

Aprimoramento das propriedades mecânicas em compósitos via utilização de borracha reciclada como agregado fino

¹Mostafa Galal Aboelkheir , ²Jayme Cardoso da Silva , ³João Vitor Bezerra Pólvora , ⁴Juliana Alves Alkmim da Silva , ⁵Mirelle Oliveira Gomes 

¹Universidade São Judas Tadeu, São Paulo – Brasil, mostafa.aboelkheir@saojudas.br

²Universidade São Judas Tadeu, São Paulo – Brasil, jaymecardoso8@gmail.com

³Universidade São Judas Tadeu, São Paulo – Brasil, joao.bezerrapolvora@gmail.com

⁴Universidade São Judas Tadeu, São Paulo – Brasil, alkmim.juliana18@gmail.com

⁵Universidade São Judas Tadeu, São Paulo – Brasil, o.gmirelle@gmail.com

RESUMO

O artigo aborda a questão dos pneus inservíveis, considerados resíduos perigosos devido ao longo tempo de decomposição e seus impactos ambientais e de saúde pública. Destaca-se a possibilidade de reaproveitamento desses pneus na construção civil, contribuindo para a economia circular, ao transformar resíduos em novos produtos. A certificação ambiental, como a ISO 14001, é mencionada como estratégia adotada por empresas para ganhar vantagem competitiva e atrair consumidores preocupados com o meio ambiente. O estudo também discute a reciclagem de pneus para utilização em matrizes poliméricas ou cimentícias, ressaltando a importância dessa prática para reduzir o volume de resíduos. Além disso, destaca-se o potencial das borrachas em melhorar as propriedades térmicas e acústicas do concreto, apresentando uma alternativa viável e sustentável para a construção civil. O artigo também contextualiza a importância dessas práticas de reciclagem e reaproveitamento de resíduos de pneus dentro dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs) e da Agenda 2030, que visam a promover a sustentabilidade ambiental e a gestão eficiente dos recursos naturais, para alcançar um futuro mais justo e equitativo.

Palavras-chave: Resíduo de Borracha de Pneu. Desvulcanização. Pavimentos de Concreto. Concreto Emborrachado.

Improvement of mechanical properties in composites by using recycled rubber as fine aggregate

This article addresses the issue of unusable tires, considered hazardous waste due to their long decomposition time and their environmental and public health impacts. It highlights the possibility of reusing these tires in the construction sector, contributing to the circular economy by transforming waste into new products. Environmental certification, such as ISO 14001, is mentioned as a strategy adopted by companies to gain a competitive advantage and attract environmentally conscious consumers. The study also discusses tire recycling for use in polymeric or cementitious matrices, emphasizing the importance of this practice in reducing waste volume. Additionally, it underscores the potential of rubber to improve the thermal and acoustic properties of concrete, presenting a viable and sustainable alternative for the construction industry. The article also contextualizes the importance of these tire waste recycling and reuse practices within the Sustainable Development Goals (SDGs) and the 2030 Agenda, which aim to promote environmental sustainability and efficient natural resource management to achieve a fairer and more equitable future.

Keywords: Waste tire rubber. Devulcanization. Concrete pavements. Rubberized concrete.



1. INTRODUÇÃO

Os pneus inservíveis são resíduos perigosos, pois além do longo tempo para sua decomposição, eles geram problemas ambientais e de saúde pública. Apesar de não ser um resíduo da construção civil, os pneus podem ser reaproveitados neste segmento, proporcionando um material com diferentes propriedades mecânicas e também beneficiar a sociedade com a redução desse resíduo no meio ambiente (Lemos, 2019).

O conceito de economia circular vem com o objetivo de reduzir a extração dos recursos naturais desenfreada e aumentar a reutilização dos materiais, a fim de diminuir a quantidade de resíduos produzidos e os impactos ambientais (Cosenza; Andrade; Assunção, 2020; Floriani; Cadore Furlanetto; Sehnem, 2016). A economia circular visa a aproveitar e valorizar os produtos e matérias-primas por um longo período, transformando o que antes seria um resíduo em um novo produto ou matéria-prima a ser utilizado (Santos, 2017).

A fim de ganhar vantagem competitiva, as empresas adotam estratégias de gestão ambiental como a certificação de gestão ambiental, por meio da norma internacional ISO 14001 (ABNT, 2004), que é uma ferramenta que mostra o compromisso ambiental das empresas (EPELBAUM, 2004). Essa certificação vem sendo utilizada como um critério na hora da compra do consumidor, tornando a empresa certificada atrativa (Mazzer; Cavalcanti, 2004).

A taxa média de crescimento anual da produção mundial da borracha foi de 2,8%, totalizando 29,04 milhões de toneladas em 2018 (CONAB, 2019). O aumento de resíduos, provenientes deste material, está diretamente ligado ao crescimento do consumo de produtos industrializados, acarretando impactos ambientais significativos.

Para a reciclagem de pneus inservíveis é feita a trituração deles, para a utilização do pó da borracha em matrizes poliméricas ou cimentícias como agregado reciclado. O aproveitamento de pneu moído em asfalto emborrachado, mostra-se uma escolha ambientalmente apropriada, que pode apresentar notáveis reduções de volume desse resíduo (Cury *et al.*, 2003; PAulo; , 2009; Shu; Huang, 2014).

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, constituído de água, aglomerante, agregados e aditivos. Suas vantagens são o custo baixo em sua produção, durabilidade e a possibilidade de se modelar de diversas formas. Entretanto, ele possui algumas deficiências, como baixa ductilidade e retração plástica (Figueiredo, 2011).

A taxa média de crescimento anual da produção mundial da borracha foi de 2,8%, totalizando 29,04 milhões de toneladas em 2018 (CONAB, 2019). O aumento de resíduos, provenientes deste material, está diretamente ligado ao crescimento do consumo de produtos industrializados, acarretando impactos ambientais significativos.

As borrachas são conhecidas pela resistência térmica e por isso são aplicadas como isolantes térmicos. As misturas que contêm borracha são caracterizadas por baixa condutividade térmica, com o aumento do percentual dela, assim o concreto pode ganhar uma melhor eficiência térmica; isto é, um melhor controle de quantidade de calor que entre dentro do corpo do concreto. Além disso, o coeficiente de absorção de som aumenta significativamente ao aumentar o percentual da borracha, especialmente quando se trata de partículas graúdas (Fiore *et al.*, 2014; Flores Medina; Flores-Medina; Hernández-Olivares, 2016; Ghizdăveț *et al.*, 2016; Holmes; Browne; Montague, 2014; Saboktakin; Saboktakin, 2016; Santos *et al.*, 2004).

O atual trabalho visa a realizar uma revisão da literatura, utilizando bases de dados acadêmicas e palavras-chave relevantes como resíduo de borracha de pneu, desvulcanização, concreto emborrachado, recuperação ambiental, agenda 2030 e sustentabilidade.

2. METODOLOGIA

2.1 Estratégia de Busca

A revisão da literatura foi conduzida utilizando bases de dados acadêmicas renomadas, incluindo Scopus e Google Scholar. As palavras-chave empregadas foram selecionadas com base no escopo do estudo, incluindo: resíduo de borracha de pneu, concreto emborrachado, desvulcanização, recuperação ambiental, sustentabilidade, e Agenda 2030. Foram realizadas combinações booleanas dessas palavras-chave para ampliar o alcance da pesquisa.

2.2 Critérios de Seleção

Os artigos foram selecionados com base nos seguintes critérios:

Inclusão: Estudos publicados nos últimos 20 anos (2003–2023), redigidos em inglês, português ou espanhol, que abordassem a reciclagem de pneus em matrizes poliméricas ou cimentícias e apresentassem dados experimentais, revisões sistemáticas ou meta-análises relevantes para a temática.

Exclusão: Artigos que não possuíam revisão por pares, não apresentavam dados técnicos aplicáveis à construção civil ou que abordavam apenas aspectos econômicos sem relevância técnica direta.

2.3 Procedimentos de Revisão

Os artigos identificados foram organizados utilizando o *software Zotero* para gerenciamento de referências. Inicialmente, os títulos e resumos foram triados para garantir relevância. Os estudos selecionados foram analisados de forma qualitativa e categorizados em temas principais:

Propriedades mecânicas de compósitos cimentícios.

Melhoria das propriedades térmicas e acústicas.

Métodos de desvulcanização e tratamentos físico-químicos aplicados.

2.4 Análise dos Dados

Os dados foram organizados em tabelas e gráficos, comparando os resultados experimentais reportados nos artigos selecionados. A análise incluiu:

Comparação das propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios com e sem adição de borracha.

Impacto de diferentes tratamentos na interação entre borracha e matriz cimentícia.

Alinhamento das práticas analisadas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resíduos de pneus não são degradáveis na natureza em condições normais, pois são impermeáveis, além disso, seu uso na fabricação de novos pneus é impraticável, em virtude da sua complexidade, oriunda do processo de vulcanização (Pacheco *et al.*, 2014; Reciclanip, 2021; Torretta *et al.*, 2015). Como resultado, a disposição incorreta do material se tornou um ponto de preocupação para o mundo, do ponto de vista ambiental, como veremos na Figura 1 Erro: Origem da referência não encontrada, o maior cemitério de pneus do mundo, localizado na Sulaibiya, Kuwait, o qual é possível ser visto via imagens de satélite (PACHECO *et al.*, 2014).

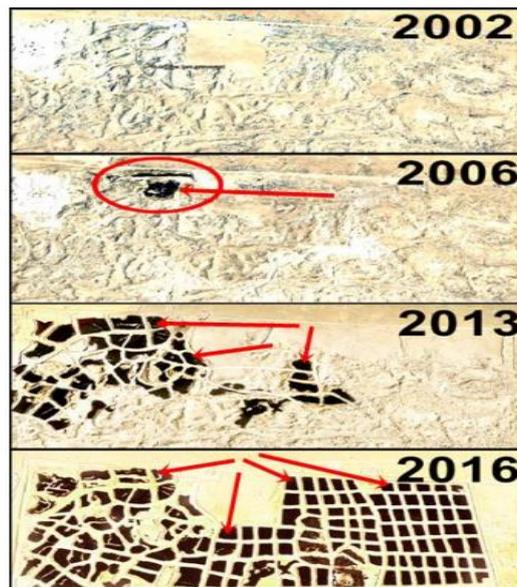


Figura 1 - Evolução do gigante cemitério de pneus localizado no Kuwait
Fonte: Aboelkheir (2019),

A vulcanização é um processo rápido e barato para melhoria do desempenho da borracha pela da adição de compostos de enxofre ao elastômero em altas temperaturas, por meio de uma reação química irreversível, como apresentado na Figura 2, em que m e n são ligações cruzadas de átomos de enxofre na cadeia polimérica (Callister Jr.; Rethwisch, 2010; Canevarolo Jr., 2006).

A borracha não vulcanizada é macia e pegajosa, portanto, inútil para aplicações convencionais, como pneus, calçados etc. (Callister Jr.; Rethwisch, 2010). Cruzar as ligações da cadeia polimérica otimiza a resistência mecânica e introduz elasticidade à borracha, convertendo-a a um polímero termofixo, garantindo maior aplicabilidade ao material (Callister Jr. E Rethwisch, 2010; Flores Medina *et al.*, 2018; Torretta *et al.*, 2015). Transformar o elastômero num polímero termofixo o torna incapaz de ser remoldado por simples aquecimentos, embora introduza muitos benefícios no seu uso, dificulta a reciclagem mecânica, promovendo danos ambientais devido ao incorreto descarte do material (Paulo; Saron, 2019).

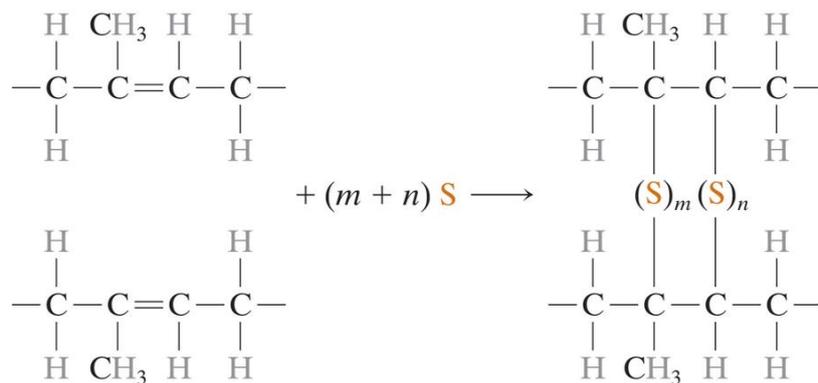


Figura 2 - Reação química da vulcanização

Fonte: e(.

A Resolução CONAMA 416/2009 obriga os fabricantes a destinarem corretamente uma unidade de pneu inservível para cada nova unidade produzida. Segundo dados da Anip (2021), cerca de 67,9 milhões de unidades de pneus foram vendidas no Brasil em 2020. Em nosso país, o maior responsável pela destinação adequada dos pneus inservíveis é a Reciclanip, que é composta pelas fabricantes Bridgestone, Michellin, Pirelli e Goodyear. Erro: Origem da referência não encontrada (Reciclanip, 2021).

Os resíduos de borracha de pneus têm sido caracterizados como tóxicos e perigosos. A recuperação e disposição dos pneus em fim de vida útil por meio de vários métodos, como aterro, queima, uso como combustível, pirólise, produção de negro de fumo etc., são reconhecidas como "poluição negra", por terem um forte impacto ambiental, econômico, social, pela poluição do ar, água e solo, refletindo diretamente na saúde pública e estética dos países desenvolvidos e tornando-se problemática nos países em desenvolvimento (Thomas; Gupta, 2016; Pacheco-Torres *et al.*, 2018).

O descarte inadequado de pneus pode, também, armazenar água e resíduos orgânicos por um longo período, devido a sua forma de partículas e natureza impermeável, provendo habitat favorável à proliferação de mosquitos, e outras pragas, especialmente o *Aedes Aegypti*, responsável por doenças como a dengue, febre amarela, chikungunya e zika vírus (Carmo; Silva, 2009; Thomas; Gupta; Panicker, 2016).

Foram estabelecidas regulamentações ambientais visando à prevenção e redução de resíduos, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que define as responsabilidades dos geradores e do poder público em relação ao manejo de resíduos sólidos (Brasil, 2010). A conscientização dos consumidores ao optarem por produtos ambientalmente responsáveis incentiva as indústrias a buscarem alternativas para minimizar os impactos ambientais durante a produção (Brollo; Silva, 2001; Mazzer; Cavalcanti, 2004).

O setor da construção, embora essencial para o desenvolvimento econômico, gera significativos impactos ambientais devido à alta demanda por recursos naturais e à produção de resíduos sólidos (Macêdo e Martins, 2015; Queiroga e Martins, 2015).

A economia circular surge com o propósito de reduzir a exploração desenfreada dos recursos naturais e aumentar a reutilização de materiais, com o intuito de diminuir a geração de resíduos e os impactos ambientais associados a isso (Cosenza; Andrade; Assunção, 2020). Esse conceito busca valorizar produtos e matérias-primas por períodos prolongados, transformando o que seria considerado resíduo em novos produtos ou matérias-primas a serem aproveitados.

As propriedades físicas dos compósitos cimentícios emborrachados demonstram ser inferiores às do concreto de cimento Portland tradicional, quando analisadas em termos de resistência à compressão, tração, flexão e módulo de elasticidade. Isso ocorre devido à fraca interação entre a matriz cimentícia e as partículas de borracha, além da alta ductilidade do elastômero. A natureza hidrofóbica da borracha dificulta a hidratação adequada do cimento na zona de transição (Aboelkheir, 2019; Flores Medina *et al.*, 2018; Shu; Huang, 2014; Si; Guo; Dai, 2017). Assim, os pesquisadores têm explorado várias técnicas para recuperar a borracha, tanto física quanto quimicamente, além de abordagens biológicas, a fim de criar uma superfície hidrofílica para o agregado reciclado, melhorando as propriedades mecânicas cruciais do compósito.

Os tratamentos físico-químicos desempenham um papel crucial na recuperação das propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios emborrachados. A imersão em água, embora uma técnica inicialmente simples, não proporciona melhorias significativas na interação entre borracha e cimento. Já o pré-revestimento com materiais cimentícios oferece vantagens substanciais, garantindo uma superfície hidrofílica ao agregado, permitindo uma hidratação eficiente do cimento na interface de transição. Além disso, a exposição à radiação UV tem sido eficaz na melhoria das propriedades mecânicas desses compósitos, promovendo uma desvulcanização da borracha, que resulta em uma melhor adesão da partícula de borracha com a pasta de cimento (Aboelkheir *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2017; Mohammadi; Khabbaz; Vessalas, 2014; Najim; Hall, 2013; Ossola; Wojcik, 2014; Richardson; Coventry; Ward, 2012; Youssf *et al.*, 2018)

Os tratamentos químicos, como a imersão em NaOH, demonstram viabilidade para aprimorar as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios emborrachados. A substituição do íon do grupo ácido carboxílico pelo Na⁺ na superfície do polímero após a imersão em solução de NaOH altera a natureza hidrofóbica da borracha, permitindo uma melhor hidratação do cimento e resultando em um compósito com resistência à compressão aprimorada. Outra técnica eficaz é o tratamento de superfície com agente de acoplamento silano, que promove uma melhor adesão da partícula de borracha com a pasta de cimento, garantindo propriedades mecânicas superiores aos compósitos cimentícios emborrachados não tratados (Guo *et al.*, 2017; Huang; Shu; Cao; 2013; Kashani *et al.*, 2018; Mohammadi; Khabbaz; Vessalas, 2016; Rodrigues André; Galal Aboelkheir, 2022; Su *et al.*, 2015; Youssf; ElGawady; Mills, 2016).

A redução da resistência à compressão em compósitos cimentícios emborrachados é uma preocupação comum entre pesquisadores, atribuída à frágil interação entre o cimento e a borracha, bem como à disparidade de dureza entre os materiais. Os estudos de Aboelkheir (2019a), Gesoğlu *et al.* (2014), Flores-Medina; Medina e Hernández-Olivares *et al.* (2014), Roychand *et al.* (2020) e Thomas *et al.* (2016) destacam essa diminuição da resistência à compressão (Aboelkheir, 2019; Gesoğlu *et al.*, 2014; Medina; Medina; Hernández-Olivares, 2014; Roychand *et al.*, 2020; Thomas; Gupta; Panicker, 2016), como ilustrado na Figura 3, em que "REF" representa a amostra de controle sem adição de borracha, enquanto as demais amostras apresentam diferentes percentuais do elastômero. Além disso, a resistência à flexão também é comprometida com o aumento da fração de substituição dos agregados, como evidenciado por Medina *et al.* (2017), Najim e Hall (2013) e Roychand *et al.* (2020) (Flores Medina *et al.*, 2017; Najim; Hall, 2013; Roychand *et al.*, 2020).

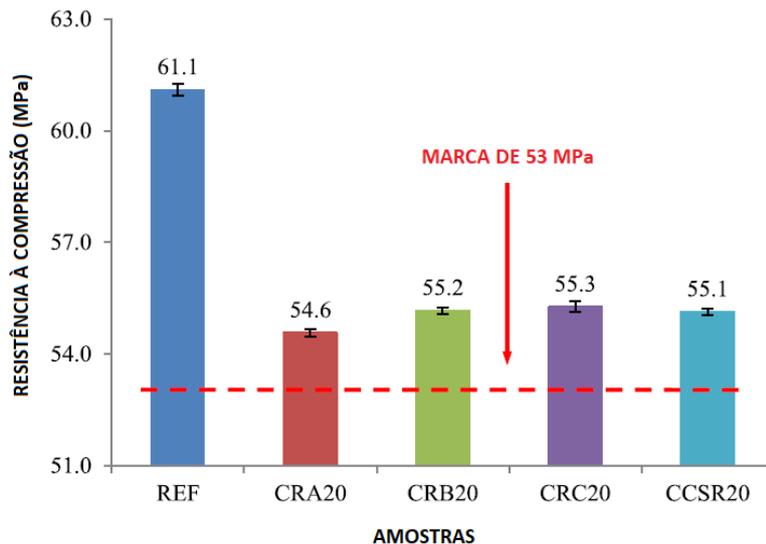


Figura 3 - Resistência à compressão aos 28 dias de compósitos emborrachados
Fonte: Su *et al.* (2015).

Em contrapartida, no que diz respeito à resistência ao impacto, estudos como o de Aboelkheir *et al.* (2021) relatam resultados promissores. Ao substituir parte dos agregados convencionais por borracha, os compósitos apresentaram uma resistência ao impacto significativamente maior do que o concreto convencional (Aboelkheir *et al.*, 2021). Esse aumento na resistência ao impacto, mesmo com a inclusão de borracha, sugere possíveis aplicações vantajosas em áreas onde a resistência a impactos é crucial. No entanto, os resultados encontrados na literatura podem variar, como indicado por Youssf *et al.* (2017) e Khalil *et al.* (2015), destacando a importância de estudos adicionais para compreender completamente o comportamento desses compósitos em diferentes condições e formulações (Youssf; Hassanli; Mills, 2017).

4. CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Resíduos de pneus não são degradáveis na natureza em condições normais, pois são impermeáveis, além disso, seu uso na fabricação de novos pneus é impraticável, em virtude da sua complexidade, oriunda do processo de vulcanização (Pacheco *et al.*, 2014; Reciclanip, 2021; Torretta *et al.*, 2015). Como resultado, a disposição incorreta do material se tornou um ponto de preocupação para o mundo, do ponto de vista ambiental, como veremos na Figura 1 Erro: Origem da referência não encontrada, o maior cemitério de pneus do mundo, localizado na Sulaibiya, Kuwait, o qual é possível ser visto via imagens de satélite (PACHECO *et al.*, 2014).

Ao considerar as seguintes conclusões, é possível perceber o potencial significativo da reciclagem de pneus na construção civil como uma abordagem sustentável para lidar com os resíduos de pneus e promover práticas mais responsáveis e eficientes na gestão de recursos:

a) A importância da reciclagem de pneus inservíveis: O reaproveitamento de pneus na construção civil emerge como uma estratégia fundamental para lidar com os desafios ambientais e de saúde pública associados aos resíduos de pneus. A transformação desses resíduos em novos produtos contribui significativamente para a economia circular, reduzindo a dependência de recursos naturais e minimizando o impacto ambiental.

b) A necessidade de regulamentações e políticas eficazes: Regulamentações como a Resolução CONAMA 416/2009 no Brasil e iniciativas globais, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), são essenciais para garantir a destinação adequada de pneus inservíveis e

promover práticas sustentáveis na gestão de resíduos. Além disso, a conscientização dos consumidores sobre a importância de escolher produtos ambientalmente responsáveis desempenha um papel crucial na promoção da sustentabilidade na indústria.

c) Desafios e avanços na reciclagem de pneus: Os estudos revisados destacam os desafios técnicos associados à reciclagem de pneus, como a necessidade de desenvolver métodos eficazes de desvulcanização e tratamentos físico-químicos para melhorar as propriedades dos compósitos emborrachados. No entanto, também demonstram avanços promissores na utilização de pneus reciclados em matrizes poliméricas e cimentícias, especialmente no que diz respeito à resistência ao impacto.

d) Relevância para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): As práticas de reciclagem e reaproveitamento de pneus inservíveis estão alinhadas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs) da Agenda 2030, particularmente aqueles relacionados à promoção da sustentabilidade ambiental e à gestão eficiente dos recursos naturais. Essas iniciativas contribuem para alcançar um futuro mais justo e equitativo, ao mesmo tempo em que abordam os desafios globais de sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR ISO 14001**: sistema da gestão ambiental. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABOELKHEIR, M. G. A. M. **Physicochemical modifications to ground tire rubber surface and their impact on the properties of cement based composites**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

ABOELKHEIR, M. G. *et al.* Influence of UV-modified GTR on the properties of interlocking concrete paving units. **Journal of Molecular Structure**, v. 1234, p. 130110, 15 Jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130110>

ANDRÉ, F. R.; ABOELKHEIR, M. G. Sustainable approach of applying previous treatment of tire wastes as raw material in cement composites: Review. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 58, part. 4, p. 1557-1565, 2 Apr.. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.456>

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 16 dez. 2024.

BROLLO, M.; SILVA, M. **Política e gestão ambiental em resíduos sólidos. revisão e análise sobre a atual situação no Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering**: an introduction. 8. ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos Polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

CARMO, S. A. F. do; SILVA, R. Q. Subsídios anti-disseminação de *Aedes aegypti* em usina de processamento de pneus. **Ciência et Praxis**, Belo Horizonte, v. 2, n. 4, p. 15–18, 2009.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Borracha Natural - Análise Mensal. CONAB, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/>

COSENZA, J. P.; ANDRADE, E. M. de; ASSUNÇÃO, G. M. de. Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 16147, 6 maio 2020.

CURY, M. V. Q., MURTA, A. L. S., FIGUEIREDO, L. H. F., MOTENEGRO, L.C.S. Análise sócio-econômica e ambiental para o uso de asfalto emborrachado na construção de rodovias. Instituto Militar de Engenharia – IME, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transporte, Rio de Janeiro – RJ, 2003.

EPELBAUM, M. **A influência da gestão ambiental na competitividade e no sucesso empresarial**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

FIGUEIREDO, A. Concreto com fibras. *In*: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 1327–1365.

FIORE, A. *et al.* On the Fresh/Hardened Properties of Cement Composites Incorporating Rubber Particles Recycled Tires. **Advances in Civil Engineering**, [s. l.], v. 2014, p. e876158, 30 Oct. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/876158>

FLORES MEDINA, N. *et al.* Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 144, p. 563–573, Jul. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.196>

FLORES MEDINA, N. F. *et al.* Composites with recycled rubber aggregates: Properties and opportunities in construction. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 188, p. 884–897, 10 Nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.069>

FLORES MEDINA, N.; FLORES-MEDINA, D.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. Influence of fibers partially coated with rubber tire recycling as aggregate on the acoustical properties of rubberized concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 129, p. 25–36, 30 Dec. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.007>

FLORES-MEDINA, D.; MEDINA, N. F.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. Static mechanical properties of waste rests of recycled rubber and high quality recycled rubber from crumbed tyres used as aggregate in dry consistency concretes. **Material and Structures**, [s. l.], v. 47, p. 1185–1193, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0121-6>

FLORIANI, M. A.; CADORE FURLANETTO, V.; SEHNEM, S. Descarte sustentável de pneus inservíveis. **NAVUS: revista de gestão e tecnologia**, Florianópolis, v. 6, n. 2, p. 37-51, abr./jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.22279/navus.2016.v6n2.p37-51.347>

GESOĞLU, M. *et al.* Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 63, p. 206–213, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.046>

GHIZDĂVEȚ, Z. *et al.* Sound absorbing materials made by embedding crumb rubber waste in a concrete matrix. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 124, p. 755–763, 15 out. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.145>

GUO, S. *et al.* Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 148, p. 681–689, 10 Fev. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.046>

HOLMES, N.; BROWNE, A.; MONTAGUE, C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 73, p. 195–204, Dec. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107>

HUANG, B.; SHU, X.; CAO, J. A two-staged surface treatment to improve properties of rubber modified cement composites. **Construction and Building Materials**, [s. l.], Special Section on Recycling Wastes for Use as Construction Materials. v. 40, p. 270–274, 1 Mar. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.014>

KASHANI, A. *et al.* Effects of surface treatments of recycled tyre crumb on cement-rubber bonding in concrete composite foam. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 171, p. 467–473, 20 May 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.163>

LEMOS, A. E. D. F. **Adição de resíduos de borracha de pneu no concreto**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro Universitário de João Pessoa – UNIPÊ, João Pessoa, 2019.

MACÊDO, A. T.; MARTINS, M. de F. A Sustentabilidade Urbana sob a Ótica da Construção Civil: Um Estudo nas Empresas Construtoras de Campina Grande-PB. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 4, n. 1, p. 139–157, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5585/geas.v4i1.183>

MAZZER, C.; CAVALCANTI, O. A. Introdução à gestão ambiental de resíduos. **Infarma**, Brasília, v. 16, n. 11-12, p. 67-77, 2004.

MOHAMMADI, I.; KHABBAZ, H.; VESSALAS, K. In-depth assessment of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 71, p. 456–471, 30 Nov. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.085>

MOHAMMADI, I.; KHABBAZ, H.; VESSALAS, K.. Enhancing mechanical performance of rubberised concrete pavements with sodium hydroxide treatment. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 813–827, 1 Mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0540-7>

NAJIM, K. B.; HALL, M. R. Crumb rubber aggregate coatings/pre-treatments and their effects on interfacial bonding, air entrapment and fracture toughness in self-compacting rubberised concrete (SCRC). **Materials and Structures**, [s. l.], v. 46, n. 12, p. 2029–2043, 1 Dec. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0034-4>

OSSOLA, G.; WOJCIK, A. UV modification of tire rubber for use in cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 52, p. 34–41, 1 set. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.04.004>

PACHECO, J. *et al.* Considerações sobre o módulo de elasticidade do concreto. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO CBC2014*, 56., 2014, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Ibracon, 2014.

PACHECO-TORRES, R. *et al.* Fatigue performance of waste rubber concrete for rigid road pavements. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 176, p. 539–348, 10 Jul. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.030>

PAULO, G. D.; SARON, C. **Reciclagem de elastômeros por desvulcanização química e física combinadas**. Foz do Iguaçu, PR: out. 2019

PAULO, G. D.; SARON, C. Reciclagem de elastômeros por desvulcanização química e física combinadas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS*, 10. 2009, Foz Iguaçu. **Anais [...]**. São Carlos: Cubo Multimídia, 2009.

QUEIROGA, A. T. D.; MARTINS, M. de F. Indicadores para a construção sustentável: estudo em um condomínio vertical em Cabedelo, Paraíba. **Revista de Administração da UFSM**, v. 8, ed. esp. 16, p. 114-130, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5902/1983465916497>

RECICLANIP. **Reciclanip**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.reciclanip.org.br/>. Acesso em: 4 abr. 2021

RICHARDSON, A. E.; COVENTRY, K. A.; WARD, G. Freeze/thaw protection of concrete with optimum rubber crumb content. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 96–103, 1 Mar. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.013>

ROYCHAND, R. *et al.* A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 237, p. 1–20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117651>

SABOKTAKIN, A.; SABOKTAKIN, M. Improvements of physical, mechanical and biodegradation properties of polybutadiene rubber insulators by chitosan and silica nanoparticles. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 91, p. 1194–1198, Oct. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.06.078>

SANTOS, G. B. **Reciclagem de pneus: vantagens econômicas e ecológicas**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

SANTOS, W. N. dos *et al.* Hot wire technique in the determination of thermal properties of polymers. **Polímeros: ciência e tecnologia**, São Paulo, v. 14, n. 5, p. 354–359, dez. 2004.

SHU, X.; HUANG, B. Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: an overview. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 67, n. Part B, p. 217–224, 30 Sep. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>

SI, R.; GUO, S.; DAI, Q. Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 153, p. 496–505, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.085>

SU, H. *et al.* Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 91, p. 288–296, Mar. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.022>

SU, H. *et al.* Surface modified used rubber tyre aggregates: effect on recycled concrete performance. **Magazine of Concrete Research**, [s. l.], v. 67, n. 12, p. 680–691, 1 Jun. 2015.

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 54, p. 1323–1333, Fev. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092>

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C.; PANICKER, V. J. Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 112, p. 504–513, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.046>

TORRETTA, V. *et al.* Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review. **Waste Management**, [s. l.], v. 45, p. 152–160, 1 Nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.018>

YOUSSF, O. *et al.* An experimental investigation of the mechanical performance and structural application of LECA-Rubcrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 175, p. 239–253, 30 Jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.184>

YOUSSF, O.; ELGAWADY, M. A.; MILLS, J. E. Static cyclic behaviour of FRP-confined crumb rubber concrete columns. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 113, p. 371–387, 15 Apr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.033>

YOUSSF, O.; HASSANLI, R.; MILLS, J. E. Mechanical performance of FRP-confined and unconfined crumb rubber concrete containing high rubber content. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 11, p. 115–126, 1 May 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.04.011>