XV SBTA Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas
Porto Alegre/RS - 11 a 13 de junho de 2025

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM PÓ DE VIDRO DE REEE COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO

Performance Assessment of Mortars Produced with WEEE Glass Powder as a Partial Cement Replacement

DUARTE FERREIRA[1], RAPHAELE MALHEIRO [2], ANDRÉ LEMOS [1], AIRES CAMÕES[2], MANUEL RIBEIRO[3], ALINE NÓBREGA[4]

[1] DEC, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal, duartelimaferreira@outlook.com; alemos30@hotmail.com

[2] CTAC, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal, raphaelemalheiro@civil.uminho.pt; aires@civil.uminho.pt

[3] Instituto Politécnico de Viana do Castelo, ribeiro@estg.ipvc.pt

[4] Universidade Federal de Campina Grande, aline.figueiredo@professor.ufcg.edu.br

RESUMO

A incorporação de resíduos em materiais cimentícios é reconhecida como prática importante para mitigação da pegada ecológica da indústria do cimento. Foi desenvolvida uma campanha experimental para avaliar o potencial do vidro proveniente dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (REEE) como substituto parcial do cimento. Foram produzidas argamassas onde a resistência à compressão e capilaridade foram avaliadas. Os resultados mostram um desempenho mecânico muito satisfatório, alcançando entre 81 e 97% de resistência quando comparadas à situação de referência, aos 90 dias. Deste modo, as argamassas com REEE apresentam-se como sendo uma alternativa viável às convencionais.

Palavras-chave: Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (REEE). Pó de vidro. Argamassa. Economia circular. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The incorporation of waste into cementitious materials is widely recognized as an important strategy for mitigating the ecological footprint of the cement industry. An experimental campaign was conducted to evaluate the potential of glass from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) as a partial substitute for cement. Mortars were prepared, and their compressive strength and capillarity were assessed. The results demonstrated very satisfactory mechanical performance, achieving between 81% and 97% of the strength compared to the reference condition at 90 days. Therefore, mortars containing REEE emerge as a viable alternative to conventional ones.

Key-words: Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Glass powder. Mortar. Circular economy. Sustainability.

Como citar:
FERREIRA, D.L.; MALHEIRO, R.; LEMOS, A.L.M.; CAMÕES, A.; RIBEIRO, M.J.P.M.; NÓBREGA, A.F. Avaliação do desempenho de argamassas produzidas com pó de vidro de REEE como substituto parcial do cimento. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2025, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2025.

INTRODUÇÃO

A procura por cimento continua a crescer de forma consistente, paralelamente ao desenvolvimento global, acentuando os desafios ambientais associados à sua utilização e ao seu processo de fabrico. Assim, a promoção da economia circular surge como uma ferramenta fundamental para que o setor da construção possa minimizar os impactos ambientais negativos associados e atingir marcos ambientais importantes como a neutralidade carbónica até 2050 estabelecida, por exemplo, no *European Green Deal*.

Alinhada com as premissas citadas anteriormente, a incorporação de resíduos em matrizes cimentícias tem sido uma prática cada vez mais estudada e com reconhecida importância. No que se refere ao uso de resíduo de vidro na produção de betões, a publicação da [1] ajudou a impulsionar esta utilização, promovendo novas abordagens sustentáveis [2]. As especificações apresentadas nesta norma podem ser transpostas, com alguma precaução, para a produção de argamassas. Além da elevada quantidade de vidro potencialmente disponível para reciclagem (provenientes desde garrafas até vidros planos), a elevada quantidade de sílica encontrada na composição do vidro é um dos impulsionadores dos estudos envolvendo pó de vidro como substituto parcial do cimento.

No que se refere ao vidro proveniente dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (REEE), a reciclagem é limitada devido a potencial presença de metais pesados. Contudo, o REEE despejado de forma inadequada pode penetrar no solo, no ar e na água, ocasionando impactos negativos ao meio ambiente e a saúde [3]. De acordo com [4], devido ao rápido desenvolvimento tecnológico que assistimos, deparamo-nos com uma expansão global dos resíduos eletrónicos, que apresentam riscos ambientais e de saúde bastante significativos. De acordo com o [5], em 2019 geraram-se 53,6 toneladas de REEE. No que à europa diz respeito, estima-se que ter-se-á produzido cerca de 12 milhões de toneladas de REEE, correspondendo a 22,4% a nível global. Esta lista é liderada pela Ásia com 24,9 milhões de toneladas, que totalizam 46,4% da produção global. Neste sentido, é urgente encontrar respostas para esta problemática.

O concreto e a argamassa são dos materiais de construção com maior capacidade de incorporar resíduos. Além disso, a matriz de cimento tem sido considerada uma ferramenta eficaz para processos de estabilização/solidificação para o tratamento final de resíduos perigosos. [6] estudaram o comportamento do chumbo em matrizes de cimentíceas concluindo que a estabilização/solidificação do chumbo em argamassa é possível, apesar de verificar-se uma redução na resistência mecânica. Outros autores têm estudado a substituição do cimento por pó de vidro proveniente de REEE com resultados satisfatórios no que se refere à resistência mecânica. [7] estudaram argamassas produzidas com resíduo de lâmpada fluorescente concluindo que embora estas argamassas tenham obtido valores de resistência à compressão menores do que a amostra de referência aos 28 dias de cura, após 90 dias, a resistência das argamassas contendo até 35% de resíduos de vidro foi semelhante ou até maior do que a registada para a amostra de referência.

Este trabalho pretende contribuir para o estudo da utilização do pó de vidro proveniente de REEE como substituto parcial do cimento considerando o impacto dos diferentes REEE na resistência mecânica de argamassas.

MATERIAIS E MÉTODOS

TRANSFORMAÇÃO DO RESÍDUO DE VIDRO EM PÓ

Foram utilizados três tipos de REEE: lâmpada fluorescente, ecrã de *Cathode-ray Tube* (CRT) e funil de CRT (Figura 1). O vidro foi fornecido em caco por uma empresa portuguesa de gestão ambiental, NaturPAIVA. O resíduo de vidro em caco foi transformado em pó com granulometria similar ou inferior à do cimento. O processo de moagem teve por base o processo descrito por [8] para moagem de garrafas de vidro, tendo sido adaptado de acordo com a natureza do vidro em causa, resultando no seguinte processo:

a. Pesagem do resíduo de vidro;
b. Passagem do resíduo de vidro pelo moinho de mandíbulas: 2 ciclos;
c. Passagem do resíduo de vidro pelo moinho de martelos: 2 ciclos;
d. Recurso a um moinho de café para a moagem do vidro até à granulometria desejada, similar ao D(50) do cimento (25 µm).

Figura 1 – REEE utilizados para transformação do resíduo de vidro em pó: (a) lâmpada fluorescente e (b) ecrã de CRT (1) e funil de CRT (2).



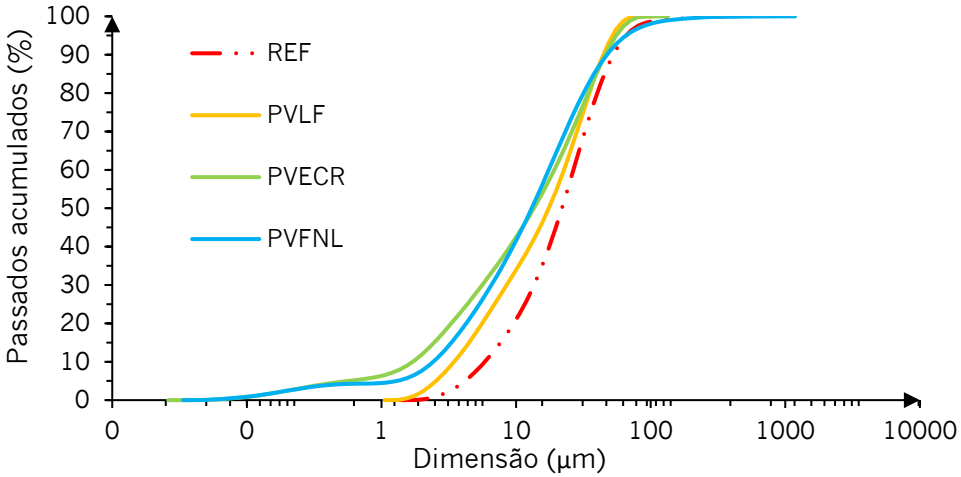
(a) (b)

Fonte: Os autores (2025).

CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO E DO PÓ DE VIDRO

De forma a possibilitar a comparação da dimensão média da partícula do cimento com os diferentes pós dos resíduos de vidro, recorreu-se a um granulómetro a laser, utilizando o equipamento Mastersizer 500. A Figura 2 apresenta as seguintes granulometrias: REF - cimento Portland CEM I 42,5; PVLF - lâmpada fluorescente; PVECR - ecrã CRT; e PVFNL - funil CRT. Na Tabela 1 encontra-se o D(50) e a superfície específica de cada um deles, também determinados com o auxílio do granulómetro a laser.

Figura 2 – Curva granulométrica do cimento e dos pós de vidro em estudo.



Fonte: Os autores (2025).

Tabela 1 – Características físicas do cimento e dos pós de vidro em estudo.

	REF	PVLF	PVECR	PVFNL
D(50) (µm)	23,4	18,7	14,5	13,9
Superfície específica (m^2/kg)	415,4	631,4	2635	2384
Massa volúmica (kg/m^3)	3140	2551	2793	3047

Fonte: Os autores (2025).

PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Foram produzidas argamassas com substituição, em volume, de 25% de cimento por pó de vidro proveniente dos REEE. Foram preparadas 4 misturas, de acordo com a Tabela 2, tendo em conta a utilização de moldes 40x40x160 mm. É de salientar que foi utilizada uma areia siliciosa com massa volúmica igual a 2640 kg/m^3 e a razão água/ligante foi mantida em 0,5.

Após a realização das misturas, o seu espalhamento foi determinado de acordo com a [9]. Em seguida, os moldes foram preenchidos com as respetivas misturas. Estes foram cobertos com filme de plástico e armazenados em câmara húmida (18 ± 2ºC, 93 ±2% HR) durante 48 horas. Em seguida, os provetes de argamassa foram retirados dos moldes e colocados em um tanque com água da torneira saturada com cal. Após os diferentes períodos de cura (7, 28 e 90 dias), o ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a [10]. O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado aos 7 e 28 dias, de acordo com a [11].

Tabela 2 – Composição das argamassas.

ID	PV (Kg/m³)	Cimento (Kg/m³)	Areia (Kg/m³)	Água (Kg/m³)
REF	0,0	511,6	1534,8	255,8
PVLF	103,8	383,7	1534,8	255,8
PVECR	113,7	383,7	1534,8	255,8
PVFNL	124,0	383,7	1534,8	255,8

Fonte: Os autores (2025).

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

ESTADO FRESCO

O espalhamento obtido para as diferentes misturas pode ser visto na Tabela 3. Os resultados apresentados variam com o tipo de vidro. A argamassa PVLF apresenta um comportamento bastante similar a argamassas de REF, com espalhamentos médios de 215 e 216 mm, respetivamente. Este comportamento também foi verificado por [12] para outro tipo de vidro, o proveniente de embalagens. Os autores estudaram pastas com substituição de cimento por 25%, 35% e 50% de pó de vidro (D(50) = 23,1 µm) , concluindo que a substituição do cimento pelo pó de vidro não alterou consideravelmente a fluidez das pastas e os resultados obtidos com o reómetro e com o mini cone apesentam consistência entre si.

Já as argamassas PVECR e PVFNL apresentam comportamento muito semelhantes entre si, com espalhamento igual a 221 mm, porém diferente das argamassas REF e PVFL, havendo aqui um aumento de 2,5% no espalhamento quando comparado à REF. Este comportamento ocorre apesar da redução do tamanho da partícula, que no cimento é D(50) = 23,4 µm e nos vidros utilizados em PVECR e PVFNL são próximos de D(50) = 14 µm. Comportamento oposto foi observado por [13], que afirmam haver uma redução significativa (20%) na trabalhabilidade das argamassas com pó de vidro (D(50) = 24,1 µm) provenientes de dispositivos eletrónicos quando comparadas com as argamassas de referência.

A morfologia do grão pode estar relacionada com estes resultados divergentes, uma vez que está diretamente relacionada com o deslizamento entre as partículas. Grãos redondos são geralmente associados a um maior deslizamento, enquanto grãos irregulares a um menor. A composição química muito específica destes materiais também pode estar na origem desta divergência. Além destes aspetos, um futuro estudo reológico destas pastas contribuirá para uma melhor compreensão do seu comportamento.

Tabela 3 – Espalhamento das argamassas estudadas.

Ensaio	REF	PVLF	PVECR	PVFNL
Espalhamento (mm)/ Desvio padrão	216/ ±2,84	215/ ±2,97	221/ ±4,7	221/ ±4,94

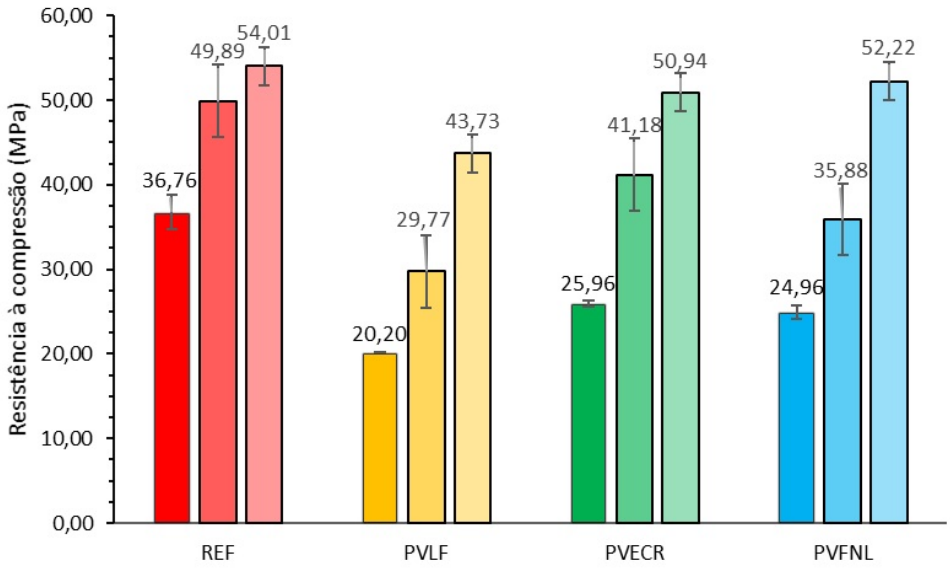
Fonte: Os autores (2025).

ESTADO ENDURECIDO

RESISTÊNCIA MECÂNICA: COMPRESSÃO

A Figura 3 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados aos diferentes provetes após 7, 28 e 90 dias de cura. No que se refere ao desenvolvido da resistência ao longo do tempo, todas as misturas estudadas apresentam um crescimento gradual, de acordo com o esperado. Observa-se que, para a mistura de referência, sem substituição de cimento, o maior crescimento acontece entre os 7 e os 28 dias. Já para as misturas com pó de vidro, fica evidente a importância do crescimento entre os 28 e os 90 dias. Este crescimento está relacionado com as reações pozolânicas que ocorrem de forma mais lenta e possuem maior expressão aos 90 dias.

Figura 3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias.



Fonte: Os autores (2025).

De acordo com os ensaios mecânicos de resistência à compressão aos provetes com 7 dias de cura, foi possível constatar que existia uma perda significativa, quando comparando a REF com os provetes com 25% de pó de vidro. No que diz respeito à resistência atingida pelo provete contendo PVLF, verificamos que apenas atingiu 55% da resistência do provete de referência. Por outro lado, o PVECR e o PVFNL, atingiram 71% e 68%, respetivamente, da resistência do provete de referência. Seguindo a mesma ordem de análise, mas agora para os 28 dias de cura, observamos um ligeiro aumento na capacidade resistente quando comparados com a referência, continuando no provete PVLF a verificar-se um menor ganho em termos de resistência à compressão, 60% em relação à REF, embora quando comparado com os 83% e 72%, de resistência atingidos pelos PVECR E PVFNL, percebemos o potencial da incorporação de pó de vidro na formulação de argamassas. Em relação aso 90 dias de cura, o panorama altera-se significativamente sendo o caso mais notório, a resistência de 52,22 MPa, atingida pelo PVFNL, alcançando cerca de 97% da resistência atingida pela REF. Temos também o PVLF

e o PVECR a atingirem 81% e 94% da resistência de REF, respetivamente, com 43,73 MPa e 50,94 MPa.

Estes resultados mostram uma resistência mecânica satisfatória para as argamassas com pó de vidro. Considerando os resultados aos 28 dias, todas as argamassas são classificadas como CS IV (>6N/mm^2) de acordo com a [14]. Considerando os elevados valores de resistência à compressão obtidos aos 28 dias, independentemente do tipo de pó de vidro utilizado, existe a possibilidade de explorar percentagens mais elevadas de substituição de cimento por pó de vidro, mantendo-se os valores dentro dos requisitos estabelecidos na norma EN 998-1 [14]. Considerando os resultados aos 90 dias, as perdas de resistência mecânica são residuais (entre 3 e 9%) quando comparadas a situação de referência. Este comportamento foi também verificado em outras pesquisas que utilizaram REEE. [7], por exemplo, estudaram argamassas produzidas com resíduo de lâmpada fluorescente concluindo que embora estas argamassas tenham obtido valores de resistência à compressão e verificara que os resultados de resistência à compressão chegaram perto de 100% da situação de referência, após 90 dias de cura. A pequena diferença entre os resultados de [7] e os resultados apresentados na Figura 3 para PVLF pode estar relacionada com o D(50) que [7] esteve entre 10,9 e 11,70 µm e aqui foi de 18,7 µm.

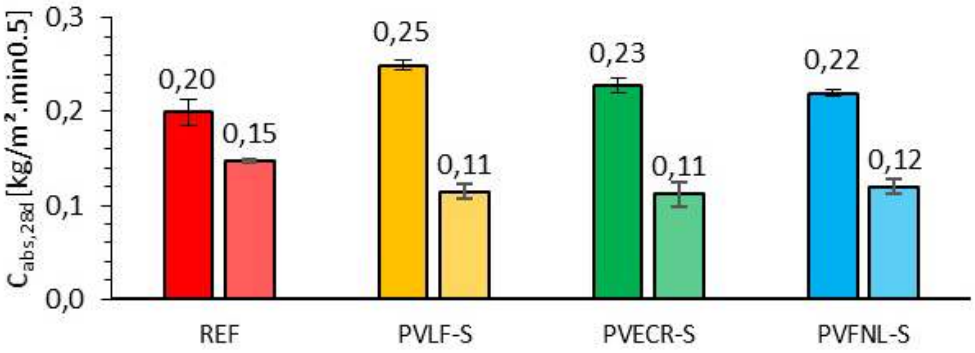
Comparando os diferentes tipos de REEE utilizados, as argamassas PVECR e PVFNL destacam-se, sendo a primeira a apresentar um melhor desempenho aos 28 dias e a última a apresentar o melhor desempenho aos 90 dias. Contudo, este desempenho mecânico pode estar relacionado não com o tipo de vidro, mas sim com a dimensão da partícula refletida no D(50) dos pós de vidro provenientes dos diferentes REEE. A argamassa PVFNL apresenta o menor D(50), 13,9 µm, e maior resistência à compressão, 52,22 MPa, enquanto a PVLF apresenta maior, 18,7 µm, e menor resistência à compressão entre as argamassas com REEE, 43,73 MPa. [15] estudou a influência do tamanho da partícula de vidro proveniente de garrafas no desempenho mecânico de argamassas, concluindo que há uma tendência de aumento do índice de atividade pozolânica com a diminuição do tamanho das partículas do pó de vidro. No entanto, é importante analisar quimicamente estes materiais a fim de verificar a sua possível influência na resistência mecânica das argamassas.

INDICADORES DE DURABILIDADE: ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A Figura 4 apresenta os coeficientes de absorção de água por capilaridade para os diferentes provetes após 7 e 28 dias de cura. No que se refere ao desenvolvido da resistência ao longo do tempo, observa-se uma redução progressiva deste coeficiente para todas as argamassas estudadas sendo esta redução mais expressiva para PVLF e PVECR. Através da análise da Figura 4 percebe-se que os provetes com incorporação de pó de vidro (PVLF, PVECR e PVFNL) apresentam uma menor taxa de absorção de água quando comparados com a REF. Quando comparados entre si, apresentam uma performance bastante semelhante. Considerando os resultados aos 28 dias, todas as argamassas são classificadas como W2 (<0,20kg/m^2.min$^{0.5}$) de acordo com a [15]. É de salientar a importância desta melhoria no coeficiente de absorção, que conduz a uma melhoria das propriedades da argamassa, uma vez que aumenta a resistência ao ciclo de gelo-degelo e aumenta ainda a resistência à carbonatação e à corrosão por sulfatos, devido à redução da difusão de cloretos [12]. No entanto, é importante

aprofundar esta parte do estudo, realizando o ensaio aos 28 dias. A realização do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio também seria uma grande mais-valia para compreensão da distribuição dos poros de acordo com cada argamassa.

Figura 4 – Resultados do ensaio de absorção aos 7 e 28 dias.



Fonte: Os autores (2025).

CONCLUSÕES

A presente investigação, que diz respeito à avaliação do desempenho de argamassas com incorporação de pó de vidro proveniente de material elétrico e eletrónico, revelou-se importante na afirmação do potencial das substituições parciais de cimento em argamassas, por pó de vidro. É uma realidade que o aumento da quantidade de resíduos eletrónicos está a causar grandes problemáticas, sobretudo em termos ambientais, ao nível da saúde e ainda económicos. Uma solução viável em termos de comportamento mecânico, como comprovamos com este trabalho de investigação, é a sua implementação em argamassas, trazendo ainda benefícios em termos de durabilidade das mesmas. No que se refere às argamassas com os diferentes pós de vidro, a argamassa classifica-se com CS IV (>6N/mm^2) e W2 (<0,20kg/m^2.min$^{0.5}$) de acordo com a EN 988-1 [15], o que viabiliza a sua utilização como argamassa de revestimento. Além disso, os resultados apresentados podem ser transpostos para os betões, mostrando que também para este material pode ser possível a utilização deste tipo de material como substituto do parcial do cimento. Todos estes aspetos mencionados reforçam a tendência para a viabilidade de utilização dos resíduos de REEE em matrizes cimentícias, com vantagens para circularidade e sustentabilidade do setor.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por Fundos Nacionais através da FCT/MCTES – Fundação para a Ciência e Tecnologia/Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, no âmbito do CTAC – Centro de Território, Ambiente e Construção – UIDB/0407/2020 e UIDP/04047/2020, e no âmbito dos projetos: GlassCON (10.54499/2022.03197.PTDC), com referência 2000.03197.PTDC, e Norte+Verde, desenvolvido no Lab2pt (através do Financiamento Plurianual).

REFERÊNCIAS

[1] ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C1866M-20**: Standard specification for glass aggregates for use in concrete. West Conshohocken, PA. https://DOI: 10.1520/C0033-03. (2023).

[2] FERREIRA, D. L.; OLIVEIRA, A. D.; SILVA, R.; CORRÊA, M.; JESUS, C. M. G.; MALHEIRO, R. L. M. C.; CAMÕES, A. Viabilidade de incorporação de resíduos de vidros industriais na produção de argamassas sustentáveis. In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis | Congresso construção, 5., 2024, Lisboa. **Materiais eco-eficientes e de baixo carbono**. Guimarães: Universidade do Minho, 2024. p. 398-405

[3] SHARMA, S.; BOORA, A. Application of E-Waste in the Construction of Concrete Pavements: A Comprehensive Review. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2024. p. 01031.

[4] ISLAM, Md Hamidul et al. Experimental investigation on fresh, hardened and durability characteristics of partially replaced E-waste plastic concrete: A sustainable concept with machine learning approaches. **Heliyon**, 2025.

[5] FORTI, V.; BALDE, C. P.; KUEHR, R.; BEL, G. The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. 2020.

[6] GOLLMANN, M. A.; SILVA, M. M.; MASUERO, Â. B.; SANTOS, J. H. Z. Stabilization and solidification of Pb in cement matrices. **Journal of Hazardous Materials**, v. 179, n. 1-3, p. 507-514, 2010.

[7] PITARCH, A. M.; REIG, L.; GALLARDO, A.; SORIANO, L., BORRACHERO, M. V., ROCHINA, S. Reutilisation of hazardous spent fluorescent lamps glass waste as supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 292, p. 123424, 2021.

[8] MOREIRA, B.; JESUS, C.; MALHEIRO, R.; Camões, A. USING GLASS WASTE FOR PRODUCING LOW CO_2 CEMENTITIOUS MATERIAL AS A CONTRIBUTION TO CIRCULAR ECONOMY. **Romanian Journal of Materials/ Revista Romana de Materiale**, v. 53, n. 4, 2023.

[9] European Committee for Standardization. **EN 1015-3**: Methods of test for mortar for masonry: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels, Belgium: CEN, 1999.

[10] European Committee for Standardization. **EN 1015-11**: Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels, Belgium: CEN, 1999.

[11] British Standards Institution. **EN-1015-18**: Methods of Test for Mortar for Masonry: Determination of Water Absorption Coefficient Due to Capillary Action of Hardened Mortar. BS, 2002.

[12] MARQUES, C. M. l.; QUEIROZ, J. H. M.; ALVES, L. F.; FERREIRA, V. V. O.; NÓBREGA, A. F.; MALHEIRO, R. L. M. C. Análise reológica do comportamento de pastas cimentícias com utilização de pó de vidro. In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis | Congresso construção, 5., 2024, Lisboa. **Materiais eco-eficientes e de baixo carbono**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2024. p. 398-405.

[13] MALAIŠKIENĖ, J.; BEKERĖ, K. Impact of Electronic Waste Glass on the Properties of Cementitious Materials. **Buildings**, v. 14, n. 5, p. 1218, 2024.

[14] European Committee for Standardization. **EN 998-1**: Specification for Mortar for Masonry – Part 1: Rendering and Plastering Mortar. Brussels, Belgium: CEN, 2013.

[15] JESUS, C.; CAMÕES, A.; MALHEIRO, R.; RIBEIRO, M.; AGUIAR, J.; REIS, R. Fineness Effect Evaluation on the Mechanical Activity Index of Glass Powder. In: FIB International Conference on Concrete Sustainability, 4., 2024, Guimarães. **Lecture Notes in Civil Engineering**, vol 573. p. 438-445. Cham: Springer Nature Switzerland. Doi:https://doi.org/10.1007/978-3-031-80672-8_53.