

Recebido em 11/2019. Aceito para publicação em 12/2019.

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E À FLEXÃO DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO NO AGREGADO GRAÚDO EM ATÉ 30%

EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF RESISTANCE TO COMPRESSION AND FLEXION OF CONCRETE WITH PARTIAL REPLACEMENT OF PRINTED CIRCUIT BOARD IN THE AGGREGATE IN UP TO 30%

Leonardo Alves da Conceição¹

Ricardo de Freitas Cabral²

Roberto de Oliveira Magnago³

Resumo: Os materiais utilizados para produzir o concreto são finitos na natureza. Pensando nisso, existem diversos estudos comprometidos a encontrar substitutos para os agregados, seja graúdo ou miúdo. Esses substitutos, podem ser resíduos naturais, tais como: fibras naturais ou casca de arroz e etc, ou resíduos industriais, como pneus ou embalagens PET. Nesse artigo, foi utilizado como substituto no agregado graúdo, a Placa de Circuito Impresso (PCI), em proporções de 10%, 20% e 30%. As PCI's são encontradas nos Resíduos de Equipamentos Eletro Eletrônicos (REEE). Para a realização dos testes, foi feita a extração dos componentes e feito a moagem num moinho de facas, onde a PCI foi moída duas vezes. Após isso, foram feitos os moldes e realizados os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão, para testar a viabilidade técnica. Atingiu-se a resistência de 25,67 MPa no ensaio de compressão para o concreto padrão e a resistência de 24,53 MPa na proporção de 10% para o ensaio de compressão. Para o ensaio de tração na flexão, a resistência atingida foi de 5,19 MPa para concreto padrão e de 3,81 MPa para a proporção de 30%. Sendo assim, sua aplicação como concreto não estrutural é possível.

Palavras-chave: Reciclagem; concreto; PCI; agregados graúdo; REEE.

Abstract: The materials used to produce concrete are finite in nature. With this in mind, there are several studies committed to finding substitutes for households, whether large or small. These substitutes may be natural wastes such as: natural fibers or rice husk, among others, or industrial wastes such as tires or PET packaging. In this article, the Printed Circuit Board (PCI) was used as a substitute in the coarse aggregate, in proportions of 10%, 20% and 30%. PCIs are found in Waste Electronic Equipment (WEEE). To perform the tests, the components were extracted and milled in a knife mill, where the PCI was milled twice. After that, the molds were made and the compressive strength and flexural tensile strength tests were performed to test the technical feasibility. The resistance of 25.67 MPa was reached in the compression test for standard concrete and the resistance of 24.53 MPa in the proportion of 10% for the compression test. For the flexural tensile test, the strength achieved was 5.19 MPa for standard concrete and 3.81 MPa for the proportion of 30%. Thus, its application as non-structural concrete is possible.

Keywords: Recycling; concrete; PCB; coarse aggregates; WEEE.

¹ Mestrando em Mestrado Profissional em Materiais pela UniFOA Volta Redonda, RJ, BRASIL. E-mail: lcalves1@hotmail.com.

² Doutor em Ciência dos Materiais, Professor Responsável Doutor do Centro Universitário Geraldo Di Biase (UGB). E-mail: ricfisc@gmail.com.

³ Doutor em Física, Coordenador do MeMat UniFOA Volta Redonda, RJ, BRASIL, E-mail: roberto.magnago@foa.org.br.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o concreto é o material mais utilizado na construção civil. No seu estado fresco, o concreto toma a forma do molde onde será aplicado. Suas principais propriedades são a trabalhabilidade e a homogeneidade, sendo muito fácil de fazer. A mistura é a base de cimento portland, areia, brita e água. Porém, como a brita e areia estão se tornando produtos escassos nas grandes cidades e 40% dos recursos extraídos são para ser utilizados na construção civil, é necessário pesquisas para procura de novos agregados (MODRO *et al.*, 2009). Diversas pesquisas estão sendo realizadas, visando diminuir esse consumo ao mesmo tempo em que se aproveitam outros materiais disponíveis, que seriam jogados em aterros e lixões de forma inadequada e levariam décadas para se decompor. Podem ser resíduos industrializados, por exemplo, os pneus e embalagem PET e resíduos naturais, tais como: casca de arroz, serragem, ou bagaço da cana.

Dentre tantos materiais pesquisados, ainda há o “lixo eletrônico”, mais conhecido como Resíduo de Equipamento Eletro Eletrônico (REEE), que são as TVs, geladeiras, computadores entre outros. Dentro estes REEE, encontram-se as Placas de Circuito Impresso (PCI), as responsáveis por controlar as funções dos equipamentos eletro eletrônicas (EEE). Quando descartados incorretamente em lixões ou aterros, podem contaminar o meio ambiente.

As PCI's podem ser feitas de diversos materiais, os mais comuns são: fenolite e fibra de vidro/epóxi. Existem ainda as PCI's feitas de poliéster e poliimida. Sua utilização varia de acordo com a necessidade, dependendo do material a ser utilizado, apresenta baixo custo, boa resistência térmica ou mecânica. As PCI's são projetadas para ter baixa inflamabilidade, baixa absorção de água, boa estabilidade dimensional entre outros.

Ao fazer o reaproveitamento das PCI's, podem ser evitadas a exploração de recursos naturais virgens e não renováveis. Podem-se reaproveitar os metais nobres de alto valor na cadeia de produção e as partes não metálicas das PCI's, como substitutos da brita no concreto. A PCI é um material pouco explorado em termos de pesquisa no país, onde se aproveita um tipo de metal da sucata de PCI ou adicionar em pequenas proporções PCI na fabricação de blocos de alvenaria.

Nos países com hábito de reciclar o REEE, a reciclagem realiza-se da seguinte forma: desmontagem e separação dos componentes valiosos, que passa por um tratamento especial; processamento mecânico e/ou metalúrgico e purificação dos materiais por processos químicos (OLIVEIRA; BERNARDES; GERBASE, 2012).

O objetivo desse estudo foi apresentar outro material possível de se aplicar ao concreto, substituindo o agregado graúdo por PCI, em proporções de 10%, 20% e 30%, fazendo a comparação com o concreto padrão e identificar a proporção que tenha o melhor desempenho de resistência mecânica. Além disso, ajudará a dar um destino adequado aos resíduos, diminuindo a extração de matéria prima e gerando redução de

custos.

2 MATERIAIS E METODOS

2.1 Materiais

Os materiais usados para este artigo foram: o concreto, usando brita, areia, PCI e água. O traço usado para o concreto padrão foi 1:2:3, na ordem, 7 litros de cimento, 14 litros de areia e 21 litros de brita. O cimento Portland, CP-III 40 RS de 40 MPa, embalagem de 50 kg da marca CSN, fornecido pela UniFOA. Brita 1 (diâmetro de 4,8 mm a 12,5 mm) e 2 (diâmetro de 12,5 mm a 25 mm) que foi gentilmente fornecida pela UniFOA. Foi utilizada a areia de tamanho médio de 0,42 mm a 1,2 mm que foi gentilmente fornecida pela UniFOA. Foi usada água potável, fornecida pela rede de abastecimento do SAAE de Volta Redonda. As PCI's foram coletadas basicamente na escola ICT/Fasf e na Kadoshi Informática, localizadas em Volta Redonda. Em maior parte, formadas por placa-mãe de computador.

2.2 Métodos

Na primeira etapa, foi realizada a limpeza das PCI's manualmente, extraindo os componentes maiores, exemplo das entradas USB, baterias, memórias entre outros. Alguns plásticos, pontos de solda e metais, foram processados juntos, devido à dificuldade da retirada e para não gerar mais resíduos. Após isso, as placas foram moídas duas vezes em um moinho de facas, modelo Plastimax, modelo PM 200.

Os corpos de prova utilizados neste trabalho, baseados na norma NBR 5738/2003, foram produzidos no Laboratório do UniFOA, com o traço 1:2:3, na ordem, cimento, areia, brita e a água foi sendo adicionada conforme a necessidade. Foram produzidos um total de 12 cps para cada porcentagem, além do cp padrão, considerando as idades da amostra para o teste (7, 14, 21 e 28 dias). De posse dos materiais, a mistura do concreto foi feita na Betoneira, marca Menegotti, de 150 litros, modelo Premium. Na produção dos corpos de prova (cp) para compressão, começou pelo cp referência onde foram usados 7 litros de cimento, 14 litros de areia e 21 litros de Brita (1 e 2). Para as proporções de 10%, 20% e 30%, a PCI substituiu a Brita, conforme Tabela 1. A água foi adicionada individualmente para cada proporção.

A produção dos corpos de prova de tração tem como diferenças, a quantidade de material utilizado, devido ao teste ser realizado apenas na idade de 28 dias, conforme Tabela 2 e a mistura foi feita manualmente.

Para o ensaio de compressão, as formas utilizadas para o molde dos corpos de prova foram de metal, lisas e revestidas com uma fina camada de óleo e com dispositivo de abertura para facilitar na hora de moldar, com dimensão de 10 x 20 cm. Os cp's foram preenchidos em duas etapas, entre elas, foi desferido 12 golpes com uma haste, deixando o concreto mais uniforme possível no molde e foi utilizado uma colher de pedreiro para o último acabamento, baseado na NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO

BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

Para o ensaio de tração, as formas utilizadas para o molde dos corpos de prova foram de madeira naval, fabricada no UniFOA, com dimensão de 35 x 10 x 10 cm. Os cp's foram preenchidos em duas etapas, entre elas, foi desferido 12 golpes com uma haste, deixando o concreto mais uniforme possível no molde e foi utilizado uma colher de pedreiro para o último acabamento, baseado na NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

Tabela 1 - Proporção de material usado para cada porcentagem de CP para resistência à compressão.

%	Material (litros)				
	Areia	Água	Brita	PCI	Cimento
0	14	4	21	-	7
10	14	4	18,9	2,1	7
20	14	3,9	16,8	4,2	7
30	14	4,2	14,7	6,3	7

Fonte: Os autores.

Tabela 2 - Proporção de material usado para cada porcentagem de CP para resistência à tração na flexão.

%	Material (litros)				
	Areia	Água	Brita	PCI	Cimento
0	4	1	6	-	2
10	4		5,4	0,6	2
20	4	1	4,8	1,2	2
30	4	1	4,2	1,8	2

Fonte: Os autores.

2.2.1 Ensaio de resistência à compressão

O Ensaio de resistência à compressão foi realizado no Laboratório da UniFOA, com base na NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), foi utilizada a prensa EMIC, modelo PC 150, célula de carga de 15.000 toneladas, com capacidade máxima de 100 MPa, com base de neoprene tanto em cima como embaixo do corpo de prova, de modo que se tenha melhor distribuição de carga no CP até se romper. Taxa de carregamento utilizada foi de 0,7 MPa/min.

2.2.2 Ensaio de resistência à tração na flexão

O Ensaio de Resistência à tração na flexão realizado no Laboratório da UniFOA, com base na NBR 12142 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010), foi utilizado a prensa EMIC, modelo PC 150, célula de carga de 15.000 toneladas, com capacidade máxima de 100 MPa, com base de neoprene tanto em cima como embaixo do corpo de prova, de modo que se tenha melhor distribuição de carga no CP até se romper. Taxa de carregamento utilizada foi de 0,9 MPa/min.

3 Resultado e Discussão

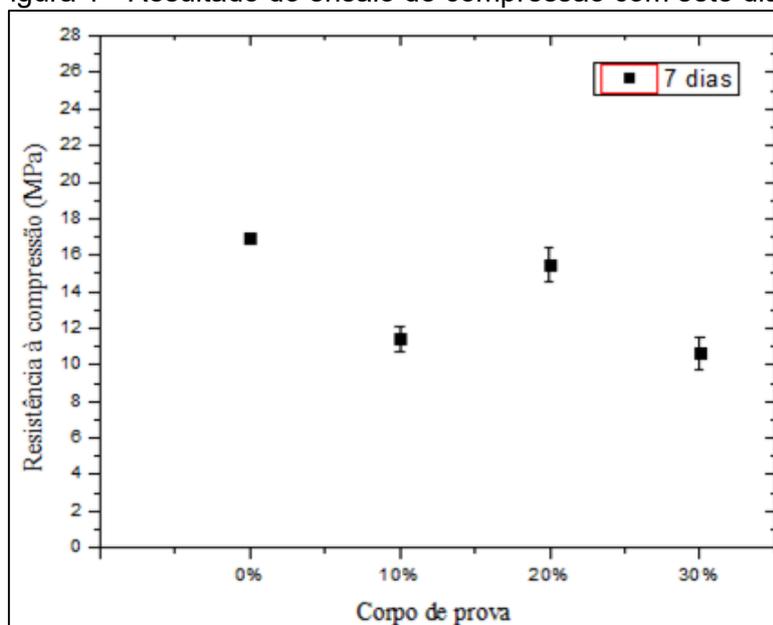
Para o ensaio de resistência à compressão, os resultados apresentados nas Figuras (1, 2, 3, 4), foram separados de acordo com a idade do corpo de prova (7, 14, 21 e 28 dias), tendo como parâmetro, os corpos de prova padrão. Para o ensaio de resistência à flexão, os resultados apresentados na Figura 6, considera apenas a idade de 28 dias, tendo como parâmetro, os corpos de prova padrão.

3.1 Ensaio de Resistência à Compressão

3.1.1 Resultados para sete dias

Para o resultado de sete dias, observa-se que em relação ao corpo de prova padrão, a amostra de 20% foi a que obteve os melhores resultados. Pode ter acontecido de o material ao ser despejado na forma, não ter ficado homogêneo, podendo ter mais areia ou PCI, por exemplo, (PARAGUASSÚ, 2017). Pode ser o caso da amostra de 10%. A Figura 1 ajuda a melhor visualização dos resultados. Resultados obtidos nesse estudo são parecidos com resultados obtidos de (NAGAJOTHI; KALA, 2015).

Figura 1 - Resultado do ensaio de compressão com sete dias.

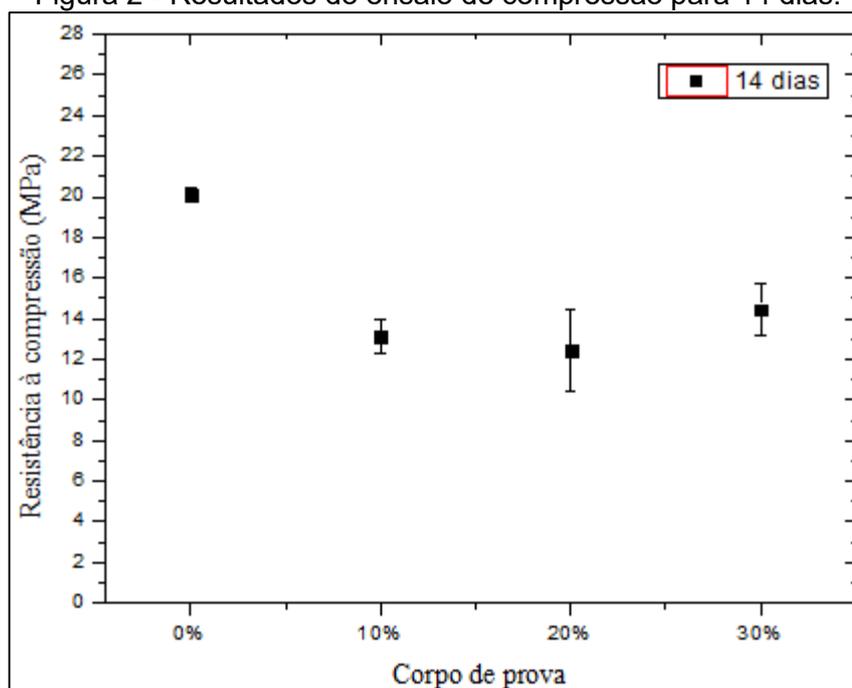


Fonte: Os autores.

3.1.2 Resultados para 14 dias

Para o resultado de 14 dias, destaca-se que a amostra de 20% de PCI teve uma queda na resistência em relação ao resultado de sete dias. (FERRARI *et al.*, 2018) diz que o formato e tamanho da PCI pode ter influência no resultado. Essa queda pode ser atribuída também à natureza angular da PCI, menor que do agregado graúdo, fazendo assim a resistência cair (WANG; ADAWAY, 2015). Em outra hipótese, o material ao ser despejado na forma, não ter ficado homogêneo, podendo ter mais areia ou PCI, por exemplo, (PARAGUASSÚ, 2017). Os resultados são apresentados Figura 2.

Figura 2 - Resultados do ensaio de compressão para 14 dias.

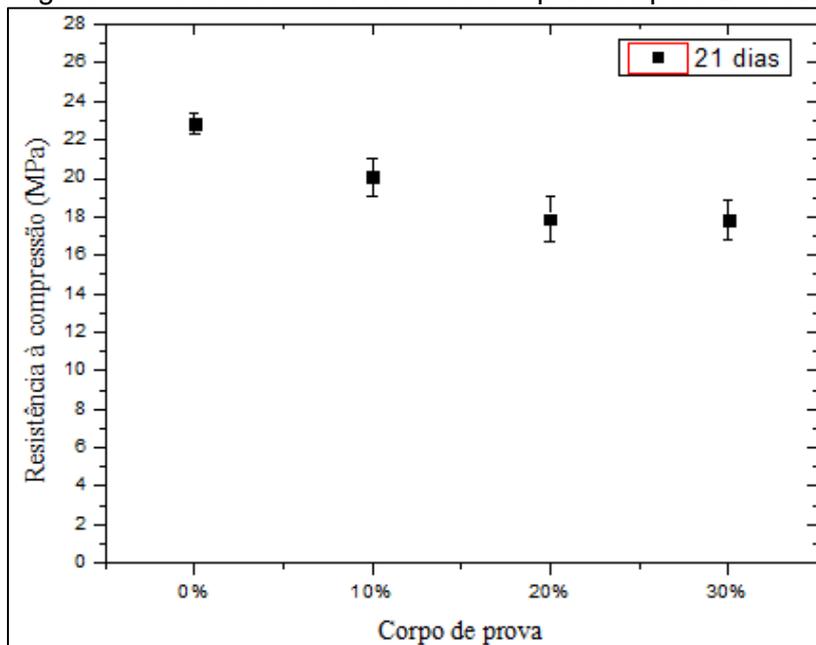


Fonte: Os autores.

3.1.3 Resultados para 21 dias

Os resultados de 21 dias são apresentados na Figura 3. Na cura dos corpos de prova na idade de 21 dias, em média, o ganho de resistência foi de 30% para as proporções com 10% e 20% com PCI. Para a proporção de 30% de PCI, o ganho foi de aproximadamente 20% de resistência. Resultados obtidos nesse estudo são parecidos com resultados obtidos de (NAGAJOTHI; KALA, 2015).

Figura 3 - Resultados do ensaio de compressão para 21 dias.

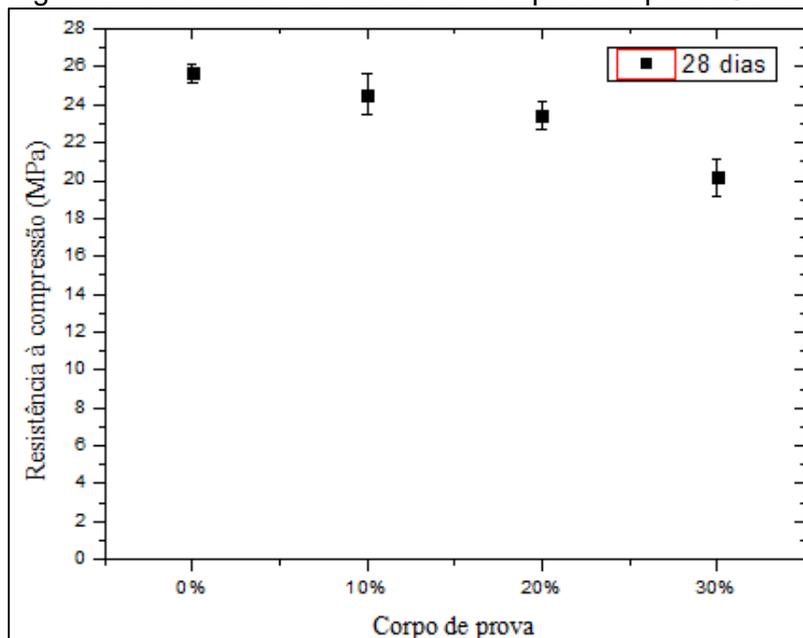


Fonte: Os autores.

3.1.4 Resultados para 28 dias

É nesta idade de cura em que se considera os valores para realizar projetos. Considerando que não foi usado nenhum aditivo para auxiliar a secagem ou obter ganho de resistência, as amostras com 10% e 20% de PCI atingiram valores próximos a amostra padrão, conforme apresentado na Figura 4. Estas amostras podem ter ficado mais homogêneas (PARAGUASSÚ, 2017). Resultados obtidos nesse estudo são parecidos com resultados obtidos de (NAGAJOTHI; KALA, 2015).

Figura 4 - Resultados do ensaio de compressão para 28 dias.

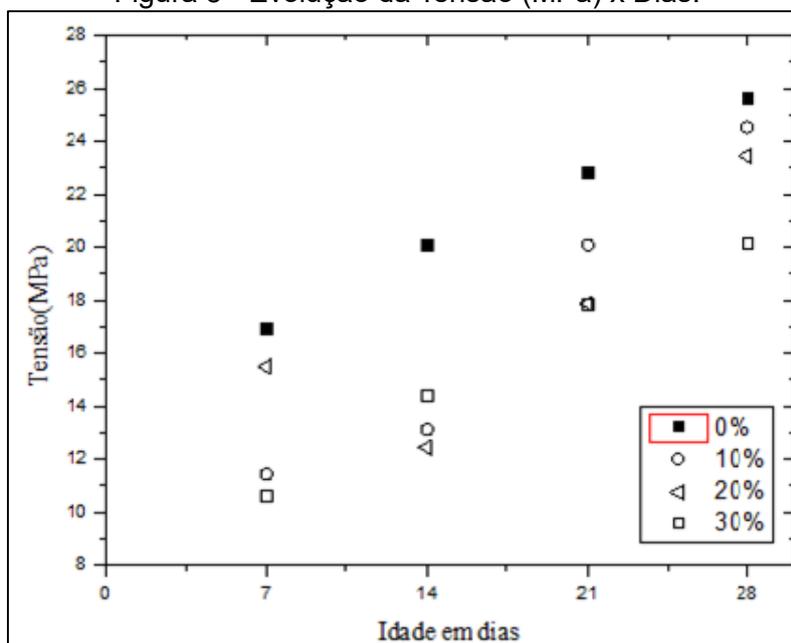


Fonte: Os autores.

3.1.5 Tensão (MPa) x Idade dos corpos de prova

A Figura 5 mostra a evolução das amostras ao longo dos 28 dias de cura. Pode-se destacar a composição de 10% de PCI, que aos 28 dias atingiu o equivalente a 95% da tensão total da amostra padrão e a composição de 20% que atingiu 91,3% da tensão total. (OLOFINNADE; EDE; NDAMBUKI, 2017; THORNEYCROFT *et al.*, 2017), dizem que, tanto a forma e tamanho das partículas do PCI, assim como, a superfície mais lisa do PCI podem ser a explicação para a perda de resistência. (THORNEYCROFT *et al.*, 2017), complementa afirmando que as PCI's podem agir como defeito na estrutura interna do concreto. (WANG; ADAWAY, 2015), diz que, quanto menor o tamanho das partículas melhor seria a interação entre pasta e da PCI.

Figura 5 - Evolução da Tensão (MPa) x Dias.



Fonte: Os autores.

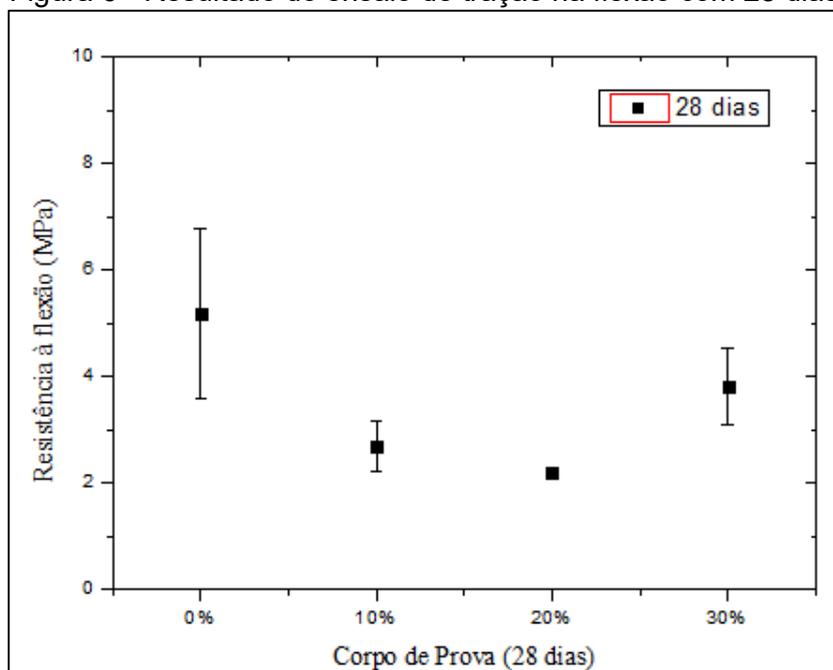
3.2 Ensaio de Resistência à Tração na Flexão

Para o ensaio de resistência à tração na flexão, o resultado foi apresentado na Figura 6, tendo como parâmetro, os corpos de prova padrão.

Ensaio muito utilizado para verificar, por exemplo, os efeitos que o concreto sofrerá ao ser usado como piso ou viga. Pela literatura, esse ensaio resiste em média até 10% do valor da resistência a compressão. Na Figura 6, foi possível observar que, para o cimento com 30% de PCI ocorreu um aumento de resistência à tração na flexão, ficando fora da faixa esperada para este tipo de ensaio. Após pesquisas na literatura, foi levantada a hipótese para essa inesperada melhora, o fator água/cimento e uma mistura mais homogênea dos materiais (ANNA, 2013). Em outra hipótese, o que pode ter acontecido, foi que o concreto absorveu a propriedades/característica da PCI, que tem boa resistência a flexão na tração (MAGNAGO, 2014; ANNA, 2013). Outra hipótese levantada na literatura por (OLOFINNADE; EDE; NDAMBUKI, 2017), diz que a força de

ligação entre cimento e PCI são fracas, o que provoca a perda de resistência. Os valores ficaram próximos aos atingido por Alagusankareswari, 2016 (ALAGUSANKARESWARI et al., 2016).

Figura 6 - Resultado do ensaio de tração na flexão com 28 dias.



Fonte: Os autores.

4 CONCLUSÃO

Baseado nas normas NBR 6118/2014 e NBR 12655/2006, para o concreto ser considerado estrutural, deve apresentar valores entre 20 MPa a 90 MPa. Os valores das amostras produzidas neste trabalho apresentam valores 25,67 MPa de resistência à compressão para amostra padrão e 24,53 MPa de resistência à compressão para amostra de 10% com PCI. Para o ensaio da resistência à tração na flexão, a amostra com 30% de PCI obteve o melhor desempenho entre as amostras com PCI. Pelas normas, é necessário aplicar um fator de segurança e aplicando o maior índice, o concreto cai para abaixo de 20 MPa, não sendo possível a utilização como concreto estrutural, mas está apto a ser utilizado como concreto não estrutural, podendo ser aplicado em calçadas ou pavimentos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014; 2006).

5 AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago, a UniFOA, que cedeu os materiais para produção do concreto, à escola ICT/Fasp, localizada na cidade de Volta Redonda - RJ e Loja de informática Kadoshi, localizada na cidade de Volta Redonda - RJ, por ceder as PCI's e aos técnicos de laboratório Arthur Almeida Bitencourt e Dirceu Hartung de Camargo, pela ajuda durante os ensaios.

REFERÊNCIAS

- ALAGUSANKARESWARI, K.; SANDEEP, K. S.; VIGNESH, K. B.; NIYAS, K. A. H. Na Experimental Study on E Waste Concrete. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 2, 2016.
- ANNA, A. S. **Characteristics of concrete building units containing crushed waste glass**. 2013 86 f. Dissertação (Mestrado em Master os Science) North Dakota State University of Agriculture and Applied Science, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- FERRARI, J. R. *et al.* Reaproveitamento de placas de circuito impresso na produção de argamassas. *In*: CBECiMat - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 23., 2018. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2018. 12 p.
- MAGNAGO, R. O.; AMARAL, M. P.; MULINARI, D. R.; SANTOS, C. Preparação e caracterização de compósitos obtidos a partir de rejeitos poliméricos oriundos de placas de equipamentos eletrônicos. *In*: CBECIMAT - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 21., 2014. **Anais...** Cuiabá, MT Brasil, 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.
- NAGAJOTHI, P. G.; KALA, F. A Study on reusing waste printed circuit board powders and chips in cement mixes. **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, v. 8, n. 2, p. 460-464, abril, 2015.
- OLIVEIRA, C. R., BERNARDES, A. M.; GERBASE, A. E. Collection and recycling of electronic scrap: A worldwide overview and comparison with the Brazilian situation. **Waste Management**, v. 32, n. 8, p. 1592-1610, 2012.
- OLOFINNADE, O.M.; EDE, A.N.; NDAMBUKI, J.M. Sustainable greem environment through utilization of waste soda-lime glass for production of concrete. **JMES**, v. 8, n. 4, p. 1139-1152, 2017.
- PARAGUASSÚ, I. M. **Elaboração de endurecedor químico de superfície à base de silicato de sódio e silicado de lítio para aplicação em pavimentos de concreto.**

2017 89 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) - Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA, Volta Redonda, 2017.

THORNEYCROFT, J. *et al.* Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 63-69, 2017.

WANG, Y.; ADAWAY, M. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete - Effects on compressive strength. Special Issue: **Electronic Journal of Structural Engineering**, v. 14, n. 1, p. 116-122, 2015.