

Resistência a Compressão de Compósitos de Poliuretano e cimento, com adição de resíduo de vidro ou areia

Compression resistance of polyurethane and cement composites, with addition of glass or sand residue

Polyana Baungarten, graduanda, Unisul.

polyanabaungarten@gmail.com

Rachel Faverzani Magnago, Dr., Unisul.

rachelfaverzanimagnago@gmail.com

Resumo

As placas de poliuretano (PU) são muito utilizadas como isolante térmico e acústico, devido ao seu ótimo desempenho. Entretanto, incidentes envolvendo materiais poliméricos na construção civil ainda são comuns, ressaltando a urgência de estudos nessa área, assim como, a necessidade de encontrar fins para resíduos industriais. O objetivo deste estudo foi preparar compósitos pela reação de policondensação de polipropilenoglicol e tolueno 2,6-diisocianato (2,4-TDI/2,6-TDI, 80/20) e cimento, com incorporação de resíduo da lapidação de vidro e insumo de areia, com o intuito de investigar o comportamento da resistência mecânica em relação ao tempo, a densidade aparente dos espécimes e a influência da cura ao ar e cura em água. O teste de resistência mecânica de compressão com 35 dias teve como melhor resultado o espécime Pu_Cim, porém foi constatada uma redução de 39,93% de sua resistência no teste de 90 dias, sendo ultrapassado pelos espécimes Pu_Cim_Areia e Pu_Cim_Vidro, que ao contrário do Pu_Cim, tiveram um expressivo aumento na sua resistência de 10,33 e 77,69%, respectivamente. Observou-se também que o período de cura em água é essencial para o aumento da resistência do espécime Pu_Cim e que o espécime com resíduo de vidro é o menos denso entre os três. Em suma, o espécime Pu_Cim_Vidro apresentou melhores propriedades mecânicas alavancando os benefícios da substituição de parte do cimento pelo resíduo de vidro que é ecologicamente e economicamente viável.

Palavras-chave: Poliuretano; Resíduo Industrial; Resistência mecânica.

Abstract

Polyurethane (PU) boards are widely used as thermal and acoustic insulation, due to their excellent performance. However, incidents involving polymeric materials in civil construction are still common, highlighting the urgency of studies in this area, as well as the need to find ends for industrial waste. The aim of this study was to prepare composites by the polycondensation reaction

of polypropylene glycol and toluene 2,6-diisocyanate (2,4-TDI / 2,6-TDI, 80/20) and cement, with the incorporation of cut glass residue and sand, in order to investigate the behavior of mechanical resistance in relation to time, the apparent density of the specimens and the influence of air and water healing. The 35-day mechanical compressive strength test had the best result for the Pu_Cim specimen, however it was found a 39.93% reduction in its resistance in the 90-day test, being exceeded by the Pu_Cim_Areia and Pu_Cim_Vidro specimens, which unlike Pu_Cim, had a significant increase in their resistance of 10.33 and 77.69%, respectively. It was also observed that the healing period in water is essential for increasing the strength of the Pu_Cim specimen and that the specimen with glass residue is the least dense among the three. The bottom line is the Pu_Cim_Vidro specimen showed better mechanical properties, taking advantage of the benefits of replacing part of the cement with glass waste which is ecologically and economically viable.

Keywords: *Polyurethane; Industrial waste, Mechanical resistance*

1. Introdução

O desenvolvimento de produtos sustentáveis, que tragam otimizações e redução dos impactos socioambientais são de grande valia para a sociedade, em virtude da urgente necessidade de limitar o uso de recursos naturais. A construção civil e todos seus produtos e processos são considerados um dos maiores geradores de resíduos no mundo, acarretando um crescente interesse no reaproveitamento destes resíduos. Uma possibilidade é incorporá-los através de inovação e tecnologia como matéria prima para confecção de novos produtos, atribuindo valor e um ciclo de vida maior para os mais variados tipos de resíduos (CARVALHO *et al.*, 2015; DEMIREL, 2013).

A necessidade de encontrar fins para resíduos da indústria local que ofereçam conforto, segurança e sustentabilidade é um forte estímulo para pesquisas e desenvolvimento de produtos que incorporem resíduos (ESTRELLA, 1996).

Os materiais de isolamento térmico exercem um papel importante quanto ao conforto térmico e seu uso contribui efetivamente para reduzir a energia necessária para aquecimento ou refrigeração de ambientes e manter uma boa temperatura interna, gerando maior eficiência energética (MAZOR *et al.*, 2011).

O poliuretano é um polímero termoplástico utilizado na construção civil, devido ao seu excelente desempenho como isolante térmico e acústico. Além disso, pode adquirir qualquer formato, é leve e de fácil manuseio (GUO *et al.*, 2015; MEIRELLES, 2014; VLADIMIROV *et al.*). Porém, apesar de seus benefícios e durabilidade no médio e longo prazo, ainda é visto como um produto caro, quando comparado com seus concorrentes como, por exemplo, o isopor (EPS).

Neste estudo, foram incorporados cimento, areia ou resíduo de vidro às placas de poliuretano com o intuito de aprimorar suas características. O cimento foi escolhido principalmente para aumentar resistência mecânica de compressão e possibilidade de acabamento cimentício. O resíduo de lodo de vidro foi selecionado visando o reaproveitamento de resíduos industriais, especialmente os de baixa granulometria, que não podem ser reaproveitados em fornos da indústria vidreira. Além do mais, este resíduo é considerado um material isolante térmico, inerte, de baixo custo, de alta durabilidade química e apresenta cerca de 72% de óxido de silício em sua composição, material não-combustível (LUZ e RIBEIRO, 2008; VARGAS e WIEBECK, 2007; BOYD e *et al.*, 1994). A areia foi utilizada para comparação com compósitos de cimento, cimento/resíduo de vidro, sendo que a composição da área é principalmente óxido de silício. Deste modo, foram avaliadas a resistência mecânica a compressão de compósitos de poliuretano com cimento, poliuretano com cimento e areia e poliuretano com cimento e resíduo de vidro

2. Procedimento Experimental

Foram adquiridos o resíduo da lapidação de vidro (Personal Glass), areia (Guarezi), cimento Portland (CPV-ARI, Itambé) e os reagentes polipropilenoglicol (AudazBrasil) e tolueno-2,6-diisocianato (2,4-TDI/2,6-TDI, 80/20, Audaz Brasil).

O resíduo de vidro foi lavado e filtrado utilizando funil de Buchner e bomba a vácuo, seco a 70 °C em estufa por 24 h e tamisado em peneiras de inox com abertura de malha de 45 µm. A areia foi tamisada em uma peneira de inox com abertura de malha de 150 µm. Logo após o preparo dos materiais, esses foram dosados, homogêneos e inseridos em moldes de madeira revestidos com fita de alumínio nas dimensões de 19,7x10x4,9 cm e mantidos por cerca de 1 hora. Após desmoldados cada espécime foi cortado em corpos de prova nas medidas 5x5x4 cm para a realização do teste de resistência mecânica. No total, foram confeccionados 8 espécimes, gerando 40 corpos de prova, pela reação de policondensação do polioli poliéter e toluenodiiisocianato com cimento e incorporação de areia ou resíduo de vidro.

O primeiro ensaio consistiu em avaliar a resistência mecânica a compressão de compósitos com a cura submerso em água/ar e a cura ao ar. Para o estudo da cura submersa em água foram preparados 10 corpos de prova de poliuretano com cimento (Pu_Cim), 5 deles permaneceram 7 primeiros dias submersos em água e mais 28 dias curando ao ar. O segundo grupo permaneceu 35 dias de cura ao ar.

Para o estudo de resistência mecânica de compressão em relação ao tempo de cura foram preparados 6 grupos de 5 corpos de prova nas composições poliuretano com cimento (Pu_Cim), poliuretano com cimento e areia (Pu_Cim_Areia) e poliuretano com cimento e resíduo de vidro (Pu_Cim_vidro). O tempo de cura seguiu dois protocolos, (1) 7 dias de cura submersa em água e 28 dias de cura ao ar (total 35 dias de cura) e (2) 7 dias de cura submersa em água e 83 dias de cura ao ar (total 90 dias de cura).

Na Tabela 1 tem-se o número de placas dos espécimes preparados, com as massas dos ensumos.

Espécimes	Nº de Placas	Polipropilenoglicol (g)	ToluenoDiisocianato (g)	Cimento (g)	Carga (g)
Pu_Cim	4	48,93	73,61	73,61	-
Pu_Cim_vidro	2	48,93	73,61	46,31	27,30
Pu_Cim_Areia	2	48,93	73,61	46,31	27,30

Tabela 1. Quantidades dos reagentes em massa (g) usados para confecção dos espécimes. Fonte:

Elaborado pelos autores.

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados no equipamento EMIC modelo DL 30000, célula de carga de 5 kN. Submeteu-se então, os corpos de prova à incrementos de pressão até deformação plástica (ASTM E2954).

Para o ensaio de densidade aparente, utilizou-se a balança analítica para obter a massa dos materiais e calculou-se o volume através das medidas com um paquímetro, obtendo o valor da densidade aparente e desvio padrão (ASTM D1622/D1622M).

3. Resultados e Discussões

Os compósitos Pu_Cim, Pu_Cim_Areia e Pu_Cim_Vidro desenvolvidos estão apresentados na Figura 1.



Figura 1. Imagens dos espécimes de poliuretano com cimento (Pu_Cim), poliuretano com cimento e areia (Pu_Cim_Areia) e poliuretano com cimento e resíduo de vidro (Pu_Cim_vidro). Fonte: elaborado pelos autores.

Visualmente, na Figura 1, os espécimes preparados apresentaram aparência semelhante, superfície uniforme e bom aspecto visual, não demonstrando deformação ou esfrelamento.

Na Figura 2 tem-se os resultados de resistência mecânica de compressão para os espécimes de Pu_Cim com cura ao ar e com cura em água/ar.

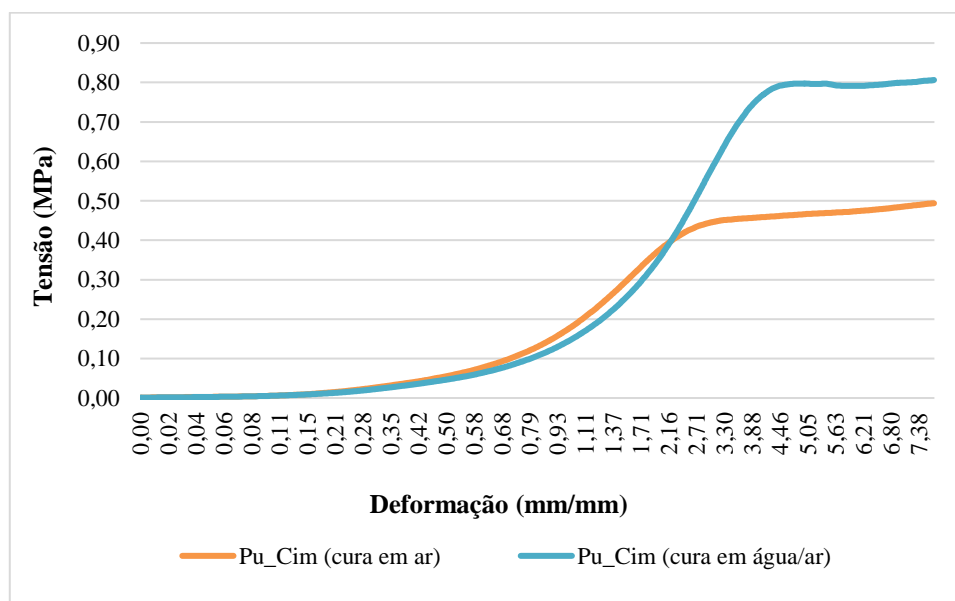


Figura 2. Resistência mecânica de compressão para os espécimes de Pu_Cim (cura em água/ar) e Pu_Cim (cura em ar). Fonte: elaborado pelos autores.

O gráfico foi gerado a partir ensaio de compressão, através da aplicação uniaxial de carga compressiva no espécime. Os resultados obtidos nesse ensaio consistem na relação entre a deformação linear, obtida pela medida da distância entre as placas que comprimem o corpo de prova, em função da carga de compressão aplicada em cada instante. Estes valores de força são divididos pela área inicial do espécime a fim de obter a tensão.

Os espécimes de Pu_Cim apresentaram comportamento elástico plástico independentemente do processo de cura, deste modo atribuiu-se esse comportamento à matriz de PU (MARQUES *et al.*, 2018). O espécime com cura nos 7 primeiros dias submersos em água e mais 28 dias ao ar apresentou resistência máxima de compressão superior, com um valor de 0,8063 MPa, enquanto que o espécime com cura de 35 dias ao ar obteve 0,4935 MPa, o que faz da cura submersa em água uma etapa fundamental para a conquista de resistência mecânica a compressão do espécime Pu_Cim.

O cimento com a água provoca a hidratação dos silicatos e aluminatos formando silicato de cálcio hidratado [Tobermita], hidróxido de cálcio [Portlandita: $\text{Ca}(\text{OH})_2$] e sulfoaluminatos de cálcio hidratados [Etringita]. O surgimento destas fases hidratadas ocorre em diferentes velocidades, o que confere características importantes como o enrijecimento, fornecendo resistência ao cimento (COUTINHO, 1997; PETRUCCI, 1998; ISAIA, 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE e BROOKS, 2012).

A cura em ar gera uma reação entre o cimento hidratado e dióxido de carbono, conhecida como carbonatação. Na presença de umidade, o CO_2 que está presente na atmosfera forma ácido carbônico, que reage com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formando CaCO_3 (NEVILLE e BROOKS, 2012). A carbonatação ocorre da superfície para o interior, é extremamente lenta e traz benefícios como aumento da resistência e durabilidade, a partir da redução da porosidade da matriz pela precipitação dos cristais de CaCO_3 nos poros (YUAN *et al.*, 2013; MO, 2013; ROSTAMI *et al.*, 2012; NEVILLE e BROOKS, 2012).

Na Figura 3 tem-se os resultados do ensaio de densidade aparente para os espécimes Pu_Cim, Pu_Cim_Areia, Pu_Cim_Vidro, com 35 e 90 dias.

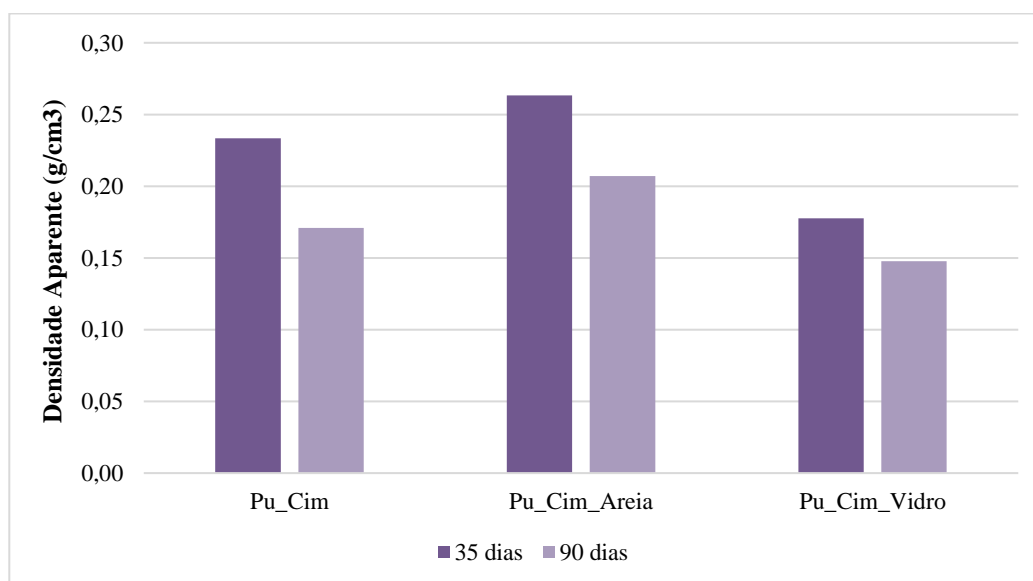


Figura 3. Densidade aparente para os espécimes Pu_Cim, Pu_Cim_Areia e Pu_Cim_Vidro.
Fonte: Elaborado pelos autores.

O material mais denso foi o Pu_Cim_Areia com $0,2632 \text{ g/cm}^3$ em 35 dias e $0,2071 \text{ g/cm}^3$ em 90 dias, seguido do Pu_Cim com $0,2333 \text{ g/cm}^3$ para 35 dias e $0,1709 \text{ g/cm}^3$ para 90 dias e por último Pu_Cim_Vidro com $0,1776 \text{ g/cm}^3$ para 35 dias e $0,1478 \text{ g/cm}^3$ para 90 dias. Esta diferença deve-se provavelmente a capacidade de reagir com a água que varia de acordo com a adição dos diferentes materiais ao PU. Quanto menos denso for o espécime, menor a sua condutividade térmica, ou seja, melhor o seu desempenho como isolante térmico, isso acontece em razão do aumento na porosidade do material (BATOOL e BINDIGANAVILE, 2018; SAMSON *et al.*, 2017).

Observou-se na Figura 3, que todos os corpos de prova ainda estavam úmidos com 35 dias de cura, já no teste de 90 dias, estavam secos. Essa perda de água explica a redução na densidade dos espécimes de 35 para 90 dias de cura.

A Figura 4 apresenta os resultados do teste de resistência mecânica de compressão para espécimes Pu_Cim, Pu_Cim_Areia e Pu_Cim_Vidro com 35 dias de cura.

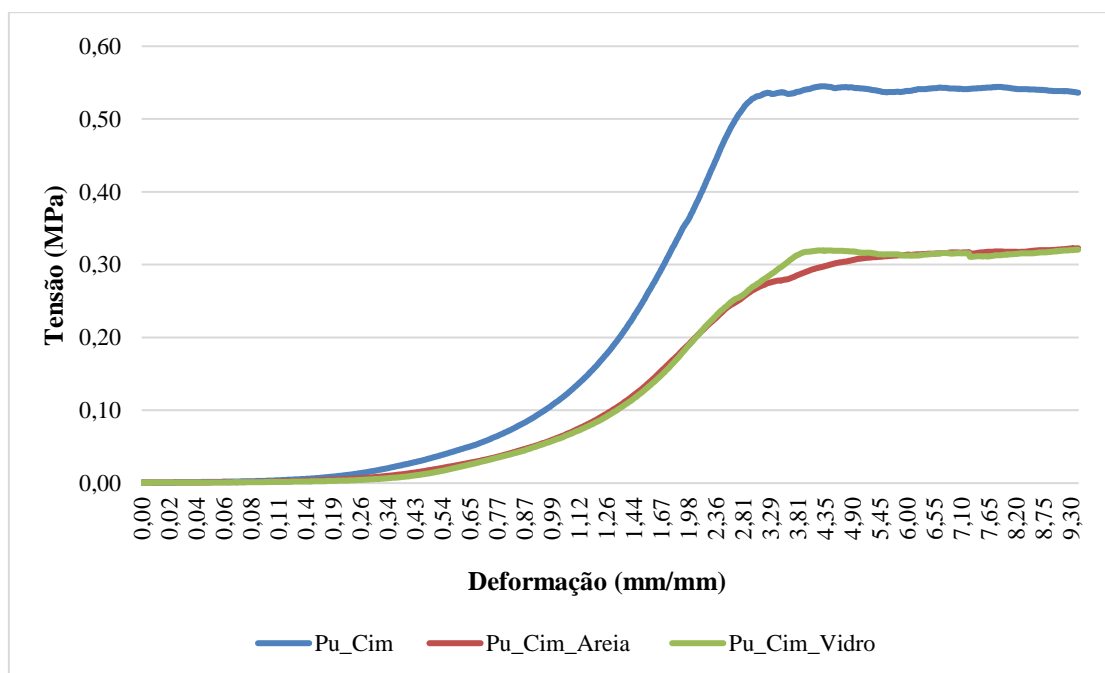


Figura 4. Resistência mecânica de compressão com 35 dias de cura para Pu_Cim, Pu_Cim_Areia e Pu_Cim_Vidro. Fonte: elaborado pelos autores.

O espécime Pu_Cim atingiu uma resistência de 0,5069 MPa enquanto que os espécimes Pu_Cim_Vidro e Pu_Cim_Areia obtiveram 0,3098 e 0,2765 MPa, respectivamente. A partir disso, observa-se que a redução de cerca de 37% de cimento causou uma diminuição na resistência a compressão para os espécimes PU_Cim_Areia e Pu_Cim_Vidro do material, entretanto, de acordo com a ASTM D1621-16, todos os espécimes revelaram resistência satisfatória para aplicação, pois estes não possuem função estruturante.

Os espécimes de Pu_Cim_Areia e Pu_Cim_Vidro tiveram resultados semelhantes, o que é coerente visto que possuem composição química similar. Dessa maneira, em relação a resistência mecânica a compressão, é sustentavelmente viável a substituição da areia pelo resíduo da lapidação de vidro em virtude de uma reutilização eficiente dos recursos industriais e a consequente minimização da geração de resíduos e poluição (LEE *et al.*, 2017).

A Figura 5 apresenta os resultados do teste de resistência mecânica de compressão para espécimes Pu_Cim, Pu_Cim_Areia e Pu_Cim_Vidro com 90 dias de cura.

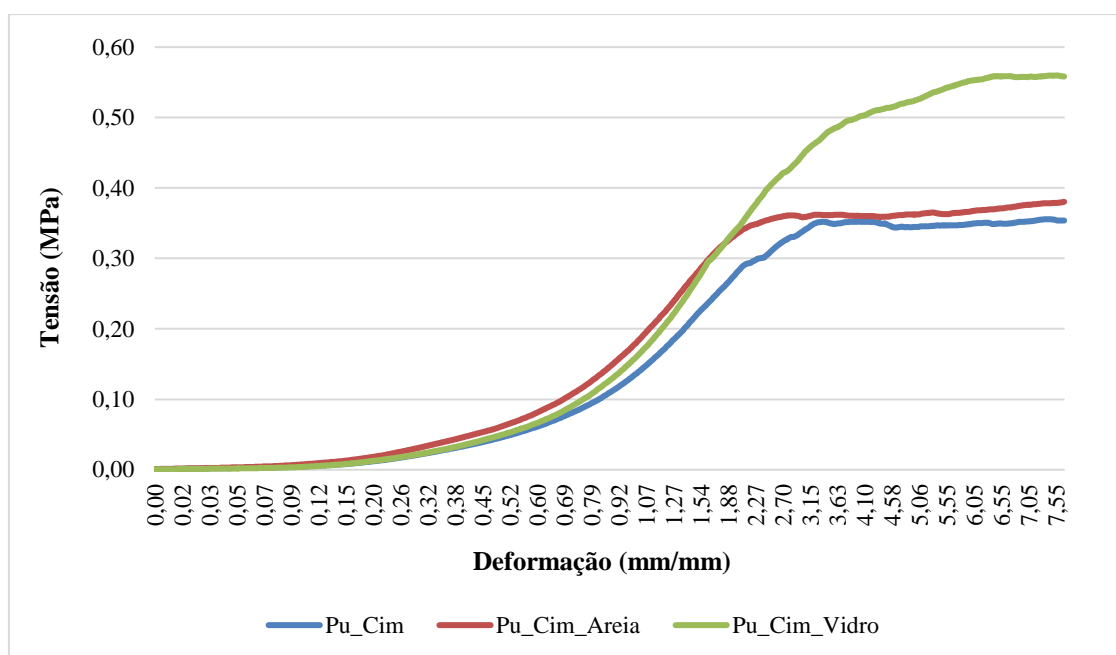


Figura 5. Resistência mecânica de compressão com 90 dias de cura para Pu_Cim, Pu_Cim_Areia e Pu_Cim_Vidro. Fonte: elaborado pelos autores.

A partir deste ensaio ficou evidente a influência do tempo de cura na resistência mecânica dos espécimes. O espécime Pu_Cim obteve 0,3033MPa, uma redução de 39,93% se comparado ao teste de 35 dias. Isso pode ter acontecido devido a formação de porosidades ou interfaces de baixa resistência entre poliuretano e a matriz cimentícia, estas porosidades tornam o espécime vulnerável aos agentes agressivos do meio que, com o passar do tempo, causam a deterioração, reduzindo sua resistência e durabilidade (SIQUEIRA, 2004). Além disso, o cimento pode ter sofrido refração por secagem, neste fenômeno ocorre uma contração do cimento devido a perda da água, gerando fissuras e comprometendo sua resistência (NEVILLE e BROOKS, 2012).

Por outro lado, o espécime com areia teve um aumento de 10,33%, atingindo 0,3418MPa e o espécime com resíduo de vidro um expressivo aumento de 77,69%, alcançando 0,4913MPa. Este aumento na resistência aconteceu possivelmente em razão do alto teor de sílica (SiO_2) presente na areia e no resíduo de vidro, que em contato com o hidróxido de cálcio reage formando uma quantidade extra de silicato de cálcio hidratado (GRAUPMANN *et al.*, 2019; MYMRIN *et al.*, 2017).

Mediante o exposto, nota-se que a substituição de parte do cimento por resíduo de vidro gerou o espécime de melhor resultado no ensaio de resistência a compressão a longo prazo Pu_Cim_Vidro, uma alternativa ecológica que garante a reciclagem do vidro, além de ter um custo mais acessível.

4. Conclusão

Compósitos de poliuretano com cimento, areia ou resíduo de vidro foram preparados pela incorporação dos insumos inorgânicos aos reagentes polioli e isocianato. Para Pu_Cim foi observado maior resistência mecânica a compressão quando os espécimes foram curados submersos em água e ar. O melhor resultado no teste de resistência mecânica de compressão foi para Pu_Cim com 0,5069 MPa com 35 dias de cura em água e ar, enquanto que para Pu_Cim_Areia e Pu_Cim_Vidro foi semelhante a resistência mecânica a compressão, cerca de 0,3 MPa. Entretanto, o teste de resistência mecânica de compressão feito com 90 dias teve como melhor resultado o espécime com adição do resíduo do vidro, com um acréscimo de 77,69% na sua resistência, ultrapassando o Pu_Cim, que com 90 dias de cura teve uma redução de 39,93% na sua resistência. O espécime com areia obteve a menor variação de resistência com o passar do tempo, aumentou 10% que ainda sim pode ser considerado um valor significativo.

Em suma, com cura de 90 dias, sendo 7 dias submerso em água e seguido por cura ao ar, o espécime com melhor desempenho em relação a resistência mecânica de compressão foi o Pu_Cim_Vidro. Ele também foi o espécime mais apropriado economicamente devido ao baixo custo do resíduo e ecologicamente devido ao reaproveitamento dos resíduos de vidro, que são em grande parte descartados incorretamente.

Agradecimentos

Agradecemos a empresa Personal Glass pelo fornecimento do resíduo da lapidação de vidro. O trabalho teve a concessão de Bolsa pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Tecnológica e Inovação (PIBITI), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Axial Compression Test of Reinforced Plastic and Polymer Matrix Composite Vertical Members, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics, 2016.

BATOO, F.; BINDIGANAVILE, V.; Thermal conductivity of hydrated paste in cementbased foam microstructure, *Adv. Civ. Eng. Mater.* 7, 2018.

BOYD, D. C.; DANIELSON, P. S. & THOMPSON, D.A. - "Glass" in: Kirk-Othmer, *Encyclopedia of Chemical Technology*, V.12, Ed. Wiley Interscience, USA, 1994.

COUTINHO A.S. *Fabrico e propriedades do betão*. Laboratório de engenharia civil, vol. I, Portugal, 1997.

ESTRELLA, S. P. *Diagnóstico de resíduos sólidos industriais em Santa Catarina - perspectivas de uso na construção civil*. 193 f. Dissertação (Mestrado): Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

GRAUPMANN, O.; MARTINS, M. A.; CONSUL, M.; CECHIN, L. *Análise da resistência à compressão de concretos com adição de cinza de aterro sanitário*. Rio de Janeiro, v. 24, 2019.

GUO, H., GAO, Q., OUYANG, C., ZHENG, K., & XU, W. Research on properties of rigid polyurethane foam with heteroaromatic and brominated benzyl polyols. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015.

ISAIA, G. C. *Concreto ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005.

LEE. C.; WON, J.W.; JANG, W.; JUNG, W.; HAN, S. H.; KWAK, Y. H. Social conflict management framework for project viability: Case studies from Korean megaprojects, *International Journal of Project Management*, 2017.

LUZ, A.P.; RIBEIRO, S. *Uso de pó de vidro como fundente para produção de grês porcelanato*. *Matéria* vol.13. Rio de Janeiro, 2008.

MARQUES, D. V.; BARCELOS, R. L.; SILVA, H. R. T.; EGERT, P.; PARMA, G. O. C.; GIROTTO, E.; CONSONI, D.; BENAVIDES, R.; SILVA, L.; MAGNAGO, R. F. Recycled Polyethylene Terephthalate-Based Boards for Thermal-Acoustic Insulation. *Journal Cleaner Production*. v. 189, 2018.

MAZOR, M.; MUTTO, J.; RUSSEL, D.; KEOLEIAN, G. Life cycle greenhouse gas emissions reduction from rigid thermal insulation use in buildings, *Journal of Industrial Ecology* 15 (2), 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEIRELLES, S. *Química verde: a indústria química e seus impactos na indústria da construção*. Anais: Congresso Nacional de Excelência em Gestão. Rio de Janeiro, 2014.

MO, L., PANESAR, DAMAN, K. Accelerated carbonation - A potential approach to sequester CO₂ in cement paste containing slag and reactive MgO. *Cement and Concrete Composites*, v.43, 2013.

MYMRIN, V., STELLA, J. C., SCREMIM, C. B., PAN, R. C. Y., SANCHES, F. G.; ALEKSEEV, K.; PEDROSO, D. E.; MOLINETTI, A.; FORTINI, O. M. "Utilization of

sediments dredged from marine ports as a principal component of composite material”, *Journal of Cleaner Production*, v. 142, 2017

PETRUCCI, E. G. R. *Concreto de cimento Portland*. 13. ed. São Paulo: Globo, 1998.

properties of lightweight concrete, *Mag. Concr. Res.* 69, 2017.

ROSTAMI V., SHAO Y., BOYD A. J. Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing. *Cement Concrete Research*, n.42, v.1, 2012.

SAMSON, G.; PHELIPOT-MARDEL, A.; LANOS C. A review of thermomechanical of lightweight concrete, v. 69, 2017.

SIQUEIRA, L. V. M.; STRAMARI, M. R.; FOLGUERAS, M. V. Adição de Poliuretano Expandido para a Confeção de Blocos de Concreto Leve. *Revista Matéria*, v. 9, n. 4, 2004.

VARGAS, I.M.; WIEBECK, H. Reciclagem de vidro laminado: utilização dos vidros de baixa granulometria como carga abrasiva na formulação de vernizes de alto tráfego para pisos de madeira. *Polímeros* vol.17. São Paulo, 2007.

VLADIMIROV, V. S.; LUKIN, E. S.; POPOYA, N. A.; ILYUKHIN, A.; MOIZIS, S.E.; ARTAMONOV, M.A. New types of light-weight refractory and heat-insulation materials for long-term use at extremely high temperatures. *Glass and Ceramics*, v.68, n.3-4, 2011.

YUAN, C., NIU, D., CHEN, N., *et al.* Influence of carbonation on microstructure of concrete. *Guisuanyan Tongbao*, v.32, n.4, 2013.