DESEMPENHO TERMO-MECÂNICO DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO POR RESÍDUO ELETRÔNICO

Thermo-mechanical performance of concrete with replacement of coarse aggregate by *e-waste*

Davi Eduardo Malaquias
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Curvelo, Minas Gerais | davi.eduardoma@gmail.com

Warley José de Souza
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Curvelo, Minas Gerais | warleyjose9299@gmail.com

Weslley Eunathan Fernandes Lima
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Curvelo, Minas Gerais | eunathanlima@gmail.com

Lourdiane Gontijo das Mercês Gonzaga
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Curvelo, Minas Gerais | lourdiane@cefetmg.br

Paulo Roberto Ribeiro Soares Junior
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | pauloroberto.rsoares@gmail.com

Júlia Cordeiro Vieira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | juliacordeiroengcivil@gmail.com

RESUMO

A crescente geração e descarte de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE ou e-waste) e o impacto ambiental da extração de agregados naturais são desafios contemporâneos. Este estudo investigou os efeitos da substituição parcial do agregado graúdo por plásticos de ABS oriundos de e-waste no desempenho termo-mecânico do concreto. Foram avaliados teores de 0%, 10%, 12,5% e 15%, considerando resistência à compressão, à tração e comportamento térmico em câmara experimental. A substituição de 15% reduziu em até 25% a resistência à compressão e 32% à tração, mantendo-se viável para aplicações de engenharia. A análise microestrutural apontou baixa aderência entre o plástico e a matriz cimentícia, impactando negativamente a resistência mecânica. Termicamente, observou-se redução de até 5,2% na temperatura superficial da laje e redução da frequência das temperaturas máximas pela maior substituição. O estudo contribui para o desenvolvimento de concretos mais sustentáveis, com potencial de reaproveitamento de resíduos e melhoria do conforto térmico.

Palavras-chave: Concreto sustentável; Lixo eletrônico; Plástico ABS; Resistência mecânica; Desempenho térmico.

ABSTRACT

The growing generation of waste electrical and electronic equipment (WEEE or e-waste) and the environmental impact of extracting natural aggregates are pressing concerns. This study assessed the thermo-mechanical performance of concrete with partial replacement of coarse aggregate by ABS plastics from e-waste. Replacement levels of 0%, 10%, 12.5%, and 15% were tested for compressive and tensile strength and thermal performance in a controlled chamber. At 15% replacement, compressive and tensile strengths dropped by 25% and 32%, respectively, though still suitable for engineering applications. Microstructural analysis indicated weak bonding between ABS and the cementitious matrix, explaining strength loss. Thermally, the 15% replacement mix reduced the slab's surface temperatures by up to 5.2% and significantly decreased the frequency of peak temperatures. These findings contribute to the development of more sustainable concrete, with potential benefits for waste reutilization and enhanced thermal comfort.

Keywords: Sustainable concrete; Electronic waste; ABS plastic; Strength; Thermal performance.

1 INTRODUÇÃO

O descarte inadequado de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), ou *e-waste*, é um desafio crescente para o meio ambiente e a saúde pública, devido à presença de substâncias químicas potencialmente tóxicas que contaminam solo e recursos hídricos. O Brasil, quinto maior gerador mundial de *e-waste*, produziu 2.143 kt em 2019, mas reciclou apenas 3% (Forti *et al*., 2020), demonstrando o subaproveitamento de materiais reutilizáveis.

Paralelamente, a construção civil — grande consumidora de recursos naturais e geradora de resíduos — sofre pressão por práticas mais sustentáveis. A extração de agregados naturais, como areia e brita, acarreta impactos ambientais significativos, como a degradação de ecossistemas e o aumento da pegada de carbono (Massara, 2018; Campbell; Adamowicz, 2013; Bendixen *et al*., 2021).

Nesse cenário, a reutilização de e-waste surge como alternativa promissora para materiais construtivos sustentáveis. Plásticos, que compõem cerca de 20% do peso dos REEE (Sahajwalla; Gaikwad, 2018), vêm sendo estudados como substitutos parciais de agregados em concreto. Estudos indicam que podem melhorar a trabalhabilidade e as resistências à tração e à flexão, embora reduzam a resistência à compressão (Ullah *et al*., 2021; Anand; Hamdan, 2022; Danish *et al*., 2023; Paramasivan; Rajagopal, 2023). Tais desafios reforçam a necessidade de avaliações criteriosas para garantir a conformidade com os padrões técnicos (Luhar; Luhar, 2019). Termicamente, há relatos de redução de até 8% na condutividade térmica (Ali *et al*., 2021), sugerindo potencial para o conforto ambiental. No entanto, estudos sobre propriedades térmicas e eficiência energética desses compósitos ainda são escassos.

Diante disso, este trabalho investigou os efeitos da substituição parcial do agregado graúdo por resíduos plásticos de ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), proveniente da moagem de sucata eletrônica, avaliando diferentes teores de substituição com foco em propriedades mecânicas e térmicas, visando identificar a proporção ideal para otimização termo-mecânica do concreto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

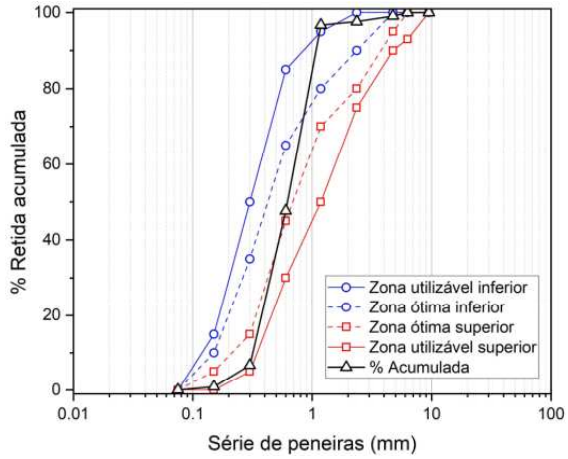
A metodologia adotada baseou-se em pesquisa experimental, com ensaio de concretagem. Utilizou-se cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), areia fina e brita 0 de origem local. As propriedades dos materiais estão na Tabela 1, e a análise granulométrica do agregado miúdo, segundo a ABNT NBR 7211:2022, está na Figura 1. O plástico ABS substituiu parcialmente a brita (Figura 2a). A água utilizada era potável.

Tabela 1: Propriedades gerais dos materiais.

Propriedades	Cimento	Areia	Brita	Plástico ABS
DIÂMETRO MÁXIMO	50 µm	1,18 mm	19 mm	6,3 mm
MÓDULO DE FINURA	-	2,50	2,35	5,49
MASSA ESPECÍFICA (KG/M³)	3.100	2.551,02	2.672	1.141,91

Fonte: Os autores.

Figura 1: Análise granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Os autores.

A adição de plásticos pode reduzir a resistência mecânica, mas também diminuir a condutividade térmica. Foram testadas quatro composições: REF (0%), EW10, EW12.5 e EW15. O traço adotado foi 1:1,41:2,35 (cimento:areia:brita), com fator a/c 0,50, conforme ABCP. Detalhes constam na Tabela 2.

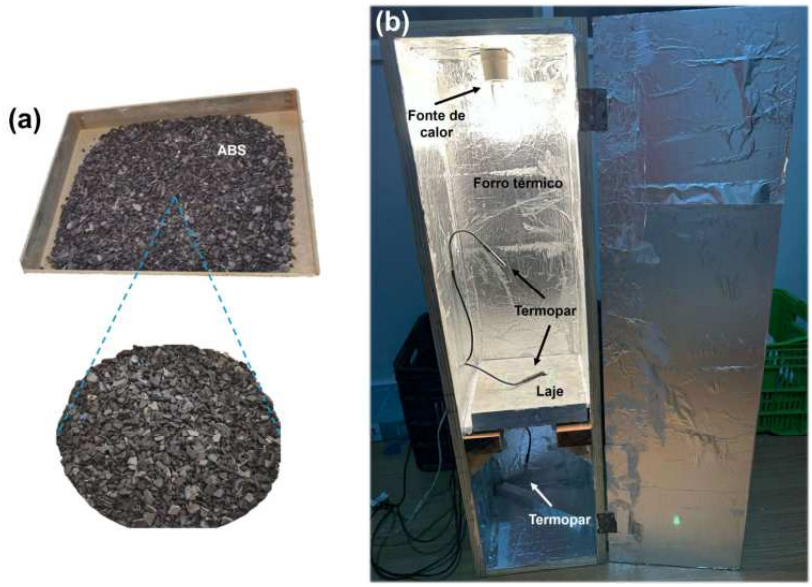
Tabela 2: Detalhe das misturas.

ID	Teor de substituição da brita por resíduos de ABS	Cimento (Kg/m³)	Areia (Kg/m³)	Brita (Kg/m³)	Plástico ABS (kg/m³)	Água (Kg/m³)
REF	0% (Controle)	452,54	638,88	1.065	0	226,27
EW10	10%	452,54	638,88	958,50	106,5	226,27
EW12,5	12,5%	452,54	638,88	931,88	133,13	226,27
EW15	15%	452,54	638,88	905,25	159,75	226,27

Fonte: Os autores.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos, cujas propriedades mecânicas foram avaliadas em máquina universal (EMIC), com acionamento hidráulico, conforme as normas NBR 5739:2018 (compressão axial) e NBR 7222:2011 (tração por compressão diametral). O desempenho térmico das lajes REF e EW15 foi testado em câmara térmica de madeira revestida internamente com alumínio e equipada com termopares tipo K (Figura 2b). Utilizou-se lâmpada incandescente de 105 W como fonte de calor, com registro de temperaturas a cada 5 minutos via microcontrolador Arduino. Para avaliar diferenças térmicas, aplicou-se o teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste post-hoc de Dunn com correção de Bonferroni, no *software* Rstudio. A mesoestrutura foi analisada por microscópio óptico portátil, com sensor CMOS HD, processador DSP de 24 bits e foco ajustável entre 15 e 40 mm.

Figura 2: Plástico ABS triturado (a) e caixa para avaliação do desempenho térmico (b).



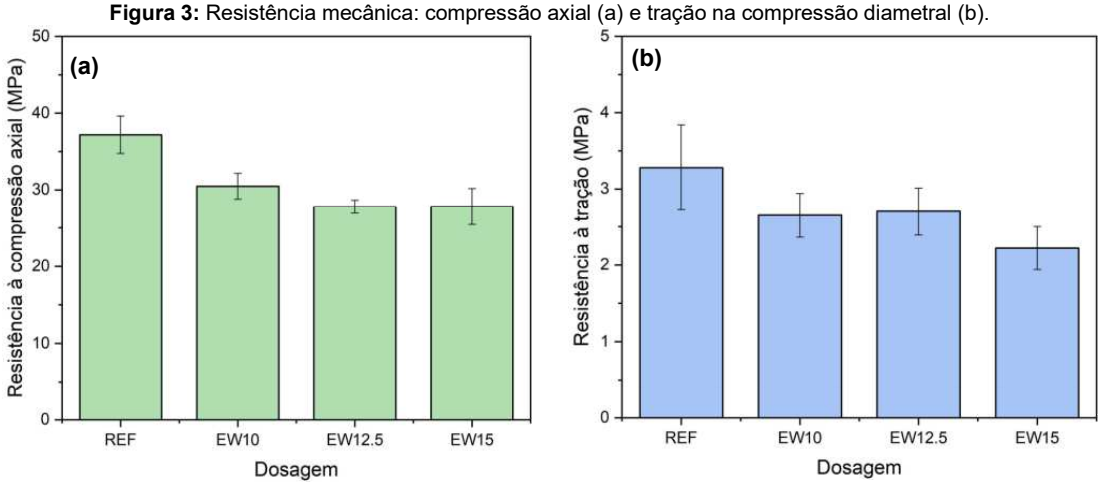
Fonte: Os autores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DESEMPENHO MECÂNICO

A Figura 3 apresenta os resultados do desempenho mecânico das diferentes dosagens de concreto. A mistura de referência (REF) atingiu 37,19 MPa na compressão e 3,28 MPa na tração, valores compatíveis com o desempenho do CP V-ARI aos 7 dias (Oliveira *et al*., 2021). A substituição parcial do agregado graúdo por resíduos plásticos de *e-waste* (EW) resultou em reduções progressivas das resistências. A mistura EW15 obteve 27,80 MPa na compressão e 2,22 MPa na tração, correspondendo a decréscimos de 25 e 32%, respectivamente. Esses resultados podem estar relacionados à menor rigidez do plástico frente aos agregados convencionais, à possível deficiência de aderência com a pasta cimentícia e à retração térmica do plástico, que pode gerar defeitos internos e aumentar a suscetibilidade à fissuração. Esses achados estão em conformidade com estudos anteriores (Arnandha *et al*., 2017; Needhidasan; Ramesh; Prabu, 2020; Arivalagan, 2020; Ahmad *et al*., 2021; Mashaan; Silva, 2024). Apesar das perdas mecânicas, as misturas com ABS, inclusive a EW15, apresentam potencial para aplicações não estruturais, como pavimentos intertravados (Sojobi *et al*., 2018), calçadas (Mashaan; Silva, 2024) e estradas de baixo volume (Saranya; Ramadevi, 2022).

Figura 3: Resistência mecânica: compressão axial (a) e tração na compressão diametral (b).



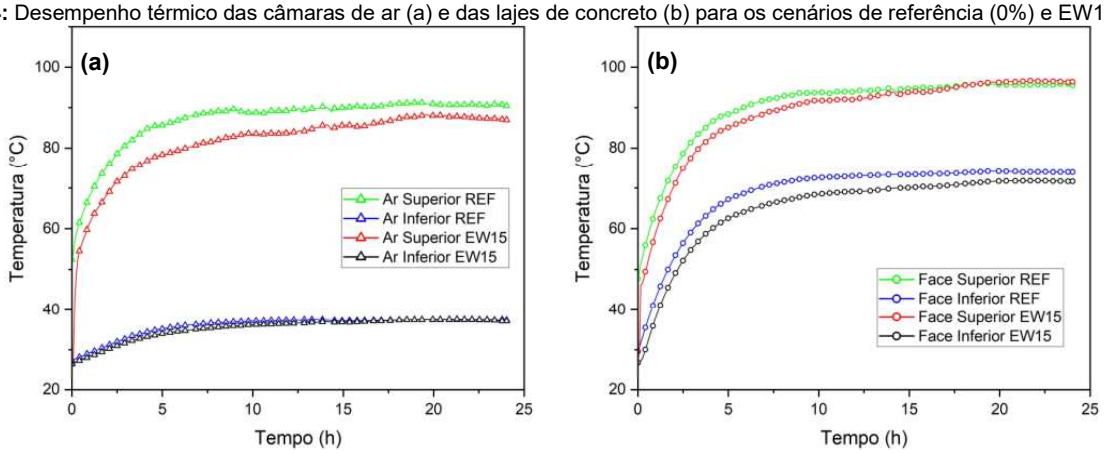
Fonte: Os autores.

3.2 DESEMPENHO TÉRMICO

A Figura 4a apresenta as temperaturas do ar nas câmaras superior e inferior da caixa de avaliação térmica para os casos REF e EW15 ao longo de um dia. Os casos EW10 e EW12.5 foram excluídos, conforme estudos prévios (Ali *et al*., 2021; El-Aidy *et al*., 2024), que apontam melhor desempenho térmico com maiores teores de ABS. Observa-se redução na temperatura do ar na câmara superior de EW15 em relação à REF, possivelmente devido à perda de eficiência da lâmpada entre os ensaios. As temperaturas externas foram 28,5 °C (EW15) e 26,8 °C (REF).

Apesar dessas variações, as temperaturas médias nas câmaras inferiores permaneceram semelhantes (≈ 36,9 °C), com defasagem térmica de até 53,9 °C em relação à câmara superior, indicando a eficácia da laje em reduzir os ganhos de calor. A Figura 4b mostra as temperaturas das faces da laje, revelando atraso térmico de até 24,9 °C, diferença relevante, pois a temperatura do ar e a radiante média influenciam diretamente o conforto térmico dos ocupantes (Yang *et al*., 2024).

Figura 4: Desempenho térmico das câmaras de ar (a) e das lajes de concreto (b) para os cenários de referência (0%) e EW15 (15%).



Fonte: Os autores.

A análise estatística (Tabela 3) revelou diferenças significativas entre os grupos pelo teste de Kruskal-Wallis ($p \leq 0,05$), confirmadas pelo teste post-hoc de Dunn.

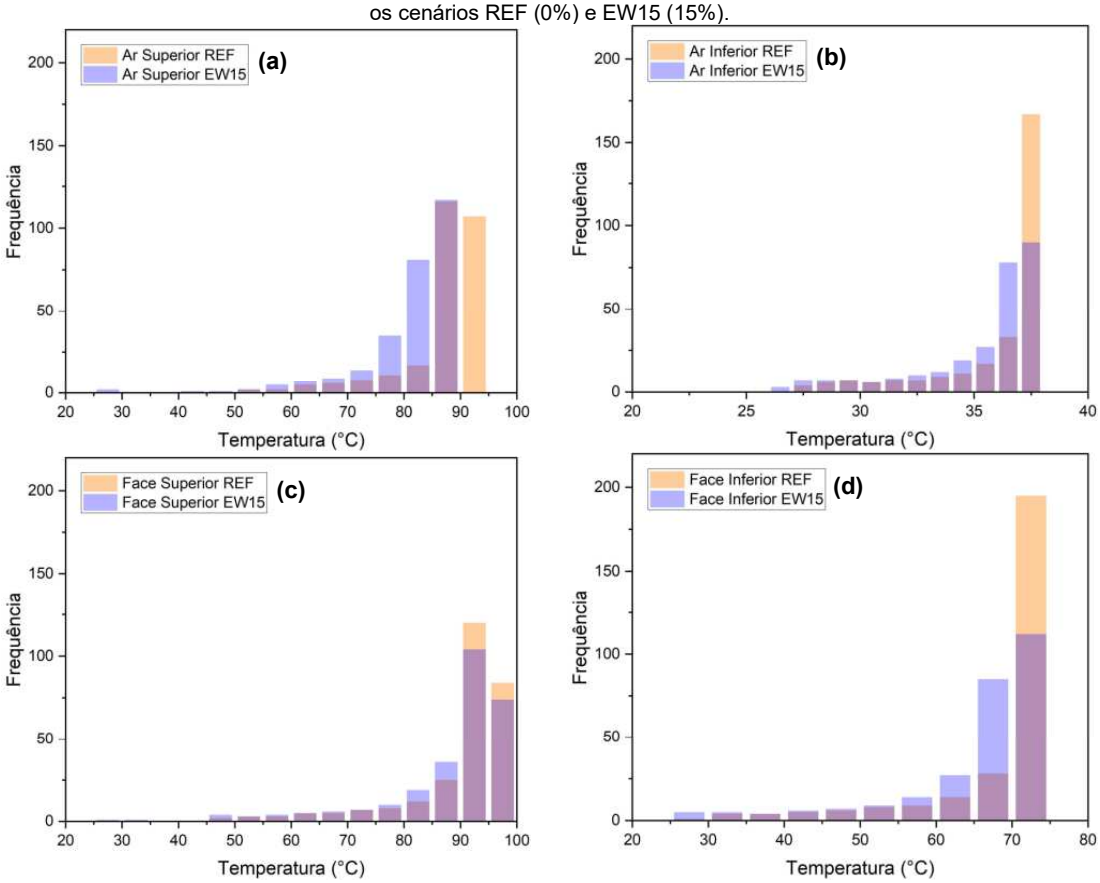
Tabela 3: Resultados das análises estatísticas entre os casos EW15 e REF.

Variável	Teste de Kruskal-Wallis	Post-hoc de Dunn	Cenário	Mediana (°C)	Diferença	Amplitude interquartil (°C)
AR SUPERIOR	($X^2_{(2)}$ = 174,08; p < 0,001)	n = 274, p < 0,001	REF	89,4	6,4 %	3,88
			EW15	83,7		7,74
AR INFERIOR	($X^2_{(2)}$ = 14,18; p < 0,001)	n = 274, p < 0,001	REF	37,2	1,9 %	1,68
			EW15	36,5		2,80
FACE SUPERIOR DA LAJE	($X^2_{(2)}$ = 4,10; p = 0,043)	n = 274, p = 0,043	REF	93,9	1,9%	5,82
			EW15	92,1		9,00
FACE INFERIOR DA LAJE	($X^2_{(2)}$ = 110,15; p < 0,001)	n = 274, p < 0,001	REF	72,9	5,2%	5,39
			EW15	69,1		7,14

Fonte: Os autores.

As medianas indicaram reduções de temperatura em EW15 frente à REF: 1,9% na câmara inferior e 5,2% na face inferior da laje. Também houve menor frequência de picos térmicos em EW15: 100% na câmara superior, 45,6% na inferior, 9,9% na face superior e 42,6% na inferior (Figuras 5a–5d). Tais reduções são atribuídas à menor condutividade térmica do ABS em comparação à brita, o que contribui para reduzir a transmitância térmica da laje, corroborando achados da literatura (Ali *et al.,* 2021; El-Aidy *et al.,* 2024).

Figura 5: Frequência das temperaturas nas câmaras de ar superior (a) e inferior (b), e nas faces superior (c) e inferior (d) da laje, para os cenários REF (0%) e EW15 (15%).

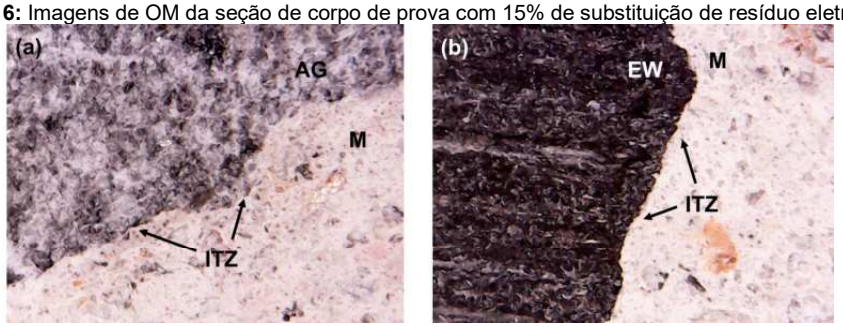


Fonte: Os autores.

3.3 ESTUDO DA MESOESTRUTURA

O estudo multiescala do concreto é fundamental para compreender a interação entre seus componentes e os efeitos no desempenho global (Wriggers; Moftah, 2006). As Figuras 6 e 7 mostram imagens de OM, destacando a mesoestrutura do concreto com EW. Na Figura 6a, observa-se a heterogeneidade do agregado convencional (AG), formado por partículas minerais, enquanto na Figura 6b o agregado de *e-waste* (EW) apresenta composição monofásica e superfície rugosa. Em ambos os casos, a matriz cimentícia (M) é densa e a zona de transição interfacial (ITZ) coesa. Contudo, a ITZ do AG exibe maior continuidade, sugerindo afinidade superior com a matriz.

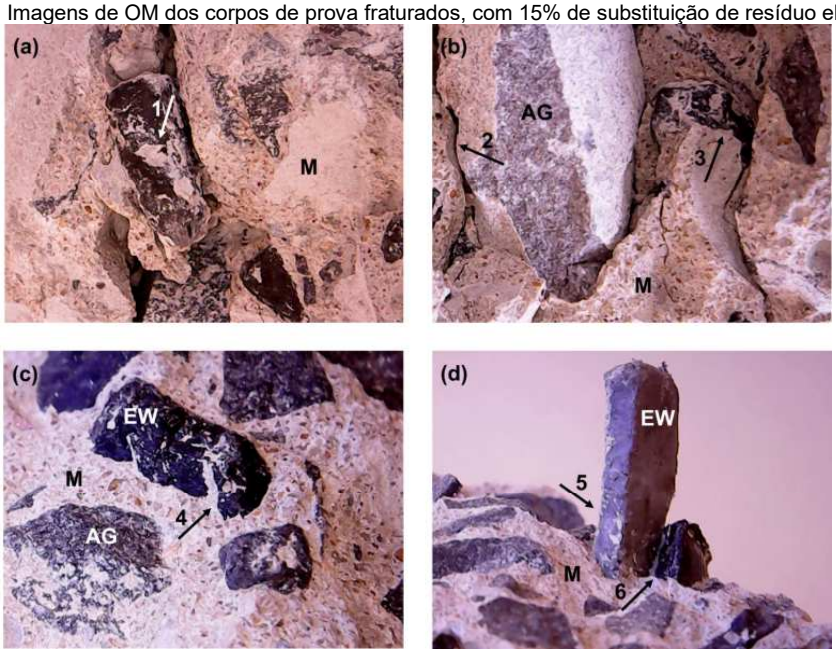
Figura 6: Imagens de OM da seção de corpo de prova com 15% de substituição de resíduo eletrônico.



Fonte: Os autores. Nota: M – Matriz cimentícias, AG – Agregado convencional, EW – Agregado de resíduo eletrônico, ITZ – Zona de transição interfacial.

As Figuras 7a e 7b exibem uma interface fraturada, um EW exposto (detalhe 1), um AG rompido em uma das faces (detalhe 2) e um EW parcialmente imerso na matriz (detalhe 3). O EW apresenta menor recobrimento por pasta, indicando menor afinidade com a matriz fluida, possivelmente devido às suas características físico-químicas. Na Figura 7c, nota-se que a maior rugosidade superficial do EW (detalhe 4) favorece a adesão mecânica. Porém, esse intertravamento não garante fixação total. A Figura 7d mostra um EW extraído com baixa força friccional, evidenciando ligação fraca com a matriz, o que pode justificar as menores resistências mecânicas observadas (Ullah *et al*., 2021).

Figura 7: Imagens de OM dos corpos de prova fraturados, com 15% de substituição de resíduo eletrônico.



Fonte: Os autores. Nota: M – Matriz cimentícias, AG – Agregado convencional, EW – Agregado de resíduo eletrônico.

4 CONCLUSÕES

Este estudo analisou o comportamento termo-mecânico de concretos com substituição parcial do agregado graúdo por resíduos plásticos de equipamentos eletroeletrônicos (ABS). Com 15% de substituição, observou-se redução de 25% na resistência à compressão e 32% na tração, atingindo 27,80 MPa, valor compatível com aplicações não estruturais, como pavimentos intertravados e elementos de vedação. A análise da mesoestrutura revelou interface agregado-pasta visualmente coesa, embora a baixa aderência do ABS à matriz cimentícia possa justificar as perdas mecânicas. No desempenho térmico, a incorporação de 15% de ABS reduziu em 1,9% a temperatura da câmara inferior e em 5,2% a da face inferior da laje, além de diminuir a frequência das temperaturas máximas, indicando ganho em isolamento e potencial de aplicação em edificações voltadas ao conforto ambiental. Assim, o uso sem ABS é preferível em aplicações de engenharia, enquanto, para fins não estruturais com foco em desempenho térmico, a substituição de 15% é mais vantajosa. A pesquisa contribui para o desenvolvimento de materiais sustentáveis, promovendo o reaproveitamento de resíduos eletrônicos e a mitigação de impactos ambientais. Estudos futuros devem explorar a durabilidade dos compósitos, como absorção de água e resistência a agentes agressivos, ampliando seu potencial de aplicação na construção civil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), especialmente ao Campus Curvelo, pelo auxílio técnico no desenvolvimento deste trabalho, bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem à CityMix Concreto e à E-mile Reciclagem de Eletrônicos pela doação dos materiais que viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AHMAD, Farhan; JAMAL, Arshad; MAZHER, Khwaja Mateen; UMER, Waleed; IQBAL, Mudassir. Performance Evaluation of Plastic Concrete Modified with *E-waste* Plastic as a Partial Replacement of Coarse Aggregate. **Materials**, v. 15, n. 1, p. 175, 27 dez. 2021. http://doi.org/10.3390/ma15010175.

ALI, Khawar; QURESHI, Muhammad Irshad; SALEEM, Shahzad; KHAN, Sibghat Ullah. Effect of waste electronic plastic and silica fume on mechanical properties and thermal performance of concrete. **Construction And Building Materials**, v. 285, p. 122952, maio 2021. http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122952.

ANAND; HAMDAN, Ateeb. Impact of partial replacement of coarse aggregate with electronic plastic waste on compressive strength of concrete. **Materials Today:** Proceedings, v. 56, p. 143-149, 2022. http://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.573.

ARIVALAGAN, S. Experimental Study on the Mechanicalbehaviour of Concrete by Partial Replacementof Waste Iron Powder as Fine Aggregate: agreen concrete approach. **International Journal For Modern Trends In Science And Technology**, v. 6, n. 11, p. 126-130, 23 nov. 2020. http://doi.org/10.46501/ijmtst061123.

ARNANDHA, Yudhi; SATYARNO, Iman; AWALUDIN, Ali; IRAWATI, Inggar Septia; PRASETYA, Yoga; PRAYITNO, Deki Agung; WINATA, Dui Cakra; SATRIO, Mochammad Hardito; AMALIA, Astri. Physical and Mechanical Properties of WPC Board from Sengon Sawdust and Recycled HDPE Plastic. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 695-704, 2017. http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.412.

BENDIXEN, Mette; IVERSEN, Lars L.; BEST, Jim; FRANKS, Daniel M.; HACKNEY, Christopher R.; LATRUBESSE, Edgardo M.; TUSTING, Lucy S. Sand, gravel, and UN Sustainable Development Goals: conflicts, synergies, and pathways forward. **One Earth**, v. 4, n. 8, p. 1095-1111, ago. 2021. http://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.07.008.

CAMPBELL, Brett; ADAMOWICZ, Wiktor L.; CAMPBELL, Brett; ADAMOWICZ, Wiktor L. Aggregate Resource Extraction: examining environmental impacts on optimal extraction and reclamation strategies. In: AGRICULTURAL AND APPLIED ECONOMICS ASSOCIATION, 2014, Minneapolis. **Anais [...]**. Minneapolis: AgEcon Search, 2014. http://doi.org/10.22004/AG.ECON.170187

DANISH, Aamar; MOSABERPANAH, Mohammad Ali; OZBAKKALOGLU, Togay; SALIM, Muhammad Usama; KHURSHID, Kiran; BAYRAM, Muhammed; AMRAN, Mugahed; FEDIUK, Roman; QADER, Diyar N.. A compendious review on the influence of *e-waste* aggregates on the properties of concrete. **Case Studies In Construction Materials**, v. 18, e01740, p. 1-24, jul. 2023. http://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01740.

EL-AIDY, Karem E.; ELLITHY, Mohamed; MAHMOUD, Mohamed H.; EL-SHAFIEY, Tarek F. Mechanical and physical properties of eco-friendly recycled plastic concrete (RPC). **Journal Of Building Engineering**, v. 97, p. 110907, nov. 2024. http://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110907.

FORTI, Vanessa; BALDÉ, Cornelis Peter; KUEHR, Ruediger; BEL, Garam. **The Global *E-waste* Monitor 2020**. UNU/UNITAR – co-hosted SCYCLE Programme, ITU & ISWA. Bonn/Geneva/Rotterdam, 2020.

LUHAR, Salmabanu; LUHAR, Ismail. Potential application of *E-waste*s in construction industry: a review. **Construction And Building Materials**, v. 203, p. 222-240, abr. 2019. http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.080.

MASHAAN, Nuha S.; SILVA, Appuwa de. Review on Assessment and Performance Mechanism Evaluation of Non-Structural Concrete Incorporating Waste Materials. **Applied Mechanics**, v. 5, n. 3, p. 579-599, 31 ago. 2024. http://doi.org/10.3390/applmech5030033.

MASSARA, Vanessa Meloni. The Brazilian legislation for the reuse of civil construction waste. **Moj Civil Engineering**, v. 4, n. 5, p. 410-412, 2018. http://doi.org/10.15406/mojce.2018.04.00136.

NEEDHIDASAN, Santhanam; RAMESH, B.; PRABU, S. Joshua Richard. Experimental study on use of *E-waste* plastics as coarse aggregate in concrete with manufactured sand. **Materials Today**: Proceedings, v. 22, p. 715-721, 2020. http://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.006.

OLIVEIRA, Dayana Ruth Bola *et al*. Resíduo de concreto como substituto ao cimento: avaliação da resistência à compressão e das emissões. **Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção**, v. 7, p. 208-215, 2021.

PARAMASIVAN, Subashree; RAJAGOPAL, Thenmozhi. Strength studies on concrete using e-plastic waste as coarse aggregate. **Global Nest Journal**, v. 25, n. 10, p. 212-215, 10 out. 2023. http://doi.org/10.30955/gnj.004799.

SAHAJWALLA, Veena; GAIKWAD, Vaibhav. The present and future of *e-waste* plastics recycling. **Current Opinion In Green And Sustainable Chemistry**, v. 13, p. 102-107, out. 2018. http://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.06.006.

SARANYA, K.; RAMADEVI, K. Electronic Waste Management — An Overview. **2022 Sixth International Conference On I-Smac (Iot In Social, Mobile, Analytics And Cloud) (I-Smac)**, p. 386-389, 10 nov. 2022. http://doi.org/10.1109/i-smac55078.2022.9987272.

SOJOBI, A. O.; ALADEGBOYE, O. J.; AWOLUSI, T. F. Green interlocking paving units. Construction and Building Materials, v. 173, p. 600-614, 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.061.

ULLAH, Zeeshan; QURESHI, Muhammad Irshad; AHMAD, Afnan; KHAN, Sibghat Ullah; JAVAID, Muhammad Farrukh. An experimental study on the mechanical and durability properties assessment of *E-waste* concrete. **Journal Of Building Engineering**, v. 38, p. 102177, jun. 2021. http://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102177.

WRIGGERS, Peter; MOFTAH, S. O. Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behaviour. Finite elements in analysis and design, v. 42, n. 7, p. 623-636, 2006. https://doi.org/10.1016/j.finel.2005.11.008.

YANG, Yuxin; LYU, Junmeng; DU, Heng; LIAN, Zhiwei; LIU, Weiwei; DUANMU, Lin; ZHAI, Yongchao; CAO, Bin; ZHANG, Yufeng; ZHOU, Xiang. Main effects and interactions of multiple key factors related to thermal perception. **Science Of The Total Environment**, v. 918, p. 170683, mar. 2024. http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170683.