760	0,340
Na ₂ O	1,187	0,090	0,310	2,130
SO ₃	0,564	0,347	< 0,050	0,270
P ₂ O ₅	0,532	0,357	0,080	0,050
K ₂ O	0,480	0,247	2,980	0,880
MnO	0,441	0,760	-	-
PbO	0,388	0,045	-	-
SrO	0,205	0,055	-	-
CuO	0,150	0,065	-	-
Cr ₂ O ₃	0,131	0,298	-	-
ZrO ₂	0,085	0,041	-	-
NiO	0,078	0,040	-	-
Perda ao Fogo	18,827	11,535	8,27	4,97
Massa Específica (g/cm³)	2,710	3,248	2,622	2,325

(*) Composição química da massa (% em peso)
Fonte: adaptado de CCDM [10].

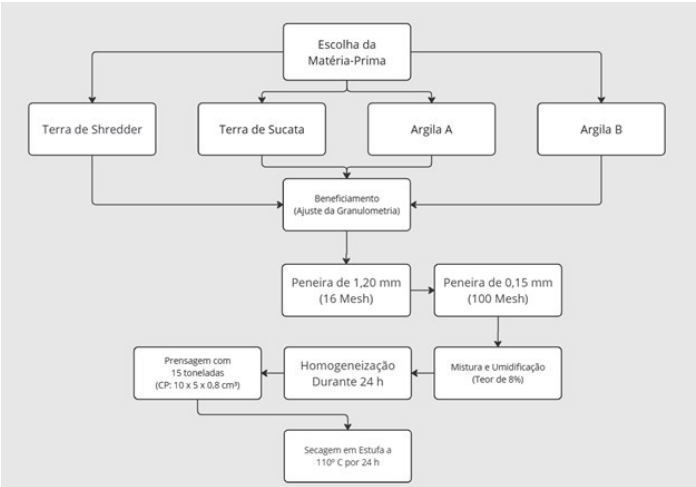


Figura 1: Processo de preparação dos CPs.

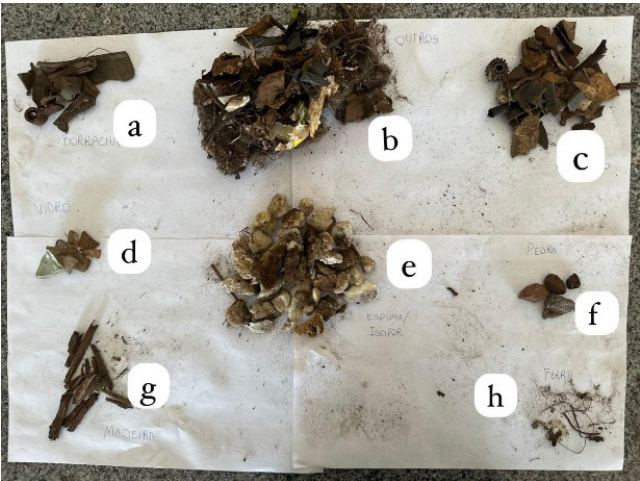


Figura 2: Imagem ilustrativa dos materiais encontrados na Terra de Shredder (a: borracha; b: outros; c: plástico; d: vidro; e: espuma; f: pedra; g: madeira; h: metais).

pesados (metais e pedras, por exemplo), conforme pode ser observado na Figura 3.

Após a separação prévia e descarte dos materiais grosseiros, as amostras foram submetidas às etapas de beneficiamento apresentadas na Figura 1, realizadas no laboratório de Materiais da Construção Civil da EEP/FUMEP, com ajuste da granulometria (material < 0,15 mm) e da umidade (8%) antes da conformação por prensagem.

Para o ajuste prévio da granulometria as terras passaram por um moinho de facas do tipo wiley MA 340/SNR, da marca Marconi, existente no laboratório de Materiais da Construção Civil da EEP/FUMEP. Após a moagem as amostras ficaram com partículas menores que 0,6 mm. Posteriormente, o material foi submetido a uma peneira de 0,15 mm (100 mesh), com o auxílio do agitador mecânico da marca Pavitest. Dessa forma as partículas das amostras antes da umidificação tinham diâmetro máximo igual a 0,15 mm. No caso das argilas foi realizada uma moagem manual prévia com posterior peneiramento conforme descrito.

A Figura 4 representa as amostras de Terra de Shredder e Terra de Sucata antes e depois das etapas de moagem e de peneiramento.



Figura 3: Imagem ilustrativa dos materiais encontrados na Terra de Sucata (a: borracha; b: outros; c: plástico; d: vidro; e: pedra; f: madeira; g: metais).

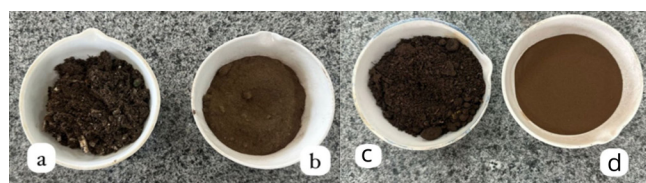


Figura 4: Terras de Shredder e de Sucata antes (a, c) e após (b, d) as etapas de moagem e peneiramento.

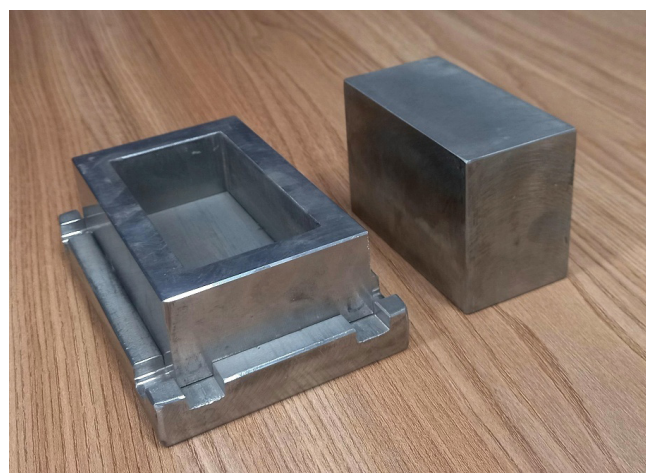


Figura 5: Molde para produção dos corpos de prova.

Independente da composição, as amostras foram secas em estufa à 110 °C por 24 h para depois serem umidificadas e homogeneizadas em reservatórios fechados, onde a quantidade de água necessária foi adicionada e nos quais permaneceram por 24 h. Em todos os experimentos o teor de umidade foi igual a 8% em base seca.

As amostras com composição pré-estabelecida e devidamente beneficiadas foram conformadas por

prensagem uniaxial de ação simples em molde de aço ASTM A 240 TP 304 com 100 mm de comprimento, 50 mm de largura e 37 mm de altura, Figura 5.

A massa para carregamento do molde foi calculada com base na composição pré-estabelecida e na(s) massa(s) específica(s) do(s) componente(s), conforme as equações A e B, considerando a produção de CPs com 100 mm de comprimento, 50 mm de largura e 8 mm de espessura. Os valores de massa específica (ρ) utilizados nos cálculos foram aqueles apresentados na Tabela I.

$$\rho_m = x_1 \times \rho_1 + x_2 \times \rho_2 + \dots + x_n \times \rho_n \quad (A)$$

Em que:

ρ_m : massa específica média (g/cm³);

x_n : porcentagem do material n;

ρ_n : valores de massa específica do material n (g/cm³).

$$m_t = \rho_m \times v \quad (B)$$

Em que:

m_t : massa total (g);

v : volume que o CP deve ter depois de prensado (cm³).

O carregamento do molde, com a massa de interesse, foi realizado com aplicação de vibração mecânica de forma a melhorar a distribuição das partículas e reduzir a porosidade entre elas. Após essa etapa, o molde foi levado a uma prensa hidráulica com capacidade de 100 toneladas, da marca Pavitest, na qual se procedeu a prensagem uniaxial de ação simples com uma carga final igual a 15 toneladas. Após a desmoldagem foram realizadas as medidas de massa, comprimento, largura e espessura de cada CP produzido. Em seguida, os CPs foram levados para secagem em estufa a uma temperatura de 110 °C, onde permaneceram por 24 h.

Após o tempo decorrido na estufa, as dimensões dos corpos de prova foram medidas novamente para que fosse possível calcular, em um primeiro momento, a retração linear por secagem. Tal retração pode ocorrer devido à retirada da umidade livre que ainda permanece nos poros após a prensagem. Segundo Vieira *et al*, a água presente no material durante a etapa da prensagem pode ser dividida em dois tipos, sendo o primeiro tipo a água intersticial, que consiste na água necessária para preencher os poros das partículas do material. Enquanto isso o segundo tipo, a água de plasticidade, diz respeito à água que se localiza entre as partículas, conferindo plasticidade à mistura e facilitando a trabalhabilidade no processo de conformação, ou seja, este é o tipo responsável pela retração dos corpos de prova ao evaporar durante a secagem [11].

Após a etapa de secagem os CPs foram submetidos ao processo de queima e aos ensaios tecnológicos, conforme são apresentados na Figura 6.

O processo de queima foi realizado em um forno tipo mufla MA385/3, da marca Marconi, com taxa de aquecimento de 4 °C/min., com o objetivo de atingir a sinterização do material. De acordo com Silva e Alves Júnior, a sinterização

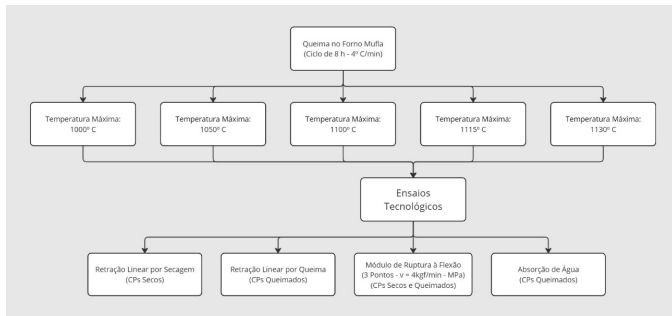


Figura 6: Processo de queima dos CPs e ensaios tecnológicos.

refere-se a um processo físico, termicamente ativado, que faz com que um conjunto de partículas de determinado material, inicialmente em contato mútuo, adquira resistência mecânica. É importante analisar a resistência mecânica das composições antes e depois da queima, de modo a formular uma massa cerâmica que apresente módulos de rupturas que sejam adequados em ambos os estágios [12].

No estudo preliminar exploratório realizado ficou estabelecido que a temperatura máxima de 1100 °C, com um patamar de 20 min. na temperatura de 500 °C, seria utilizada para definição da composição da massa cerâmica que apresentasse, previamente, os melhores resultados com relação à resistência mecânica e à retração linear. Este ciclo de queima foi estabelecido com base em resultados preliminares obtidos para corpos de prova produzidos com material único, 100% Terra de Shredder, 100% Terra de Sucata, 100% Argila A ou 100% Argila B.

Com o ciclo de queima estabelecido foram iniciados os experimentos com diferentes composições da massa cerâmica, começando com as terras de sucata como único material e depois, de acordo com os valores obtidos de resistência mecânica pós secagem e pós queima, em conjunto com os valores de retração linear pós queima, alterando as composições até que fosse encontrada a que se mostrasse mais interessante, segundo os parâmetros analisados, para produção de materiais cerâmicos. Ressalta-se que para este estudo não foram utilizados os métodos tradicionais de formulação da massa cerâmica, pois o objetivo era priorizar o uso das terras de sucata e propor formulações que tivessem pelo menos 70% em massa desses materiais. Essa foi uma condição estabelecida em acordo com a empresa que cedeu as terras de sucata para a pesquisa. As porcentagens individuais de Terra de Sucata (TS) e de Terra de Shredder (TSH) aplicadas em composições que utilizaram as duas terras em conjunto com alguma das argilas foram omitidas por questão de sigilo. Portanto, nos resultados, as porcentagens para estes casos foram apresentadas como um único valor que corresponde à soma dos valores individuais utilizados.

Após a análise dos resultados obtidos na etapa de estudo das composições, a melhor ou as melhores formulações foram utilizadas para produzir CPs que foram submetidos a ensaios para determinação da absorção de água, da retração linear por secagem e por queima e da resistência mecânica de ruptura à flexão em seu estado seco e queimado. Os experimentos foram conduzidos nas temperaturas máximas de queima iguais a 1000 °C, 1050 °C, 1100 °C, 1115 °C e 1130 °C, com

patamar de 20 min. a 500 °C e de 60 min. na temperatura máxima. A curva de queima com os respectivos patamares é representada pela Figura 7.

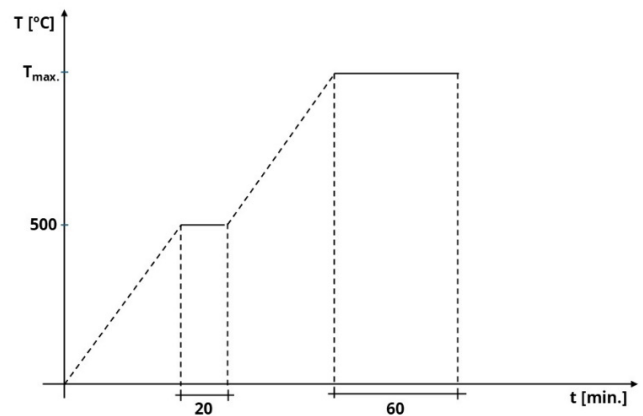


Figura 7: Gráfico ilustrativo que mostra os patamares da curva de queima e os respectivos tempos de permanência em cada patamar.

Os ensaios de absorção de água foram baseados na norma ABNT NBR ISO 10545-4/2020 e realizados pelo Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM), localizado nas dependências da Universidade Federal de São Carlos junto ao Departamento de Materiais (DEMa/UFSCar) [13, 14].

A retração linear foi calculada considerando-se as medidas do comprimento do material cerâmico antes e depois da secagem ou sinterização, de modo a obter a porcentagem de sua diminuição. De acordo com a Cáceres *et al*, esse cálculo foi realizado por meio da equação C [15].

$$RL = \left(\frac{L_i - L_f}{L_i} \right) \times 100 \quad (C)$$

Em que:

RL: retração linear (%);

L_i : comprimento do corpo cerâmico medido antes da secagem/queima (cm);

L_f : comprimento do corpo cerâmico medido após a secagem/queima (cm).

O módulo de ruptura à flexão (R) foi obtido com base na norma ABNT NBR ISO 10545-4/2020 [13]. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil

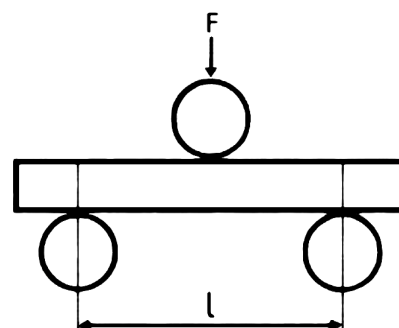


Figura 8: Representação de carga no corpo de prova, adaptada da ABNT NBR 10545-4/2020 [13].

da EEP/FUMEP em uma prensa mecânica para flexão de componentes cerâmicos da marca Contenco, com célula de carga adaptada modelo CKS com capacidade de 200 kgf da marca Kratos, acoplada a um indicador digital Kratos modelo IK-15. A taxa de aplicação da carga foi mantida em 4,0 kgf/min durante os ensaios. O ensaio avaliou a resposta dos CPs quando submetidos a uma carga aplicada em solicitação de flexão em três pontos, figura 8.

O cálculo da carga de ruptura (S) foi realizado através da equação D, de acordo com a ABNT NBR 10545-4/2020 [7].

$$S = \frac{F \times l}{R} \quad (D)$$

Em que:

S: carga de ruptura (N);

F: força de ruptura (N);

l: distância entre as barras de apoio (mm);

B: menor lado do corpo de prova (mm).

O módulo de resistência à flexão (R) foi calculado por meio da equação E, presente na ABNT NBR 10545-4/2020 [13]:

$$R = \frac{3 \times S}{2 \times h^2} \quad (E)$$

Onde:

R: resistência à flexão (MPa);

S: carga de ruptura (N);

h: espessura mínima do corpo de prova ensaiado (mm).

A partir dos resultados obtidos para absorção de água e retração linear foram elaboradas curvas de gresificação que foram analisadas de forma conjunta com os resultados referentes ao módulo de ruptura à flexão. Esta análise possibilitou a comparação dos valores obtidos com aqueles estabelecidos na ABNT NBR 13818/1997 [16] para diferentes tipos de placas cerâmicas que podem ser utilizadas como revestimento de pisos e paredes, além de valores sugeridos por autores que estudaram o tema, e desta forma inferir sobre a possibilidade de produzir revestimentos com qualidade mercadológica a partir do uso das terras de sucata.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 9 ilustra os CPs secos à temperatura de 110 °C por 24 h e submetidos ao processo de queima, após o ensaio de resistência à flexão.

Os resultados referentes à etapa de análise do comportamento da massa cerâmica com diferentes composições, considerando os valores de módulo de resistência à flexão e os valores de retração linear estão na Tabela II. Foram testadas 13 composições, desde formulações em que as terras de sucata constavam como único material até diversas proporções entre as terras de sucata e as argilas A e B. Nesta etapa todos os CPs foram submetidos aos mesmos métodos e condições de beneficiamento.

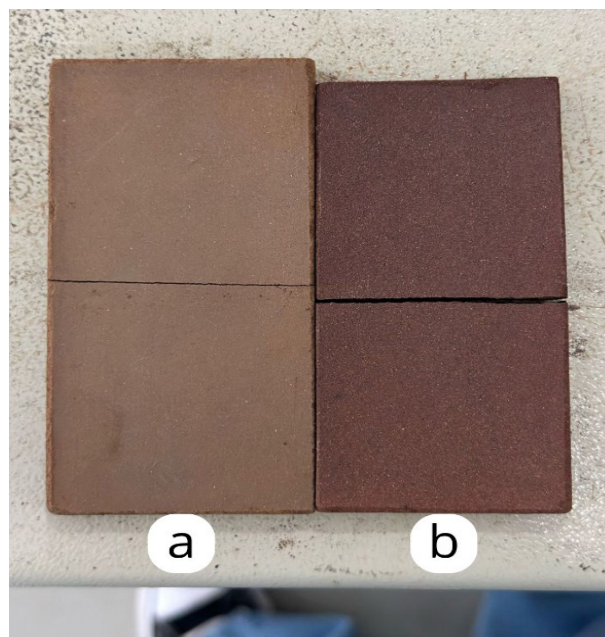


Figura 9: Imagens dos corpos de prova após a determinação do módulo de ruptura: (a) secos a 110 °C por 24 h e (b) após o processo de queima

Ao observar os resultados obtidos para as composições 1 e 2 (Tabela II) formadas por apenas Terra de Shredder (100% TSH) e Terra de Sucata (100% TS), respectivamente, foi possível verificar se alguma delas, ou ambas, teriam potencial de serem utilizadas como matéria-prima única para produção de cerâmica. A Terra de Shredder deu origem a um corpo de prova (CP) com elevado valor para o módulo de resistência à flexão depois de sinterizado, 24,6 MPa. Porém, a retração linear por queima foi demasiadamente alta em relação a todas as outras composições, chegando a 16,67%, sendo este um dos fatores que dificultam a utilização exclusiva do material na massa cerâmica. A Terra de Sucata, por outro lado, apesar de apresentar baixa retração linear por queima, chegando a apenas 1,78%, apresentou um valor baixo de módulo de resistência à flexão após a queima, 0,7 MPa, o que também dificulta seu uso como matéria-prima única. Além disso, todos os CPs que tinham as terras de sucata como único material em sua composição, apresentaram baixo módulo de resistência à flexão depois da secagem, ou seja, quando ainda cru, sendo 0,3 MPa o valor encontrado para a composição 1 e para composição 2. Tais valores se encontram bem abaixo dos obtidos para matérias-primas tradicionais utilizadas pela indústria cerâmica, como nos casos das composições 3 e 4, formadas somente por Argila A (3,2 MPa) e por Argila B (4,1 MPa), respectivamente. Portanto, após os resultados obtidos no estudo preliminar exploratório constatou-se a necessidade de se trabalhar com formulações compostas por uma combinação das matérias-primas propostas para estudo.

Nesta etapa preliminar utilizou-se como primeiro critério de seleção, entre as composições apresentadas na Tabela II, a comparação dos valores do módulo de resistência a flexão pós queima com valores de referência encontrados no anexo

Tabela II – Valores de módulo de resistência à flexão e retração linear para diferentes composições da massa cerâmica.

Nº	Composição	Módulo de Resistência à Flexão (Seco) MPa (*)	Módulo de Resistência à Flexão (Queimado) MPa (**)	Retração Linear por Secagem (%) (*)	Retração Linear por Queima (%) (**)
1	100% de TSH	0,3±0,0	24,6±6,1	0,25±0,01	16,67±1,12
2	100% de TS	0,3±0,0	0,7±0,1	0,00±0,00	1,78±0,08
3	100% de A	3,2±0,2	37,4±4,6	0,00±0,00	3,96±0,21
4	100% de B	4,1±0,1	19,7±1,9	0,69±0,02	6,87±0,59
5	70% de TSH e 30% de A	3,2±0,3	10,2±2,3	1,08±0,05	5,85±0,21
6	70% (TSH + TS) e 30% Argila A	3,4±0,3	8,0±1,2	0,39±0,01	3,96±0,24
7	90% (TSH + TS) e 10% Argila B	0,9±0,1	28,3±6,4	0,25±0,02	10,29±0,82
8	85% (TSH + TS) e 15% de Argila B	1,0±0,2	20,9±2,3	0,39±0,02	8,27±0,62
9	80% (TSH + TS) e 20% Argila B	1,2±0,1	20,4±2,1	0,10±0,01	7,20±0,73
10	85 % (TSH + TS) e 10% de Argila B e 5% de Argila A	1,1±0,1	22,5±1,9	0,25±0,01	8,73±0,49
11	80 % (TSH + TS) e 10% de Argila B e 10% de Argila A	1,4±0,2	21,6±2,1	0,25±0,03	7,51±0,74
12	75% (TSH + TS) e 25% de Argila A	1,5±0,3	23,5±4,1	0,20±0,01	8,20±0,38
13	75% (TSH + TS) e 25% de Argila B	1,8±0,4	24,2±6,2	0,35±0,02	8,22±0,29

(*) Corpos de prova secos à temperatura de 110 °C por 24 h.

(**) Corpos de prova submetidos à temperatura máxima de queima igual a 1100 °C, no estudo preliminar

T da ABNT NBR 13818/1997 [16], para diferentes grupos de placas cerâmicas produzidas por prensagem. Os referidos valores constam da Tabela III.

Constatou-se a partir do critério estabelecido que dentre as oito composições (composições 6 a 13) compostas por Terra de Shredder, Terra de Sucata e uma das argilas, quatro (composições 7, 10, 12, e 13) apresentaram módulo de resistência pós queima entre 22 e 30 MPa, este resultado indica uma semelhança de resistência mecânica entre as placas obtidas em laboratório com placas cerâmicas classificadas como parte do grupo BIIa pela norma. As outras três

composições (composições 8, 9, e 11), pelo mesmo critério adotado, se assemelham a placas do grupo BIIb, com valores de resistência entre 18 MPa e 22 MPa. Portanto, como a maioria das composições testadas apresentaram similaridade, quanto a resistência mecânica, com placas aceitas no mercado, este foi um indicativo importante de que as terras de sucata poderiam ser interessantes para este tipo de aplicação. Ressalta-se que todas as composições que apresentaram bons resultados de resistência pós queima tinham teores de terras de sucata maiores ou iguais a 70%, cumprindo assim com a quantidade mínima proposta para esse estudo.

Tabela III – Módulo de resistência à flexão de cada grupo cerâmico para produtos prensados [16].

Grupo	Bla	BIb	BIIa	BIIb	BIII
Módulo de Resistência à Flexão Médio – MPa	≥ 35	≥ 30	≥ 22	≥ 18	≥ 15
Módulo de Resistência à Flexão Individual (Mínimo) – MPa	32	27	20	16	12

B: tipo prensado; I, II e III: grupo de absorção de água; a e b: subgrupos.

A retração linear por secagem e por queima, juntamente com o módulo de resistência à flexão dos corpos de prova crus (pós secagem), também puderam ser analisados no estudo preliminar, conforme os resultados apresentados na Tabela II. Estas outras propriedades auxiliaram na escolha das composições que seriam utilizadas no aprofundamento da pesquisa.

Quanto à retração linear após a secagem, Sousa sugere que os valores de retração linear por secagem devem estar compreendidos entre 0,00 e 0,30%, de modo a evitar fissuras e trincas nos produtos [17]. Observa-se na Tabela II que, para os resultados obtidos através da utilização dos resíduos siderúrgicos, apenas quatro composições (composições 5, 6, 8 e 13) fogem do intervalo aconselhado pelo autor, mesmo assim ficando com valores próximos da faixa recomendada.

Oliveira e Hotza apresentaram os valores de resistência à flexão depois da secagem e de retração linear por queima dos principais materiais utilizados na indústria cerâmica [18]. Estes se encontram na Tabela IV.

Nota-se que os valores de retração linear por queima que constam da Tabela II foram relativamente maiores do que os apresentados para os materiais convencionais (Tabela IV), mas todos ficaram abaixo de 10%, o que está de acordo com o que foi preconizado por Santos [19].

Com relação à resistência mecânica após a secagem verificou-se que a maioria dos valores da Tabela II ficaram abaixo dos encontrados por Oliveira e Hotza [18], tabela IV, também abaixo do valor igual a 2,5 MPa recomendado por Sousa [17]. Os valores de resistência após a secagem são importantes para garantir o manejo das peças cerâmicas e o transporte durante os processos de queima e esmaltação. Apesar disso não existe um valor de referência estabelecido para qualquer processo. Diante desse fato, priorizou-se, para este trabalho, composições que se aproximassem dos

valores de resistência após a secagem recomendados, mas que apresentassem valores de resistência mecânica após a queima iguais ou acima dos encontrados na Tabela III.

Portanto, após a análise dos resultados obtidos no estudo preliminar, Tabela II, foi possível verificar que cada material utilizado contribuiu de forma a melhorar uma característica da massa cerâmica. Observou-se que o uso da Terra de Shredder tende a aumentar a resistência mecânica à flexão dos CPs após a queima, já a composição com a Terra de Sucata tende a diminuir a retração linear, principalmente após o processo de queima e por fim, a presença de qualquer uma das argilas testadas na massa mostrou uma melhora na resistência mecânica à flexão do corpo de prova cru, após a secagem. Assim, considerando os melhores resultados encontrados para todas as propriedades analisadas, foi possível selecionar as composições 12 e 13 para a continuidade dos estudos, pois apresentaram um teor das terras (TSH + TS) na massa igual a 75% (acima dos 70% esperados), valores de módulo de resistência à flexão acima de 20 MPa após o processo de queima e próximo de 2 MPa após a secagem, e retração linear abaixo de 10% após a queima e menor ou igual a 0,35% após a secagem.

A partir das composições selecionadas no estudo preliminar, composições 12 e 13, foram realizados os experimentos para valores de temperatura máxima de queima iguais a 1000 °C, 1050 °C, 1100 °C, 111 °C e 1130 °C. Para cada valor de temperatura os CPs foram submetidos a ensaios tecnológicos de módulo de resistência à flexão após a secagem (110 °C por 24 h) e após o processo de queima, e de absorção de água após o processo de queima. A retração linear foi medida após a secagem e após o processo de queima.

Os resultados obtidos do módulo de resistência à flexão (R) em função da temperatura máxima de queima e da

Tabela IV – Características típicas de matérias-primas argilosas [18].

Características Físicas	Argilas Carbonáticas	Argilas Gresificáveis	Argilas Plásticas	Argilas Caulínicas	Caulim
Resistência à Flexão a Seco (MPa)	2,2	2,3	2,0 - 2,9	1,8	1,2 - 1,8
Retração Linear por Queima (%)	3	5	4 - 6	3	7 - 8

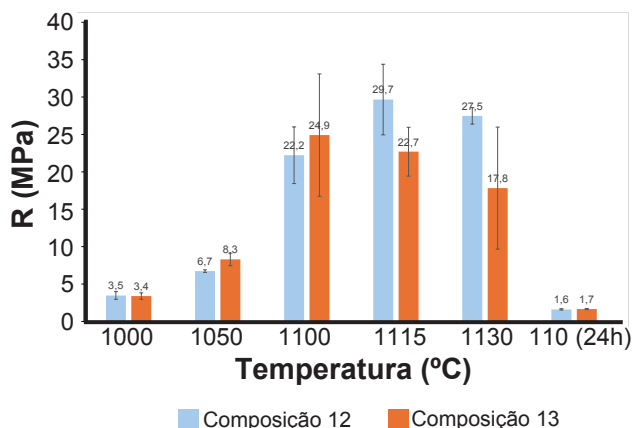


Figura 10: Módulo de resistência à flexão (R) das composições 12 e 13 de acordo com a variação de temperatura máxima de queima.

secagem (110 °C por 24 h), para as composições 12 e 13, são apresentados na Figura 10.

Observou-se a partir da Figura 10 um aumento significativo nos valores do módulo de resistência à flexão a partir da temperatura de 1100 °C. Este resultado indica que a partir dessa temperatura houve a sinterização do material. Portanto, os maiores valores para o módulo de ruptura à flexão (R) foram encontrados para as temperaturas de 1100 °C, 1115 °C e 1130 °C, para ambas as composições (12 e 13) analisadas, sendo o maior valor médio igual a 29,7 MPa para a composição 12 e 1115 °C e igual a 24,9 MPa para a composição 13 e 1100 °C. Constatase que, de acordo com os desvios mostrados na Figura 10, não houve uma diferença significativa entre os valores de R para os ensaios realizados a 1100 °C, 1115 °C e 1130 °C, mas a grande maioria dos valores médios ficou acima dos 20 MPa, à exceção das composições 13 e 1130 °C. Os valores médios de R para o ensaio realizado após a secagem (110 °C por 24 h) mostram valores muito próximos para as duas composições consideradas, mas ainda abaixo dos valores encontrados por Oliveira e Hotza [18] e do recomendado por Sousa [17]. Os valores de R, tanto para corpos de prova testados após a secagem como para aqueles testados após a queima, corroboram o estudo preliminar realizado, mostrando que a metodologia adotada permitiu uma reprodução de condições e resultados. Os valores de R para as temperaturas máximas de queimas iguais a 1000 °C e 1050 °C ficaram abaixo de 12 MPa, valor mínimo encontrado na ABNT NBR 13818/1997 [16] para placas cerâmicas prensadas.

A análise da retração linear (RL) foi realizada de forma conjunta com os resultados de porcentagem de absorção de água (AA). Para tanto foram construídas curvas de gresificação que são apresentadas na Figura 11 para a composição 12 e na figura 12 para a composição 13.

Verificou-se nas Figuras 11 e 12 que para ambas as composições (12 e 13) a retração linear (RL) após a queima se manteve abaixo dos 10% independente da temperatura analisada, resultado esse que condiz com o estudo preliminar realizado. As porcentagens de absorção de água (AA), considerando as temperaturas em que o material já se encontra sinterizado, ou seja, 1100 °C, 1115 °C e 1130 °C ficaram abaixo de 10%. É possível observar também, tanto para composição 12 como para

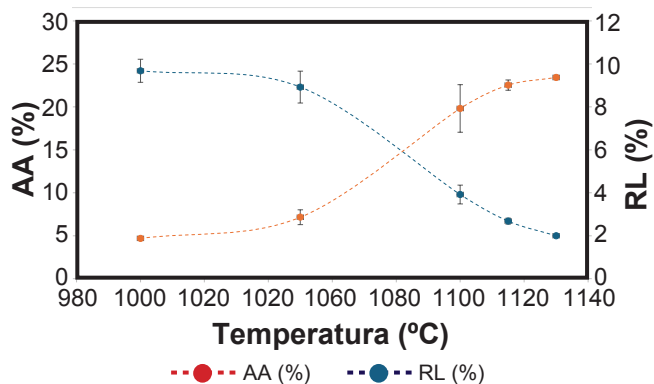


Figura 11: Curva de gresificação para a composição 12.

a composição 13, que existe uma tendência de estabilidade no processo de gresificação verificada nas curvas de RL e AA para temperaturas acima dos 1115 °C.

Além dos resultados apresentados até aqui, foram também calculadas as médias de RL por secagem (110 °C por 24 h) dos corpos de prova constituídos pelas composições 12 e 13. A composição 12, preparada com a adição da Argila A, apresentou uma porcentagem de 0,24%, enquanto para a composição 13, preparada com a Argila B, foi obtido um valor de 0,31%. Valores que estão de acordo ou muito próximos da faixa recomendada por Sousa [17], ou seja, entre 0 e 0,30%.

Seguindo a mesma linha adotada no estudo preliminar e buscando verificar o potencial do uso das terras de sucata, TSH e TS, na incorporação da matéria prima e produção de placas cerâmicas, analisou-se os resultados para as propriedades R pós secagem, R pós queima, RL pós secagem, RL pós queima e AA pós queima em conjunto, comparando os valores obtidos com aqueles encontrados na ABNT NBR 13818/1997 [16] e na literatura. Desta forma os valores de absorção de água para placas cerâmicas obtidas por prensagem, estabelecidos no anexo T da ABNT NBR 13818/1997 [16], estão na Tabela V.

Os melhores resultados de acordo com as propriedades analisadas estão na tabela 6.

Analisando os resultados da Tabela VI, verificou-se que, para os valores de R pós-queima e de AA, quando comparados aos valores normatizados [16] apresentados nas Tabelas III e V, constata-se que, quanto a esses parâmetros, há possibilidade de enquadrar as placas cerâmicas obtidas

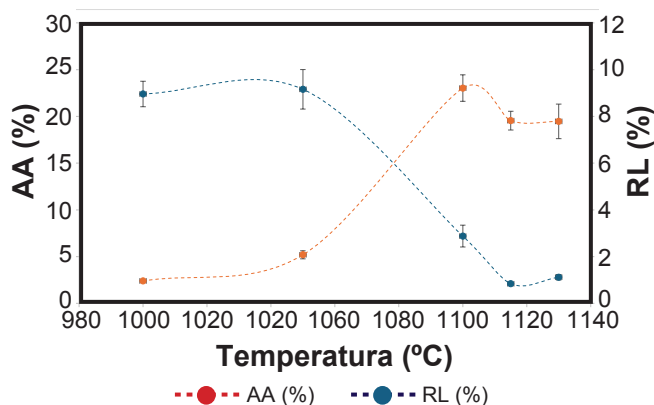


Figura 12: Curva de gresificação para a composição 13.

Tabela V – Absorção de água de cada grupo cerâmico [16].

Grupo	Bla	B Ib	BIIa	BIIb	BIII
Absorção de Água – %	$\leq 0,5$	$0,5 < AA \leq 3,0$	$3,0 < AA \leq 6,0$	$6,0 < AA \leq 10,0$	> 10
Absorção de Água (Máximo) – MPa	0,6	3,3	6,5	11,0	Mínimo: 9,0

B: tipo prensado; I, II e III: grupo de absorção de água; a e b: subgrupos.

Tabela VI – Resumo dos melhores resultados encontrados para as composições 12 e 13 nas diferentes condições de temperatura máxima de queima estudadas.

Propriedade	Composição 12	Composição 13
R pós secagem (110 °C por 24 h) (MPa)	1,6±0,1	1,7±0,1
R pós queima (MPa)	29,7±4,7 (1115 °C)	24,9±8,2 (1100 °C)
RL pós secagem (110 °C por 24 h) (%)	0,24±0,11	0,31±0,11
RL pós queima (%)	7,93±1,11 (1100 °C)	7,79±0,74 (1130 °C)
AA (%)	<10,0 (1100 °C, 1115 °C, e 1130 °C) 5,0±0,2 (1130 °C)	<10,0 (1100 °C, 1115 °C, e 1130 °C) 2,1±0,1 (1115 °C)

experimentalmente como grupo BIIa, mas que, considerando resultados individualizados, obtiveram-se placas cerâmicas que poderiam ser classificadas até como grupo B Ib e, na pior das hipóteses, como grupo BIIb. Esses resultados de resistência mecânica e absorção de água, somados a uma retração linear menor do que 10% pós-queima, corroboram os testes preliminares realizados e confirmam o potencial do uso das terras de sucata como matéria-prima para produção de placas cerâmicas, que poderiam ser aplicadas na construção civil como pisos ou revestimentos. Contudo, é preciso buscar novas composições que auxiliem no aumento da R pós secagem, buscando atingir valores mais altos e próximos a 2,5 MPa, conforme Sousa [17], de forma a garantir as condições de manuseio antes da etapa de queima.

Mesmo com resultados promissores para uso das terras de sucata na produção de placas cerâmicas é necessário que sejam realizados mais trabalhos que envolvam outros parâmetros de qualidade, novas formulações e testes em escala piloto na indústria. E, desta forma buscar minimizar a disposição desse resíduo em aterros e até transformar as terras de sucata em coprodutos da indústria siderúrgica.

CONCLUSÃO

Com base na metodologia aplicada e nos resultados obtidos conclui-se que: o estudo preliminar permitiu com

base nos valores do módulo de ruptura à flexão, retração linear pós secagem e pós queima descartar o uso das terras de sucata como único componente da massa cerâmica; as composições 12 (75% (TSH + TS) e 25% de Argila A) e 13 (75% (TSH + TS) e 25% de Argila B) foram as que apresentaram os melhores resultados no estudo preliminar; não houve variação significativa do módulo de ruptura à flexão para as composições 12 e 13, no estudo complementar, para as temperaturas máximas de queima iguais a 1100 °C, 1115 °C e 1130 °C, sendo o melhor resultado em termos de valores médios para a composição 12 e 1115 °C e para a composição 13 e 1100 °C; a gresificação ocorreu para temperaturas acima de 1100 °C, sendo que a retração linear pós queima e a absorção de água ficaram abaixo de 10% com tendência a estabilidade das curvas; é preciso atenção quanto aos valores de resistência à flexão pós secagem (110 °C por 24h), pois ficaram abaixo de 2,5 MPa recomendado na literatura, indicando a necessidade de melhora desse parâmetro, para garantir as condições de manuseio pré queima; considerando os melhores resultados encontrados para composição 12 e para composição 13 é possível produzir placas cerâmicas compatíveis com aquelas normatizadas dos grupos B Ib, BIIa e BIIb e portanto, as terras de Shredder e de Sucata apresentaram grande potencial de aplicação para produção de placas cerâmicas utilizadas como revestimentos e pisos na construção civil; apesar do potencial de uso, devido

à complexidade desses resíduos, são necessários mais estudos que envolvam as terras de Shredder e de Sucata, para um entendimento mais profundo do comportamento e características desses materiais, envolvendo formulações com um número maior de matérias-primas e testes piloto em empresas do ramo cerâmico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da empresa ArcelorMittal, ao Instituto Euvaldo Lodi (IEL) e à Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (FIPT) pela concessão de bolsas e à Escola de Engenharia de Piracicaba da Fundação Municipal de Ensino de Piracicaba (EEP/FUMEP) pela disponibilidade do Laboratório de Materiais de Construção Civil, que garantiram a estrutura necessária para a realização dessa pesquisa.

DISPONIBILIDADE DE DADOS

Os dados que sustentam as conclusões deste estudo estão disponíveis, mediante solicitação razoável, ao autor correspondente.

REFERÊNCIAS

- [1] World Steel Association. Sustainability Indicators Report 2025: Sustainability performance of the steel industry. 2024. Disponível em <https://worldsteel.org/wider-sustainability/sustainability-indicators/>. Acesso em: 19/02/2026.
- [2] ArcelorMittal. Compilado de Resíduos das Terras de Sucata. Banco de Dados da Empresa. 2024.
- [3] Siviero AFT. Galuppo MV. Marcellino MMA. Guimarães D. Magalhães DC. Pereira LG. Caracterização do resíduo sólido gerado na planta de beneficiamento de sucata utilizada na produção de aço. Anais do 72º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), Vol. 72, nº 1, 2017.
- [4] Vermeulen I. Caneghem J. Block C. Baeyens J. Vandecasteele C. Automotive shredder residue (ASR): reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation. Journal of Hazardous Materials, Vol. 190, 2011.
- [5] Cossu R. Lai T. Automotive shredder residue (ASR) management: An overview, Waste Management, Vol 45, p. 143-151, 2015.
- [6] Mayyas M. Pahlevani F. Maroufi S. Liu Z. Sahajwalla V. Waste conversion into high-value ceramics: Carbothermal nitridation synthesis of titanium nitride nanoparticles using automotive shredder waste. Journal of Environmental Management, Vol 188, p. 32-42, 2017.
- [7] Figueiredo JDC. Aplicação de uma fração do resíduo do shredder na fabricação de blocos cerâmicos estruturais (dissertação - Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Rio Grande do Sul: Centro Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia; 2016. 82 p.
- [8] Rao J. Hagare D. Tao Z. Evaluation of the Use of Automotive Shredder Residue Plastics in Concrete: Physical, Mechanical, and Durability Properties, Journal of Building Engineering, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2026.115460>. Acesso em: 19/02/2026
- [9] Caetano JA. Reaproveitamento do resíduo da terra da shredder através da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento portland para aplicação na construção civil (dissertação - Mestrado em Área de Hidráulica e Saneamento). São Carlos: EESC/USP; 2016. 101 p.
- [10] Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM). Certificados de ensaio de CPC24_000042 a CPC24_000050, VER.00 (arquivo técnico); 2024. 4 p.
- [11] Vieira CMF. Feitosa HS. Monteiro SN. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de bigot (artigo - Revista Cerâmica Industrial). Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) e Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV); 2003. 5 p.
- [12] Silva AGP. Alves CJ. A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização (artigo). Rio Grande do Norte: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Física Teórica e Experimental; 1998. Disponível em <<https://www.scielo.br/j/ce/a/PmJKHP86qkXSCZ4j4MGdxSx/#>>. Acesso em: 30/08/2024.
- [13] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 10545 – 4: placas cerâmicas parte 4: determinação da carga de ruptura e módulo de resistência a flexão. Rio de Janeiro: ABNT; 2020. 9 p.
- [14] Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM). RELATÓRIO DE ENSAIO CPC24-000212 – Rev.01 (arquivo técnico); 2025. 9 p.
- [15] Cáceres VI. Chaparro García AL. Sánchez Molina J. Caracterización de materiales arcillosos y su potencial aplicación en la industria cerámica. Editora UFPS; 2022. Disponível em: <https://libros.ufps.edu.co/index.php/editorial-ufps/catalog/book/23>. Acesso em: 01/04/2025.
- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 13818/1997: placas cerâmicas para revestimento – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT; 1997. 78 p.
- [17] Sousa SJG. Desenvolvimento de massas cerâmicas processadas por via seca com matérias-primas do norte fluminense visando aplicação em revestimento poroso (tese - Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Rio de Janeiro: Universidade Estadual Do Norte Fluminense (UENF); 2008. 129 p.
- [18] Oliveira NPA. Hotza D. Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos. 2 ed. Florianópolis: Editora UFSC; 2015. 124p.
- [19] Santos PS. *Ciência e Tecnologia de Argilas*. 2 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA; 1989. 408 p. (Rec. 20-May-2025, Rev. 29-Sep-2025, 19-Mar-2026, Ac. 30-Apr-2026) (AE: Rafael Salomão)