



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Comportamento das argamassas com borracha e vermiculita quanto à atenuação de ruídos de impactos em edificações

Batista, L. S.¹; Da Silva, F. M.¹; Gachet, L. A.¹; Lintz, R. C. C.¹

¹ Pós-graduação em Tecnologia: Ciências dos materiais, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP, Brasil, lucassbatista01@gmail.com

Resumo

Um dos grandes desafios nas edificações brasileiras é o desenvolvimento de soluções capazes de isolar os ruídos e promover o conforto acústico aos usuários. O ruído de impacto consiste na energia da excitação mecânica de superfícies rígidas, sendo transmitido por meio sólido. Os concretos e argamassas são materiais densos e de alta rigidez, essas propriedades proporcionam um aumento da velocidade de propagação da onda sonora, sendo comum o uso de materiais leves e flexíveis para o isolamento do ruído de impacto. Dentro deste contexto, neste trabalho foram analisadas por meio da técnica de ultrassom, o comportamento de argamassas com substituição parcial da areia por vermiculita e pó de borracha. A argamassa de referência apresentou uma velocidade de propagação média de 3978,67 m/s, enquanto que a argamassa contendo 30% de substituição da areia por vermiculita apresentou uma velocidade de propagação média de 3675,33m/s e com a mesma porcentagem de borracha a argamassa apresentou uma velocidade de propagação média de 2672,83 m/s. Verificou-se que as argamassas contendo pó de borracha promoveram menor velocidade de propagação da onda sonora comparadas as argamassas contendo porcentagem equivalente de vermiculita, o que colabora para a sustentabilidade, uma vez que a borracha utilizada trata-se de um resíduo e a vermiculita um mineral de origem natural.

Palavras-chave: argamassa, borracha, vermiculita, ultrassom, propriedades acústicas.

PACS: 43.35.Zc Use of ultrasonics in nondestructive testing, industrial processes, and industrial products

Abstract

One of the great challenges in Brazilian buildings is the development of solutions capable of isolating noise and promoting acoustic comfort to users. The impact noise consists of the energy of the mechanical excitation of rigid surfaces, being transmitted by solid medium. Concretes and mortars are dense and highly rigid materials, these properties provide an increase in the speed of propagation of the sound wave, being common the use of light and flexible materials for the isolation of impact noise. Within this context, in this work, the behavior of mortars with partial replacement of sand by vermiculite and rubber powder was analyzed using the ultrasound technique. The reference mortar presented an average propagation velocity of 3978.67 m/s, while the mortar containing 30% of sand replacement by vermiculite presented an average propagation velocity of 3675.33 m/s and with the same percentage of rubber at mortar showed an average propagation speed of 2672.83 m/s. It was found that mortars containing rubber powder promoted a lower speed of propagation of the sound wave compared to mortars containing an equivalent percentage of vermiculite, which contributes to sustainability, since the rubber used is a waste and vermiculite a mineral of natural origin.

Palavras-chave: mortar, rubber, vermiculite, ultrasound, acoustic properties.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho acústico é uma das exigências na Norma de Desempenho das Edificações NBR 15575:2013 [1], e para atender os parâmetros normativos muitas vezes se faz

necessário o uso de materiais com melhor capacidade de absorção acústica. Os materiais comumente utilizados na construção civil possuem baixo coeficiente de absorção sonora. De acordo com Holmes et al. [2] o concreto possui um coeficiente de absorção sonora em

torno de 0,02 a 0,06; o coeficiente de absorção sonora da madeira é em torno de 0,3 e os blocos pré-moldados sem pintura entre 0,02 a 0,05.

Quando a onda sonora incide em um material, parte dela é transmitida, parte é absorvida pelo material e parte é refletida. Os materiais conhecidos como bons absorvedores de som, geralmente são materiais leves e sem função estrutural [3].

O ruído pode ser propagado por meio aéreo, ou seja, pelo ar, ou então, por meio sólido, que é caracterizado como o ruído de impacto.

O ruído de impacto é transmitido pela própria estrutura da edificação. Uma das técnicas utilizadas para diminuir a transmissão do ruído de impacto é o contrapiso flutuante que consiste no uso de um material resiliente entre a laje e a camada rígida do contrapiso conforme ilustra a Figura 1.



Figura 1: Contrapiso flutuante

Fonte: Proacústica (2015) [4]

Os agregados leves têm a função de diminuir a densidade dos concretos e argamassas e isso influencia diretamente nas propriedades acústicas.

Os agregados leves podem ser oriundos de jazidas naturais e neste caso as propriedades são variáveis o que dificulta um pouco a sua aplicação. Os agregados leves artificiais ou processados industrialmente possuem maior controle de propriedades e são classificados de acordo com a matéria-prima originária e o processo de produção [5].

Como exemplos de agregados leves naturais podem ser citados a rocha vesicular denominada escória, e o vidro vulcânico, conhecido como pedra pomes, estes, possuem massa específica na ordem de 500 kg/m³ a 900 Kg/m³. A argila expandida, folhelho, ardósia, vermiculita e perlita são exemplos de agregados leves industrializados. E os resíduos ou subprodutos industriais como as cinzas

volantes e escória de alto forno também podem ser reaproveitados e utilizados na produção de agregados leves [6].

De acordo com Fürh et al [7] a substituição parcial da areia por vermiculita expandida e serragem de couro, proveniente de resíduos da indústria de couro, em argamassas, causou diminuição na rigidez mecânica e proporcionou melhor atenuação do ruído de impacto quando essas argamassas são utilizadas em contrapiso. Verificaram ainda que as argamassas com substituição de 30% da areia por agregado leve apresentaram resistências à flexão próximo ao valor das argamassas de referência.

Sambucci e Valente [8] e Fediuk et al. [9] verificaram maior coeficiente de atenuação acústicas com a inserção de agregados de borracha de pneus em argamassas.

Carbajo et al. [10] verificaram um aumento significativo do coeficiente de absorção sonora em concretos com inserção de vermiculita.

A rigidez dinâmica do material está relacionada com a sua capacidade de absorver as vibrações produzidas por impactos, sendo assim, quanto menor a rigidez do material maior será a capacidade de redução sonora [4].

Dentro deste contexto, neste trabalho as argamassas com substituição parcial da areia por borracha de pneus e por vermiculita expandida foram analisadas quanto ao desempenho mecânico e acústico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados para a produção das argamassas foram: cimento CPV ARI; areia natural de origem quartzosa; borracha proveniente da recauchutagem de pneus; vermiculita expandida, água proveniente do sistema de abastecimento de água do município de Limeira/SP e aditivo superplastificante.

A fim de caracterizar os materiais foram determinadas as massas específicas ABNT NBR 16916:2021 [11] e unitárias dos agregados miúdos ABNT NBR 16972:2021 [12].

A massa específica do cimento foi determinada conforme a ABNT NBR 16605:2017 [13].

O ensaio para determinação granulométrica dos agregados foi realizado conforme a ABNT

NBR 248:2003 [14], e foram classificados de acordo com a ABNT NBR 7211:2009 [15]. Os resultados da caracterização dos materiais utilizados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização física dos materiais utilizados na pesquisa.

Material	ME ⁽¹⁾	MU ⁽²⁾	DM ⁽³⁾	MF ⁽⁴⁾
Aditivo	1,08	-	-	-
Cimento	3,10	-	-	-
Areia	2,60	1,50	1,2	1,47
Borracha	1,16	0,35	4,8	3,49
Vermiculita	0,45	0,12	4,8	4,05

- (1) Massa específica (g/cm³)
- (2) Massa unitária (g/cm³)
- (3) Dimensão máxima característica (mm)
- (4) Módulo de finura

2.2 Dosagem das argamassas

Foram produzidos três diferentes traços de argamassas, sendo o de referência (Ref) sem adição de borracha ou vermiculita, o (B30) com substituição parcial de 30% da areia por borracha e o (V30) com substituição parcial de 30% da areia por vermiculita. O fator água/cimento foi de 0,50, o teor de aditivo superplastificante em relação a quantidade de cimento foi 0,5% e foi utilizado apenas no traço (V30). A Tabela 2 apresenta as dosagens de materiais utilizados.

2.3 Moldagem e cura dos corpos de prova

As argamassas foram produzidas em argamassadeira seguindo as recomendações da ABNT NBR 16541:2016 [16]. Para cada traço foram moldados 6 corpos de prova prismáticos de 4cm de largura, 4cm de espessura e 16cm de comprimento e 6 corpos de prova cilíndricos de 5cm de diâmetro por 10cm de altura. Os corpos de prova foram moldados e curados de acordo com as especificações da ABNT NBR 13279:2005 [17] e ABNT NBR 7215:2019 [18].

Tabela 2: Quantidade de materiais utilizados em gramas para a produção de 2 litros de argamassa.

Materiais	Ref	B30	V30
Cimento	1138,72	1138,72	1138,72
Areia	2824,03	1976,82	1976,82
Água	569,36	569,36	569,36
Borracha	-	370,85	-
Vermiculita	-	-	143,87
Aditivo	-	-	5,69

2.4 Caracterização física, mecânica e acústica das argamassas

A caracterização física, mecânica e acústicas das argamassas foi realizada por meios dos seguintes ensaios:

- Índice de consistência de acordo com a ABNT NBR 13276:2016 [19];
- Absorção de água, índice de vazios e massa específica no estado endurecido, de acordo com a ABNT NBR 9778:2009 [20];
- Resistência à tração e à compressão de acordo com a ABNT NBR 13279:2005 [21], sendo que o teste foi realizado aos 7 e aos 28 dias de cura;
- Ensaio ultrassônico de acordo com as especificações da ABNT 15630:2008 [22].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Índice de Consistência

Os resultados de espalhamento em (mm) das argamassas no estado fresco estão apresentados na Tabela 3. Observa-se que ocorreu uma diminuição de 21,13% no espalhamento quando 30% da areia foi substituída por borracha, mas ainda não foi necessário o uso de aditivo para manter a trabalhabilidade, no entanto, para a substituição de 30% da areia por vermiculita expandida a diminuição foi maior, mesmo com o uso de 0,5% de aditivo superplastificante em relação à massa de

cimento, houve uma diminuição de 23,32% no espalhamento.

A vermiculita expandida por ser um material poroso possui maior capacidade de absorção de água, portanto ocorre essa diminuição no espalhamento (Benli, karatas e Toprak, 2020).. A borracha, embora não absorva água, também causa diminuição na trabalhabilidade [23 – 25]

Tabela 3: Resultados da determinação de espalhamento das argamassas.

Traço	Espalhamento (mm)
Ref	288,67
B30	227,67
V30	221,33

3.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica no estado endurecido

Os resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica das argamassas no estado endurecido estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados de índice de vazios, absorção de água e massa específica.

Traço	Índice de vazios (%)	Absorção de água (%)	Massa específica (kg/m ³)
Ref	20,10	10,03	2004,17
B30	17,71	11,29	1567,83
V30	22,97	12,21	1881,17

Observa-se que houve uma diminuição de aproximadamente 21,7% na massa específica da argamassa com substituição de 30% da areia por borracha de pneus, já com a substituição por 30% de vermiculita a diminuição foi de 6%.

Verifica-se que a vermiculita causou um aumento de 2,8% no índice de vazios, e a borracha não influenciou negativamente nesta propriedade, causando uma diminuição de 3,4% em relação à argamassa de referência.

Quanto à absorção de água a vermiculita causou um aumento de 2,2% e a borracha um aumento de 1,3%, portanto, verificou-se que esta taxa de substituição não alterou significativamente a porcentagem de absorção de água em relação à argamassa de referência. Em geral, a taxa de substituição de 30% da areia por borracha de pneus ou vermiculita se mostrou apropriada para a produção de argamassa leve sem alterar significativamente a porosidade e absorção de água.

A menor densidade dos agregados leves causa o aprisionamento de ar nas partículas e a formação de poros celulares, o que acarreta na perda de resistência mecânica de concretos e argamassas [26].

3.3 Resistência à compressão

Na Figura 2 estão apresentados os resultados de resistência à compressão das argamassas aos 7 e 28 dias de idade.

Observa-se que a borracha influencia significativamente na resistência à compressão das argamassas, sendo que a queda de resistência à compressão aos 28 dias, foi de 68% em relação à argamassa de referência. A O baixo módulo de elasticidade da borracha e sua natureza hidrofóbica interfere negativamente na interação das partículas de borracha com a pasta de cimento no estado fresco causando o aumento de pontos fracos nas argamassas e consequentemente a diminuição da resistência mecânica [27 – 28].

A queda de resistência à compressão com a substituição da areia por vermiculita expandida não foi tão severa quanto à borracha, sendo que aos 28 dias as argamassas apresentaram uma queda de aproximadamente 18%.

Mo et al. [29] verificaram quedas de 50% e 63% na resistência à compressão das argamassas com substituição de 30% e 60% em volume da areia.

A borracha diminui consideravelmente a resistência à compressão das argamassas. Isso está relacionado ao baixo módulo de elasticidade da borracha e a falta de interação da borracha com a pasta de cimento [30].

3.3 Resistência à tração na flexão

Na Figura 3 estão apresentados os resultados de resistência à tração na flexão das argamassas aos 7 e 28 dias de idade.

Observa-se que a queda de resistência à tração das argamassas com substituição da areia por 30% de borracha foi de 43% em relação à argamassa de referência. A argamassa com vermiculita apresentou resistência à tração aos 28 dias 7% maior em relação à argamassa de referência. Este fato mostra que a taxa de substituição de 30% da areia por vermiculita apresentou um bom empacotamento de partículas, pois diminuiu a porosidade das argamassas e aumentou a resistência à tração na flexão, resultados semelhantes foram observados por Fürh et al [7].

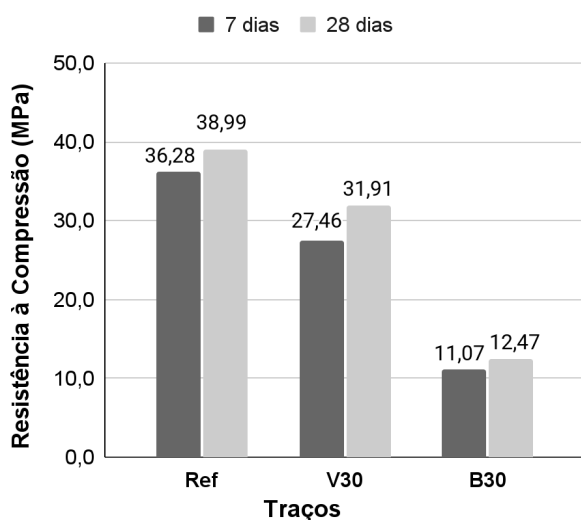


Figura 2: Resistência Média à Compressão aos 7 e 28 dias de idade.

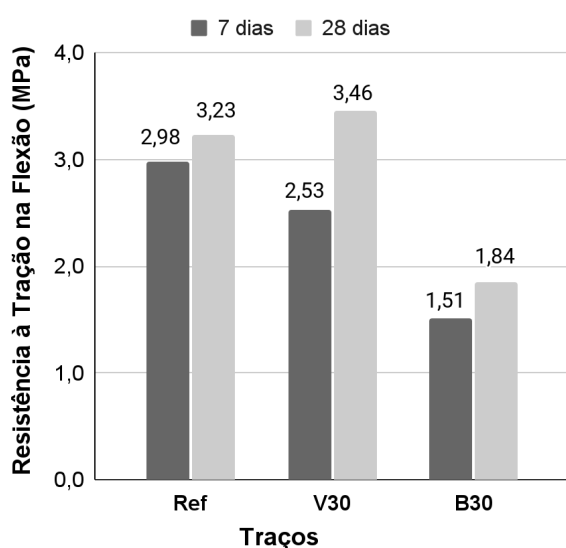


Figura 3: Resistência Média à tração na flexão aos 7 e 28 dias de idade.

3.4 Velocidade de ultrassom e módulo de elasticidade dinâmico

A Figura 4 apresenta a correlação da densidade das argamassas com a velocidade de propagação onda ultrassônica, observa-se que quanto menor a densidade da argamassa menor foi a velocidade de propagação da onda ultrassônica. Sendo assim, a argamassa com substituição de 30% de borracha foi a que apresentou menor densidade e menor velocidade de propagação da onda ultrassônica.

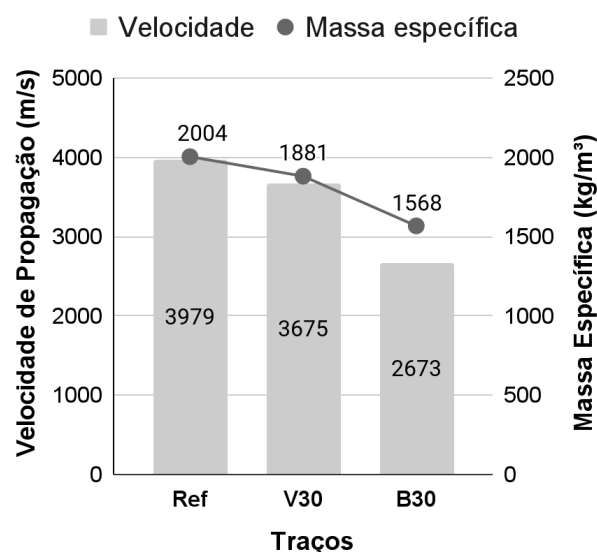


Figura 4: Correlação entre a densidade e velocidade de propagação de onda ultrassônica das argamassas.

Quanto ao módulo de elasticidade dinâmico que também está relacionado à rigidez do material, a argamassa com borracha foi a que apresentou menor valor de módulo de elasticidade dinâmico, ou seja, com a mesma porcentagem de substituição da areia por borracha e vermiculita, a borracha apresentou maior influência nas propriedades acústicas e de rigidez das argamassas.

A Figura 5 apresenta os resultados de módulo de elasticidade dinâmico das argamassas, observa-se que com 30% de substituição da areia por borracha houve a diminuição de aproximadamente 64,7% no módulo de elasticidade dinâmico, no entanto, com a mesma porcentagem de substituição da areia por vermiculita a queda foi de aproximadamente 19,9% em relação à argamassa de referência.

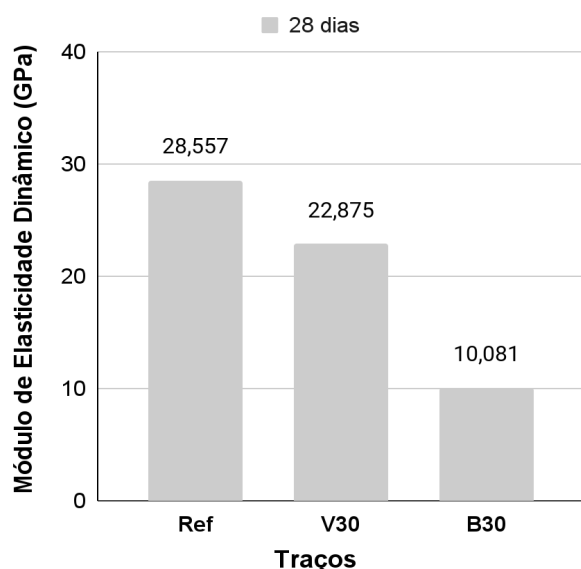


Figura 5: Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas aos 28 dias.

4. CONCLUSÃO

Por meio dos resultados obtidos observa-se que a borracha e a vermiculita influenciam nas propriedades reológicas das argamassas, no entanto, utilizando a dosagem adequada e aditivos químicos, é possível a produção de argamassas leves com boa trabalhabilidade e coesão.

Quanto às propriedades mecânicas, as argamassas com borracha apresentaram maior queda de resistência em comparação às argamassas com vermiculita.

As argamassas com vermiculita expandida apresentaram menor velocidade de propagação da onda sonora e menor módulo de elasticidade em comparação às argamassas de referência.

Observa-se que, mesmo com a queda de resistência mecânica, a borracha se mostrou viável para a produção de argamassas leves para aplicação em contrapisos flutuantes, pois apresentaram menor velocidade de propagação da onda ultrassônica e menor rigidez o que indica uma maior capacidade de absorver as vibrações por impacto.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15575: Requisitos gerais; Requisitos para sistemas estruturais; Requisitos para sistemas de pisos internos; Requisitos para sistemas de vedação; Requisitos de cobertura e Requisitos para sistemas hidrossanitários, Rio de Janeiro, 2013.
- [2] HOLMES, N.; BROWNE, A.; MONTAGUE, C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 195–204, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107>.
- [3] BISTAFA, S. R., *Acústica Aplicada ao controle do Ruído*, 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA QUALIDADE ACÚSTICA, *Manual ProAcústica, Recomendações Básicas para Contrapisos*, São Paulo, 2015.
- [5] ROSSIGNOLO, J. A., *Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações*, São Paulo, PINI, 2009.
- [6] NEVILLE, A. M., *Propriedades do Concreto*, tradução: Ruy Alberto Cremonini - 5ª Edição, Porto Alegre: Bookman, 2016.
- [7] Führ, G., Masuero, A.B., Pagnussat, D.T., Menna Barreto, M.F.F. Impact sound attenuation of subfloor mortars made with exfoliated vermiculite and chrome sawdust. *Applied Acoustics* 174,107725 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107725>
- [8] Sambucci, M., Valente, M. Acoustic behaviour of 3d-printable cement mortars functionalized with recycled tire rubber aggregates. "Advances in Acoustics, Noise and Vibration - 2021" Proceedings of the 27th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2021. DOI: https://iris.uniroma1.it/retrieve/handle/11573/1577621/1920288/Sambucci_Acoustic-behavior-3D_2021.pdf.
- [9] FEDIUK, R.; AMRAN, M.; VATIN, N.; VASILEV, Y.; LESOVIK, V.; OZBAKKALOGU, T., Acoustic Properties of Innovative Concretes: A Review, Reprinted from: *Materials* 14(2), 398, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14020398>.
- [10] Carbajo, J.; Esquerdo-Lloret, T.V.; Ramis, J.; Nadal-Gisbert, A.V.; Denia, F.D. (2015) Acoustic properties of porous concrete made from arlite and vermiculite lightweight aggregates. *Mater. Construcc.* 65 [320], e072 DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2015.01115>.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916 – Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água, Rio de Janeiro, 2021.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972 – Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios, Rio de Janeiro, 2021.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 2017.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação, Rio de Janeiro, 2009.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16541 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios, Rio de Janeiro, 2016.

[17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, Rio de Janeiro, 2005.

[18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2019.

[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, 2016.

[20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2009.

[21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, Rio de Janeiro, 2005.

[22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15630 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica, Rio de Janeiro, 2008.

[23] MOUSTAFA, A.; ELGAWADY, M. A., Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire

rubber, Construction and Building Materials, v. 93, p. 249 - 256, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.115>.

[24] SILVA, F. M.; BARBOSA, L. A. G.; LINTZ, R. C. C.; JACINTHO, A. E. P. G. A., Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber, Construction and Building Materials, v. 91, p. 71 - 79, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.027>.

[25] SALONI; PARVEEN; PHAM T. M.; LIM, Y. Y.; MALEKZADEH, M., Effect of pre-treatment methods of crumb rubber on strength, permeability and acid attack resistance of rubberised geopolymer concrete, Journal of Building Engineering, v. 41, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102448>.

[26] CHUNG, S. Y.; SIKORA, P.; KIM, D. J.; MADAWY, M. E. EL.; ELRAHMAN, M. A., Effect of different expanded aggregates on durability-related characteristics of lightweight aggregate concrete, Materials Characterization, v. 173, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.110907>.

[27] LI, L.; RUAN, S.; ZENG, L., Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles, Construction and Building Materials, v. 70, p. 291 - 308, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.105>.

[28] SHU, X.; HUANG, B., Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview, Construction and Building Materials, v. 67, p. 217 - 224, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>.

[29] MO, K. H.; LEE, H. J.; LIU, M. Y. J.; LING, T. C., Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar, Construction and Building Materials, v. 179, p. 302 - 306, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.219>.

[30] KARUNARATHNA, S.; LINFORTH, S.; KASHANI, A.; LIU, X.; NGO, T., Effect of recycled rubber aggregate size on fracture and other mechanical properties of structural concrete, Journal of Cleaner Production, v. 314, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128230>.