http://journal.unoeste.br/index.php/ce/index
DOI: 10.5747/ce.2025.v17.e436
ISSN on-line 2178-8332

Colloquium Exactarum

Submetido: 02/07/2025 Revisado: 18/07/2025 Aceito: 31/07/2025

# ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO UTILIZANDO RESÍDUOS DE PÓ DE TONER

***Study and physical characterization of soil-cement bricks using toner powder waste***

**Vinícius de Santi Phelippe Nunes[1]; Rebeca Delatore Simões[1]**

[1]**Universidade Estadual Paulista – UNESP, SP.**
e-mail: viniciusdesantipn@gmail.com , rebeca.simoes@unesp.br

**RESUMO –** Tijolos solo-cimento são uma alternativa sustentável na construção civil devido às suas eficientes propriedades físico-mecânicas, utilizando solo, cimento e água. Estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de incorporar novos materiais em sua composição. Atualmente, milhares de cartuchos de toner são descartados diariamente em aterros sanitários e, por apresentar quantidades relevantes de pó de toner não biodegradável e poluente, geram um problema que tem desafiado os pesquisadores. Este estudo avaliou a combinação de tijolos solo-cimento produzidos com resíduos de pó de toner visando encontrar uma solução ecológica para este material e também impulsionar a sustentabilidade na construção civil. Através de análises de cada material utilizado e uma criteriosa revisão da literatura, tijolos foram desenvolvidos no traço 1:7 (cimento:solo) com 3% de resíduo de pó de toner sendo adicionado em sua composição no lugar do solo. Após a cura das amostras, os tijolos foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, revelando valores superiores aos requisitos mínimos estabelecidos pelas normas brasileiras. Os resultados evidenciaram a viabilidade técnica da utilização de resíduo de pó de toner na produção de tijolos solo-cimento, e a sua relevância para o gerenciamento sustentável de resíduos industriais, com a promoção de práticas mais sustentáveis na construção civil.
**Palavras-chave:** Engenharia; Pó de toner; Resíduos; Sustentabilidade; Tijolo.

**ABSTRACT –** Soil-cement bricks are a sustainable alternative in civil construction due to their efficient physical-mechanical properties, using soil, cement and water. Studies have been developed with the aim of incorporating new materials into their composition. Currently, thousands of toner cartridges are discarded daily in landfills and, due to their significant amounts of non-biodegradable and polluting toner powder, they generate a problem that has challenged researchers. This study evaluated the combination of soil-cement bricks produced with toner powder waste, aiming to find an ecological solution for this material and also to promote sustainability in civil construction. Through analyses of each material used and a careful review of the literature, bricks were developed in a 1:7 ratio (cement:soil) with 3% of toner powder waste being added to their composition in place of soil. After curing the samples, the bricks were subjected to compressive strength tests, revealing values higher than the minimum requirements established by Brazilian standards. The results demonstrated the technical feasibility of using toner powder residue in the production of soil-cement bricks, and its relevance for the sustainable management of industrial waste, with the promotion of more sustainable practices in civil construction.
***Keywords*:** Engineering; Toner powder; Waste; Sustainability; Brick.

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil está constantemente buscando novas soluções para alcançar a sustentabilidade a fim de reduzir o uso de recursos naturais e, consequentemente, reduzir os impactos ambientais. A escassez de recursos naturais, o aumento constante dos custos de produção e o apelo ambiental reforçado pelas autoridades e órgãos regulamentadores têm levado os pesquisadores e empresários a buscar novas alternativas para a produção de materiais de construção (Sekhar; Nayak, 2018).

Sistemas de alvenaria que usam solo como principal matéria-prima, surgem como uma dessas soluções, sendo uma das técnicas de construção mais antigas e que só recentemente tiveram suas propriedades estudadas mais profundamente (Vilela *et al.*, 2020). Esse interesse por métodos de construção em solo se deve à redução nas emissões de carbono quando comparado aos materiais similares convencionais largamente utilizados (Maskell; Heath; Walker, 2014). Os tijolos de solo-cimento ganham destaque em termos de sustentabilidade, pois não utilizam processo de queima em sua fabricação, usando menos de 10% da energia necessária para fazer tijolos de argila e de concreto, por exemplo (Maskell; Heath; Walker, 2016).

A adição de resíduos em tijolos solo-cimento tem sido abordada em vários estudos visando a substituição de algum dos seus componentes (Vilela *et al.*, 2020). Neste contexto, resíduos de pó de toner surgem como uma abordagem ainda inovadora. Atualmente, mais de 1,1 bilhão de cartuchos são vendidos por ano, dos quais mais de 500 milhões acabam sendo descartados em aterros em todo o mundo (Fernández *et al.*, 2022). Este número demonstra que mais de um milhão de cartuchos são descartados mundialmente todos os dias. No cartucho descartado, aproximadamente 10% de sua massa corresponde ao resíduo de pó de toner (Ring *et al.*, 2024).

Esses resíduos, classificados como não recicláveis, apresentam partículas com diâmetro inferior a 10 µm e composição química complexa, incluindo substâncias como negro de carbono e dióxido de titânio — ambos classificados pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) como "possivelmente cancerígenos para humanos" (Yordanova; Angelova; Dombalov, 2014). O descarte inadequado desses materiais contribui para a poluição ambiental devido à presença de diversos grupos funcionais orgânicos, como carboxilas, hidroxilas e carbonilas. Além disso, a reciclagem por combustão é inviável, pois aumenta a inflamabilidade e o risco de explosão, com a liberação de gases tóxicos, como dioxinas e furanos (Parthasarathy, 2021).

A fim de proporcionar opções sustentáveis e evitar que resíduos sejam descartados no meio ambiente, é necessário o desenvolvimento de novos elementos construtivos que possam ser facilmente produzidos com tais materiais. Nesse aspecto, um tijolo solo-cimento, resultante da produção com reutilização de pó de toner, surge como uma oportunidade comercialmente sustentável, podendo ser considerado uma patente verde ao atender a 6 dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), sendo eles “Saúde e Bem-Estar”; “Trabalho Decente e Crescimento Econômico”; “Indústria, Inovação e Infraestrutura”; “Cidades e Comunidades Sustentáveis”; “Consumo e Produção Responsáveis” e “Ação Contra a Mudança Global do Clima” (Nações Unidas - Brasil, 2023).

Do ponto de vista ambiental, a reutilização de resíduos de pó de toner no tijolo ecológico oferece uma solução eficaz para reduzir a quantidade de material descartado, que frequentemente é incinerado ou enviado para aterros sanitários, diminuindo os riscos de poluição (Jujun; Jia; Zhenming, 2013). Ao integrar o pó de toner à produção de tijolos solo-cimento, é possível aproveitar um resíduo normalmente de difícil destino, contribuindo para a economia circular e para a redução do consumo de matérias-primas naturais. Além disso, o tijolo ecológico apresenta um custo de fabricação reduzido, devido à abundância de sua matéria-prima, o que o torna uma alternativa viável para a construção de habitações populares e, por consequência, impulsiona o desenvolvimento econômico. Assim, o estudo de novas tecnologias com o uso do tijolo ecológico é uma oportunidade para criar alternativas construtivas que promovam práticas ambientais, sociais e econômicas, fundamentais para o avanço sustentável na Engenharia Civil (Han; Yu; Qiu, 2023).

Apesar dos benefícios reconhecidos, há uma carência de estudos científicos sobre a produção de tijolos de solo-cimento incorporando resíduos de pó de toner. Dada a escassez de informações neste campo, esta pesquisa visa destacar o potencial de reutilização deste material na indústria da construção civil como uma estratégia para mitigar seu impacto ambiental e aumentar a sustentabilidade do setor. Para avaliar o desempenho do tijolo ecológico proposto, o estudo integrará os princípios de preservação ambiental com os requisitos técnicos da indústria da construção civil, garantindo o cumprimento das

normas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O desenvolvimento deste novo material pode oferecer uma alternativa comercial viável para fabricantes e consumidores, ao mesmo tempo em que promove o gerenciamento sustentável de resíduos de toner, que apresentam riscos ambientais significativos se descartados de forma inadequada.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

Para a confecção dos tijolos solo-cimento foi utilizado o solo (argissolo) encontrado na região Oeste do estado de São Paulo (Brasil), que passou pelo processo de destorroamento e peneiramento em laboratório. Também foi utilizado o cimento CPII-E-32 da marca Votorantim Cimentos, atendendo as exigências normativas da NBR 16697/2018, e água potável, isenta de impurezas que pudessem prejudicar à hidratação do cimento (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000). O resíduo de pó de toner foi doado por empresas do município de Presidente Prudente/SP, especializadas em serviços envolvendo impressoras.

### 2.2. Métodos

#### 2.2.1. Granulometria e densidade

O ensaio de granulometria consistiu em coletar uma amostra de solo e prepará-la seguindo as orientações da NBR (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016a). Em seguida, foi realizado o processo de destorroamento, desmanchando os torrões, homogeneizando a amostra. Utilizou-se um agitador mecânico durante 5 minutos para que o material passasse nas peneiras #4, #8, #16, #30, #50, #100 e #200 seguindo o processo descrito na NBR 7181/2016. A granulometria do pó de toner foi realizada com objetivo de verificar o tamanho médio dos resíduos de pó de toner. A densidade (g/cm³) deste resíduo foi determinada dividindo a massa (g) do resíduo de pó de toner, pelo volume do recipiente (cm³).

#### 2.2.2. Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg foram determinados para avaliar o comportamento do solo em diferentes teores de umidade, conforme as normas brasileiras ABNT NBR 6459/2016 (Solo - Determinação do limite de liquidez) e NBR 7180/2016 (Solo — Determinação do limite de plasticidade).

#### 2.2.3. Ensaio de compactação e permeabilidade do solo

Para avaliar a umidade ótima de compactação do solo destinado à produção de tijolos, foi conduzido o ensaio de compactação utilizando o método Proctor Normal, conforme estabelecido pela NBR 7182/2020.

Para verificar a impermeabilização do solo quanto aos seus componentes, foi feito o Ensaio de Permeabilidade, seguindo a NBR 13292/2021. Este ensaio, apresentou o resultado do Coeficiente de Permeabilidade, permitindo avaliar a taxa na qual a água percola o solo utilizado nos tijolos.

#### 2.2.4. Fluorescência de raios X

Foi determinada a concentração de elementos químicos presentes nas amostras de solo, cimento e resíduos de pó de toner através do ensaio de Fluorescência de Raios X. Foi utilizado o equipamento Shimadzu, modelo XRF-700, com capacidade de varredura de Sódio (Na) a Escândio (Sc) e de Alumínio (Al) a Urânio (U).

#### 2.2.5. Ensaios térmicos

Foram realizados ensaios de Termogravimetria (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para o resíduo de pó de toner. As medidas do TGA foram realizadas sob a atmosfera de gás nitrogênio, com intervalo de temperatura entre 25 °C a 900 °C e com razão de aquecimento de 10 °C/min, no equipamento da Marca Netzsch, modelo TG 209 F1 Libra®. Para as medidas de DSC foi utilizado porta amostra de alumínio (Al), atmosfera inerte de Nitrogênio (N2), em um intervalo de temperatura de –100 ºC a 600 ºC e razão de aquecimento de 10 °C/min, no equipamento da marca Netzsch, modelo DSC 204 – Phoenix.

#### 2.2.6. Fabricação dos corpos de prova

A fabricação dos corpos de prova seguiu as orientações do Boletim Técnico e das NBRs 8491/2012 e NBR 10833/2012. Estas normas, no entanto, não estabelecem parâmetros sobre a porcentagem recomendada, mínima ou máxima para fabricar tijolos de solo-cimento com a inclusão de resíduos. Dessa forma, a porcentagem de pó de toner foi determinada através de literaturas.

De acordo com Nascimento (2015), a utilização de até 3% de rejeito mineral de manganês na produção de tijolos de solo-cimento resultou em valores consistentes de resistência à compressão mecânica, os quais superaram os requisitos estabelecidos pela norma NBR 8491/2012. Outro estudo foi realizado por Maxiliano (2009), que utilizou resíduos de madeira para produzir tijolos ecológicos. Os resultados do ensaio de compressão mecânica mostraram que o material produzido com 3% destes resíduos, apresentou potencial para ser utilizado na confecção de tijolo maciço sem função estrutural. Lima (2020) acrescentou fibra de coco verde para produzir tijolos ecológicos. Em sua pesquisa, a autora verificou que corpos de prova com 4% da fibra de coco apresentaram os melhores resultados. Assim, foi determinada a substituição de 3% de solo por resíduos de pó de toner.

Os tijolos de solo-cimento foram fabricados utilizando o método tradicional de prensagem. Após realizar a homogeneização entre os componentes (no traço 7:1 – solo:cimento), o material foi colocado em um molde metálico (20x10x6 cm) para em seguida ser submetido a etapa de prensagem. Posteriormente, os tijolos produzidos foram transportados para a área de cura, onde permaneceram por 28 dias, protegidos de sol e chuva, mantidos em temperatura ambiente. Ao todo, foram desenvolvidos três tijolos (denominados T1, T2, T3) com 20 cm de comprimento, 10 cm de largura e 6 cm de espessura. As dimensões dos tijolos foram analisadas logo após a fabricação, usando um paquímetro digital para garantir a conformidade com as especificações padrão exigidas.

2.2.7. Resistência a compressão

Após o período de cura de 28 dias dos corpos de prova, o Ensaio de Resistência à Compressão Mecânica foi realizado conforme a NBR 8492/2012, onde os tijolos foram cortados ao meio, capeados com uma pasta de cimento e levados à prensa com a aplicação uniforme de uma carga com razão à 500 N/s até a sua ruptura. A Figura 1 apresenta um dos blocos confeccionados e a Figura 2 demonstra o mesmo capeado no momento de execução do ensaio de compressão mecânica.

**Figura 1.** Corpo de prova produzido

Fonte: Os autores (2025).

**Figura 2.** Ensaio de resistência a compressão mecânica

Fonte: Os autores (2025).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1. Granulometria e densidade

Para realizar a análise granulométrica do solo, verificou-se que o material passava integralmente na peneira 76,2 mm. Do material passante, observou-se com o auxílio de uma peneira de #4 que menos de 0,28% dos grãos tinha dimensões maiores que 5 mm. Dessa forma, desprezando esses grãos, foi separado1 kg de solo para o ensaio. O ensaio de peneiramento do solo e do pó de toner foi conduzido utilizando diferentes malhas, onde o material retido em cada peneira foi quantificado e convertido em porcentagem. A Tabela 1 apresenta a massa de solo que ficou retida em cada peneira após o peneiramento. Em complemento, a Tabela 1 também apresenta o acumulo da porcentagem retida (Mi) e o porcentual passante da amostra total.

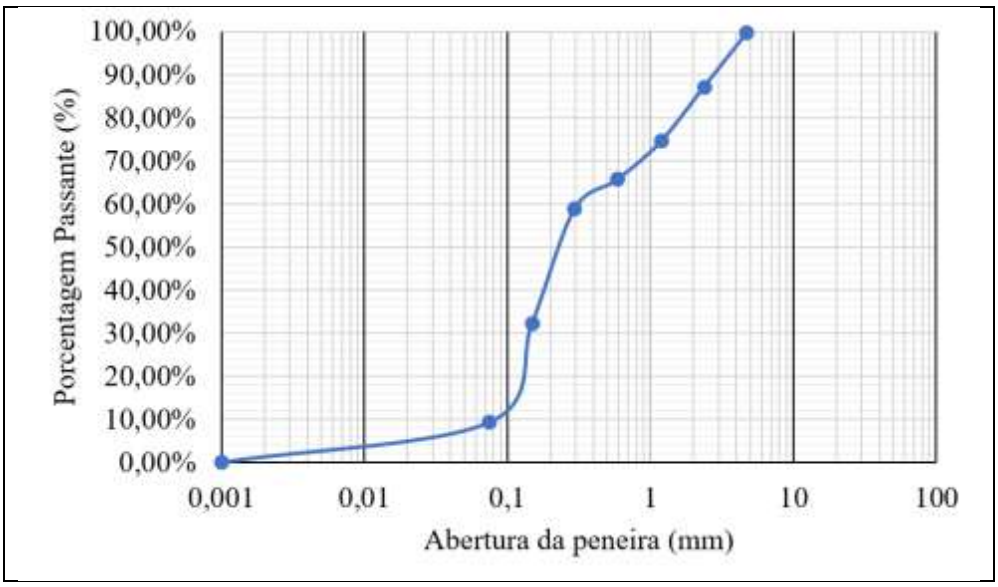
**Tabela 1**. Peneiramento do Solo

| PENEIRAMENTO DA AMOSTRA | | | |
|---|---|---|---|
| Peneira (mm) | Material Retido | | % Passante da amostra total |
| | Massa (g) | Massa Acumulada (g) | |
| 4,75 | 2,79 | 2,79 | 99,71 |
| 2,38 | 126,07 | 128,86 | 86,70 |
| 1,19 | 126,05 | 254,91 | 73,74 |
| 0,59 | 88,67 | 343,58 | 65,40 |
| 0,297 | 67,35 | 410,93 | 58,72 |
| 0,149 | 267,00 | 677,93 | 30,33 |
| 0,075 | 229,05 | 906,98 | 9,51 |
| Fundo | 93,02 | 1000 | 0,00 |

Fonte: Os autores (2025).

Com a porcentagem passante de cada peneira, a curva granulométrica foi desenvolvida (Figura 3).

**Figura 3.** Curva Granulométrica do Solo




Fonte: Os autores (2025).

A análise granulométrica do solo revelou que a peneira de 0,149 mm reteve a maior quantidade de grãos correspondendo a 26,7%, indicando uma predominância de partículas mais "finas", semelhante a pesquisa de Marangoni, Marangoni e Lima (2023). A curva granulométrica (Figura 1) mostra uma transição suave entre as frações de areia fina, média e grossa, destacando a concentração de partículas nas faixas de silte e areia fina, de acordo com os parâmetros da NBR 6502/2022.

No ensaio de peneiramento do pó de toner, 100% do material passou pelas peneiras maiores (de 0,297 a 0,075 mm). Nas peneiras mais finas, 58,77% ficou retido na peneira de 0,053 mm e o restante no fundo. Assim, o diâmetro máximo encontrado foi de 0,053 mm, com um módulo de finura de 0,59, demonstrando que o toner apresenta uma granulometria fina e uniforme.

O ensaio de densidade do resíduo de pó de toner foi de 0,783 g/cm³. É importante destacar que o método descrito na NBR 16916/2021 não pode ser aplicado, pois, devido às propriedades hidrofóbicas do material, ele não permite a adequada absorção de água necessária para a realização dos ensaios propostos. Dessa forma, foi utilizado o método simplificado dividindo a massa (g) do material pelo seu volume (cm³) (Silva; Santos, 2011).

### 3.2. Limites de Atterberg

A Tabela 2 apresenta os resultados para o Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade encontrados através dos ensaios no solo.

**Tabela 2.** Limites de Atterberg

| Propriedades | Valores (%) |
|---|---|
| Limite de Liquidez | 27,00 |
| Limite de Plasticidade | 18,13 |
| Índice de Plasticidade | 8,87 |

Fonte: Os autores (2025).

Os resultados encontrados informam que o solo pode ser utilizado para a confecção de tijolos solo-cimento, uma vez que o Boletim Técnico exige que o Limite de Liquidez do solo seja inferior a 45% e o Índice de Plasticidade menor do que 18%. Em ambas as situações, os valores obtidos foram menores, 27,00% e 8,87% respectivamente.

### 3.3. Classificação do solo

Através dos resultados obtidos com a Granulometria do Solo e os Limites de Atterberg, o mesmo foi classificado por três diferentes sistemas: Triângulo de Feret, Sistema Rodoviário de Classificação e Sistema

Unificado de Classificação de Solo, conforme explicado por Almeida (2005). A classificação determinada em cada um destes sistemas encontra-se na Tabela 3.

**Tabela 3.** Classificação do solo

| Sistema | Classificação |
|---|---|
| Triângulo de Feret | Areia |
| Sistema Rodoviário de Classificação | A-2-4 |
| Sistema Unificado de Classificação de Solo | SC – Areia argilosa |

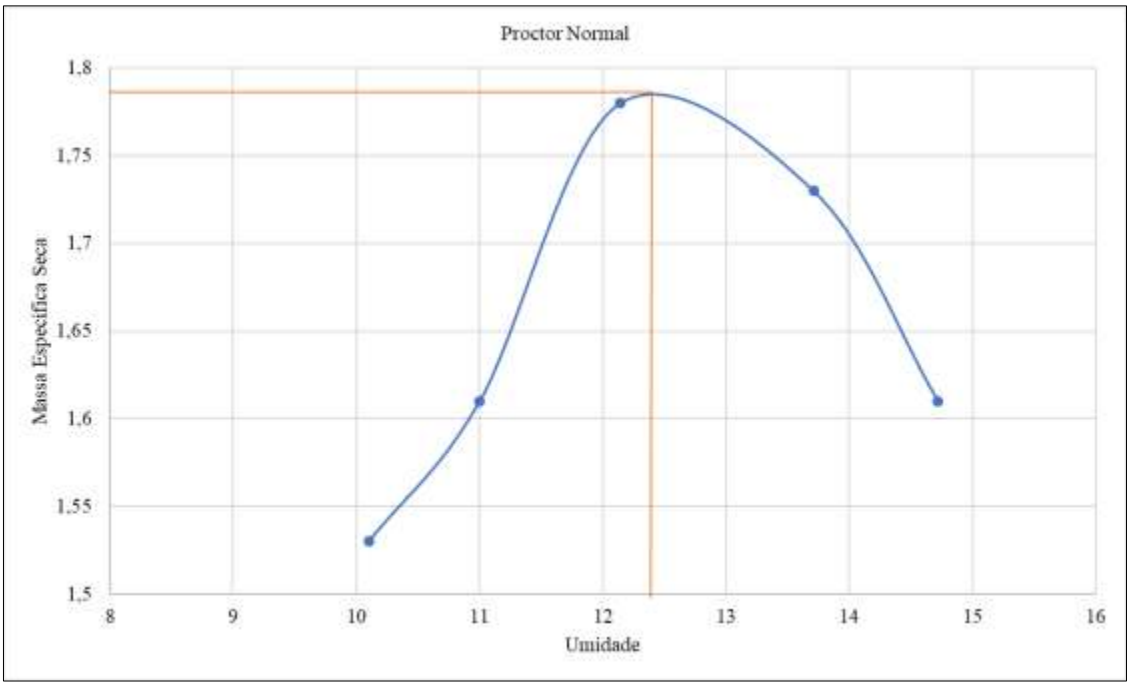
Fonte: Os autores (2025).

As classificações indicam que o solo é predominantemente areia. Os solos arenosos requerem, quase sempre, menores quantidades de cimento do que os argilosos e siltosos (Associação Brasileira de Cimento Portland e outros, 2000). Contudo, a classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solo informa que há a presença de argila na composição do solo. Ela será necessária para dar à mistura de solo e cimento, quando umedecida e compactada, coesão suficiente que permita a desmoldagem e o manuseio dos tijolos logo após a prensagem (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000).

### 3.4. Ensaio de compactação e permeabilidade do solo

Através do ensaio de compactação do solo, pelo método Proctor Normal, seguindo a NBR 7182/2016, os valores de massas específicas secas e teores de umidade foram determinados. O ensaio resultou em uma massa específica seca máxima de 1,78 g/cm³ e uma umidade ótima de aproximadamente 12,44%, definidos pela curva de compactação obtida na Figura 4. Esses dados fornecem a quantidade adequada de água para ser utilizada na fabricação dos tijolos.

**Figura 4.** Curva de Compactação do Solo




Fonte: Os autores (2025).

Seguindo as orientações descritas na NBR 13292/2021, determinou-se o coeficiente de permeabilidade do solo na temperatura de 20ºC. Devido à ausência de bomba de vácuo e tubos manométricos no laboratório, o ensaio foi adaptado. A saturação do solo foi realizada com água colorida (corante rosa), partindo de um reservatório com 9,7 L posicionado a 1,59 m de altura. O permeâmetro, com altura total de 28 cm, estava a 45 cm do chão. Após saturação total (com consumo de 2,1 L), iniciou-se o ensaio de permeabilidade em fluxo descendente. O líquido coletado foi medido com uma proveta a cada 100 ml, e os tempos registrados foram: 240 s, 240 s, 300 s, 360 s e 360 s, totalizando 1500 s para 500 ml. A carga hidráulica foi calculada como 154 cm, e a altura efetiva do corpo de prova como 20 cm.

Os coeficientes de permeabilidade medidos variaram de 0,000306 a 0,000245 cm/s, com média de 0,000280 cm/s à temperatura de 25 ºC. Para correção à temperatura padrão de 20 ºC, foi utilizada a equação da viscosidade da água, resultando em um coeficiente de permeabilidade corrigido final de 0,000248 cm/s.

### 3.5. Fluorescência de raios X

A Tabela 4 mostra a composição química do cimento, do solo e dos resíduos de pó de toner, determinada através do ensaio de Fluorescência de Raios X.

**Tabela 4.** Fluorescência de Raios X

| PÓ DE TONER | | CIMENTO CP II | | SOLO | |
|---|---|---|---|---|---|
| Composição Química | Quantidade (%) | Composição Química | Quantidade (%) | Composição Química | Quantidade (%) |
| $Fe_2O_3$ | 81,249 | CaO | 69,688 | $SiO_2$ | 66,056 |
| $SiO_2$ | 14,765 | $SiO_2$ | 16,516 | $Al_2O_3$ | 21,964 |
| SrO | 1,110 | $SO_3$ | 5,281 | $Fe_2O_3$ | 6,61 |
| $SO_3$ | 1,089 | $Al_2O_3$ | 3,845 | $TiO_2$ | 2,334 |
| $TiO_2$ | 0,796 | $Fe_2O_3$ | 2,822 | $K_2O$ | 1,681 |
| CaO | 0,522 | $K_2O$ | 1,296 | $SO_3$ | 0,604 |
| Outros | 0,479 | Outros | 0,552 | Outros | 0,751 |

Fonte: Os autores (2024).

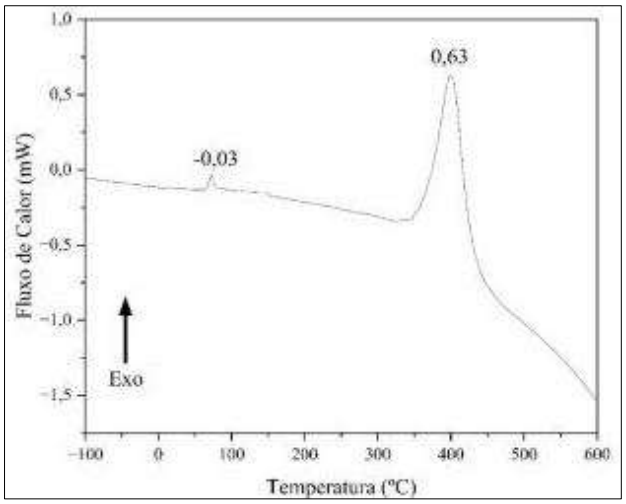
O cimento é predominantemente composto por óxido de cálcio - CaO (69,688%) e dióxido de silício - $SiO_2$ (16,516%), componentes que fornecem reatividade e resistência ao material (Neville, 2016). Devido ao seu alto teor de CaO, possui uma forte capacidade de reagir com a água para formar compostos aglomerantes importantes durante a mistura com o solo (Castro, 2021).

O solo apresenta uma alta concentração de $SiO_2$ (66,056%) e óxido de alumínio - $Al_2O_3$ (21,964%), indicando uma quantidade de argilas que ajudará nas suas propriedades de plasticidade e coesão dos tijolos (Associação Brasileira de Cimento Portland e outros, 2000). Já o pó de toner é composto majoritariamente por óxido férrico - $Fe_2O_3$ (81,249%) e $SiO_2$ (14,765%), sugerindo a presença de óxidos metálicos que podem interferir as propriedades dos tijolos.

### 3.6. Análise térmica

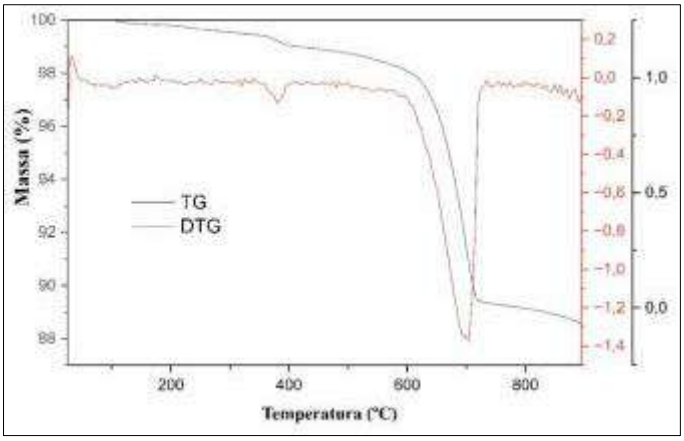
As Figuras 5 e 6 apresentam os resultados dos ensaios de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Análise Termogravimétricas (TG) nos resíduos de pó de toner, respectivamente.

**Figura 5.** Calorimetria Exploratória Diferencial




Fonte: Os autores (2025).

**Figura 6.** Análise Termogravimétrica




Fonte: Os autores (2025).

O ensaio de DSC revelou um pequeno pico exotérmico a aproximadamente 73ºC, correspondente a remoção de umidade (Vijay; Singh, 2021). Um segundo pico exotérmico também foi observado a aproximadamente 400°C, correspondente à decomposição do negro de fumo presentes no toner (Hammani *et al.*, 2019). A área interna do pico foi de 42,07 mW indicando a quantidade de energia exotérmica desprendida nesta temperatura (Lemos, 2003). Este resultado garante que no desenvolvimento dos tijolos na faixa de temperatura pretendida para o uso desse resíduo na construção civil, o material seja quimicamente estável. Isso é evidenciado pela ausência de transições energéticas no intervalo de 0 a 100°C, garantindo sua segurança e eficiência no processo produtivo.

A estabilidade térmica do resíduo de toner foi estudada no ensaio de Termogravimetria. A curva termogravimétrica apresentou uma perda de massa de 0,32% em 400°C atribuída aos hidróxidos presente no material. A perda de massa significativa de 8,87% ocorreu entre 600°C e 800°C, referente a decomposição da molécula orgânica de cadeia longa presente no resíduo (Fernández *et al.*, 2022). A curva derivada da TG (DTG) confirma as perdas de massa visualizadas na curva de TG (Dong *et al.*, 2017). Acima de 800°C, o material remanescente mostrou-se termicamente estável.

### 3.7. Avaliação dimensional

As dimensões de todos os tijolos foram medidas logo após a fabricação, para garantir que atendiam às especificações estabelecidas. Cada tijolo apresentou medidas uniformes de 20 cm de comprimento, 10 cm de largura e 6 cm de espessura. Após 28 dias de cura, o ensaio foi executado novamente e os valores permaneceram os mesmos. As únicas variações observadas foram pequenas, com desvios na espessura não ultrapassando 2 mm, indicando um alto grau de consistência no processo de fabricação.

### 3.8. Ensaio de resistência a compressão mecânica

Os resultados obtidos através do ensaio de resistência a compressão mecânica revelaram valores de 10,38; 12,27; e 13,04 MPa para os tijolos T1, T2 e T3, com média de 11,90±1,37 MPa de resistência. Estes resultados foram 500% superiores ao requisito mínimo de 2,0 MPa estabelecido pela NBR 8492/2012.

Apesar de não ter sido incluído um traço controle (sem adição de resíduo de pó de toner) nesta etapa experimental, os resultados obtidos mostram-se superiores aos valores reportados na literatura para tijolos solo-cimento convencionais produzidos com materiais, procedimentos e dosagens semelhantes. Estudos anteriores que utilizaram traços controle, sem qualquer tipo de resíduo, relatam resistências à compressão de 2,70 MPa (Aguiar *et al.*, 2024); 5,0 MPa (Souza; Segantini; Pereira, 2008); 6,32 MPa (Sousa; Tavares, 2023); 2,09 MPa (Vale Júnior, 2022); e 2,00 MPa (Batista; Fernandes, 2022), todos aos 28 dias de cura. Em comparação, os tijolos T1, T2 e T3 apresentaram um desempenho expressivamente superior.

Essa melhoria na resistência pode ser explicada pela natureza hidrofóbica do pó de toner, ajudando a diminuir a absorção de umidade pelos tijolos (Melnjak *et al.*, 2019). Além disso, as finas partículas do pó de toner podem preencher os vazios na mistura de solo-cimento. Esse preenchimento de espaços vazios contribui para uma maior densidade do material, resultando em uma matriz mais compacta e, portanto, mais resistente (Itoua *et al.*, 2023).

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aos 28 dias de cura, a incorporação de 3% de resíduos de pó de toner na produção de tijolos ecológicos de solo-cimento resultou em uma resistência à compressão mecânica significativamente superior, com média de 11,90 MPa — valor 500% acima do mínimo exigido pelas normas NBR 8491/2012 e 8492/2012. Esses resultados demonstram que a adição desse resíduo atende plenamente às exigências mecânicas e representa uma alternativa viável, promissora e sustentável para a construção civil. Embora o teste de absorção de água não tenha sido realizado, devido ao foco na avaliação mecânica e ambiental, reconhece-se sua importância em estudos de durabilidade. Assim, recomenda-se que pesquisas futuras incluam essa análise para ampliar a compreensão sobre o desempenho a longo prazo e as aplicações práticas desse material inovador.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE) pela disponibilidade da utilização do laboratório de solos, em especial a Prof. Beatriz de Mello Massimino Rotta e ao laboratorista Isac. Agradecem também ao Prof. Silvio Rainho Teixeira, por permitir utilizar o Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos, na Universidade Estadual Paulista (UNESP).

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. O. *et al.* Inovação sustentável na construção: tijolos de solo-cimento melhorados com resíduo cerâmico reciclado. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 13, p. e12432, dez. 2024. DOI: https://doi.org/10.54033/cadpedv21n13-344

ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização física e classificação dos solos**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005. Disponível em: https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/solos/livros/CARACTERIZACAO%20FISICA%20E%20CLASSIFICACAO%20DOS%20SOLOS.pdf. Acesso em: 22 ago. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Fabricação de Tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais**. São Paulo: ABCP, 2000. Disponível em: https://abcp.org.br/fabricacao-de-tijolos-de-solo-cimento-com-a-utilizacao-de-prensas-manuais-bt-111/. Acesso em: 25 ago. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491:** Tijolo de solo-cimento — Requisitos. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833:** Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8492:** Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457:** Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181:** Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459:** Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180:** Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. A**BNT NBR 7182** - Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janiero, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292:** Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:** Solos e rochas - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BATISTA, F. P.; FERNANDES, F. F. Tijolos de solo-cimento com fibras vegetais de juta e malva. *In:* CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA – CONTECC, 2022. Goiânia. **Anais** [...] Goiânia: CONTECC, 2022. Disponível em: https://www.confea.org.br/midias/uploads-imce/Contecc%202022/Civil/TIJOLOS%20DE%20SOLO-CIMENTO%20COM%20FIBRAS%20VEGETAIS%20DE%20JUTA%20E%20MALVA.pdf Acesso em: 23 ago. 2025.

CASTRO, V. G. Cimento Portland. *In*: CASTRO, V. G. **Compósitos madeira-cimento:** um produto sustentável para o Futuro. Mossoró, RN: EdUFERSA, 2021. p. 13–21. DOI: https://doi.org/10.7476/9786587108612.0002

SEKHAR, D.; NAYAK, S. Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 531–536, mar. 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.125

DONG, L. *et al.* Pyrolysis Routine of Organics and Parameter Optimization of Vacuum Gasification for Recovering Hazardous Waste Toner. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 5, n. 11, p. 10038–10045, 6 nov. 2017. DOI: https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02024

FERNÁNDEZ, B. *et al.* Recycling of Waste Toner Powder as Adsorbent to Remove Aqueous Heavy Metals. **Materials**, v. 15, n. 12, jun., 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15124150

HAMMANI, S. *et al.* Toner waste powder (twp) as a filler for polymer blends (LDPE/HIPS) for enhanced electrical conductivity. **Materials**, v. 12, n. 19, out. 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/ma12193062

HAN, D.; YU, D.; QIU, J. Assessing coupling interactions in a safe and just operating space for regional sustainability. **Nature Communications**, v. 14, n. 1, dez. 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-023-37073-z

ITOUA, P. I. *et al.* Influence of Waste Toner on Asphalt Binder: Chemical and Rheological Characterization. **Molecules**, v. 28, n. 6, mar. 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules28062794

JUJUN, R.; JIA, L.; ZHENMING, X. Improvements of the recovery line of waste toner cartridges on environmental and safety performances. **Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 12, p. 6457–6462, 18 jun. 2013. DOI: https://doi.org/10.1021/es305311k

LEMOS, A. B. Generalidade da Análise Térmica. **Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 1-4. 2003. Disponível em: https://ital.agricultura.sp.gov.br/arquivos/cetea/informativo/v15n3/v15n3_artigo1.pdf. Acesso em: 23 ago. 2025.

LIMA, U. T. G. M. **Uso da fibra do resíduo de coco verde na produção de tijolos ecológicos**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal Pernambuco, Recife, 2020,

MARANGONI, A. C.; MARANGONI, R. J.; LIMA, O. J. Tijolo ecológico fabricado com resíduos de pet. *In*: **Tecnologia e inovação em ciências agrárias e biológicas avanços para a sociedade atual**. [S. l.]: Seven Editora, 2023. DOI: https://doi.org/10.56238/tecnolocienagrariabiosoci-005

MASKELL, D.; HEATH, A.; WALKER, P. Inorganic stabilisation methods for extruded earth masonry units. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 602–609, nov. 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.094

MASKELL, D.; HEATH, A.; WALKER, P. Appropriate structural unfired earth masonry units. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, v. 169, n. 5, p. 261–270, out. 2016. DOI: https://doi.org/10.1680/jcoma.15.00034

MAXILIANO, P. S. **Fabricação de solo-cimento com adição de resíduos de madeira provenientes da construção civil**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2009. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/ISMS-7VZJYP/1/dissertacao_maxiliano_perdigao_dos_santos.pdf. Acesso em: 11 ago. 2025.

MELNJAK, I. *et al.* Waste Toner powder in concrete industry: an approach towards circular economy. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 18, n. 9, p. 1897–1906, 2019. DOI: https://doi.org/10.30638/eemj.2019.181

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil**. Brasília: ONU, 2025. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 11 ago. 2025.

NASCIMENTO, C. S. **Tijolo solo cimento com adição de rejeito de manganês do sudeste paraense**. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará. Belém, PA,. 2015. Disponível em: https://ppgec.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2015/antonio.pdf. Acesso em: 11 ago. 2025.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: [s. n.], 2016.

PARTHASARATHY, M. **Challenges and emerging trends in toner waste recycling:** A review. Recycling MDPI. 1 set. 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/recycling6030057

RING, P. *et al.* Circular Economy Approach: Recycling Toner Waste in Cement-Based Construction Materials. **Sustainability**, v. 16, n. 11, p. 4707, 31 maio 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su16114707

SILVA, M. C.; SANTOS, G. O. Densidade aparente de resíduos sólidos recém coletados. *In:* CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 5., 2011, Maceió. **Anais** [...]. Maceió: Instituto Federal de Alagoas, 2011.

SOUSA, L. R. TAVARES, F. F. C. Tijolo de solo-cimento com resíduos sólidos: Uma oportunidade para construção de casas populares em Macapá, AP. **Cerâmica industrial**, v. 28, n. 1, p. 1–7, 2023. DOI: https://doi.org/10.4322/cerind.2022.011

SOUZA, M. I. B.; SEGANTINI, A. A. S.; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 205–212, abr. 2008. DOI: https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000200014

VALE JÚNIOR, G. J. **Avaliação de propriedades do tijolo ecológico com substituição parcial do cimento pelo resíduo de corte de rochas ornamentais**. Cajazeiras: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, 2022.

VIJAY, M.; SINGH, G. Analysis of Toner Powder Using Different TechniquesJETIR2106708**. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research**. JETIR, 2021. Disponível em: www.jetir.orgf53. Acesso em: 23 ago. 2025.

VILELA, A. P. *et al.* Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction and Building Materials**, v. 262, 30, nov., 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883

YORDANOVA, D.; ANGELOVA, S.; DOMBALOV, I. **Utilisation Options for Waste Toner Powder**. Sófia, Bulgaria. 2014. Disponível em: http://environment.scientific-journal.com/articles/3/23.pdf. Acesso em: 23 ago. 2025.