

O ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE POLI TEREFTALATO DE ETILENO COMO AGREGADO EM ARGAMASSAS

THE STUDY ON THE USE OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE RESIDUES AS AN AGGREGATE IN MORTARS

Paulo Paiva Oliveira Leite Dyer¹
Gustavo Lauer Coppio²

Resumo: No mundo moderno, a geração de resíduos de biodegradabilidade lenta vem ocasionando diversos impactos ambientais. Destes, destacam-se os resíduos de Poli Etileno Tereftalato (PET), os quais são originários das embalagens alimentícias, que surgiram para facilitar o mercado consumidor cada vez mais dinâmico e crescente. Da mesma forma, o consumo de recursos minerais pela construção civil impacta de maneira importante o meio ambiente e a sociedade. Com isso, torna-se uma oportunidade à reutilização destes resíduos poliméricos, em substituição ao agregado mineral, nas misturas cimentícias, um procedimento que pode trazer vantagens ao produto final, seja em argamassas ou em concreto de cimento Portland. Neste sentido, há diversos esforços de pesquisadores e entidades de pesquisa, ao longo dos anos, em reaproveitar resíduos de PET para este fim, contudo, ainda são discutíveis os resultados obtidos até aqui. Desta forma, neste presente artigo foram propostas novas metodologias para este reuso e assim foram testadas argamassas contendo PET como agregado, de acordo com a Norma brasileira. Os resultados revelaram um ganho em resistência à compressão, da ordem de três vezes, além de um isolamento térmico superior, da ordem de cinco vezes, em relação às argamassas convencionais. Este novo material ainda revelou ser comercialmente viável, de acordo com os critérios normativos e com o custo final. Assim sendo, o reuso de PET como agregado demonstra ser uma alternativa que, além de beneficiar o meio ambiente, tem o potencial de produzir um material de construção mais vantajoso.

Palavras-chave: PET. Argamassa. Sustentabilidade. Poli tereftalato de etileno.

Abstract: In the modern world, the generation of slowly biodegradable waste has caused several environmental impacts. Among them, residues of Polyethylene Terephthalate (PET) are highlighted, which originate from food packaging, which has emerged to facilitate the increasingly dynamic and growing consumer market. Likewise, the consumption of mineral resources by civil construction has an important impact on the environment and society. Therefore, it becomes an opportunity to reuse these polymeric residues, replacing the mineral aggregate, in cement mixtures, a procedure that can bring advantages to the final product, either in mortar or in Portland cement concrete. In this sense, there have been several efforts by researchers and research entities, over the years, to reuse PET waste for this purpose; nevertheless, the results obtained so far are still debatable. Therefore, in this article new methodologies were proposed for this reuse, and mortars containing PET as an aggregate were tested, according to the Brazilian Standard. The results revealed an increase in compressive strength, of the order of three times, in addition to a superior thermal insulation, of the order of five times, compared with conventional mortars. This

¹ Instituto Tecnológico de Aeronáutica, E-mail: paulo_dyer@yahoo.com.

² Instituto Tecnológico de Aeronáutica, E-mail: gustavocoppio@gmail.com.

new material also proved to be commercially viable, according to the normative criteria and the final cost. Therefore, the reuse of PET as an aggregate proves to be an alternative that, in addition to benefiting the environment, has the potential to produce a more advantageous construction material.

Key words: PET. Mortar. Sustainability. Polyethylene terephthalate.

Data de submissão: 15.07.2020

Data de aprovação: 18.02.2021

Identificação e disponibilidade:

(<https://revista.univap.br/index.php/revistaunivap/article/view/2523>,
<http://dx.doi.org/10.18066/revistaunivap.v27i56.2523>).

1 INTRODUÇÃO

Durante o progresso da humanidade, sempre houve a necessidade do enfrentamento das adversidades do meio ambiente por esta, impondo o seu papel dominante sob a natureza (PROCÓPIO FILHO *et al.*, 2000). Além disso, as tentativas para o retorno do “equilíbrio” natural geram impactos, afetando o desenvolvimento da humanidade (PEDRUZZI *et al.*, 2015). Desta forma, as últimas décadas foram muito importantes, na busca de um modelo de desenvolvimento sustentável ao progresso, o qual se mostrou imprescindível para o futuro (BARBOSA, 2008).

Segundo Meier *et al.* (2014), um dos principais males do progresso é a geração de resíduos sólidos. Devido a lenta degradação natural destes resíduos (KUMAR *et al.*, 2016), acabam por trazer desequilíbrios físicos, químicos, biológicos e sociais ao meio ambiente (ALBUQUERQUE, 2016). Dentre os resíduos sólidos urbanos (RSU), os plásticos ganham destaque, por serem de difícil degradação e ocuparem grandes volumes nos locais de descarte, gerando elevados impactos ambientais (ROTH; GARCIAS, 2008). Neste cenário, o Poli etileno tereftalato (PET), face as suas vantagens em termos de resistência mecânica, durabilidade e baixo custo de produção, foi um plástico amplamente difundido (PIATTI; RODRIGUES, 2005). Entretanto, surgiu um passivo residual que representa um grande desafio, em termos de impacto sócio ambiental.

O PET foi introduzido no Brasil em 1988, concentrando seu consumo no mercado de fibras e garrafas (KOSCHEVIC; BITTENCOURT, 2016), tendo sua reciclagem mecânica difundida a partir do início dos anos 90 (FORMIGONI; FORTES, 2008), tornando o país em um dos maiores recicladores de PET do mundo (51%). Todavia, o mercado ainda não é capaz de absorver estes resíduos na sua totalidade, acumulando-se quase 130 mil toneladas por ano, conforme os dados do Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2020). Assim sendo, este RSU impacta cada vez mais o meio ambiente e esgota a capacidade dos aterros sanitários.

Por outro lado, o consumo de recursos minerais pela construção civil também representa um enorme risco ao meio ambiente. A extração de agregados minerais, utilizados para a fabricação de concreto de cimento Portland, representa mais de 70% de toda extração mineral por escavações de leitos de rio ou detonação de rochas, ocasionando elevados impactos ambientais (BARBOZA *et al.*, 2019). Por estas razões, há muitas pesquisas sendo desenvolvidas, na busca de materiais alternativos ao uso dos agregados minerais (BINA, 2002). Dentre estes estudos, os resíduos plásticos triturados ou em formato de fibras são importantes alternativas ao uso de

agregados convencionais (ALFAHDAWI *et al.*, 2016, PASTOR *et al.*, 2019).

As primeiras pesquisas sobre o uso de PET residual, como agregado, remontam o final da década de 80 (ALMESHAL *et al.*, 2020). Um dos pioneiros nesta área foi Liu (1988), que utilizou o PET triturado, também conhecido comercialmente como flake, na mistura do concreto. Foi utilizada a borra triturada residual, oriunda do processo de reciclagem mecânica de PET, nos estudos de Lennon *et al.* (1993) realizados na década de 90. A partir do início dos anos 2000, houve um aumento significativo de estudos nesta temática, como Choi *et al.* (2005) e Canellas (2005), os quais utilizaram pó e lã de PET (terminologias comerciais), respectivamente, ambos subprodutos da reciclagem mecânica do polímero, segundo Park e Kim (2014).

Nestas pesquisas, foram observados os usos dos diversos tipos de cimento Portland, conforme a norma NBR:16697 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018a) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e aditivos hidráulicos, de acordo com a NBR:11768-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019a); cuja proporção de PET em relação ao agregado convencional variou de 10 a 100% nos concretos produzidos, sendo observadas perdas de resistência à compressão da ordem de 20 a 40%, com o uso de PET reciclado como agregado. De acordo com De Cort *et al.* (2017), a redução da resistência à compressão observada em concretos com PET reciclado na mistura, pode ser atribuída à hidrofobicidade do polímero. Contudo, Flores e Calleja (1998) destacaram que o PET possui uma elevada resistência a esforços verticais (47 a 90 MPa), além de um módulo de Young (3 GPa) inferior ao cimento Portland (41 GPa), demonstrando que um compósito derivado dos dois materiais, segundo as definições de Callister Jr. e Rethwisch (2010), somaria as propriedades individuais do cimento e do PET em um único material superior ao concreto convencional. Todavia, a repelência da água pelo polímero prejudica a mistura hidráulica PET-cimento (MODRO *et al.*, 2009, BIGOTTO *et al.*, 2019), bem como a trabalhabilidade do concreto fresco (BIGOTTO *et al.*, 2019).

No concreto endurecido, ocorrem cavitações entre o PET e o cimento, facilitando seu arrancamento da matriz cimentícia (JUCÁ, 2017). Assim sendo, é imprescindível a escolha do tipo de cimento, de aditivo e da relação água cimento, para produzir um compósito de PET e cimento, cujas propriedades dos dois materiais realmente se integrem (DYER; MANCINI, 2009, YAO *et al.*, 2014, JARDIM, 2016).

Segundo os estudos de Casanova-del-Angel, Vázquez-Ruiz (2012) e Lima *et al.* (2018), concretos com uso de PET como agregado demonstraram ser até 50% mais leves que os convencionais. Tolentino e Bastos (2007) observaram um aumento de quase dez vezes da resistência térmica, quando utilizado resíduo de PET como agregado. Duarte (2014) e Monteiro (2017) demonstraram a viabilidade do emprego de PET em argamassas.

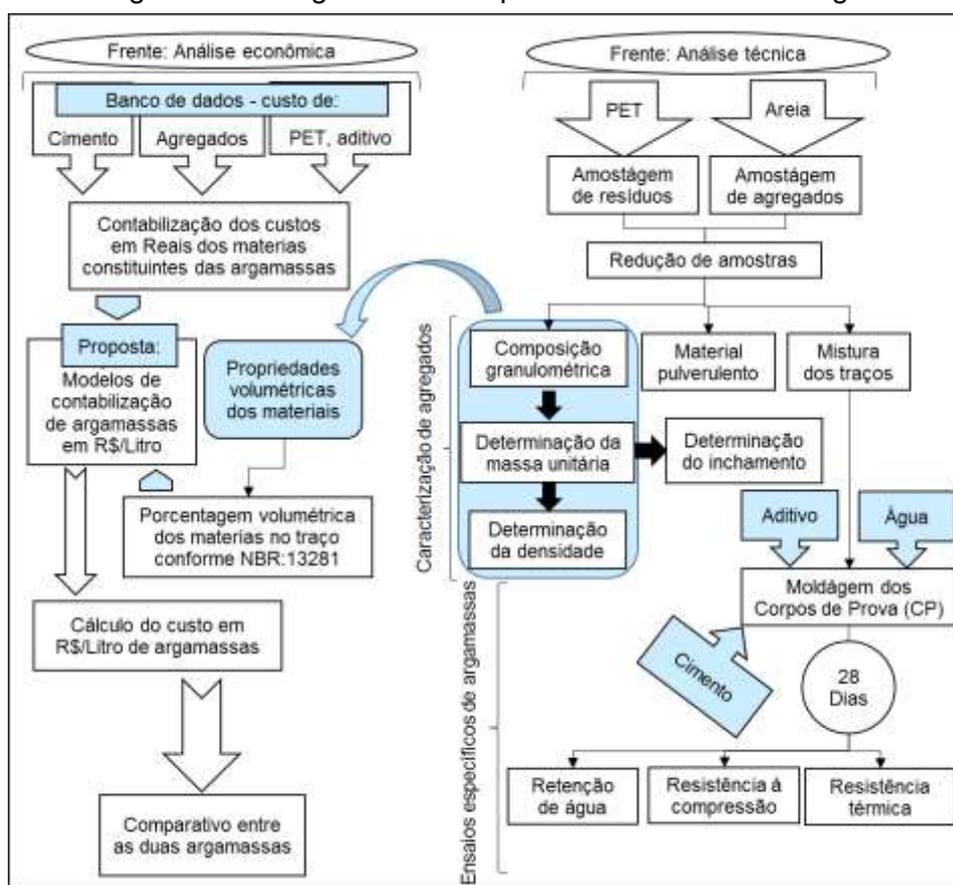
Em vista destas premissas, é observado um hiato no que tangem definições sobre características dos materiais empregados e a composição dos traços, para melhorar as propriedades físicas do concreto e da argamassa. Na atual literatura, também não se observa a realização de análises econômicas, que poderiam caracterizar este material compósito, como comercialmente viável.

Portanto, o objetivo deste artigo foi buscar a definição de uma proporção entre cimento, PET e água, bem como do tipo de cimento e aditivo, mais adequados para produzir uma argamassa contendo PET, com propriedades físicas superiores a argamassas convencionais. Também foi realizado um estudo econômico para avaliar sua viabilidade econômica, a partir da dedução de modelos matemáticos diretos e um banco de dados de precificação de materiais de construção e RSU no Brasil.

2 EXPERIMENTAL

Após uma análise crítica da literatura atual, foi verificado que o cimento CP II, apresentou o melhor desempenho, e o aditivo superplastificante do tipo II (RA2-R), melhorou significativamente o entrosamento entre o PET e a matriz cimentícia. Por esta razão, estes materiais foram escolhidos para o estudo experimental. Ainda, optou-se pela utilização de flakes na proporção de 100% de substituição, em relação ao agregado convencional. O desenvolvimento experimental deste estudo foi dividido em duas frentes: ensaios físicos e análise econômica. Na Figura 1, é apresentado um fluxograma, contendo todas as etapas envolvidas no desenvolvimento deste estudo.

Figura 1 - Fluxograma das etapas desenvolvidas no artigo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A areia foi obtida em um porto de areia, na cidade de Jacareí/Brasil. Já os flakes de PET, foram obtidos em uma recicladora na cidade de São Paulo/Brasil.

3 MATERIAIS

Para o desenvolvimento experimental, foi utilizado PET triturado, no formato de flakes, cimento Portland CP II, areia mineral, aditivo para argamassas e água. A Tabela 1 descreve estes materiais, de acordo com a especificação regulamentada por norma. A Figura 2 ilustra os materiais utilizados.

Tabela 1 - Propriedades e critérios técnicos dos materiais utilizados.

Material	Denominação	Propriedades	Especificação
PET	Flake	Tam. máximo das partículas: 1,0 mm	-
Areia	Média	Tam. médio grãos entre 0,6 e 1,2 mm	NBR NM:248 (2003)/ NBR:7211 (2009)
Cimento	CP II	Cimento Portland Composto	NBR:16697 (2018)
Aditivo	RA2-R	Redutor de água e superplastificante	NBR:11768-1 (2019)
Água	-	-	-

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 2 - Materiais empregados.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4 PROCEDIMENTOS

4.1 ANÁLISE TÉCNICA

Inicialmente, os agregados foram caracterizados de acordo com os procedimentos estabelecidos nas normas técnicas, conforme mostra a Tabela 2. No teste de densidade, foi utilizado um aparelho de ultrassom, como ilustra a Figura 3, ao invés da fonte de calor, como recomenda a DNER ME:084 (1995), pois comprometeria a integridade do *flake*.

Tabela 2 - Testes de caracterização de agregados.

Ensaio de caracterização	Métodos	Número de ensaios por teste
Composição granulométrica	NBR NM:248 (2003)/ NBR:7211 (2009)	6: 3 p/ areia e 3 p/ PET
Teor de material pulverulento	NBR NM:46 (2003)	6: 3 p/ areia e 3 p/ PET
Determinação da massa unitária	NBR NM45 (2006)	6: 3 p/ areia e 3 p/ PET
Determinação da densidade	DNER ME:084 (1995)	6: 3 p/ areia e 3 p/ PET
Determinação do inchamento	NBR:6467 (2006)	6: 3 p/ areia e 3 p/ PET

Fonte: Elaborado pelos autores.

Foram produzidas argamassas contendo PET e areia como agregado, conforme as proporções volumétricas, fator água cimento (A/C), que são apresentadas na Tabela 3. Também foi utilizado um aditivo RA2-R, cujo mesmo foi diluído na taxa de 100 ml para cada litro de água, em ambas as amostras.

Tabela 3 - Composição das argamassas produzidas.

Argamassa	Proporção de materiais (cm ³ /cm ³)			
	Cimento	PET	Areia	Fator: A/C ³
Cimento + Areia: Controle	1	0	2	0,65
Cimento + PET: PET-cimento	1	2	0	0,65

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os corpos de prova deste estudo foram moldados em formato cilíndrico de 50 x 100 mm, conforme a NBR:7215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019b). Durante a preparação das misturas, cada material foi quantificado em peso, utilizando a relação volumétrica entre massa e densidade, com o objetivo de obter proporções mais precisas, evitando os vazios de cada material granular (areia, cimento e PET). Para a determinação da resistência à compressão, adotou-se a metodologia da NBR:5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018b). Os referidos procedimentos têm sido comumente utilizados, em diversos estudos sobre argamassas, como por exemplo, nas pesquisas de Armange *et al.* (2005), Siqueira *et al.* (2012) e Reis e Carneiro (2012). Na Tabela 4 são apresentados os ensaios e metodologias utilizadas neste estudo.

Tabela 4 - Testes de argamassas.

Ensaio de concreto	Métodos	Quantidade de ensaios (CP) por teste
Retenção de água	NBR:13277 (2005)	4: 2 p/ Controle e 2 p/ PET-cimento
Resistência a compressão	NBR:7215 (2019)/ NBR 5739 (2018)	6: 3 p/ Controle e 3 p/ PET-cimento
Resistencia térmica	NBR:15220-4 (2005)	4: 2 p/ Controle e 2 p/ PET-cimento

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 3 – Procedimentos do teste de densidade no PET.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados dos ensaios foram determinados a partir da média aritmética dos valores obtidos em cada um deles. Os resultados obtidos pelos dois materiais (PET e areia), e, pelas duas misturas (PET-cimento e Controle), foram comparados entre si, e, também, analisados em relação aos critérios da NBR:7211 (ASSOCIAÇÃO

³ O valor A/C de 0,65 foi escolhido por representar a quantidade de água que apresentou a melhor trabalhabilidade do cimento com PET durante a preparação das argamassas.

BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), quanto aos agregados, e, da NBR:13281 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a) e da NBR:15220-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b) quanto as argamassas.

4.2 ANÁLISE ECONÔMICA

Para a contabilização dos custos do PET-cimento, inicialmente, foi realizada a precificação dos materiais envolvidos, em R\$ por Kg, pelo levantamento de valores dos bancos de dados da Agência Nacional de Mineração (AMN, 2020), Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2020), Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2020) e Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento (SINAPROCIM, 2020). A Tabela 5 mostra os valores médios (R\$ por Kg), em função da variável atribuída para cada material, nos períodos de análise e fonte.

Tabela 5 – Custo dos materiais empregados em R\$ por kg (variáveis) nas argamassas.

Materiais	Variáveis	Preço médio (R\$ por Kg)	Período	Fonte
Areia média	P_A	0,01	2014 - 2020	ANM, 2020
PET (<i>flake</i>)	P_P	0,05	2014 - 2019	CEMPRE, 2020
Cimento CP II	P_C	0,31	2014 - 2020	CBIC, 2020
Aditivo	P_D	6,71	2004 - 2020	SINAPROCIM, 2020

Fonte: Os autores.

Em seguida, foram deduzidos pelos autores, dois modelos matemáticos, a partir das proporções volumétricas dos materiais nas argamassas. Para tanto, foram atribuídos “pesos” às variáveis de entrada, segundo a Tabela 3 e a quantidade de RA2-R utilizada em cada mistura. Nestes algoritmos, as unidades das variáveis de entrada: custo e densidade foram fixadas em R\$ por litro e g/cm³.

Estes algoritmos foram desenvolvidos utilizando proporções volumétricas, devido a densidade do PET ser quase a metade da areia mineral (DE CORT *et al.*, 2017; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), inviabilizando cálculos utilizando o peso de cada material como variável de entrada. As Equações (1) e (2), apresentam estes modelos.

$$V_{PET-cimento} = \frac{2}{3} \left(\frac{P_P}{D_P} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{P_C}{D_C} \right) + \frac{1}{30} \left(\frac{P_D}{D_D} \right) \quad (1)$$

$$V_{Controle} = \frac{2}{3} \left(\frac{P_A}{D_A} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{P_C}{D_C} \right) + \frac{1}{30} \left(\frac{P_D}{D_D} \right) \quad (2)$$

Onde $V_{PET-cimento}$ e $V_{Controle}$ são os custos em R\$ por litro das argamassas de PET-Cimento e Controle, respectivamente, em que P_P , P_C , P_D e P_A representam os valores em R\$.kg, dos materiais utilizados (Tabela 5), e, D_P , D_C , D_D e D_A , as suas densidades (em g/cm³), apresentadas a seguir neste artigo.

5 RESULTADOS

5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS AGREGADOS E ARGAMASSAS

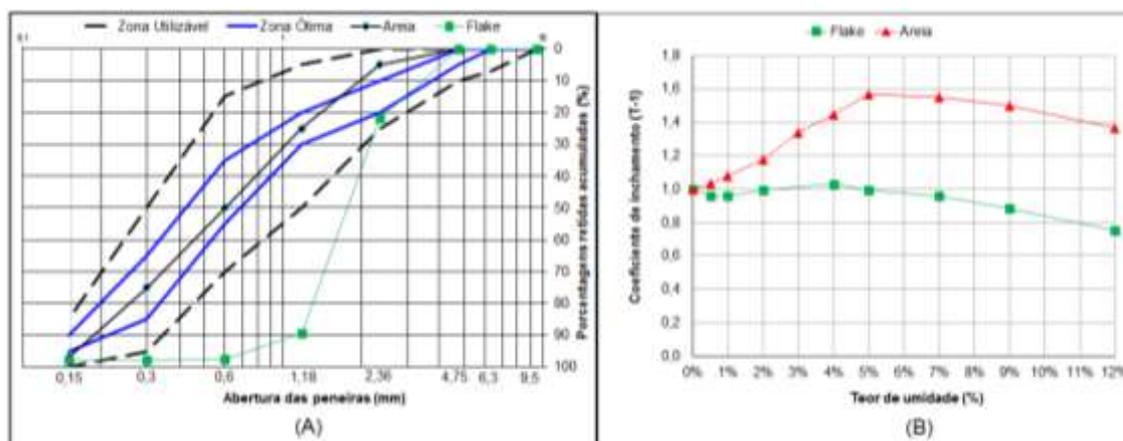
As características dos agregados são apresentadas na Figura 4(A) (composições granulométricas) e na Figura 4(B) (curvas de inchamento). Na Tabela 6, são mostradas as propriedades físicas dos agregados.

Tabela 6 - Propriedades físicas dos agregados.

Propriedade	Agregado analisado		Critério NBR:7211 (2009)
	PET	Areia	
Material pulverulento (%)	0,01 ± 0,00	1,68 ± 0,01	< 5
Massa unitária Método A (kg/m ³)	530 ± 10	1290 ± 15	> 1,00
Massa unitária Método C (kg/m ³)	580 ± 11	1460 ± 10	> 1000
Massa unitária SSS (kg/m ³)	544 ± 21	1350 ± 20	-
Índice de vazios (%)	75,82 ± 0,5	48,78 ± 0,3	-
Densidade (g/cm ³)	1,32 ± 0,01	2,57 ± 0,01	> 1,0
Umidade crítica (%)	4,01 ± 0,01	4,9 ± 0,5	-
Coefficiente de inchamento (T-1)	1,05 ± 0,05	1,64 ± 0,05	-

Fonte: Elaborado pelos autores.

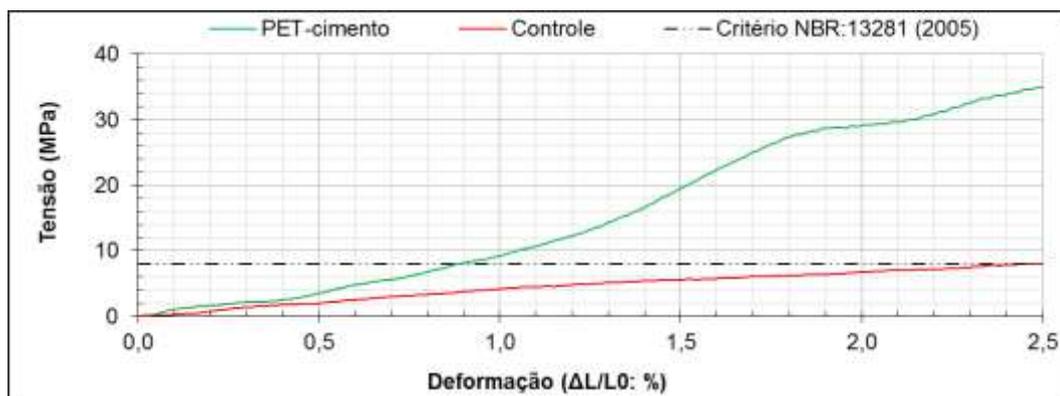
Figura 4 - Composição granulométrica e curva de inchamento dos agregados.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em relação aos testes das argamassas, o gráfico da Figura 5 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão e a Tabela 7, é apresentada as demais propriedades físicas.

Figura 5 - Resistência à compressão das argamassas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 7 - Propriedades físicas das argamassas.

Propriedades	Argamassas		Critério	
	PET-cimento	Controle	NBR:13281	NBR:15220-2 ⁴
Resistencia máxima (MPa)	34,93 ± 0,18	8,21 ± 0,12	> 8 ⁵	-
Peso CP seco (g)	357,36 ± 0,08	520,98 ± 0,07	-	-
Peso CP saturado (g)	395,23 ± 0,05	576,20 ± 0,02	-	-
Retenção (%)	10,6 ± 0,7	11,9 ± 0,8	≤ 78	-
Condutividade (W/m.K)	0,16 ± 0,09	1,00 ± 0,08	-	< 1,15
Resistencia térmica (K/W)	0,32 ± 0,08	0,05 ± 0,01	-	< 0,61

Fonte: Elaborado pelos autores.

5.2 VIABILIDADE ECONÔMICA DA ARGAMASSA PET-CIMENTO

A Tabela 8 apresenta os valores em R\$ por litro, das argamassas aqui analisadas, segundo as Equações (1) e (2) e as densidades dos materiais empregados. Já a Tabela 9, apresenta um comparativo entre os custos das duas argamassas.

Tabela 8 - Custo das argamassas.

Materiais	Variável	Densidade (g/cm ³)	Preço médio (R\$ por litro)
Areia média grossa	D_A	2,57	0,03
PET (flake)	D_P	1,32	0,07
Cimento CP II	D_C ⁶	2,82	0,88
Aditivo	D_D ⁷	2,33	15,67
PET-cimento	$V_{PET-cimento}$	-	0,14
Controle	$V_{Controle}$	-	0,16

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 9 - Diferença de custos entre PET-Cimento e Controle.

Argamassas	Valores R\$ por litro	Diferença Absoluta R\$ por litro	Diferença Relativa %
Controle	0,14	0,02	15
PET-cimento	0,16		

Fonte: Elaborado pelos autores.

⁴ Estes critérios se referem a materiais de construção considerados como ótimos isolantes térmicos.

⁵ O critério de resistência desta norma se refere a argamassa utilizada em uma gama de aplicações em uma obra.

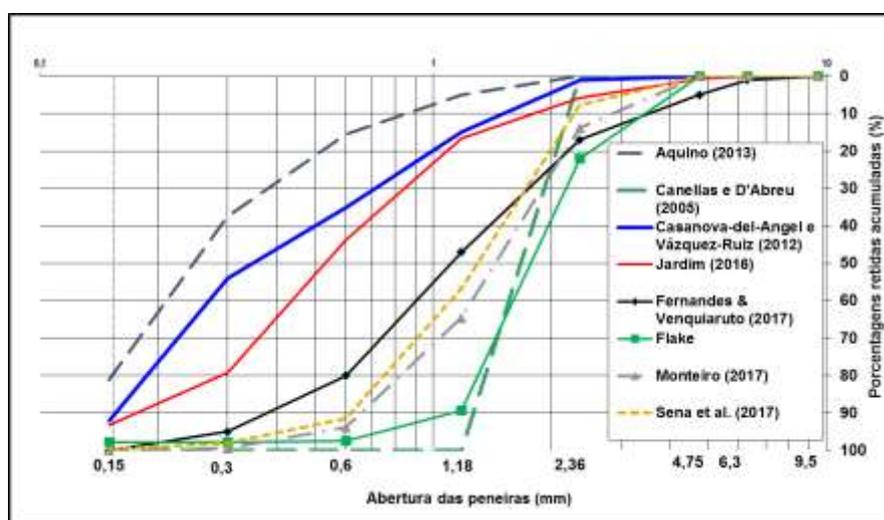
⁶ A densidade do cimento foi obtida diretamente do seu fabricante.

⁷ A densidade do aditivo foi obtida diretamente do seu fabricante.

5 DISCUSSÕES E COMPARAÇÕES

Destes resultados, observa-se que apesar das propriedades físicas do flake atender aos critérios da NBR:7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), o PET não se enquadrou nos limites granulométricos para agregados miúdos. Entretanto, isto não afetou as características da argamassa PET-Cimento, pois esta obteve uma resistência 3 vezes maior, e, um isolamento térmico 5 vezes superior, em relação aos resultados obtidos pela argamassa de Controle. Esta argamassa, ainda, apresentou um peso 30% inferior ao Controle e uma retenção dentro dos limites da NBR:13281 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a). Outrossim, de maneira comparativa à literatura, pode-se traçar um paralelo entre as propriedades determinadas por outros autores, como mostram a Figura 6 e as Tabelas 10 e 11.

Figura 6 - Composição granulométrica do PET, segundo diversos autores.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 10 – Panorama comparativo das propriedades do PET com a literatura.

Autor	Densidade (g/cm ³)	M. unitária (kg/m ³)	Mat. pulverulento (%)	Tipo
Obtido	1,32	580	0,01	flake
Canelas e D'Abreu (2005)	-	425	-	lã
Choi et al. (2005)	1,39	844	4,11	borra
Casanova-del-Angel e Vázquez-Ruiz (2012)	1,3	760	-	flake
Yao et al. (2014)	1,35	-	-	grão ⁸
Jardim (2016)	1,36	280	-	pó ⁹

Fonte: Elaborado pelos autores.

⁸ Matéria prima para indústria têxtil, segundo Park e Kim (2014), obtido pela reciclagem mecânica do PET.

⁹ Subproduto da reciclagem do PET, segundo Park e Kim (2014).

Tabela 11 – Panorama comparativo das propriedades da argamassa com a literatura.

Autor	Resistência	Resistência	Condutividade	Taxa	Tipo
	máxima – sem PET MPa	máxima – com PET MPa			
Obtido	8,21	34,93	0,16	100	flake
Yao <i>et al.</i> (2014)	-	24,21	-	70	grão
Choi <i>et al.</i> (2005)	37,2	31,8	-	50	borra
Monteiro (2017)	38,5	19,7	0,92	20	flake
Fernandes e Venquiaruto (2017)	37,0	32,5	-	15	pó
Modro <i>et al.</i> (2009)	15,1	13	-	10	flake
Tolentino e Bastos (2007)	-	-	1,1	5	fibras

Fonte: Elaborado pelos autores.

Deste panorama comparativo são observadas semelhanças entre as características do PET e argamassa, com a literatura pesquisada. Segundo a Tabela 11, são confirmadas tendências de melhoria no isolamento térmico, em função do aumento da taxa de substituição do PET. Esta característica também é observada por Almeshal *et al.* (2020). Todavia, a questão da resistência à compressão ainda é muito discutida entre autores. Entretanto, tal característica não é importante, do ponto de vista comercial, uma vez que a NBR:15116 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), restringe o uso de materiais reciclados em concretos sem função estrutural, não havendo tal restrição ao uso, em relação às argamassas, contudo, os isolantes térmicos com peso inferior, são mais atraentes, ao reduzir custos de transporte e melhorar a eficiência térmica das edificações.

Em relação ao custo efetivo em R\$/l, a argamassa PET-Cimento se mostrou 15% mais onerosa que a argamassa convencional (Controle). Uma diferença que pode parecer importante à primeira vista, porém, considerando as economias geradas no equilíbrio térmico da edificação e no transporte, bem como do apelo ecológico deste material de construção, tal diferença pode ser considerada aceitável no mercado atual, como sublinham Robichaud, Anantatmula (2011) e Imbabi *et al.* (2013).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em vista dos resultados e discussões realizadas neste presente artigo, considera-se uma potencial viabilidade técnica do uso de resíduos de PET, como agregado em argamassas de cimento Portland, segundo os critérios das principais normas brasileiras, para agregados e argamassas. Apesar do ganho de resistência à compressão, tal como se espera, de um material compósito, este é discutível entre outros resultados presentes na literatura pesquisada. Por sua vez, o seu ganho em isolamento térmico é ratificado, constituindo uma vantagem para materiais de acabamento e revestimento, que compensaria o custo 15% mais elevado de produção, em relação à argamassa convencional.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Sumário mineral: agregados para a construção civil**: banco de dados de 2014-2020. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/sumarios/>. Acesso em: 18 jan. 2021.

ALBUQUERQUE, B. A. **Resíduos sólidos urbanos: uma abordagem da relevância, caracterização e impactos em Três Lagoas, MS**. 2016. 134 f.

Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Três Lagoas, 2016.

ALFAHDAWI, I.H. *et al.* Utilizing waste plastic polypropylene and polyethylene terephthalate as alternative aggregates to produce lightweight concrete: a review. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 11, n. 8, p. 1165-1173, 2016.

ALMESHAI, I. *et al.* Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: A review. **Construction and Building Materials**, v. 253, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119146>.

ARMANGE, L. C. *et al.* Utilização de Areia de Fundição Residual para uso em Argamassa. **Revista Matéria**, v. 10, n. 1, p. 51-62, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: agregados - determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto –ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467**: agregados - determinação do inchamento de agregado miúdo - método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 7211**: Agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019b. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1**: aditivos químicos para concreto de cimento Portland parte 1 - requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019a. 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação da retenção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 17 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: desempenho térmico de edificações - parte 2 - métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b. 34 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-4**: desempenho térmico de edificações - parte 4 - medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland - requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a. 16 p.

BARBOZA, D.V. *et al.* Aplicação da Economia Circular na Construção Civil. **Res. Soc. Dev.**, v. 8, n. 7, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v8i7.1102>.

BARBOSA, G.S. O desafio do desenvolvimento sustentável. **Visões**, v. 1, n. 4, 2008.

BIGOTTO, S.A.M. *et al.* Produção de Argamassas com Substituição Parcial de Areia Natural por Resíduo de PET. **ANAP Brasil**, v. 12, n. 25, p. 28-41, 2019.

BINA, P. **Metodologia de utilização de rejeitos industriais na pavimentação: estudo de caso de uso de areia de fundição**. 2002. 123 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Habitação) – Engenharia de Habitação, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 2002.

CALLISTER Jr., W.D.; RETHWISCH, D.G. **Materials science and engineering an introduction**. 8.ed. EUA: Willey, 2010. 1000 p.

CANELLAS, S.S.; D'ABREU, J.C. Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassa. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, ENTMMME, 21., 2005, Natal. **Anais [...]**. Natal: ENTMMME, 2005, p. 299-304.

CASANOVA-DEL-ANGEL, F.; VÁZQUEZ-RUIZ, J.L. Manufacturing light concrete with PET aggregate. **International Scholarly Research Network**, v. 2012, ID 287323, 2012. <http://dx.doi.org/doi:10.5402/2012/287323>.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO consumo, produção e valores de materiais de construção: banco de dados cimento. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/menu/materiais-de-construcao/cimento>. Acesso em: 18 maio 2020.

CEMPRE. COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Biblioteca-acervo: banco de dados**. Disponível em: <http://cempre.org.br/biblioteca>. Acesso

em: 18 maio 2020.

CEMPRE. COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Anuário da Reciclagem 2017-2018**. São Paulo: ANCAT, 2020. Disponível em: <https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/2-Anu%C3%A1rio-da-Reciclagem.pdf>. Acesso em: 17 maio 2020.

CHOI, Y. *et al.* Effects of waste PET bottles aggregate on the properties. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 776-781, 2005. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.014>.

DE CORT, S. *et al.* **Packaging Materials**: Polyethylene Terephthalate (PET) for Food Packaging Applications. Report to Commissioned by the packaging materials task force. Brussels: ILSI Europe, 2017. 27 f. (ILSI Europe Report Series).

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODÁGEM. **ME 084**: agregado miúdo - determinação da densidade real. Rio de Janeiro: DNER, 1995. 3 p.

DYER, P. P. O. L.; MANCINI, S.D. A utilização de resíduos de pet poli (tereftalato de etileno) como agregado em argamassa. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25., 2009, Recife. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

FERNANDES, A. P.; VENQUIARUTO, S.D. Influência da utilização de agregado reciclado de pet na resistência a compressão simples do concreto. *In*: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, SIEPE, 9., 2017, Santana do Livramento. **Anais [...]**. Santana do Livramento: SIEPE, 2017.

FLORES, A.; CALLEJA, F. J. B. Mechanical properties of poly(ethylene terephthalate) at the near surface from depth-sensing experiments. **Philosophical Magazine A**, v. 78, n. 6, p. 1283-1297, 1998. <http://dx.doi.org/doi:10.1080/01418619808239987>.

FORMIGONI A.; FORTES, R. P. A perspectiva de crescimento da utilização do PET (Poli Tereftalato de Etileno) reciclado e qual a consequência na geração de recursos para os catadores. *In*: V SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, SEGET, 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SEGET, 20-22 de out, 2008.

IMBABI, M. S. *et al.* Trends and developments in green cement and concrete technology International. **Journal of Sustainable Built Environment**, v. 2012, n. 1, p. 194–216, 2013. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.ijsbe.2013.05.001>.

JARDIM, R. R. **Estudo da viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo por agregado miúdo reciclado de pet em concretos convencionais**. 2016. 71 f. Trabalho Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, 2016.

JUCÁ, P. H. O. **Estudo das propriedades mecânicas em diferentes temperaturas**

do pet e ensaios de arrancamento com tratamento mecânico em matriz cimentícia a base de cimento Portland. 2017. 99 f. Trabalho Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, 2017.

KOSCHEVIC, M. T.; BITTENCOURT, P. R. S. Meio ambiente e materiais poliméricos: breves considerações com ênfase ao Politereftalato de Etileno (PET) e processos de degradação. **R. Eletr. Cient. Inov. Tecnol.**, Medianeira, v. 2, n. 14, p. 60-80, 2016.

KUMAR B.M. *et al.* Studies on biodegradation of plastic packaging materials in soil bioreactor. **Indian Journal of Advances in Chemical Science**, v. 1, p. 297-299, 2016.

LENNON, B. *et al.* Performance enhancement of concrete through the use of waste injection molding pellets: a preliminary study of viability. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 6, p. 49-61, 1993. doi: 0892-7057/93/01 0049-13p

LIMA D. S. *et al.* Estudo comparativo entre o concreto leve de PET e o concreto leve de EPS. **Rev. Cienc. Exatas Tecnol.**, v. 13, n. 13, p. 23-28, 2018. doi: 10.17921/1890-1793.2018v13n13p23-28

DUARTE, E. B. L. **Resistência à compressão de argamassa composta por resíduo de construção e demolição e politereftalato de etileno.** 2014. 165 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental e Sustentabilidade) - Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2014.

LIU, S. J. **Polymer cement concrete composites.** 1988. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculty of The Graduate School, New Jersey Institute of Technology, New Jersey, 1988.

MEIER, M.A. *et al.* Sociedade moderna industrial e a educação ambiental: desafios industriais – ambientais do Corede vale do rio dos sinos. **Geographia Opportuno Tempore**, Londrina, v.1, n. especial, p. 348-363, 2014.

MODRO, N. L. R. *et al.* Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. **Revista Matéria**, v. 14, n. 1, p. 725-736, 2009.

MONTEIRO, L. L. C. **Uso de resíduos de embalagens pet em betões.** 2017. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2017.

PARK, S. H.; KIM, S. H. Poly (ethylene terephthalate) recycling for high value added textiles. **Fashion and Textiles**, v. 1, n. 1, 2014. <http://dx.doi.org/doi:10.1186/s40691-014-0001-x>.

PASTOR, J. S. *et al.* Aplicação do PET na construção de residências. *In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS 10.*, 2019, Joao Pessoa. **Anais [...]**. Porto Alegre: Instituto Venturi Para Estudos Ambientais, 2019. Disponível em: <http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/1385> Acesso em: maio 2020.

PEDRUZZI, A. N. *et al.* Educação ambiental e crise estrutural do capital. *In:* CONGRESSO NACIONAL DE EDUCAÇÃO, EDUCERE, 11., 2015, Londrina. **Anais [...]**. Londrina: EDUCERE, 2015.

PIATTI, T. M.; RODRIGUES, R. A. F. **Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais**. Maceió, AL: UFAL, 2005.

PROCÓPIO FILHO, A. *et al.* **Ciência, Ética e Sustentabilidade**. 2.ed. Brasília-DF: Cortez editora, 2001.

REIS, M. L.; CARNEIRO, E. P. Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars. **Construction and Building Materials**. v. 27, n. 1, p. 107-111, 2012.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.020>.

ROBICHAUD, L. B.; ANANTATMULA, V. S. Greening project management practices for sustainable construction. **J. Manage. Eng.**, v. 27, n. 1, p. 48-57, 2011.
[http://dx.doi.org/doi:10.1061/ ASCE ME.1943-5479.0000030](http://dx.doi.org/doi:10.1061/ASCE_ME.1943-5479.0000030).

ROTH, C. G.; GARCIAS, C. M. A influência dos padrões de consumo na geração de resíduos sólidos dentro do sistema urbano. **Redes**, v. 13, n. 3, p. 5 -13, 2008.

SINAPROCIM. SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PRODUTOS DE CIMENTO. **Índice Sinaprocim**: banco de dados. Disponível em:
<http://sinaprocim.org.br/portal/atividades/aspectos-economicos/indice-sinaprocim/>.
Acesso em: 18 maio 2020.

SIQUEIRA, J. S., *et al.* Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas. **Cerâmica**. v.58, n.346, p. 275-279, 2012.
<http://dx.doi.org/doi:10.1590/S0366-69132012000200020>.

TOLENTINO, E.; BASTOS, S. C. L. P. Avaliação de desempenho de concretos de cimento Portland, reforçados com fibras de PET, por ensaios de ultra-sonografia e condutividade térmica. **Principium Online**, v. 1, n. 2, p.57-66, 2007.

YAO, Z. *et al.* Mix proportion design and mechanical property of recycled Polyethylene terephthalate concrete. **Recent Developments in Evaluation of Pavements and Paving Materials**. Special Publication, p. 89-97, 2014.
<http://dx.doi.org/doi:10.1061/9780784478493.012>.