

# Desempenho físico e mecânico de telhas cimentícias produzidas com incorporação de resíduo de polietileno tereftalato

*Physical and mechanical performance of cement tiles produced with incorporation of polyethylene terephthalate residue*

Ivan Julio Apolonio Callejas<sup>1\*</sup> , Guilherme Fernandes Butinhoni<sup>1</sup> 

## RESUMO

Grande quantidade de resíduos de polietileno tereftalato (PET) é gerada anualmente em razão da utilização desse polímero na fabricação de embalagens e garrafas. Estudos indicam a viabilidade de utilização desse resíduo como insumo para a produção de argamassas, focando na sustentabilidade. Este trabalho demonstra a viabilidade técnica, sob os aspectos físico e mecânico, da substituição de areia natural por PET em misturas de argamassas destinadas à fabricação de telhas cimentícias (TC). Percorreram-se as seguintes etapas metodológicas: estudo de dosagem, confecção de corpos de prova com argamassas com substituição da areia natural por resíduo de PET nos percentuais de 0, 5, 10 e 15%; avaliação das propriedades físico-mecânicas das misturas e definição da porcentagem de incorporação de PET; produção e avaliação de TC de referência e com PET. Selecionou-se a mistura com 15% de incorporação de PET para fabricar as telhas em razão de sua adequada resistência à flexão e porosidade. O PET em pouco interferiu nas propriedades visuais, geométricas, físicas e mecânicas das TC, mantendo-as de acordo com os limites normativos. O PET é tecnicamente viável para ser incorporado em matrizes cimentícias para a produção de TC, o que evitaria sua destinação a áreas ilegais e aterros, contribuindo para a sustentabilidade urbana.

**Palavras-chave:** resíduos sólidos; resíduos poliméricos; reciclagem; sustentabilidade urbana.

## ABSTRACT

A large amount of Polyethylene Terephthalate (PET) waste is generated annually due to the use of this polymer in the manufacture of packaging and bottles. Studies indicate the feasibility of using this residue as an input for the production of mortars, focusing on sustainability. This work demonstrated the technical feasibility under the physical, mechanical, and thermal aspects of the incorporation of natural sand aggregate by PET waste flakes in mortar mixtures for cementitious tiles (CT) manufacture. The following methodological steps were carried out: dosage study, preparation of specimens with mortar with replacement of natural sand by PET residue in percentages of 0, 5, 10, and 15%; evaluation of the physical and mechanical properties of the mixtures and definition of the percentage of PET incorporation; production and evaluation of the reference and PET CTs. The blend with 15% PET incorporation was selected to manufacture the CTs given the adequate flexural strength and porosity. PET did not interfere in the CT's visual, geometric, physical, and mechanical properties, attending to the standard requirements. The PET is technically feasible to be incorporated into cement matrices for the production of CTs, avoiding their destination in illegal areas and landfills, contributing to urban sustainability.

**Keywords:** solid waste; polymeric waste; recycling; urban sustainability.

## INTRODUÇÃO

A destinação de resíduos sólidos de forma inadequada nas cidades causa a ocupação de vias e logradouros públicos e a degradação da paisagem urbana, podendo trazer como consequência a poluição dos mananciais, o assoreamento de rios e córregos, a contaminação do solo, a obstrução dos sistemas de drenagem urbana e a intensificação de enchentes (FUNDAÇÃO

NACIONAL DE SAÚDE, 2010; AGOPYAN; JOHN, 2011). Nesse sentido, sua reciclagem proporciona vários benefícios, com reflexo direto na redução do consumo de recursos naturais não renováveis (BRASIL, 2002). Constitui-se em alternativa para assegurar padrões de produção e de consumo mais sustentáveis, alinhados com a Agenda 2030, especialmente com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 3 (Saúde e Bem-Estar),

<sup>1</sup>Universidade Federal do Mato Grosso – Cuiabá (MT), Brasil.

\*Autor correspondente: ivancallejas1973@gmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: nenhum.

Recebido: 20/04/2022 - Aceito: 10/08/2022 - Reg. ABES: 20220095

11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 13 (Combate às Alterações Climáticas) (ONU, 2015).

Entre os resíduos sólidos gerados em abundância nas cidades, tem-se o polietileno tereftalato (PET), um polímero termoplástico que apresenta alta transparência, baixa densidade, estabilidade dimensional ao manuseio, excelente resistência mecânica/ química, capacidade de suportar a ação de agentes agressores, além de apresentar baixa permeabilidade à passagem de gases e odores (NAVARRO *et al.*, 2008). Amplamente utilizado na indústria brasileira, em 2019 foram produzidas mais de 596 mil toneladas de PET, das quais apenas 55% foram reaproveitadas visando a sua reutilização na produção de embalagens, lâminas, chapas, têxteis, entre outros (ABIPET, 2019). Apesar de a quantidade de PET reciclado estar em expansão, ela ainda é inferior à de outros insumos como o alumínio (85%) e o vidro (56%). A baixa taxa de reciclagem está relacionada à ausência de uma Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) mais robusta, bem como à falta de coleta e destinação adequadas, que, aliada aos maus hábitos da população, que usualmente não realiza a coleta seletiva, faz com que grande quantidade desse material seja destinada aos aterros sanitários (SZIGETHY; ANTENOR, 2020). Nesse sentido, a busca de soluções técnicas que explorem o reaproveitamento e a reciclagem desse material é de grande importância para a sociedade, tanto sob o aspecto econômico e social quanto sob o ambiental.

Em razão da sua baixa densidade e condutividade térmica, o PET torna-se um material propício para incorporação em materiais de construção civil, com vistas a aprimorar propriedades como as físicas e térmicas. Ao se analisar sua utilização para a produção de componentes construtivos, constata-se um número incipiente de trabalhos que demonstram sua aplicabilidade prática como material passível de ser usado em substituição aos insumos tradicionais da cadeia produtiva da construção civil (SCHILIVE *et al.*, 2021). De fato, o PET vem sendo inserido timidamente nesse mercado em revestimentos, carpetes, compostos de plásticos moídos que imitam madeira, entre outros (ARAGON; GHIRALDELLO, 2014), e seu uso nos sistemas construtivos das edificações ainda é limitado.

Entre os componentes usados no sistema de cobertura (SC) das edificações habitacionais, as telhas são aquelas que asseguram a estanqueidade das fontes de umidades externa e realizam trocas térmicas com o ambiente externo, influenciando o desempenho das edificações. Diante disso, necessitam apresentar adequadas propriedades físicas, mecânicas e térmicas com vistas a proporcionar adequada vida útil, condições de habitabilidade e de higiene ao ambiente construído (ABNT, 2021). Entre as várias tipologias de telhas aplicadas no SC, tem-se a utilização das telhas de concreto (TC) em virtude de sua capacidade de atendimento aos requisitos descritos. Elas são um componente com forma essencialmente retangular e perfil geralmente ondulado, composto de cimento, agregado e água, aditivos ou adições, fornecido na cor natural ou colorido pela adição de pigmento (ABNT, 2009a).

Algumas pesquisas têm voltado seu enfoque para a incorporação de resíduos nas misturas destinadas à confecção das TC, visando não só aperfeiçoar suas propriedades físicas e mecânicas, mas também produzir materiais mais sustentáveis, que ajudem a reduzir a enorme quantidade de resíduos sólidos gerados. No Brasil, entre os que são considerados para a produção das TC, tem-se os provenientes de resíduos de borracha moída extraída de pneus (CINTRA, 2008), de resíduo de construção civil (RCC) (CINTRA, 2008; MENDONÇA; BARCA; ANDREASI, 2010), de materiais com características isolantes (vermiculita; poliestireno; e aditivo incorporador de ar) (DAMASCENO *et al.*, 2015),

de poliestireno expandido (EPS) (MULLER *et al.*, 2016), de fibra derivada do bagaço de cana-de-açúcar (VILPERT, 2016), de mármore proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais (FERNANDES, 2017), de gesso (LIMA *et al.*, 2019) e de rejeitos de minério de ferro (EUGÊNIO *et al.*, 2021). Uma das características das TC com incorporação de resíduos poliméricos (borracha, poliestireno e EPS) observada nas pesquisas é a redução da capacidade de resistência à flexão e das massas das TC à medida que o teor de incorporação dos resíduos se eleva na mistura.

Assim, considerando a crescente necessidade de redução de resíduos sólidos lançados nas cidades, este trabalho objetiva avaliar o efeito da substituição do agregado miúdo (areia natural) por resíduos de PET nas propriedades físicas e mecânicas tanto dos traços quanto das TC fabricadas por extrusão. Busca-se demonstrar a viabilidade da incorporação desse resíduo na cadeia produtiva da indústria da construção civil, com vistas a agregar valor econômico ao produto e gerar uma alternativa técnica para absorver e/ou reduzir o passivo ambiental da cadeia produtiva do PET.

## METODOLOGIA

### Materiais: caracterização

Os materiais utilizados na confecção da argamassa para a produção das TC foram o cimento Portland do tipo CP II F 32, a areia natural (extração de rio) e *flakes* de PET residual do processamento da indústria recicladora de plásticos (moagem de garrafas de bebida pós-consumo). Para sua utilização, o material de PET sofreu peneiramento em malha 2,36 mm, o que evitou que grãos de maiores pudessem comprometer o acabamento das TC.

O cimento Portland foi submetido aos seguintes ensaios para sua caracterização: massa específica, módulo de finura, água de consistência, tempo de pega e resistência à compressão, caracterizados segundo as normas técnicas brasileiras (NBR) 16605 (ABNT, 2017a), 11579 (ABNT, 2013), 16606 (ABNT, 2017b), 16607 (ABNT, 2017c) e 7215 (ABNT, 2019), respectivamente. Já as amostras da areia natural (agregado miúdo) passaram pelos seguintes ensaios: redução da amostra de campo — NBR NM 27 (ABNT, 2001); análise de composição granulométrica — NBR NM 248 (ABNT, 2003); e massa específica — NBR NM 52 (ABNT, 2009d). Para a determinação da granulometria do miúdo de PET, foram utilizadas as peneiras da série normal e intermediária, com material agitado de forma manual (NBR NM 248). Para a determinação de sua massa específica, utilizou-se o método do Frasco de Chapman (NBR 9776) (ABNT, 1987), uma vez que o método vigente seria inadequado para esse material, pois emprega estufa em altas temperaturas em seu procedimento. Por possuir propriedades hidrofóbicas, o PET não absorve água e torna-se desnecessário determinar seu índice de absorção de água. A água usada para a produção das TC foi a proveniente da rede de abastecimento local, seguindo a NBR 15900 (ABNT, 2009b). A granulometria e as propriedades físicas dos materiais utilizados como insumos para a produção das TC estão indicadas na Figura 1 e na Tabela 1.

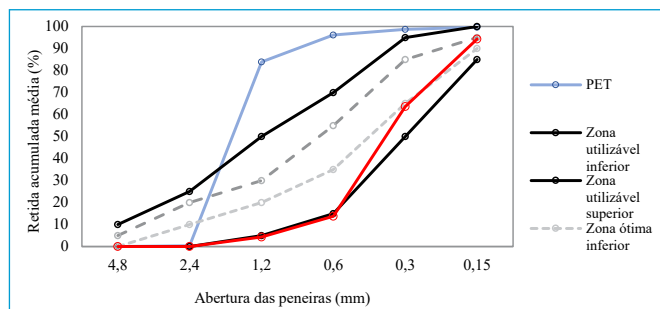
### Método

#### Etapa 1: definição do traço

O trabalho de Fernandes (2012) orientou a definição da dosagem, estabelecendo que o traço usualmente utilizado para a produção de TC está compreendido

entre 1:3 e 1:3,5 (cimento: areia) com fator água/cimento ( $a/c$ ) igual a 0,3. Pela revisão da literatura, percebeu-se que a incorporação de resíduos de PET proporciona redução da resistência mecânica nos traços de argamassas, com queda expressiva a 15% ou mais de substituição (BENOSMAN *et al.*, 2013; LUCOLANO *et al.*, 2013). Consideraram-se ainda os requisitos de desempenho especificados na norma de TC: suporte de carga mínima de 2,4 kN (classe do perfil B) no ensaio de flexão e absorção de água  $\leq 10\%$  (ABNT, 2009a).

Assim, o traço de 1:3 em massa com fator  $a/c = 0,3$  foi selecionado para ser utilizado para a produção da TC de referência (REF), sem adição de resíduos. A substituição de resíduos foi realizada considerando-se que o volume ocupado pela areia natural no interior da argamassa passará a ser ocupado pelas partículas de resíduo de PET. Dadas as pesquisas anteriores desenvolvidas, optou-se pela substituição de areia por resíduo de PET nos teores de 5, 10 e 15%, mantendo-se o volume. O fator  $a/c$  foi preservado nas misturas para tornar os traços



**Figura 1** - Distribuição granulométrica da areia natural e do resíduo sólido de polietileno tereftalato (PET).

comparáveis entre si. Não foi utilizado nenhum aditivo na produção dos traços. Para o cálculo da substituição do agregado de resíduos, utilizou-se a Equação 1.

$$M_r = V(\%) \cdot \frac{M_a \times \gamma_r}{\gamma_a \times 100} \quad (1)$$

Em que:

$M_r$ : massa de resíduo a ser utilizada no traço (g);

$V$  (%): percentual de areia a ser substituído pelo resíduo;

$M_a$ : massa total de areia no traço (g);

$\gamma_a$ : massa específica da areia ( $\text{g cm}^{-3}$ ); e

$\gamma_r$ : massa específica do resíduo ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

A Tabela 2 ilustra o quantitativo dos insumos usados nos traços, em massa (gramas).

Foram confeccionados de forma manual 15 corpos de prova (CP) para cada traço REF e traços com substituição de *flakes* de PET em 5% (PET5), 10% (PET10) e 15% (PET15) (Figura 2). De acordo com Fernandes (2012), o concreto seco tem relação direta com o grau de compactação utilizado em sua moldagem, com influência direta do tipo de máquina utilizada para confeccionar a TC, interferindo dessa forma em sua resistência final. Nesse sentido, a quantidade de camadas e o número de golpes foram definidos em estudo preliminar de dosagem, no qual se procurou promover o adensamento dos CP de tal forma que se simulasse o comportamento de fábrica, em que a massa é extrudada. A moldagem ocorreu em moldes cilíndricos de  $5 \times 10$  cm, pré-lubrificadas, nos quais a mistura foi compactada em quatro camadas de 30 golpes. A desmoldagem dos CP ocorreu após 24 horas, sendo eles submersos em água para a cura, até a realização dos ensaios de caracterização física e mecânica.

**Tabela 1** - Ensaios de caracterização dos agregados miúdos e graúdos.

Agregado	Ensaio	Valores	Foto
Cimento Portland Tipo CP II F 32	Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )	4,04	
	Finura na # 0,075 mm (%)	0,3 ( $\leq 12$ )	
	Tempo de pega (hora:min)	Início: 02:25 ( $\geq 1$ h) e fim: 04:05 ( $\leq 10$ h)	
	Resis. à compressão (28 dias)	33,4 MPa ( $\geq 32$ )	
Areia Natural	Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )	2,66	
	Diâmetro máximo (mm)	1,2	
	Módulo de finura	1,76	
Flakes de PET	Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )	1,33	
	Diâmetro máximo (mm)	2,55	
	Módulo de finura	3,79	

**Tabela 2** - Proporção em massa dos agregados na produção dos traços (em gramas).

Material	REF	PET		
Resíduo de PET (%)	0	37 (5%)	75 (10%)	112 (15%)
Cimento	250	250	250	250
Areia	750	713	675	638
Água	75	75	75	75
Cimento: Agregado Miúdo: Resíduo	1:3, $a/c = 0,3$	1:2,85:0,15, $a/c = 0,3$	1:2,7:0,3, $a/c = 0,3$	1:2,55:0,45, $a/c = 0,3$

REF: telha cimentícia de referência; PET: polietileno tereftalato.

Definidos os traços, realizaram-se os ensaios de massa específica ( $\rho$ ) (Equação 2) e absorção de água ( $\alpha$ ) (Equação 3) em três CP para cada traço, conforme as Equações 2 e 3. Para a TC, foi determinada ainda a massa da telha quando imersa em água ( $m^3$ ) por meio de balança hidrostática, com a finalidade de determinar o índice de vazios conforme a Equação 4.

$$\rho = \frac{m1}{m1 - m3} \quad (2)$$

$$\alpha(\%) = \frac{m2 - m1}{m1} \times 100 \quad (3)$$

$$Iv(\%) = \frac{m2 - m1}{m2 - m3} \times 100 \quad (4)$$

Em que:

M1: massa seca do corpo de prova/ telha (g);

M2: massa do corpo de prova/ telha na condição de saturado com superfície seca (g);

M3: massa do corpo de prova/ telha quando imerso em água (g).

O ensaio de resistência à compressão axial foi executado em cada traço desenvolvido, nas idades de sete e 28 dias. Já o de flexão foi executado apenas na idade de 28 dias. Os ensaios foram conduzidos em uma prensa Solotest Hidráulica digital, previamente calibrada, seguindo as recomendações normativas da NBR 13858-2 (ABNT, 2009c). Para a próxima etapa, apenas o traço que apresentou a maior porcentagem de incorporação de PET e que atendeu aos requisitos de desempenho físico-mecânico foi selecionado para a produção da TC.

### Etapa 2: produção das telhas de concreto

Definida a porcentagem de PET de incorporação, deu-se sequência à fabricação das TC do tipo onda baixa ( $d = 50$  mm), dimensões  $420 \times 330 \times 12$  mm, produzidas na extrusadora da indústria de artefatos de concreto parceira, conforme processo ilustrado na Figura 3.

### Avaliação visual, dimensional e de desempenho físico e mecânico das telhas cimentícias

As telhas produzidas sofreram inspeção visual com o intuito de avaliar sua homogeneidade e presença de fissuras. A variação na tonalidade de cinza

interfere na refletância da telha à radiação solar ( $\rho$  = taxa de radiação solar refletida/ taxa de radiação solar incidente), a qual foi estimada com o equipamento Alta Reflectance Spectrometer fabricado pela Vernier Software & Technology, seguindo procedimento indicado por Cordeiro *et al.* (2020).

Para a análise dimensional, foram coletadas as dimensões de seis TC de cada traço produzido: largura (b), comprimento (l), espessura (e) e profundidade do perfil (d). O valor de cada dimensão do corpo de prova foi resultado da média de três determinações executadas em pontos distintos. O desempenho seguiu os ensaios previstos na NBR13858-2: aferição da massa (kg), absorção de água (%), carga de ruptura à flexão (kN) e permeabilidade. Neste último, a TC não deve apresentar vazamentos nem formação de gotas em sua face inferior.

### Análise estatística

Os resultados dos ensaios previamente descritos foram representados por meio da média e do desvio padrão, considerando-se a quantidade de determinações para cada traço ou TC produzidas. Com vistas a examinar se as diferenças encontradas entre as propriedades físicas e mecânicas (amostras) são significativas, aplicou-se a técnica de análise de variância (Anova), adotando-se o nível de significância de 5%.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Etapa 1: estudo dos traços

Nota-se que, quanto maior a quantidade de incorporação de resíduo de PET em substituição à areia natural na matriz cimentícia da argamassa, menor é sua massa específica se comparada ao traço REF (Figura 4A), comportamento compatível com aquele observado por Benosman *et al.* (2013) em estudo de argamassa de traço 1:3 ( $a/c = 0,5$ ), com substituição de areia por PET em 2,5, 5 e 7,5%. Com relação à absorção de água, observou-se comportamento inverso, ou seja, elevação em relação ao traço REF (Figura 4B), mantendo-se de acordo com os limites normativos. Para o maior teor de substituição (15%), houve redução da massa aparente na ordem de 12,5% e elevação da absorção em 93%.

Esse comportamento pode ser atribuído às propriedades físicas do PET, particularmente a densidade da partícula e de sua forma geométrica (lamelar,

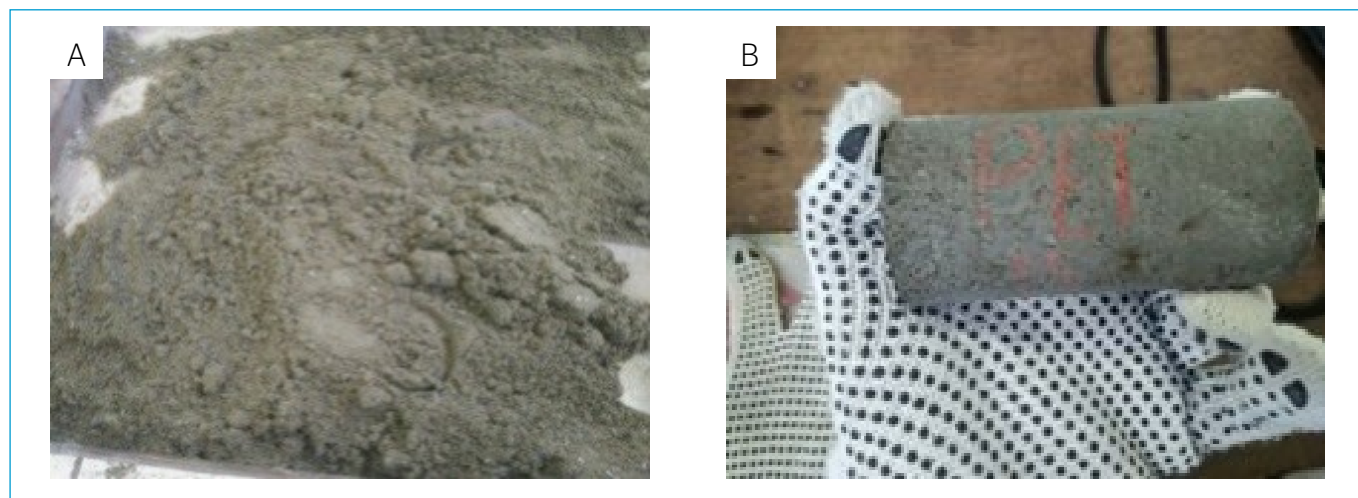


Figura 2 - (A) Característica da argamassa com polietileno tereftalato (PET) e (B) corpo de prova com 15% de PET.

em contrapartida da esférica observada na areia natural), que proporcionam diminuição da massa específica ao mesmo tempo em que aumentam a macroporosidade à medida que o teor de resíduos se eleva na matriz. A maior porosidade relaciona-se com a heterogeneidade da matriz cimentícia, uma vez que a interrupção de material homogêneo por certa quantidade de material heterogêneo pode criar grandes espaços vazios dentro da mistura (Benosman *et al.*, 2013). Nesse sentido, esses vazios proporcionam ligações mais fracas entre os resíduos de PET e a argamassa de cimento, o que pode comprometer a resistência mecânica. Todas as porcentagens de substituição utilizadas nas dosagens são adequadas para ser utilizadas na fabricação das TC, visto que a porcentagem de absorção foi inferior a 10%, valor limite recomendado

pela NBR13858-2. Entretanto, o traço com 15% de substituição aproximase do limite normativo.

A correlação estabelecida entre o teor de substituição de PET e a porcentagem absorção de água ( $R^2 = 0,9977$ ) revela que, segundo esse critério normativo, seria possível substituir o PET em até 25% na matriz cimentícia. A análise estatística (Anova) demonstrou que há diferença significativa entre a massa específica do traço REF e a do traço com incorporação de PET15 ( $p < 0,05$ ), porém os traços PET5, PET10 e PET15 não diferem entre si ( $p > 0,05$ ). Já os valores das absorções de água determinados em todos os traços diferem estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ). A diminuição da massa específica é um aspecto positivo, pois pode reduzir a massa da telha, implicando alívio de cargas no sistema da cobertura.



Figura 3 - (A) Peneiramento da areia, (B) Pesagem e elevação de materiais pela tremona, (D) argamassa na esteira, (E) extrusão e (F) secagem estufa.

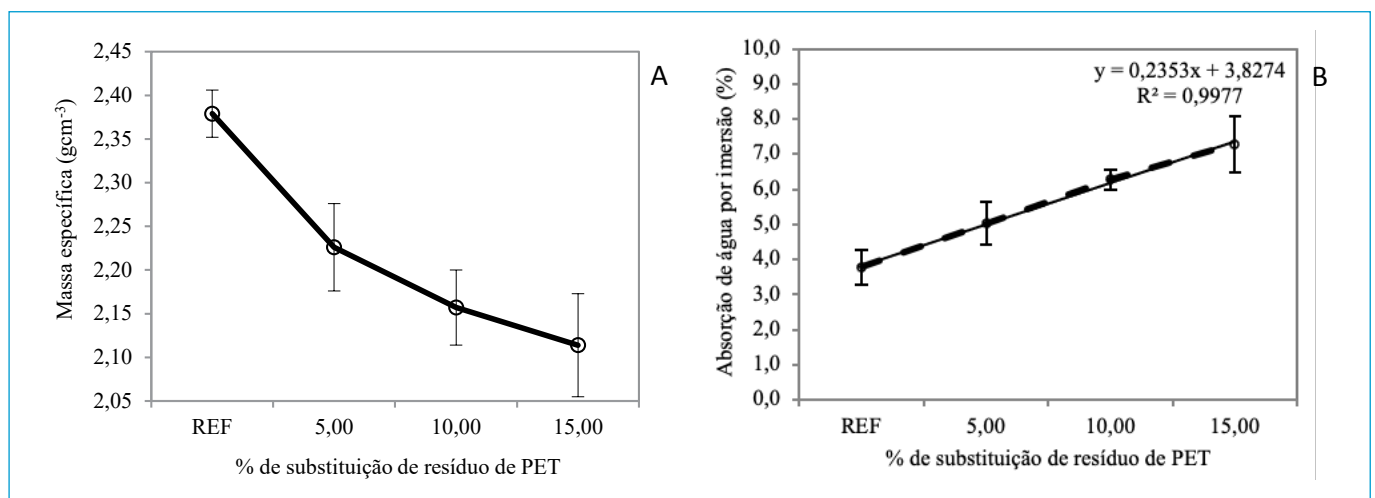


Figura 4 - (A) Densidade aparente (g cm<sup>-3</sup>) e (B) absorção de água (%) em função do teor de substituição de polietileno tereftalato (PET).



Nota-se elevação da resistência à compressão axial em todos os traços pesquisados nas idades ensaiadas. Por outro lado, constata-se redução da resistência mecânica tanto à compressão axial quanto na tração à flexão à medida que a porcentagem de substituição de PET se eleva na massa (Figura 5). Tanto a intensidade quanto a redução observada nas resistências são compatíveis com aquelas quantificadas por Benosman *et al.* (2013). A análise estatística mostrou que há diferença significativa da resistência à compressão/ tração na flexão entre o traço REF e o traço com incorporação de PET15 ( $p < 0,05$ ), porém os demais traços não diferem entre si ( $p > 0,05$ ), nem aos sete nem aos 28 dias. A introdução do PET na matriz cimentícia dificulta a trabalhabilidade e compactação da massa (justificando os diferentes valores de desvios padrão), tornando-a mais porosa (reflexo da maior absorção de água), o que provoca a perda de resistência observada nos ensaios (ALBANO *et al.*, 2009).

Em termos quantitativos, pode-se afirmar que as dosagens de substituição de 5 a 15% são adequadas para ser utilizadas na fabricação de TC, visto que apresentam absorção de água inferior a 10%, a última próxima a esse limiar. Em razão da maior quantidade de incorporação de resíduo proporcionada pela dosagem com 15% de resíduo, esta foi definida para ser utilizada na fabricação das TC com substituição de areia natural por PET.

## Etapa 2: caracterização visual, dimensional, física e mecânicas das telhas cimentícias de polietileno tereftalato e de referência

### Características visuais e dimensionais

Definido o traço de substituição, confeccionaram-se TC com traço REF e com substituição de 15% de resíduo. Com relação ao aspecto visual, nota-se que a telha REF se apresenta homogênea tanto superficial quanto transversalmente, não apresentando nenhuma contração ou bordas irregulares (Figura 6A). Por outro lado, a TC de PET apresenta em sua superfície vários grânulos de resíduos de PET, que transversalmente são mais facilmente visualizados (Figura 6B). Isso é resultado dos maiores tamanhos dos grãos de PET usados para substituir a areia natural. Essa diferenciação do produto não caracteriza uma não conformidade. Essa modificação com efeito contrário também foi observada

com a substituição de agregados graúdos por rejeitos de minério de ferro, quando a superfície das telhas se mostrou mais homogênea, lisa e menos porosa (EUGÊNIO *et al.*, 2021).

Constatou-se certa diferença de tonalidade na cor cinza das TC, o que reduziu a propriedade física de refletância à radiação solar de  $\rho_{REF} = 0,42 \pm 0,01$  para  $\rho_{PET} = 0,43 \pm 0,01$ , implicando menores ganhos térmicos no sistema de cobertura com a telha de PET. Essa mudança de tonalidade também foi observada na incorporação de rejeitos de minério de ferro nas TC (EUGÊNIO *et al.*, 2021) em razão da cor do resíduo, como acontece com o PET.

No teste de sonoridade, ambas apresentaram som semelhante ao metálico, enquanto no ensaio de empenamento não se notou afastamento entre o plano e qualquer ponto de contato superior a 3 mm. Quanto aos padrões de dimensionalidade e geometria, verificou-se que o lote inspecionado atendeu às exigências normativas (Tabela 3). A análise estatística revelou que não há diferença entre as dimensões das TC REF e com adição de PET ( $p > 0,05$ ).

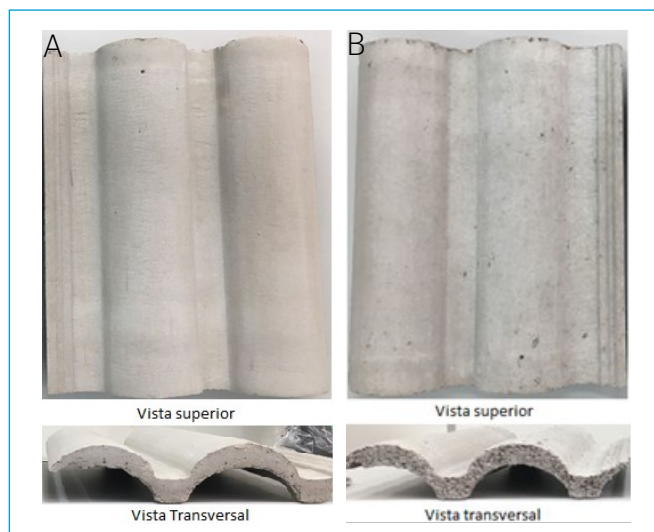


Figura 6 - Aspecto visual superficial: (A) telha cimentícia de referência e (B) telha cimentícia com polietileno tereftalato (PET).

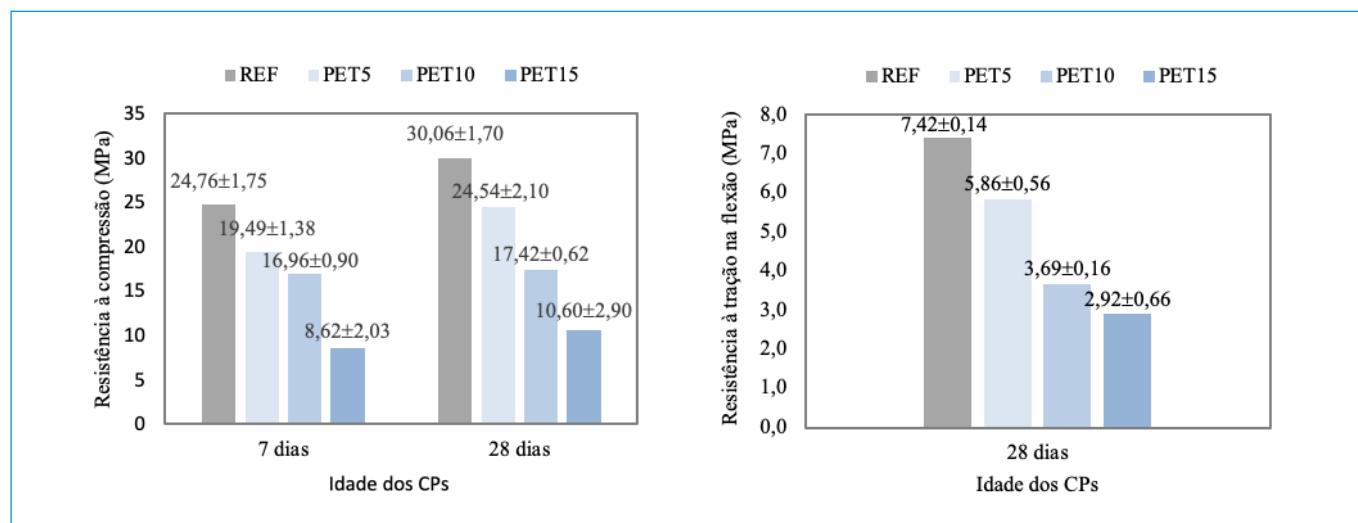


Figura 5 - (A) Resistência à compressão axial (7 e 28 dias) e (B) à tração na flexão (28 dias).

### Propriedades físicas e mecânicas

Durante o ensaio de permeabilidade, a telha permaneceu submersa por 24 horas, não se observando vazamentos ou formação de gotas nem manchas de umidade em sua face inferior, conforme estabelecido na NBR 13852-2 (ABNT, 2009c) (Figura 7). Subsidiariamente, as telhas foram ensaiadas pelo procedimento da versão anterior da norma NBR 13858-2 (ABNT, 1997) que preconiza a instalação de um tubo de seção circular reto, aberto nas extremidades, com diâmetro interno de aproximadamente 35 mm e altura suficiente para formar uma coluna d'água de 250 mm (Figura 7C). Nele também não foram verificados vazamento, formação de gotas aderentes nem aparecimento de manchas de umidade.

Há uma indicação, portanto, de que houve adequado fechamento dos poros na matriz cimentícia, apesar da maior granulometria do PET, em razão do processo de extrusão e das reações de hidratação, que impedem a penetração da água nas telhas produzidas, como constatado nos testes de permeabilidade conduzidos. Esse comportamento está indiretamente associado ao teor de absorção de água e ao índice de vazios descritos na sequência. A reduzida permeabilidade encontrada neste trabalho pode se dar pela redução dos poros capilares causada pelos produtos de hidratação, de forma similar à verificada por Tonoli *et al.* (2010) na avaliação dos efeitos da carbonatação acelerada nas características mecânicas e físicas de telhas reforçadas com fibras vegetais.

Os valores médios e os respectivos desvios padrão obtidos no ensaio de absorção de água e índice de vazios podem ser observados na Figura 8. Nota-se que a TC de PET apresentou menores índices de vazios se comparada à TC REF (6,7%), o que se reflete na menor quantidade de água absorvida (redução de 4,7%), com ambas atendendo à exigência normativa da NBR 13852-2 (ABNT, 2009c) (< 10%). Apesar das diferenças, a análise estatística mostrou que não há diferença significativa para essas propriedades entre a TC REF e o traço de PET15 ( $p < 0,05$ ). Ressalta-se que a absorção das telhas de PET foi 23,5% inferior à do traço que serviu de referência para a dosagem da TC, provavelmente em decorrência

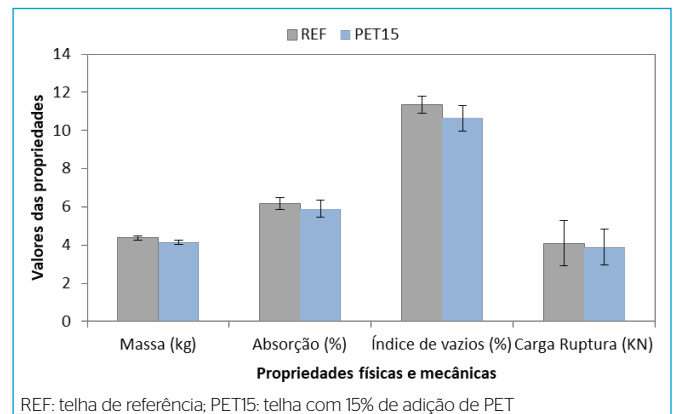
**Tabela 3** - Dimensões médias  $\pm$  desvio padrão das larguras, comprimentos, espessuras e de profundidades das telhas cimentícias de referência e com polietileno tereftalato (PET).

TC	Dimensões			
	L (mm)	C (mm)	e (mm)	d (mm)
REF	420,17 $\pm$ 0,98	331,33 $\pm$ 0,82	15,50 $\pm$ 0,58	43,00 $\pm$ 0,82
PET15	421,50 $\pm$ 1,05	330,67 $\pm$ 1,21	15,75 $\pm$ 0,52	42,50 $\pm$ 0,58

do processo de produção, no qual as telhas são extrudadas. O índice de vazios quantificado nesta pesquisa assemelha-se ao observado nas TC produzidas com incorporação de resíduo polimérico (DAMASCENO *et al.*, 2015), em que o teor de absorção de água também foi inferior aos das TC REF. Todavia, a redução da absorção de água difere daquela observada no estudo dos traços. Diante disso, o processo de extrusão pode ter elevado o empacotamento da matriz cimentícia, favorecendo o entrosamento das partículas, diminuindo assim o índice de vazios. A menor quantidade de espaço para a entrada de água torna as telhas mais estanques, o que favorece sua durabilidade e a vida útil do sistema de cobertura.

A massa das TC de PET foi 6% inferior à das telhas REF, não se verificando diferença estatística entre elas ( $p > 0,05$ ). Em termos de peso, as telhas de concreto apresentaram valores de  $45,5 \pm 1,20$  daN/m<sup>2</sup> e as de PET  $43 \pm 1,23$  daN/m<sup>2</sup>, sendo ambas classificadas como classe B, com valores menores que 50 daN/m<sup>2</sup> (ABNT, 2009a). Na TC com incorporação de resíduo polimérico (DAMASCENO *et al.*, 2015), verificou-se que o peso da TC REF se afastou do encontrado nesta pesquisa, fato associado à maior utilização de areia no traço, porém para aquela com 5% de poliestireno os valores ficaram próximos. O uso de PET nas TC é uma estratégia para reduzir o peso permanente do sistema de cobertura.

As cargas de ruptura à flexão das TC com PET foram 11% inferiores em relação às de referência, ambas apresentando valores superiores à carga de ruptura normativa de 2,4 kN, classificando-as como classe B. Assim sendo, o processo de extrusão foi mais eficaz no processo de moldagem das TC se comparado àquele manualmente conduzido em laboratório, no qual se observou



**Figura 8** - Ensaio de desempenho da telha de concreto e com substituição de PET (15%).



**Figura 7** - (A) Telha de polietileno tereftalato (PET) submersa, (B) aspecto da face inferior após 24 horas de ensaio e (C) ensaio de permeabilidade da versão NBR 13.852.2.

perda de resistência média nos CP na ordem de 153% com o uso do PET na matriz cimentícia. Sob esse aspecto, a elevação ou redução da resistência está associada ao tipo de resíduo utilizado. Com a incorporação de rejeitos de minério de ferro, observou-se elevação da carga de ruptura das telhas à medida que se elevam as porcentagens de substituição desse agregado fino (EUGÊNIO *et al.*, 2021). Já as ensaiadas com aditivo polimérico (poliestireno) apresentaram redução (DAMASCENO *et al.*, 2015). Em ambos os casos, tanto as telhas REF quanto as com adições não atingiram o mínimo recomendado por norma em razão de terem utilizado traços com maiores proporções de cimento e areia fina e/ou pó de pedra.

Não se verificou diferença estatística entre as cargas de ruptura de tração na flexão das TC REF e com adição de PET ( $p > 0,05$ ), com cargas superiores às especificadas por norma, o que mostra que maiores incorporações de PET na mistura possam ser idealizadas. Apesar da menor resistência das partículas de PET, sua combinação com o agregado fino de areia natural (de diferente tamanhos de grãos) e o processo de extrusão podem ter contribuído para preencher melhor os vazios da matriz cimentícia, otimizando a estrutura dos poros e colaborando para que esse compósito apresentasse menor redução em sua propriedade mecânica que aquele dos testes laboratoriais, em que os CP foram moldados manualmente. Sendo assim, a telha com PET é um produto passível de ser utilizado nas edificações, pois atende aos requisitos físicos e mecânicos da NBR 13852-2 (ABNT, 2009c).

## CONCLUSÕES

A presente pesquisa propôs-se a avaliar a potencialidade da substituição do agregado miúdo por resíduo de PET em sua forma triturada para a confecção de telhas de concreto. Foram considerados os requisitos normativos dimensionais, visuais, de sonoridade, de permeabilidade e absorção de água, de peso e de resistência à flexão.

O estudo laboratorial de traços revelou que as diferentes proporções de incorporação de resíduos de PET testadas em substituição à areia natural são passíveis de ser utilizadas para a confecção das TC. Com enfoque na sustentabilidade, adotou-se aquele que proporcionava maior destinação de resíduo na

mistura, ou seja, 15%, uma vez que, apesar da maior redução nas propriedades físicas e mecânicas, as propriedades ainda permaneceram em conformidade com os limites normativos. Por meio de correlação entre o teor de substituição e o de absorção de água, verificou-se que se poderiam incorporar 26% de PET na mistura, possibilitando assim maior reciclagem desse resíduo na fabricação da telha.

As TC fabricadas com PET apresentaram, em alguns casos, resultados mais satisfatórios do que aqueles identificados em laboratório durante a fase de definição dos traços (Etapa 1), como menor absorção de água, resultado do processo de produção industrial, uma vez que são confeccionadas por meio de extrusão. Esse fato explica a pequena diferença observada entre a resistência à flexão da TC REF e a com PET (11%), viabilizando incorporar uma porcentagem ainda maior de resíduo no traço de referência. O atendimento dos requisitos da NBR 13.852:2 garante a aplicabilidade do produto nas edificações, com características muito similares às da TC sem o resíduo.

Conclui-se, portanto, que a TC com PET é um produto tecnicamente viável com vistas a promover a sustentabilidade urbana, com possibilidade de evitar seu lançamento em áreas ilegais e/ou aterros sanitários, favorecendo as diretrizes do plano de desenvolvimento sustentável da Agenda 2030. Pelo desempenho alcançado, vislumbra-se a possibilidade de realizar substituições com maiores porcentagens de PET, o que pode contribuir ainda mais para eliminar o passivo ambiental proveniente da utilização desse produto.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Mato Grosso, em especial ao Curso de Engenharia Civil, pela disponibilização dos laboratórios para a realização dos ensaios.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Callejas, I. J. A.: Conceituação, Administração do Projeto, Supervisão, Análise Formal, Escrita – Revisão e Edição, Metodologia. Butinhoni, G.F.: Investigação, Validação, Visualização.

## REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V.; JOHN, V.M. *O desafio da sustentabilidade na construção civil*. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

ALBANO, C.; CAMACHO, N.; HERNANDEZ, M.; MATHEUS, A.; GUTIERREZ, A. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*, v. 29, n. 10, p. 2707-2716, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>

ARAGON, A.T.; GHIRALDELLO, L. Produtos à base de polietileno (PET) na construção civil: Um estudo diagnóstico no município de poços de caldas. *Gestão e Conhecimento*, v. 10, n. 1, p. 35-56, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET (ABIPET). *11º Censo da Reciclagem de PET no Brasil*. ABIPET, 2019. Disponível em: <https://www.abipet.org.br/>. Acesso em: 18 jul. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7211: Agregados para concreto - especificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman*. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm*. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15575-5: Edificações habitacionais - Parte 5: Requisitos para sistemas de cobertura*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.



- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16605*: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16606*: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16607*: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2017c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13858-2*: Telhas de concreto - Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13858-2*: Telhas de concreto - Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2009c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR NM 27*: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR NM 52*: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR NM 248*: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- BENOSMAN, A.S.; MOULI, M.; TAI BI, H.; BELBACHIR, M.; SENHADJI, Y.; BAHOULI, I.; HOUIVET, D. Effect of Addition of PET in the Thermal Properties of Polymer-Mortar Composite Material. *Chemistry and Materials Research*, v. 5, p. 21-26, 2013.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre o inventário nacional de resíduos sólidos industriais. *Diário Oficial da União*, 22 nov. 2002. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=263>. Acesso em: 6 set. 2021.
- CINTRA, A.D. *Utilização de pneu moído e resíduos da construção na fabricação de telhas de concreto*. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade São Francisco, Itatiba, 2008.
- CORDEIRO, C.C.M.; BRANDÃO, D.Q.; DURANTE, L.C.; CALLEJAS, I.J.A.; CAMPOS, C.A.B. Caracterização termofísica de solo laterítico para produção de taipa. *Matéria*, v. 25, n. 1, e-12564, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1517-7076202000010889>
- DAMASCENO, F.A.; MACEDO, O.A.P.; OLIVEIRA, J.L.; OLIVEIRA, C.E.A.; BRANDÃO, L.F. Propriedades físicas, mecânicas e térmicas de telhas de concreto fabricadas com adição de diferentes materiais isolantes. *Revista Engenharia na Agricultura*, v. 23, n. 5, p. 406-417, 2015. <https://doi.org/10.13083/reveng.v23i5.578>
- EUGÊNIO, T.M.C.; FAGUNDES, J.F.; VIANA, Q.S.; VILELA, A.P.; MENDES, R.F. Study on the feasibility of using iron ore tailing (IOT) on technological properties of concrete roof tiles. *Construction and Building Materials*, v. 279, 122484, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122484>
- FERNANDES, D.G. *Desenvolvimento de telha de concreto eco-eficiente utilizando resíduo de mármore do tear de fio diamantado*. 74f. Tese (Doutorado) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, 2017.
- FERNANDES, I. *Telhas de concreto: produção e controle de qualidade*. São Paulo: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais, 2012.
- FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. *Programas municipais de coleta seletiva de lixo como fator de sustentabilidade dos sistemas públicos de saneamento ambiental na Região Metropolitana de São Paulo*. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2010.
- LIMA, V.A.; NUNES, A.A.; MACIEL, R.T.; PAULINO, V.E.N. Incorporação de resíduo de gesso na fabricação de telhas de concreto. In: ASOCIACIÓN INTERAMERICANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 2019. Disponível em: <https://aidisnet.org/wp-content/uploads/2019/07/406-Brasil-oral.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2021.
- LUCOLANO, F.; LIGUORI, B.; CAPUTO, D.; COLANGELO, F.; CIOFFI, R. Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties. *Materials and Design*, v. 52, p. 916-922, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.025>
- MENDONÇA, R.M.; BARCA, O.G.; ANDREASI, W.A. Análise do desempenho térmico de telhas produzidas de resíduo de construção e demolição. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13, 2010. *Anais...* Canela, 2010.
- MULLER, H.M.B.; STRAUB, K.W.; VERA, A.V.K.; MOURA, C.D. Telhas de concreto leve com substituição parcial e gradual do agregado miúdo por EPS. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA DE EDIFICAÇÕES E AMBIENTAL, 4, 2016. *Anais...* Cuiabá: Universidade Federal de Mato Grosso, 2016.
- NAVARRO, R.; FERRÁNDIZ, S.; LÓPEZ J.; SEGÚI, V.J. The influence of polyethylene in the mechanical recycling of polyethylene terephthalate. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 195, n. 1-3, p. 110-116, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.126>
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. ONU, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em: 6 out. 2021.
- SCHILIVE, P.M.S.; CALLEJAS, I.J.A.; DURANTE, L.C.; GUARDA, E.L.A. Blocos de concreto com resíduos de PET: alternativa para sustentabilidade urbana. *Paranoá*, n. 31, p. 2-18, 2021. <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n31.2021.03>
- SZIGETHY, L.; ANTENOR, S. *Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos*. 2020. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>. Acesso em: 20 dez. 2021.
- TONOLI, G.H.D.; SANTOS, S.F.; JOAQUIM, A.P.; SAVASTANO JR., H. Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 2, p. 193-201, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.018>
- VILPERT, G.C. *Telha de Concreto: Adição de fibra derivada de bagaço de cana-de-açúcar*. 19f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2016.