Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v.09,2024

ISSN 2178-6925

USO DE RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEUS PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO EMBORRACHADO: UMA REVISÃO

USE OF TIRE RUBBER WASTE FOR THE PRODUCTION OF RUBBERISED CONCRETE: A REVIEW

Geisa do Nascimento Frota

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Estadual Vale do Acaraú - UEVA, Brasil

E-mail: geisagg9@gmail.com

Francisco Gustavo Moreira

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Estadual Vale do Acaraú - UEVA, Brasil

E-mail: gustavomoreira2222@gmail.com

Aldecira Gadelha Diogenes

Doutora em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Estadual Vale do Acaraú - UEVA, Brasil

E-mail: aldecira_gadelha@uvanet.br

Resumo

Este trabalho teve como objetivo realizar um estudo prospectivo sobre o concreto emborrachado utilizando resíduos de borracha de pneus na substituição parcial dos agregados miúdo e/ou graúdo. O presente estudo foi realizado através de uma revisão de literatura em artigos e patentes divulgados até dezembro de 2023. A busca por artigos foi efetuada nas plataformas *Scopus*, *Web of Science* e *Scielo* e por patentes no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) do Brasil, Patentes Públicas da América Latina e Espanha (LATIPAT), Espacenet e Patentscope. As palavras-chave utilizadas na pesquisa foram: *concrete, tire, rubber, waste and rubberised concrete*, e, também, as suas traduções em português. A partir dos resultados obtidos nas bases de artigos científicos e patentes, foi realizada uma análise minuciosa dos documentos pertinentes ao tema proposto e resultou em 52 artigos e nenhuma patente. De acordo com os artigos encontrados, a aplicação da borracha de pneus não mostra resultados promissores nas propriedades mecânicas, físicas e reológicas do concreto emborrachado, mas a utilização deste resíduo é uma tentativa para colaborar com a sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Resíduo; Concreto Emborrachado; Agregados; Propriedades.

ISSN 2178-6925

Abstract

This work aimed to carry out a prospective study on rubberised concrete using tire rubber waste to partially replace fine and/or coarse aggregates. The present study was carried out through a literature review of articles and patents published until December 2023. The search for articles was conducted on the Scopus, Web of Science and Scielo platforms, and for patents at the National Institute of Industrial Property (INPI) of Brazil, Public Patents of Latin America and Spain (LATIPAT), Espacenet, and Patentscope. The keywords used in the research were: concrete, tire, rubber, waste and rubberised concrete, as well as their translations into Portuguese. Based on the results obtained from the databases of scientific articles and patents, a thorough analysis of documents relevant to the proposed topic was carried out and resulted in 52 articles and no patents. According to the articles found, the application of tire rubber does not show promising results in the mechanical, physical and rheological properties of rubberised concrete, but the use of this residue is an attempt to contribute to environmental sustainability.

Keywords: Waste; Rubberised Concrete; Aggregates; Properties.

1. Introdução

O crescimento populacional, o desenvolvimento econômico e a revolução tecnológica provocam o aumento na produção de resíduos sólidos (GOUVEIA, 2012). O tempo de decomposição dos resíduos na natureza vai depender do tipo do material, o que pode levar de meses ou até milhares de anos. Quando a disposição final dos resíduos ocorrer de forma incorreta, isso pode gerar sérios problemas ao meio ambiente e à saúde humana.

O pneu, depois de usado, torna-se um resíduo que leva centenas de anos para se decompor na natureza. Há cerca de 300 mil toneladas de lixos de pneus que são geradas por ano no Brasil, sendo apenas 10% recicladas (SILVA *et al*., 2012). Diversas pesquisas científicas vêm sendo realizadas no mundo objetivando a reutilização do resíduo de pneus na construção civil para argamassa (CINTRA; PAIVA; BALDO, 2014; PCZIECZEK *et al*., 2019; KURZ *et al*., 2018), piso intertravado (SILVA *et al*., 2017a), tijolo (SILVA *et al*., 2017b; PEREIRA *et al*., 2021), concreto para pavimento (SILVA *et al*., 2019), dentre outros.

O concreto é o material mais usado no mundo e é, comumente, composto da mistura de cimento Portland, agregados e água (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O concreto sustentável vem sendo estudado como uma tentativa de destino de diversos resíduos vindos de setores como indústria, construção civil, urbano, dentre outros, e, ainda, atender as necessidades do mercado da construção civil. O concreto sustentável é caracterizado por ter em sua composição materiais reaproveitados, onde esses podem ser adicionados e/ou substituir parcialmente ou totalmente aos seus

ISSN 2178-6925

componentes.

Sob esta ótica, este artigo teve como objetivo realizar um estudo prospectivo sobre o concreto emborrachado utilizando resíduos de borracha de pneus na substituição parcial de agregados miúdo e/ou graúdo. Para esta pesquisa foi realizada uma revisão de literatura em artigos e patentes divulgados até dezembro de 2023, onde a busca por artigos foi efetuada nas plataformas *Scopus*, *Web of Science* e *Scielo* e por patentes no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) do Brasil, Patentes Públicas da América Latina e Espanha (LATIPAT), Espacenet e Patentscope. As palavras-chave utilizadas foram: *concrete, tire, rubber, waste and rubberised*, e, também, as suas traduções em português. A partir dos resultados obtidos nas bases de artigos científicos e patentes, foi realizada uma análise minuciosa dos documentos pertinentes ao tema proposto e teve como resultado 52 artigos científicos e nenhuma patente.

2. Materiais e Métodos

O estudo prospectivo abordou a temática da incorporação de resíduos de borracha de pneus na produção de concreto publicados até dezembro de 2023. As bases de dados utilizadas foram: *Scopus*, *Web of Science* e *Scientific Electronic Library Online* (Scielo), para artigos científicos; e Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) do Brasil, Patentes Públicas da América Latina e Espanha (LATIPAT), Espacenet e Patentscope, para patentes. As palavras-chave empregadas para pesquisa dos dados nas bases do INPI e LATIPAT foram “concreto”, “emborrachado”, “resíduos”, “borracha” e “pneu”; e também “concrete”, “rubberised”, “waste”, “rubber” e “tire”, para as demais bases. Os termos correspondentes no mesmo idioma foram combinados e aplicados nos campos de busca de título e/ou resumo nas bases de artigos e patentes.

3. Resultados e Discussão

Através da pesquisa realizada nas bases de artigos científicos e patentes foi possível determinar os resultados que relacionam a utilização de resíduos de borracha de pneus aplicados na produção de concreto. A Tabela 1 apresenta a relação entre as combinações de palavras-chave e o número de documentos reportados, de acordo com as bases: *Scielo* (16), *Scopus* (617) e *Web of Science* (192), resultando em 825 documentos obtidos.

ISSN 2178-6925

Tabela 1: Resultados da pesquisa em bases de documentos científicos.

PALAVRAS-CHAVE	SCIELO	SCOPUS	WEB OF SCIENCE	TOTAL
concrete, and tire, and rubber, and waste/ concreto, pneu, borracha, resíduos	15	152	112	279
rubberised concrete/ concreto emborrachado	1	465	80	546

Fonte: elaborado pelos autores

Dentre essa extensa coletânea, foi realizada uma análise minuciosa e foram escolhidos 52 artigos devido a sua relevância ao tema em estudo e a sua aplicação em estruturas de concreto. Esses artigos selecionados foram divididos na Tabela 2, na Tabela 3 e na Tabela 4 conforme o tipo de substituição do agregado e apresentados os materiais empregados na produção do concreto, o percentual de borracha utilizada na substituição dos agregados, os tratamentos empregados no resíduo (quando aplicável) e o melhor teor de substituição encontrado pelos pesquisadores.

ISSN 2178-6925

Tabela 2: Artigos reportados sobre concreto emborrachado com utilização de borracha de pneus na substituição do agregado miúdo.

REFERÊNCIA	MATERIAIS USADOS NA PRODUÇÃO DO CONCRETO	PERCENTUAL DE BORRACHA SUBSTITUINDO O AGREGADO	TRATAMENTO REALIZADO NA BORRACHA	MELHOR SUBSTITUIÇÃO DA BORRACHA
(OTIENO; MUSHUNJE, 2021)	Cimento Portland CEM I 52,5R, AM (andesita triturada), AG (andesita triturada - Dmax=22mm), borracha (D=0,425mm; 1,18mm; e 2,36mm) e água	0%, 5%, 10% e 15% do vol. do AM	A borracha foi imersa em água potável/em solução de NaOH por 24h, depois submetida a secagem ao ar por 24h	NE
(CHU *et al.*, 2022)	Cimento, AM (areia), AG (pedra), borracha (D=1-3mm) e água	0% e 15% do vol. do AM	NE	15%
(ELSAYED; TAYEH; KAMAL, 2021)	Cimento Portland CEM I 42,5N, AM (areia áspera de deserto - Dmax=4,75mm), AG (dolomita triturada - D=4,75-22,4mm), borracha (D=0,71-2,78mm), superplastificante e água	0%, 5%, 10%, e 20% do vol. do AM	A borracha foi lavada com água da torneira, em seguida imersa em solução de NaOH por 1h, depois lavada novamente com água da torneira e seca ao ar	5%
(DONGA; SHAH; BHAVSAR, 2016)	Cimento Portland comum, AM (areia natural), AG (brita - Dmax=20mm), sílica ativa (0%, 10% e 15 % do vol. do cimento), fibras de borracha (2-5mm-larg. e até 20 mm-comp.), superplastificante (Viscocrete 4031NS) e água	0%, 25% e 30% do vol. do AM	NE	NE

ISSN 2178-6925

(FENG *et al.*, 2022)	Cimento Portland comum (classe 42,5), AM (areia - D=0,15–4,75mm), AG, borracha e água	0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% do vol. do AM	NE	30%
(ELSAYED *et al.*, 2021)	Cimento Portland CEM I 42,5N, AM (areia - D=0,18-4,75mm), AG (natural - D=4,75-22,4mm e reciclado - D=2,8-22,4mm): 0%, 25%, 50% e 100% do AGR do vol. do AG natural, borracha (D=0,18-2,8mm), superplastificante e água	0%, 10% e 20% do vol. do AM	A borracha foi lavada com água, em seguida imersa em solução de NaOH por 30 min, depois foi lavada novamente com água e submetida a secagem ao ar	25% de AGR no AG natural e 10% de BT no AM
(ZHU *et al.*, 2020)	Cimento Portland CEM I 42,5R, AM (areia), AG (brita - Dmax=15mm), borracha (Dmax=0,5mm), cinza volante (25,27% do vol. do cimento), sílica ativa (4,73% do vol. do cimento), plastificante e água	0% e 5% do vol. do AM	NE	NE
(YI *et al.*, 2020)	Cimento misto com densidade específica de 3,08, AM (areia de rio - Dmax=5mm), AG (pedra dolomita - D=10-20mm), borracha (D=1,18-2,36mm), redutor de água, incorporador de ar e água	0% e 20% do vol. do AM	Nenhum tratamento realizado	NE
(VALIZADEH *et al.*, 2020)	Cimento Portland comum, AM (areia de sílica - Dmax=4mm), AG (brita - Dmax=10mm), cinza volante (30% do vol. do cimento), escória granulada moída de alto forno (22,5% do vol. do cimento), sílica ativa (7,5% do vol. do	0%, 10% e 20% do vol. do AM	A borracha foi imersa em água por 24h	NE

ISSN 2178-6925

	cimento), borracha (D=2-5mm), superplastificante (MasterEase 3000), modificador de viscosidade e redutor de água de alta gama (MasterGlenium SKY 8345) e água			
(AYUB; KHAN; MAHMOOD, 2022)	Cimento Portland comum (densidade específica de 3,05), AM (areia de rio), AG (D=10mm e 12mm), borracha (D=0,08-1,6mm), cinza volante (35% do volume do cimento), fibras PET (25mm-comp., 5mm-larg. e 0,8mm-esp.), modificador de viscosidade e água	0%, 5%, 10%, 15% e 20% do vol. do AM	NE	15%
(MOHAMMADI; KHABBAZ; VESSALAS, 2016)	Cimento Portland de retração limitada, AM (areias fina e grossa misturadas na proporção de 50/50), AG (cascalhos - D=10-20mm), borracha (D=0,075-4,75mm), redutor de água (Sika Plastiment 10) e água	0%, 20% e 30% do vol. do AM	A borracha passou por tratamento químico em solução de NaOH	20% a 30%
(MOHAMMADI; KHABBAZ, 2015)	Cimento de retração limitada, AM (areias fina e grossa misturadas na proporção de 50/50 - D=0,075-4,75mm), AG (cascalhos de latite triturados - D=10-20mm), borracha (Dmax=4,75mm), redutor de água (Sika Plastiment 10) e água	0%, 10%, 20%, 25%, 30% e 40% do vol. do AM	A borracha foi imersa em água por 24h	20% e 25%

ISSN 2178-6925

(MOHAMMADI; KHABBAZ; VESSALAS, 2014)	Cimento de retração limitada, AM (areias fina e grossa misturadas na proporção de 50/50), AG (cascalhos de latite triturados - D=10-20mm), borracha, redutor de água (Sika Plastiment 10), agente antiespumante e água	0%, 10%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50%, 60% e 70% do vol. do AM	A borracha foi imersa em água por 24h	40%
(YOUSSF *et al.*, 2019)	Cimento de uso geral com densidade específica de 3,15, AM (areia de rio - Dmax=5mm), AG (pedra dolomita - Dmax=10mm, 14mm e 20mm), borracha (Dmax=2,36mm e 4,75mm), fibras (aço - D=0,55mm, polipropileno - D=0,80mm e borracha - D=0,5-1,3mm), superplastificante (Masterglenium Sky 8708) e água	0%, 15%, 20% e 30% do vol. do AM	Tratamentos distintos usados na borracha: 1º- Lavagem com água; 2º- Imersão em água por 24h seguido de lavagem e secagem ao ar; 3º- Imersão em água por 24h, seguido de lavagem e posterior secagem em estufa a 100ºC por 6h; 4º- Imersão em solução de NaOH; 5º- Imersão em solução de peróxido de hidrogênio; 6º- Imersão em solução de ácido sulfúrico; 7º- Imersão em solução de cloreto de cálcio; 8º- Imersão em solução de silano; 9º- Imersão em solução de permanganato de potássio e posterior imersão em solução de bissulfato de sódio	NE
(GUPTA *et al.*, 2019)	Cimento Portland comum grau 43, AM (areia de rio), AG (basalto - D=10-	0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% do vol. do AM	NE	NE

ISSN 2178-6925

	20mm), fibras de borracha (20mm-comp. e 2-5mm-larg.), redutor de água e água			
(ALSHAIKH *et al.*, 2019)	Cimento, AM (areia), AG, borracha (D=1-2mm), superplastificante (MasterGlenium ACE 8109) e água	0% e 20% do vol. do AM	NE	20%
(WERDINE *et al.*, 2021)	Cimento Portland V – ARI, AM (areia de quartzo), AG (brita 0), borracha (D=0,6mm e 0,6-4,8mm), superplastificante (ADI-SUPER H25) e água	0%, 10%, 30% e 50% do vol. do AM	NE	NE
(SILVEIRA *et al.*, 2016)	Cimento Portland CPII – Z32, AM (areia – Dmax=1,20mm), AG (brita 0 – Dmax= 12,5mm e brita 1 – Dmax=19mm), borracha e água	0% e 10% do vol. do AM	Nenhum tratamento realizado	NE

NE - Não especificado; PET - Polietileno tereftalato; AM - Agregado miúdo; AG - Agregado graúdo; AGR – Agregado graúdo reciclado; BT – Borracha triturada; Dmax - Diâmetro máximo; D - Diâmetro; comp. - Comprimento; larg. - Largura; esp. – Espessura; vol. – Volume; NaOH – hidróxido de sódio.

Fonte: elaborado pelos autores

ISSN 2178-6925

Tabela 3: Artigos reportados sobre concreto com utilização de borracha de pneus em substituição do agregado graúdo e as suas informações.

REFERÊNCIA	MATERIAIS USADOS NA PRODUÇÃO DO CONCRETO	PERCENTUAL DE BORRACHA SUBSTITUINDO O AGREGADO	TRATAMENTO REALIZADO NA BORRACHA	MELHOR SUBSTITUIÇÃO DA BORRACHA
(SINKHONDE *et al.*, 2021a)	Cimento Portland CEM I, pó de tijolo de argila queimado (0%; 2,5% e 5% do vol. do cimento), AM (areia de rio), AG (D=5-20mm), borracha (D=5-20mm) e água	0%, 10% e 20% do vol. do AG	NE	NE
(SINKHONDE *et al.*, 2021b)	Cimento Portland comum (classe 42,5), pó de tijolo de argila queimado (0% e 5% do vol. do cimento), AM (areia), AG (brita - Dmax=20mm), borracha (Dmax=20mm) e água	0% e 10% do vol. do AG	NE	5% de PTAQ no vol. do cimento e 10% de borracha no vol. do AG
(WANG; LEE; CHOU, 2022)	Cimento Portland, AM (areia - Dmax=4,75mm), AG (brita - Dmax=25mm), cinza volante (10%, 15%, 20% e 30% do vol. do cimento), zeólita (10%, 15% e 20% do vol. do cimento), borracha (D=3-6mm), escória de alto forno (10%, 15%, 20% e 30% do vol. do cimento), fibras de aço e água	0%, 10%, 15% e 25% do vol. do AG	A borracha passou por tratamento químico em solução de NaOH	25% de borracha no AG e 30% de escória no cimento

ISSN 2178-6925

(DUARTE *et al.*, 2016)	Cimento Portland CEM II A-L 42,5 R, AM (areia - D=0-4mm), AG (calcário - D=4-22,4mm), borracha (D=4-11,2mm) e água	0%, 5% e 15% do vol. do AG	NE	NE
(MISHRA; PANDA, 2015)	Cimento Portland comum grau 43, AM (areia), AG natural (Dmax=20mm), borracha (D=5 e 10mm), superplastificante (Cera Hyperplast XR-W40) e água	0%, 5%, 10%, 15% e 20% do peso do AG	NE	5%
(PANDA; PARHI; JENA, 2012)	Cimento Portland pozolânico, AM (areia natural de rio - Dmax=4,75mm), AG (brita - Dmax=20mm), borracha (Dmax=20mm) e água	0%, 3%, 6%, 9% 12% e 15% do vol. do AG	NE	NE
(ELCHALAKANI *et al.*, 2018a)	Cimento Portland comum de uso geral, AM (areia - D=0-4mm), AG (brita - Dmax=7mm), borracha (D=2-5mm e 5-7mm), superplastificante e água	0%, 15% e 30% do peso do AG	A borracha foi imersa em solução de NaOH por 24h e depois imersa em água	NE

NE - Não especificado; AM - Agregado miúdo; AG - Agregado graúdo; PTAQ – Pó de tijolo de argila queimado; Dmax - Diâmetro máximo; D - Diâmetro; vol. – Volume; NaOH – hidróxido de sódio.

Fonte: elaborado pelos autores

ISSN 2178-6925

Tabela 4: Artigos reportados sobre concreto com utilização de borracha de pneus em substituição do agregado miúdo e graúdo e as suas informações.

REFERÊNCIA	MATERIAIS USADOS NA PRODUÇÃO DO CONCRETO	PERCENTUAL DE BORRACHA SUBSTITUINDO O AGREGADO	TRATAMENTO REALIZADO NA BORRACHA	MELHOR SUBSTITUIÇÃO DA BORRACHA
(MUJDECI; BOMPA; ELGHAZOULI, 2021)	Cimento Portland CEM I 52,5, AM (D=0-5mm), AG (D=5-10mm), borracha (D=0-0,5mm; 0,5-0,8mm; 1,0-2,5mm; 2-4mm; 4-10mm; e 10-20mm), cinza volante (20% do volume do cimento), plastificante, superplastificante e água	0%, 30% e 60% do vol. dos AM e AG	NE	NE
(KARUNARATHNA *et al.*, 2021)	Cimento Portland comum, AM (areia grossa natural de rio - D=0-5mm e areia industrializada - D=0-5mm: 20% da areia industrializada substituída do peso da areia grossa natural de rio em cada projeto de mistura), AG (cascalho - D=14mm e 20mm), borracha (pedaços - D=15mm e migalhas - D=2-4mm), cinza volante (25% do peso do cimento), superplastificante e água	0% dos volumes dos AM e AG; 2% de migalhas da borracha do vol. do AM; 4% de migalhas da borracha do vol. do AM; 2% de pedaços da borracha do vol. do AG;	Nenhum tratamento realizado	NE

ISSN 2178-6925

		4% de pedaços da borracha do vol. do AG		
(WANG *et al.*, 2021)	Cimento Portland CEM II 52,5, AM (areia - D=0-5mm), AG (cascalho - D=5-10mm e 10-20mm), borracha (D=0-4mm, 4-10mm e 10-20mm), plastificante e superplastificante, sílica ativa (10% vol. do cimento), cinza volante (10% do vol. do cimento) e água	0% e 60% do vol. dos AM e AG	NE	NE
(XU; BOMPA; ELGHAZOULI, 2020)	Cimento Portland CEM I 52,5N, AM (areia - D=0-5mm), AG (cascalho - D=10-20mm), cinza volante (35% do vol. do cimento), sílica ativa (5% do vol. do cimento), borracha (D=0,5-0,8mm e 1-2,5mm), superplastificante e água	0%, 10%, 20%, 30% e 40% do vol. dos AM e AG	NE	NE
(WANG *et al.*, 2020)	Cimento Portland CEM II 52,5N, AM (areia - D=0-5mm), AG (D=5-10mm e 10-20mm), cinza volante (10% do vol. do cimento), sílica ativa (10% do vol. do cimento), borracha (D=0-4mm, 4-10mm e 10-20mm), plastificante, superplastificante e água	0%, 30% e 60% do vol. dos AM e AG	NE	NE
(POLYDOROU *et al.*, 2020)	Cimento Portland CEM I 52,5N, AM (diabásio e calcário - D=0-4mm), AG (diabásio - D=4-20mm), sílica ativa (20% do vol. do cimento), fibras de aço, nanosilica tipo P (D=15-20nm) (3% do	0% e 60% do vol. dos AM e AG	A borracha foi revestida por uma pasta de resíduos de pó de pedreira e água	NE

ISSN 2178-6925

	peso da sílica ativa), nanosilica tipo S (D=15-20nm) (3% do peso da sílica ativa), borracha, superplastificante (Tsirco-Flo SCA 43H) e água			
(BOMPA ; ELGHAZ OULI, 2020)	Cimento Portland CEM I 52,5, AM (areia - D=0-5mm), AG (cascalho - D=5-10mm), borracha (D=0-0,5mm, 0,5-0,8mm, 1-2,5mm, 2-4mm, 4-10mm e 10-20mm), cinza volante (20% do vol. do cimento), superplastificante e água	0%, 30% e 60% do vol. dos AM e AG	NE	NE
(BOMPA ; ELGHAZ OULI, 2017)	Cimento Portland CEM I 52,5, AM (areia - D=0-5mm), AG (cascalho - D=5-10mm), borracha (D=0-10mm e 10-20mm), cinza volante (10% do peso do cimento), sílica ativa (10% do peso do cimento), plastificante, superplastificante e água	0%, 20%, 40% e 60% do volume dos AM e AG	NE	NE
(RAFFO UL *et al*., 2017)	Cimento Portland de calcário CEM II 52,5N, AM (areia lavada de rio - D=0-5mm), AG (cascalho lavado de rio - D=5-10mm e 10-20mm), borracha (D=0-5mm, 5-10mm e 10-20mm), sílica ativa (10% do vol. do cimento), cinza volante (10% do vol. do cimento), redutor de água e água	0%, 10%, 20%, 40%, 60% e 100% do vol. do AM; 0%, 10%, 20%, 40%, 60% e 100% do vol. do AG; 40% e 60% do vol. dos AM e AG (em cada)	NE	NE

(RAFFOUL *et al*., 2016)	Cimento Portland de calcário CEM II 52,5N, AM (areia lavada de rio - D=0-5mm), AG (cascalho lavado de rio - D=5-10mm e 10-20mm), sílica ativa (10% do vol. do cimento), cinza volante (10% do vol. do cimento), borracha (D=0-5mm, 5-10mm e 10-20mm), plastificante, superplastificante e água	0%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% do vol. do AM; 0%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% do vol. do AG; 20%, 40% e 60% do vol. dos AM e AG (em cada)	A borracha foi lavada com água e exposta à secagem ao ar; A borracha foi pré-revestida com sílica ativa misturada com um pouco de água	60%
(SGOBBA *et al*., 2015)	Cimento Portland CEM 42,5R II-A/LL, AM (areia calcária - D=0-1mm, 1-3,5mm e 4-10mm), AG (calcário triturado - D=10-20mm), cinzas de borracha (Dmax=1mm), borracha (D=3-10mm e D=25-30mm), cinza volante, escória de alto forno, superplastificante e água	0%, 10%, 20% e 30% do vol. dos AM e AG	Tratamentos distintos usados na borracha: 1º- revestimento de látex; 2º- em solução de NaOH; 3º- revestimento de éter de metilcelulose; 4º- revestimento de látex e imperflux; 5º- revestimento de betume; 6º- revestimento de betume e agente anti decapagem; 7º- revestimento de betume e interline PE31; 8º- revestimento de poliuretano	NE
(HALL; NAJIM, 2014)	Cimento Portland de alta resistência (CEM1), AM (areia), AG (cascalho arredondado - D=10mm), cinza volante, borracha (D=2-6mm), redutor de água (ADVA Flow 411) e água	0%, 7% e 9% do peso do AM; 0%, 7% e 9% do peso do AG	A borracha foi revestida em argamassa	NE

(MAVROULIDOU; FIGUEIREDO, 2010)	Cimento Portland comum, AM (areia), AG, borracha (D=4,75-10mm e 10-19mm) e água	0%, 10%, 20%, 30% e 40% do peso do AM; 0%, 10%, 20%, 30% e 40% do peso do AG	NE	NE
(HALL; NAJIM; HOPFE, 2012)	Cimento Portland CEM I 52,5, AM (areia - Dmax=5mm), AG (cascalho de quartzito - Dmax=10mm), borracha (D02-6mm) e água	0%, 10%, 20% e 30% do peso do AM; 0%, 10%, 20% e 30% do peso do AG; 0%, 10%, 20% e 30% do peso dos AM e AG	NE	30%
(POLYDOROU *et al.*, 2018)	Cimento, AM natural, AG natural, borracha, sílica ativa (10% e 20% do vol. do cimento), fibras de aço, cinza volante (10% e 20% do vol. do cimento), superplastificante e água	60% do volume dos AM e AG	NE	NE
(HARON *et al.*, 2018)	Cimento Portland comum tipo I, AM (areia), AM (granito - Dmax=10mm), borracha (D=1-4mm e 5-8mm), redutor de água (Glenium C380) e água	10%, 20%, 30% e 40% do peso do AM; 10%, 20%, 30% e 40% do peso do AG	NE	10% a 30%
(ELGHAZOULI *et al.*, 2018)	Cimento Portland CEM I 52,5, AM (areia - D=0-5mm), AG (cascalho - D=5-10mm), borracha (D=0-5mm, 5-10mm e 10-20mm), sílica ativa (10% do vol. do cimento), cinza volante (10% do vol. do	0%, 45% e 60% do vol. dos AM e AG	NE	NE

	cimento), plastificante, superplastificante e água			
(ELCHALAKANI *et al.*, 2018b)	Cimento Portland comum de uso geral, AM (areia), AG, borracha (D=2-5mm e 5-7mm), superplastificante e água	0%, 15% e 30% do peso dos AM e AG	A borracha foi lavada com água, em seguida imersa em solução de NaOH por 24h, depois enxaguada até obter um pH=7 e imersão em água	15%
(DONG *et al.*, 2019a)	Cimento Portland comum de uso geral, AM (areia de duna), AG (cascalho - Dmax=4, 7 e 10mm), borracha (D=2-5mm e D=7-10mm), superplastificante e água	0%, 15% e 30% do peso dos AM e AG	A borracha foi imersa em solução de NaOH por 24h e em seguida lavada com água	NE
(DONG *et al.*, 2019b)	Cimento Portland comum de uso geral (densidade específica de 3,12), AM (areia), AG (cascalho - Dmax=4, 7 e 10mm), borracha (D=2-5mm e 7-10mm), superplastificante e água	0%, 15% e 30% do peso dos AM e AG	A borracha foi imersa em solução de NaOH por 24h	15%
(BOMPA; ELGHAZOULI, 2019)	Cimento Portland CEM I 52,5, AM (areia - D=0-5mm), AG (cascalho - D=5-10mm), borracha (D=0-0,5mm; 0,5-0,8mm, 1-2,5mm, 2-4mm, 4-10mm e 10-20mm), sílica ativa (15% do vol. do cimento), cinza volante (15% do vol. do cimento), superplastificantes (Sika ViscoFlow 1000 e 2000) e água	0% e 60% do vol. dos AM e AG	Nenhum tratamento realizado	NE

ISSN 2178-6925

(XU *et al.*, 2018)	Cimento Portland CEM I 52,5, AM (areia - D=0-5mm), AG (cascalho - D=5-10mm), borracha (D=0-5mm, 5-10mm e 10-20mm), cinza volante (10% do vol. do cimento), sílica ativa (10% do vol. do cimento), plastificante, superplastificante e água	0%, 20%, 45% e 60% do vol. dos AM e AG	NE	NE
(ASLANI *et al.*, 2018)	Cimento Portland de uso geral, AM (areia de sílica fina - Dmax=4mm), AG (cascalho - Dmax=10mm), borracha (D=1-3mm, 2-5mm e 5-10mm), cinza volante (32,5% do vol. do cimento), escória de alto forno (22,5% do vol. do cimento), sílica ativa (7,5% do vol. do cimento), superplastificante, redutor de água, modificador de viscosidade e água	0%, 10%, 20%, 30% e 40% do vol. dos AM e AG	A borracha foi imersa em água por 24h	NE
(ALSAIF *et al.*, 2019a)	Cimento Portland de cal CEM II 52,5N, AM (areia natural de rio - D=0-5mm), AG (cascalho natural de rio - D=5-10mm e 10-20mm), borracha (D/0-0,5mm, 0,5-2mm, 2-6mm, 5-10mm e 10-20mm), sílica ativa (10% do peso do cimento), cinza volante (10% do peso do cimento), fibras de aço, plastificante, superplastificante e água	0%, 30% e 60% do vol. dos AM e AG	NE	NE
(ALSAIF *et al.*, 2018a)	Cimento Portland de calcário CEM II 52,5N, AM (areia de rio - D/0-5mm), AG (cascalho natural de rio - D=5-10mm e 10-20mm), borracha (D=0-0,5mm, 0,5-	0%, 20%, 40% e 60% do vol. dos AM e AG	NE	60%

ISSN 2178-6925

	0,8mm, 1-2,5mm, 2-4mm, 4-10mm e 10-20mm), fibras de aço, cinza volante (10% do peso do cimento), sílica ativa (10% do peso do cimento), plastificante, superplastificante e água			
(ALSAIF *et al.*, 2019b)	Cimento Portland de calcário CEM II 52,5N, AM (areia de rio - D=0-5mm), AG (cascalho de rio - D=5-10mm e 10-20mm), borracha (D=0-0,5mm, 0,5-2m, 2-6mm, 5-10mm e 10-20mm), sílica ativa (10% do peso do cimento), cinza volante (10% do peso do cimento), fibras de aço, plastificante, superplastificante e água	0%, 30% e 60% do vol. dos AM e AG	NE	NE
(ALSAIF *et al.*, 2018b)	Cimento Portland de calcário CEM II 52,5N, AM (areia de rio - D=0-5mm), AG (cascalho natural de rio - D=5-10mm e 10-20mm), borracha (D=0-0,5mm, 0,5-2mm, 2-6mm, 5-10mm e 10-20mm), sílica ativa (10% do peso do cimento), cinza volante (10% do peso do cimento), fibras de aço, plastificante, superplastificante e água	0%, 30% e 60% do vol. dos AM e AG	NE	60%

NE - Não especificado; AM - Agregado miúdo; AG - Agregado graúdo; Dmax - Diâmetro máximo; D - Diâmetro; vol. – Volume; NaOH – hidróxido de sódio.

Fonte: elaborado pelos autores

ISSN 2178-6925

A Tabela 5 exibe os dados relativos às patentes, seguindo os critérios anteriormente utilizados para a determinação dos resultados nas bases de artigos. Os mesmos parâmetros foram aplicados no processo de nivelamento de dados nas bases de patentes consultadas. É evidente que os resultados variam para cada combinação de palavras-chave empregadas em cada base, resultando em quantidades diferentes para o INPI (1), LATIPAT (1), ESPACENET (31) e PATENTSCOPE (35).

Tabela 5: Palavras-chave e resultados da pesquisa em bases de patentes.

PALAVRAS-CHAVE	INPI	LATIPAT	ESPACE NET	PATENT SCOPE
concrete, and tire, and rubber, and waste/ concreto, pneu, borracha, resíduos	1	1	30	34
rubberised concrete/ concreto emborrachado	0	0	1	1

Fonte: elaborado pelos autores

Após realizar uma pesquisa nas bases tecnológicas, constatou-se que, embora tenham sido encontradas algumas patentes, nenhuma delas está alinhada com o tema da pesquisa proposta.

Portanto, dentre os 52 artigos selecionados foram categorizados em tópicos conforme o tipo de substituição da borracha no agregado. Alguns desses estudos destacaram benefícios como melhor ductilidade, aumento na trabalhabilidade e redução significativa na condutividade térmica do concreto emborrachado.

Ademais, notou-se a presença de estudos que incluíram tratamentos específicos na borracha de pneus, resultando em melhorias significativas em determinados casos. Estes tratamentos foram particularmente enfatizados no último tópico, onde os artigos selecionados utilizaram técnicas de tratamento da borracha que demonstraram eficácia em algum aspecto. Entre os resultados positivos alcançados, destacam-se a redução significativa da porosidade do material cimentício, o aprimoramento da aderência entre a interface borracha e concreto, a minimização da segregação e a obtenção de uma distribuição mais uniforme da borracha na mistura.

ISSN 2178-6925

3.1. Substituição parcial do agregado miúdo por borracha de pneus

OTIENO; MUSHUNJE (2021) investigaram sobre a influência da substituição de agregados minerais finos por borracha de pneus na fluência e retração do concreto emborrachado. Fizeram corpos de prova (CP's) de concreto com substituição do volume de agregados minerais miúdos (0%, 5%, 10% e 15%) por borracha de pneus. A mistura de concreto contendo 15% de borracha granulada foi reformulada usando partículas de borracha triturada pré-tratadas. Esse pré-tratamento foi feito embebendo as amostras de borracha triturada por 24 h em água potável ou solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 M e secando ao ar por mais 24 h. Quanto ao ensaio de fluência e retração, foram realizados em CP's prismáticos de 100 × 100 × 200 mm. Os autores concluíram que a inclusão de partículas de borracha de pneu no concreto aumenta sua porosidade em 10%, retração por secagem em 20% e fluência em 10%.

CHU *et al*. (2022) aplicaram o concreto emborrachado (CE) em estruturas de edifícios, observando o comportamento cíclico de juntas de vigas-pilares feito tanto de CE quanto de concreto convencional (CC), isto é, sem borracha. O teor de borracha empregado no CE foi de 15% por volume de areia, sendo projetado no mesmo nível de resistência do CC, porém com uma menor relação água-cimento. O estudo incluiu a análise de três amostras de juntas de CE e uma de CC, proporcionando uma abordagem abrangente para avaliar o desempenho estrutural e as características específicas de cada material. Para realizar a experiência foram aplicadas uma carga hidráulica compressiva na extremidade superior do pilar e duas cargas cíclicas verticais nas extremidades das vigas através de atuadores de Medição, Teste e Simulação (MTS) de 50 toneladas. Quanto aos resultados obtidos, ambas as juntas da estrutura sofreram um processo de falha semelhante, incluindo o estágio inicial de fissuração, o estágio de desenvolvimento da fissura, o estágio final e o estágio de falha, assim como a degradação da rigidez, relação momento-rotação e tendência de deformação de cisalhamento, e em comparação ao CC o CE pode retardar a ocorrência de trincas na área central da junta. Já para a análise da ductilidade, o CE apresenta melhor ductilidade após a carga final, mas antes da falha final.

ZHU *et al*. (2020) realizaram uma investigação abordando a distribuição de probabilidade da vida à fadiga em flexão do concreto autoadensável emborrachado (CAE) para pavimentação. A borracha utilizada na produção do concreto substituiu 5% do volume total de agregado miúdo. Três amostras de vigas de cada lote passaram por

ISSN 2178-6925

testes de flexão estática para determinar a resistência à flexão estática média. O foco principal foi o teste de fadiga de flexão do CAE, uma vez que o desempenho de estruturas de concreto, como pavimentos e pontes, está intrinsecamente ligado à capacidade de resistência à fadiga. Foi provado que a distribuição de probabilidade de fadiga na vida útil do CAE pode ser aproximadamente modelada pela distribuição Weibull. Para confirmar a aplicabilidade da distribuição Weibull de dois parâmetros na descrição da vida à fadiga do CAE, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov para avaliar a qualidade do ajuste da distribuição de probabilidade dos dados de fadiga. A resistência média de durabilidade do CAE, avaliada em 2 milhões de ciclos, correspondeu a 63% da resistência à flexão estática, superando os 58% coletados no concreto simples. Concluíram que a distribuição de probabilidade da vida à fadiga do CAE está quase de acordo com a distribuição Weibull de dois parâmetros em diferentes níveis de tensão. A variabilidade da distribuição da vida de fadiga do CAE torna-se maior com o aumento do nível de tensão. Comparado com concreto simples, o parâmetro de forma α do CAE é menor, ou seja, nas mesmas condições, a variabilidade da distribuição da vida em fadiga do CAE é maior que a do concreto simples devido a distribuição desigual da borracha no interior dos CP's.

AYUB; KHAN; MAHMOOD (2022) utilizaram resíduos comumente disponíveis tais como cinzas volantes, pneus gastos e garrafas de polietileno tereftalato (PET) como fibras na confecção do concreto autoadensável emborrachado (CAE). Dez misturas contendo borracha de pneu moída e fibras de PET foram investigadas quanto às propriedades mecânicas (compressão, tração e flexão). Em cinco dessas misturas, o CAE continha 35% de cinzas volantes por substituição em volume de cimento e borracha triturada para substituir 0, 5, 10, 15 e 20% em volume de agregados miúdos. As cinco misturas restantes de CAE continham uma fração volumétrica fixa de 2% de fibras PET medida pelo volume de concreto. No geral, a adição de 20% de borracha triturada como agregados miúdos reduziu significativamente a resistência à compressão, independentemente de uma fração volumétrica de 2% de fibras PET. Assim, o nível adequado de substituição de agregado miúdo por borracha triturada com e sem fibras de PET foi de 15%. Os resultados de resistência à tração mostraram uma redução na resistência com o aumento do teor de borracha, o que foi corroborado com o relatado por (FENG *et al.*, 2022; VALIZADEH *et al.*, 2020). A redução na substituição de 5, 10, 15 e 20% de agregados miúdos foi de 10,75%, 21,5%, 53,4% e 36,6%,

ISSN 2178-6925

respectivamente, em comparação com a mistura controle contendo 100% de agregados miúdos. O módulo de ruptura do concreto com e sem fibras de PET foi reduzido em aproximadamente 18% em comparação com a mistura de controle. Os autores concluíram que a resistência à compressão foi reduzida com a substituição dos agregados miúdos por borracha, confirmando os mesmos resultados obtidos por (DONGA; SHAH; BHAVSAR, 2016; YI *et al*., 2020; MOHAMMADI; KHABBAZ, 2015; GUPTA *et al*., 2019; WERDINE *et al*., 2021 e SILVEIRA *et al*., 2016). Os autores afirmam que a borracha triturada (como agregado miúdo) e as fibras de PET (como reforço) no CAE com cinzas volantes mostraram uma excelente proposta e melhores respostas das propriedades mecânicas.

YOUSSF *et al*. (2019) investigaram o processo de produção do concreto com adição de borracha para melhorar o seu desempenho mecânico. A borracha foi usada como substituição parcial de 0, 15, 20 e 30% do volume do agregado miúdo, além de ser incorporado fibras de polipropileno, aço e borracha na mistura. Foram exploradas novas abordagens para o tratamento de resíduos de borracha antes de sua incorporação no concreto. Os resultados demonstraram que a adição de borracha como substituição da areia levou ao aumento do abatimento do concreto e diminuição das resistências à compressão, à tração e à flexão. Além disso, o uso de teores de borracha de 15%, 20% e 30% aumentou o abatimento do concreto em 7%, 48% e 40%, respectivamente. Ao substituir a areia por borracha nas proporções 15%, 20% e 30% diminuiu a resistência à compressão em 30%, 34% e 43%, respectivamente. Ademais, substituindo por 15% e 30% de borracha a resistência à tração foi diminuída em 14,5% e 28,5%, respectivamente. Além disso, usando 20% de substituição resultou na diminuição da resistência à flexão em 17%. Essa diminuição na resistência é geralmente atribuída à menor adesão entre a borracha e o concreto. Concluíram que a substituição parcial de areia no concreto por borracha triturada aumentou a trabalhabilidade do concreto, mas diminuíram as suas resistências à compressão, à tração e à flexão. A redução da resistência à compressão, à tração e à flexão são também consistentes com os relatados por (ELSAYED; TAYEH; KAMAL, 2021; ELSAYED *et al*., 2021).

ALSHAIKH *et al*. (2019) investigaram experimentalmente o colapso progressivo de pórticos de concreto armado com borracha. Foram realizadas duas misturas, uma o concreto sem borracha e a outra o concreto com substituição de 20% dos agregados

ISSN 2178-6925

miúdos por borracha triturada. Foram preparados corpos de prova cilíndricos para avaliar a resistência à compressão e à tração. Resultados mostraram que o concreto emborrachado (CE) apresentou diminuição da resistência à compressão de 30,2% e da resistência à tração de 9,4% em relação ao concreto sem borracha. Os pórticos com concreto sem borracha apresentaram fissuras maiores que os CE. Além disso, as amostras de CE apresentaram fissuras mais estreitas próximo às junções viga-coluna do que as amostras de concreto sem borracha. As estruturas com CE apresentaram maior deflexão do que as estruturas de concreto sem borracha devido a capacidade das partículas de borracha aguentarem grandes deformações, por terem grande absorção de energia, mostrando assim a sua ductilidade. Os testes indicaram que o aumento na porcentagem de partículas de borracha melhorou todos os fatores de ductilidade. Foi concluído pelos autores que a adição de partículas de borracha reduz as resistências à compressão e à tração. Além disso, os pórticos de CE apresentaram maior deflexão do que os concretos sem borracha, em mais de 13%. A ductilidade do concreto melhora com o aumento da quantidade de partículas de borracha.

3.2. Substituição parcial de agregado graúdo por borracha de pneus

SINKHONDE *et al*. (2021a) investigaram as vantagens de custo do uso do concreto emborrachado (CE) incorporado com pó de tijolo de argila queimada (PTAQ) comparando-o com o concreto convencional (CC). A substituição feita, ocorreu pela troca de cimento Portland pelo pó de tijolos de argila (PTAQ 0-5%) e agregado graúdo natural pelo resíduo de borracha de pneu (RBP 0-20%). Nesse estudo, a resistência à compressão foi investigada usando misturas geradas por Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), onde serviu de base para o Design Composto Central (DCC) responsável por estabelecer modelos matemáticos, sendo estes testado por Análise de Variância (ANOVA). A avaliação do custo foi estabelecida dividindo as despesas de material e identificando as taxas unitárias dos materiais necessários para a produção de um metro cúbico de concreto, sendo feita uma comparação entre os gastos para se produzir por ambos concretos. As medições de resistência à compressão cúbica foram realizadas em CP's cilíndricos de 100 × 100 × 100 mm de acordo com a *American Society for Testing and Materials* (ASTM C109-11), sendo preparado três CP's para cada mistura. Concluíram que o custo de produção do CE incorporado com PTAQ e

ISSN 2178-6925

RBP são identificados como inferiores ao CC.

DUARTE *et al*. (2016) investigaram de forma experimental a resistência e ductilidade de tubos curtos de aço preenchidos com concreto emborrachado (CE). Para estudar o comportamento de pilares curtos de tubos de aço preenchidos com concreto, três misturas distintas de concreto foram consideradas: concreto convencional (CC) (sem borracha) e duas misturas de CE, com 5% e 15% de substituição do agregado graúdo por borracha proveniente de pneus reciclados. Observou-se nos testes que para os pilares com seções quadradas e retangulares, o fator de ductilidade aumenta com o teor de partículas de borracha na mistura de concreto: um crescimento de cerca de 38% é obtido quando se muda de CC para CE com 15% de substituição. As misturas CE apresentaram menores resistências à compressão e tração e menor módulo de elasticidade do que o CC. Por outro lado, o CE exibe um comportamento mais dúctil porque a razão de deformação final CE-CC aumenta mais de 110% para 5% do teor de partículas de borracha e perto de 170% para 15% do teor de partículas de borracha. Portanto, o aumento do teor de borracha diminui a resistência e a rigidez, mas aumenta a ductilidade do concreto. Aumentar o teor de borracha no concreto (de 5% para 15%) também diminui a rigidez e resistência dos pilares de tubos de aço preenchidos com concreto emborrachado, mas aumenta sua ductilidade, em diferentes graus para pilares com seções quadradas/retangulares e circulares. Os autores concluíram que embora a resistência dos tubos curtos de aço preenchidos com CE seja menor do que a dos fabricados com CC, os primeiros apresentam maior ductilidade. Além disso, esse ganho de ductilidade é ainda mais perceptível para pilares de seção circular do que para pilares de seção quadrada ou retangular.

MISHRA; PANDA (2015) realizaram uma investigação experimental sobre as propriedades tanto frescas quanto endurecidas do concreto autoadensável (CA) e do concreto convencional com e sem resíduos de borracha de pneu. Foi realizado um estudo comparativo entre o concreto autoadensável emborrachado (CAE) e concreto emborrachado (CE). Cinco misturas de concreto para o CE e o CAE, com variação de borracha de 0 a 20% por agregado graúdo, foram preparadas. Seis testes foram realizados para concreto fresco, como *slump flow*, T500, J-ring, V-funnel, L-box e U-box. Testes de resistência à compressão, à flexão e à tração foram realizados para conhecer as propriedades de endurecimento dos corpos de prova. Os resultados mostraram que, à medida que a substituição da quantidade de borracha aumenta, a

resistência diminui em todas as idades, o que foi corroborado com o relatado por (PANDA; PARHI; JENA, 2012). Ainda, a resistência à compressão, tração e flexão do CAE é maior do que no CE, o que é justificado pelo fato que o CA tem adição do aditivo superplastificante que contribui para o aumento da sua resistência. A substituição de 5% de borracha apresentou maior resistência do que outra substituição em qualquer idade de cura. À medida que a substituição da borracha aumenta, a resistência diminui tanto em CE quanto em CAE. Concluído que a adição de superplastificante no CA confere um aumento em todas as resistências nas idades iniciais. Além disso, a resistência à compressão, flexão e tração do CAE é maior do que a do CE em todas as idades de cura. Notavelmente, a substituição de 5% de borracha no concreto autoadensável demonstrou maior resistência em todos os ensaios em comparação com outras substituições de borracha.

ELCHALAKANI *et al*. (2018a) exploraram experimentalmente o uso de tubos de aço formados a frio com revestimento simples e duplo de concreto emborrachado (CE) como possíveis alternativas para aplicações, como pilares em edifícios em zonas sísmicas ativas, postes de segurança e barreiras flexíveis a beira da estrada. A borracha utilizada no estudo foi tratada em uma solução com 10% de hidróxido de sódio (NaOH) e foi substituída parcialmente do peso dos agregados graúdos, nas proporções 0, 15 e 30%. Para o ensaio de resistência à compressão, foram moldados corpos de prova (CP's) cilíndricos de 100 × 200 mm de concreto, 12 colunas do tipo tubular de pele dupla preenchida com concreto (TPDPC) e 3 colunas do tipo tubular de pele preenchida com concreto (TPPC). Os resultados indicaram que a substituição dos agregados por borracha causou diminuição da resistência à compressão dos CP's de concreto, o que foi corroborado com o relatado por (SINKHONDE *et al*., 2021b; WANG; LEE; CHOU, 2022), sendo a resistência para 30% de substituição igual a 14,4 MPa e de 24,95 MPa para 15%, ambos menores que a resistência do concreto de referência, que foi de 50,3 MPa. Os tubos preenchidos com concreto emborrachado apresentaram menor resistência à compressão em comparação aos tubos preenchidos com concreto convencional. As colunas TPDPC preenchidas com concreto emborrachado e espessura externa mais fina de 2 mm apresentaram ductilidade maior que as colunas que possuíam espessura de 5 mm, observando-se que a ductilidade aumenta com o aumento do índice de esbeltez. Os autores concluíram que o processo de pré-tratamento de borracha foi bem-sucedido na criação de amostras uniformes e evitaram

ISSN 2178-6925

que as partículas de borracha flutuassem para a superfície do concreto. Foi possível atingir uma resistência à compressão de 25 MPa para o concreto com 15% de partículas de borracha, sendo o mínimo para aplicações estruturais. Além disso, o confinamento de concreto com TPPC ou TPDPC aumenta a ductilidade do concreto convencional.

3.3. Substituição parcial de agregado miúdo e graúdo por borracha de pneus

MUJDECI; BOMPA; ELGHAZOULI (2021) investigaram os efeitos de confinamento por seções tubulares circulares de concreto emborrachado sob carregamento combinado, com foco particular na influência do concreto de enchimento na interação de resistência da seção transversal à flexão. Foram confeccionados concreto com substituição do volume de agregados minerais miúdos e graúdos (0%, 30% e 60%) por borracha. Os autores observaram que uma grande quantidade de energia elástica é acumulada dentro das amostras de tubos de aço preenchidos com concreto emborrachado (TAPCE) e os corpos de prova de TAPCE normalmente exibiram características de confinamento aprimoradas com as razões de resistência confinados e não-confinados aumentando proporcionalmente com o teor de borracha. À medida que a quantidade de borracha substituída no concreto aumenta, sua resistência à compressão e flexão diminui. No entanto, os concretos com alta porcentagem de borracha tendem a apresentar uma capacidade de confinamento melhorada em comparação com o concreto sem borracha. Além disso, os resultados dos testes e as recomendações existentes foram utilizadas em conjunto com uma série de avaliações analíticas, para destacar os principais parâmetros que influenciam o comportamento e propor expressões simplificadas para determinar a resistência da seção transversal sob compressão e flexão combinadas.

WANG *et al*. (2021) analisaram o comportamento axial de corpos de provas (CP's) de seções quadradas e circulares confinados por revestimento de polímero reforçado com fibra (PRF) colado externamente. Foram realizados ensaio de resistência à compressão em 96 CP's de concreto sem borracha e concreto emborrachado, com substituição do volume de agregados minerais miúdos e graúdos (0% e 60%) por borracha, com seções circulares e quadradas, tipo de PRF (carbono ou aramida) e número de camadas de PRF (1, 2 e 3). Quanto aos resultados, para o

ISSN 2178-6925

modo de falha foi observado que todos os CP's confinados com PRF falharam abruptamente devido à ruptura por tração das camisas do PRF. No caso do concreto sem borracha confinado (CSBC), a ruptura tanto do PRF de aramida quanto de carbono sempre ocorreu na região do canto. Com o estudo realizado, foi possível concluir, que a redução da resistência do concreto causada pelo uso de agregados de borracha pode ser efetivamente recuperada através do confinamento com PRF. Espécimes de concreto emborrachado confinado (CEC) exibem deformabilidade significativamente maior e absorvem mais energia do que os espécimes CSBC. A eficácia do confinamento do CEC é maior do que a do CSBC em ambas as seções circulares e quadradas. A eficácia de confinamento do polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) é menor do que a do polímero reforçado com fibra de aramida (PRFA), e para o mesmo nível de confinamento de PRF, as seções quadradas PRFA e CEC apresentam maior deformabilidade do que as seções circulares com uma redução aceitável de resistência. A razão de dilatação secante do CEC se estabiliza em torno de 0,4, o que torna adequado para o desenvolvimento de elementos de alta resistência e alta deformabilidade sob cisalhamento.

RAFFOUL *et al*. (2016) investigaram experimentalmente o comportamento do concreto emborrachado (CE) com alto teor de borracha em substituição aos agregados miúdos e graúdos, de modo a aproveitar plenamente as propriedades mecânicas da borracha vulcanizada. Foram analisadas as propriedades frescas e a resistência à compressão uniaxial de curto prazo de 40 misturas de CE. As propriedades frescas dessas misturas mudaram significativamente com adição da borracha e, portanto, a mistura foi ajustada para obter um bom fluxo e nenhuma segregação. Concluíram que maiores teores de borracha reduzem a trabalhabilidade do concreto (KARUNARATHNA *et al*., 2021; MAVROULIDOU; FIGUEIREDO, 2010; ALSAIF *et al*., 2018a), a densidade do concreto endurecido (HARON *et al*., 2018; ALSAIF *et al*., 2018b), e a resistência à compressão (XU; BOMPA; ELGHAZOULI, 2020; WANG *et al*., 2020; BOMPA; ELGHAZOULI, 2017, 2020; XU *et al*., 2018; ALSAIF *et al*., 2019b). A resistência do concreto parece ser mais influenciada pelo volume geral de borracha do que pelo tipo de substituição da borracha (substituição de agregados graúdos ou miúdos). No entanto, as propriedades frescas do CE foram ligeiramente inferiores em altos níveis de substituição de agregados miúdos. A substituição combinada de agregados miúdos

ISSN 2178-6925

e graúdos ajuda a alcançar altos teores de borracha com influência mínima na resistência e trabalhabilidade.

SGOBBA *et al*. (2015) realizaram uma investigação abrangente de corpos de prova de concreto modificados usando partículas de borracha obtidas de pneus em fim de vida. Diferentes tipos de misturas com diferentes porcentagens de partículas de borracha como substituto parcial de agregados naturais foram estudadas, utilizando e comparando misturas com diversos tipos de adição e tratamento superficial. Um extenso programa de testes de superfície com diferentes soluções químicas foi conduzido pelos autores, com o objetivo de minimizar os efeitos de degradação observados no concreto emborrachado. De acordo com a análise microestrutural realizada, os resultados obtidos apontam a má adesão entre a pasta de cimento e as partículas de borracha responsáveis pela perda de resistência em comparação com uma mistura de controle simples, mas também demonstram uma tendência decrescente da resistência à compressão após 60 dias de envelhecimento e a baixa durabilidade revelada por um fenômeno de fissuração difusa. Os ensaios de laboratório também revelaram fenômenos de fissuração e delaminação em corpos de prova de concreto endurecido curados em condições úmidas em idade média, que nunca foram comentados na literatura. Por fim, foi possível observar, que a resistência à compressão diminui com o aumento do teor de borracha. Além disso, foi observado um desempenho mecânico mais estável na mistura de concreto emborrachado com superfície de partículas revestidas com látex, provavelmente devido à sua ação impermeável na redução da quantidade de água responsável pelo inchamento.

HALL; NAJIM (2014) realizaram um estudo para determinar a compatibilidade de misturas otimizadas com partículas de borracha para aplicações estruturais usando vigas reforçadas com aço. As partículas de borracha utilizadas foram pré-revestidas por argamassa para melhorar as propriedades mecânicas e tenacidade. O ensaio de arrancamento foi realizado para comparar os comportamentos de deslizamento da ligação em concreto convencional emborrachado (CCE) e concreto autoadensável emborrachado (CAE). Dos resultados obtidos, observou-se que, a substituição dos agregados de borracha pré-revestidos com argamassa resultou em uma diminuição da resistência máxima de aderência à armadura. No entanto, os valores do coeficiente de aderência excederam 2,5 para as misturas, o que representa uma boa condição de

ISSN 2178-6925

aderência. A substituição das partículas de borracha causou um aumento na penetração de íons cloreto tanto para o CCE estrutural quanto para o CAE. O aumento na dimensão de energia fractal foi proporcionalmente semelhante para CCE (cerca de 9%) e CAE (aproximadamente 10%), sugerindo que as mudanças na dissipação de energia na interface concreto-aço em concretos emborrachados são causadas por um mecanismo semelhante e talvez diretamente relacionado ao módulo de elasticidade, E dos agregados de borracha. Os autores concluem que o CCE estrutural poderia ser usado para elementos estruturais internos com baixa umidade do ar, enquanto o CAE estrutural poderia ser usado na fundição de elementos internos com umidade moderada do ar e elementos externos protegidos da chuva.

HALL; NAJIM; HOPFE (2012) caracterizaram experimentalmente as propriedades termofísicas de materiais de concreto emborrachado (CE), investigando a influência do projeto básico da mistura (queda alvo), porcentagem em peso de substituição de borracha triturada (BT) e tipo de substituição de agregado, ou seja, substituição apenas do agregado graúdo, apenas do agregado miúdo e substituição combinada de ambos, miúdo e graúdo, em proporções iguais. Foram testados três tipos de projetos de mistura de CE com base em diferentes valores de queda desejados. Cada nível de queda foi associado a diferentes porcentagens de substituição do agregado de borracha triturada (10%, 20% e 30%) para substituições de finos, graúdos e ambos, além de uma mistura de controle com 0% de substituições. Isso resultou em trinta diferentes combinações de misturas. Para cada projeto, foram preparadas duas lajes de dimensões 300 × 300 mm e espessura típica de 50 mm. A média de duas leituras foi obtida para cada amostra de laje, tanto no estado saturado quanto no estado seco em estufa. As características termofísicas dos materiais CE são bastante incomuns, uma vez que o efeito da substituição da borracha granulada parece ser uma redução na condutividade térmica, mas um aumento na capacidade de calor. Outro efeito interessante da substituição da borracha é que o decréscimo térmico permanece quase constante em todos os casos, enquanto o intervalo de tempo associado aumenta, mas o valor U diminui. Um aumento na porcentagem de substituição de borracha parece causar uma redução significativa e proporcional no fluxo de calor da superfície interna, chegando a uma redução de quase 1 W/m^2 K com substituição de 30% do grosseiro ou substituição de fino e grosso em todas as três classes de queda. Conclui-se que a substituição do miolo de borracha por agregado mineral no concreto

ISSN 2178-6925

parece causar uma redução significativa na condutividade térmica. Além de que, à medida que a porcentagem em peso de adição de BT aumenta, há um efeito maior dependente da umidade na condutividade térmica do estado saturado devido ao aumento da porosidade aparente causada pelo aprisionamento de ar.

POLYDOROU *et al*. (2018) investigaram a incorporação dos resíduos de borracha de pneu no concreto visando produzir uma mistura adequada de concreto para a fabricação de guarda-corpos em estradas. Uma mistura de concreto emborrachado (CE) com substituição de 60% do volume do agregado por partículas de borracha foi investigada. O comportamento do concreto em um guarda-corpo foi simulado computacionalmente por meio do *software* ANSYS LS-DYNA, utilizando o modelo RHT/CONC-35, que consegue representar o material sob carregamento dinâmico. Foi realizada uma simulação de uma barreira de segurança rodoviária de tamanho padrão (largura da base = 414 mm, largura da superfície superior = 243 mm e altura = 813 mm). A barreira foi submetida a um carregamento concentrado gerado pelo impacto de uma esfera de aço (diâmetro da esfera = 100 mm), com velocidade de 33,33 m/s. Foi computada uma deformação máxima de 1,1661 mm, sendo experimentado em t = 0,0675 segundos, 15 milissegundos após o impacto da esfera na barreira de concreto emborrachado reforçado com fibra de aço. Notou-se que após o impacto da esfera, a barreira continuou oscilando até encontrar um novo arranjo de equilíbrio. Os autores concluem que a investigação experimental revelou que as propriedades das partículas de borracha podem ser cruciais no desenvolvimento de misturas de CE bem-sucedidas, portanto, recomenda-se o desenvolvimento de métodos apropriados para determinar as propriedades das partículas de borracha.

ELGHAZOULI *et al*. (2018) realizaram uma investigação experimental sobre o comportamento cíclico de elementos de concreto armado com incorporação de partículas de borracha de pneus. As partículas de borracha foram utilizadas para substituir os agregados miúdos e graúdos nas proporções de 0%, 45% e 60%. Corpos de prova (CP’s) foram desenvolvidos com o objetivo de simular colunas de uma ponte. Além dos CP’s com armadura e com confinamento, foram moldados CP’s cilíndricos e cúbicos para analisar as resistências à compressão e à tração. Em comparação com elementos convencionais de concreto armado, os testes mostraram que as amostras de concreto armado com borracha apresentam comportamento de esmagamento

ISSN 2178-6925

suave, levando a propriedades favoráveis de ductilidade e dissipação de energia. Os corpos de prova com 45% de partículas de borracha, sem confinamento e sem carga axial, apresentaram rigidez 30% maior que os corpos com 60% de borracha, também sem carga axial e sem confinamento. Enquanto, os corpos de prova com 45% de borracha com baixa carga axial e sem confinamento, apresentaram rigidez 10% maior que seus equivalentes com 60% de borracha. Mostrando que quanto maior a quantidade de borracha, menor a rigidez do concreto, o que é consistente com o relatado por (RAFFOUL *et al*., 2017). Por fim, é demonstrado que membros de concreto armado emborrachados podem oferecer um bom equilíbrio entre capacidade de flexão e ductilidade em comparação com membros de concreto armado convencionais, particularmente para baixos níveis de cargas axiais.

BOMPA; ELGHAZOULI (2019) avaliaram a fluência e a resistência à compressão de longo-prazo de concretos com e sem confinamento com polímero reforçado com fibra (PRF), com incorporação de borracha de pneu reciclada, bem como do concreto convencional (CC). Foi realizada a substituição de 60% dos agregados minerais miúdos e graúdos por partículas de borracha. As medidas de confinamento externo por meio de PRF recuperaram uma proporção significativa da resistência perdida devido à presença de borracha e melhoraram ainda mais as características de deformação. Em relações tensão-resistência dentro da faixa de fluência linear, cerca de um ano após o carregamento, as deformações de fluência do concreto convencional de alta resistência foram 35% inferiores às dos elementos de concreto com borracha. Para a mesma relação tensão-resistência, as deformações de fluência do concreto com borracha confinado com PRF foram maiores do que as do concreto com borracha não confinado por um fator de 2,80. Por fim, os autores relataram que a avaliação cooperativa indicou que o Eurocódigo 2 oferece estimativas relativamente conservadoras do coeficiente de fluência para relações tensão-resistência dentro da faixa de fluência linear para concreto convencional de alta resistência e concreto confinado com borracha. No entanto, fornece estimativas demasiado conservadoras para o concreto emborrachado, especialmente porque a sua resistência do concreto está fora dos intervalos do modelo codificado.

ALSAIF *et al*. (2019a) avaliaram o desempenho de congelamento e descongelamento de concretos emborrachados reforçados com fibras de aço para

ISSN 2178-6925

utilização em pavimentos de concreto flexível. Quatro misturas de concreto diferentes foram preparadas, incluindo fibras de aço e partículas de borracha, sendo esta última usada como substitutos parciais dos agregados miúdo e graúdo nas proporções de 30% ou 60% em volume. O concreto com partículas de borracha apresentou maior dano em relação a descamação superficial do concreto e a separação de partes da argamassa. Os agregados de borracha podem neutralizar o efeito de congelamento e descongelamento, mesmo em concretos altamente porosos, devido à sua baixa rigidez, que oferece menor resistência à expansão. Além disso, a introdução de partículas de borracha aumenta a quantidade de vazios no concreto criando um sistema de liberação de pressão durante o congelamento-descongelamento. Enquanto os corpos de prova de concreto convencional falharam abruptamente, os corpos de prova com adição de fibras e com adição de partículas de borracha continuaram aguentando cargas de flexão mesmo após a fissuração. O módulo de resistência à flexão diminui com o aumento da quantidade de partículas de borracha. Foi demonstrado que os concretos com fibras e substituição de agregados por partículas de borracha conseguem passar por 56 ciclos de congelamento e descongelamento com a descamação aceitável e sem apresentar danos internos e perda de performance. A presença de fibras diminui a perda de resistência à flexão, que ocorre devido a adição de partículas de borracha. Os corpos de prova que foram submetidos a ciclos de congelamento e descongelamento não apresentaram diminuição significativa de suas propriedades mecânicas tornando-os bons candidatos para pavimentos expostos a ciclos de congelamento e descongelamento.

3.4. Tratamentos utilizados na borracha de pneus com melhor desempenho

POLYDOROU *et al*. (2020) estudaram o uso de resíduos de pó de pedreira (RPP) no pré-tratamento de partículas recicladas de borracha de pneus, utilizadas como substitutos de agregados em concreto, visando transformar sua superfície de repelente de água (hidrofóbica) para propensa a atrair água (hidrofílica). O pré-tratamento das partículas de borracha foi realizado por revestimento da superfície com uma pasta, composta por RPP e água. Foi adotado uma mistura de concreto emborrachado reforçado com fibra de aço (CERFA) com 60% de substituição em volume do agregado por partículas de borracha recicladas de pneus. Os resultados do

ISSN 2178-6925

primeiro conjunto de misturas indicaram que o pré-tratamento RPP foi capaz de aumentar a resistência à compressão de 28 dias da mistura de controle em mais de 300%. Os resultados do segundo conjunto indicaram um aumento de 276% da resistência à compressão aos 28 dias e 282% da resistência à compressão de 7 dias. O pré-tratamento com RPP melhorou a capacidade da borracha de absorção de água que posteriormente reduziu a formação geral de vazios dentro do CERFA. Com isso, foi concluído que o pré-tratamento foi bem sucedido em reverter a superfície da borracha de hidrofóbica para hidrofílica. Ao eliminar a hidrofobicidade, a repelência de fluidos pelas partículas de borracha e a consequente formação de poros excessivos de ar não ocorrem durante a mistura, assim, reduzindo significativamente a porosidade do concreto emborrachado e aumentando a densidade do material.

MOHAMMADI; KHABBAZ; VESSALAS (2016) realizaram o tratamento das partículas de borracha com solução de hidróxido de sódio (NaOH) em volume de 150 litros com pH de 14 e na concentração de 10%. As partículas de borracha foram colocadas em diferentes recipientes contendo a solução saturada de NaOH preparada. O volume da solução modificadora em cada recipiente foi ajustado para ser 10 vezes maior que o volume da borracha. Posteriormente, foram preparados cinco recipientes com 30 litros de NaOH saturado e colocados 3 litros (3,45 kg) de borracha triturada em cada recipiente. Logo depois, as misturas de borracha e a solução foram agitadas regularmente para garantir um tratamento uniforme das partículas de borracha. Em comparação com a borracha não tratada, as amostras preparadas com borracha otimizada com tratamento com hidróxido de sódio apresentaram resistência à compressão e à flexão 25 e 5% maiores, respectivamente.

MOHAMMADI; KHABBAZ; VESSALAS (2014) investigaram os efeitos da aplicação de um método inovador de tratamento de borracha, denominado de imersão em água, nas propriedades frescas e endurecidas do concreto emborrachado (CE). Os resultados indicaram melhoria nas propriedades frescas do CE preparado com imersão da borracha em água, em comparação com o concreto preparado com a borracha não tratada. Os resultados apresentados denotam que a borracha tratada apresentou menor teor de ar e maior massa por volume em relação às misturas contendo borracha sem tratamento. Amostras contendo borracha tratada preparada pelo método de imersão em água apresentaram resistência à compressão e flexão 22% e 8% maior,

ISSN 2178-6925

respectivamente, em comparação com a borracha não tratada. Concluíram que o método aplicado melhorou significativamente a ligação entre a borracha e a pasta de cimento. Além disso, bloqueou o início precoce de rachaduras internas devido à ligação fraca da borracha e da pasta.

ELCHALAKANI *et al*. (2018b) analisaram o efeito do confinamento com tubos de aço, de camada única e de dupla camada, nas propriedades do concreto emborrachado. Foram produzidas três misturas de concreto, com 0%, 15% e 30% de partículas de borracha, substituindo os agregados. Antes de serem utilizadas no concreto, as partículas de borracha lavadas foram colocadas em solução de 10% de hidróxido de sódio (NaOH) durante 24 horas, a solução foi então drenada e a borracha enxaguada com água até atingir um pH de 7, logo após foram imersas em água até ficarem semi-saturadas. Os resultados mostraram que o pré-tratamento com a solução de NaOH melhorou a aderência da borracha do concreto e reduziu a segregação do concreto devido à inclusão de partículas de borracha. A mistura de concreto emborrachado foi considerada homogênea em todas as camadas dos corpos de prova.

DONG *et al*. (2019a) investigaram o desempenho do concreto com partículas de borracha confinado, sob carga axial, carga de flexão e cargas mistas, revestidas com tubos circulares de aço. As partículas de borracha utilizadas foram tratadas com solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 10% por 24 h e em seguida foram lavadas com água. Foi observado uma distribuição uniforme de borracha e agregados naturais, ou seja, sem segregação ou flutuação em todos os corpos de provas com presença de borracha triturada, o que provou que o pré-tratamento com solução de NaOH e a compactação com haste foram apropriadas para a construção do tubo de aço preenchido com concreto emborrachado.

DONG *et al*. (2019b) exploraram a opção de confinar efetivamente o concreto emborrachado com tubos de aço para obter maior resistência e ductilidade. A borracha utilizada na produção do concreto foi imersa em solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 10% por 24 h, com o objetivo de melhorar a rugosidade da superfície e evitar bolsas de ar devido ao tratamento excessivo. Este método de tratamento foi selecionado para remover efetivamente o óleo e a sujeira da superfície e alterar a morfologia, melhorando assim a ligação entre as partículas de borracha e a matriz do concreto. Dos resultados obtidos, foi possível observar que uma dispersão uniforme das partículas de borracha

foi alcançada através do tratamento com NaOH.

ASLANI *et al*. (2018) analisaram as propriedades do concreto auto-adensável nos estados fresco e endurecido, com substituição de agregados por partículas de borracha de diferentes tamanhos. As partículas de borracha utilizadas na produção do concreto emborrachado foram colocadas em água, inicialmente as partículas foram mexidas por 5 minutos e deixadas em descanso por 12 horas e em seguida mexidas por 5 minutos novamente. Após 24 horas, a água foi drenada e as partículas de borracha foram deixadas em repouso até atingirem as condições de superfície saturada e seca. Os autores concluíram que o tratamento da borracha pelo método de imersão em água mostrou-se muito prático e econômico. Os resultados da tração mostraram uma distribuição uniforme dos agregados resultante de ajustes na dosagem de aditivos superplastificante e modificador de viscosidade para controlar a segregação. Além disso, dado que resultados relativamente bem sucedidos foram alcançados usando o método de imersão em água para o tratamento da borracha, os autores incentivam a investigação de outros métodos de tratamento como o uso da soda cáustica.

4. Conclusão

Os resultados da pesquisa apontam 825 artigos e 68 patentes obtidos a partir das diferentes combinações de palavras-chave utilizadas nas bases de artigos científicos e patentes, o que indica que há um interesse relevante na comunidade científica. Após uma análise minuciosa sobre o tema proposto, isto é, concreto emborrachado, foram reportados 52 artigos e nenhuma patente. De acordo com os artigos estudados, concluiu-se que a utilização do resíduo de borracha de pneus na substituição parcial dos agregados miúdo e/ou graúdo não contribui para a melhoria nas propriedades mecânicas, físicas e reológicas do concreto. Mas, isso colabora para práticas mais sustentáveis e ecologicamente responsáveis, o que torna ainda um desafio para os pesquisadores voltados ao setor da construção civil.

Referências

ALSAIF, A; BERNAL, S. A; GUADAGNINI, M; PILAKOUTAS, K. Durability of steel fibre reinforced rubberised concrete exposed to chlorides, **Construction and Building Materials**, v. 188, pp. 130-142, Nov. 2018b.

ALSAIF, A; BERNAL, S. A; GUADAGNINI, M; PILAKOUTAS, K. Freeze-thaw resistance of steel fibre

reinforced rubberised concrete, **Construction and Building Materials**, v. 195, pp. 450-458, Jan. 2019a.

ALSAIF, A; GARCIA, R; FIGUEIREDO, F. P; NEOCLEOUS, K; CHRISTOFE, A; GUADAGNINI, M; PILAKOUTAS, K. Fatigue performance of flexible steel fibre reinforced rubberised concrete pavements, **Engineering Structures**, v. 193, pp. 170-183, Aug. 2019b.

ALSAIF, A; KOUTAS, L; BERNAL, S. A; GUADAGNINI, M; PILAKOUTAS, K. Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements, **Construction and Building Materials**, v. 172, pp. 533-543, May. 2018a.

ALSHAIKH, I. M. H; BAKAR, B. H. A; ALWESABI, E. A. H; AKIL, H. M. Progressive collapse of reinforced rubberised concrete: Experimental study, **Construction and Building Materials**, v. 226, pp. 307-316, Nov. 2019.

ASLANI, F; MA, G; WAN, D. L. Y; LE, V. X. T. Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, **Journal of Cleaner Production**, v. 172, pp. 1835-1847, Jan. 2018.

AYUB, T; KHAN, S. U; MAHMOOD, W. Mechanical Properties of Self-Compacting Rubberised Concrete (SCRC) Containing Polyethylene Terephthalate (PET) Fibres, **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, v. 46, pp. 1073-1085, 2022.

BOMPA, D. V; ELGHAZOULI, A. Y. Creep properties of recycled tyre rubber concrete, **Construction and Building Materials**, v. 209, pp. 126-134, Jun. 2019.

BOMPA, D. V; ELGHAZOULI, A. Y. Stress-strain response and practical design expressions for FRP-confined recycled tyre rubber concrete, **Construction and Building Materials**, v. 237, pp. 117633, Mar. 2020.

BOMPA, D. V; ELGHAZOULLI, A. Y. Bond-slip response of deformed bars in rubberised concrete, **Construction and Building Materials**, v. 154, pp. 884-898, Nov. 2017.

CHU, L; WANG, S; LI, D; ZHAO, J; MA, X. Cyclic behaviour of beam-column joints made of crumb rubberised concrete (CRC) and traditional concrete (TC), **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, pp. e00867, Jun. 2022.

CINTRA, C. L. D; PAIVA, A. E. M; BALDO, J. B. Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus - Propriedades relevantes,

Cerâmica, São Paulo, v. 60, pp. 69-76, Mar. 2014.

DONG, M; ELCHALAKANI, M; KARRECH, A; FAWZIA, S; ALI, M. S. M; YANG, B; XU, S. Q. Circular steel tubes filled with rubberised concrete under combined loading, **Journal of Constructional Steel Research**, v. 162, pp. 105613, Nov. 2019a.

DONG, M; ELCHALAKANI, M; KARRECH, A; HASSANEIN, M. F; XIE, T; YANG, B. Behaviour and design of rubberised concrete filled steel tubes under combined loading conditions, **Thin-Walled Structures**, v. 139, pp. 24-38, Jun. 2019b.

DONGA, P. D; SHAH, D; BHAVSAR, J. K. Impact Resistance of Waste Rubber Fiber Silica Fume Concrete, **Journal of Civil Engineering and Environmental Technology**, v. 3, n. 4, pp. 274-279, Jan-Mar. 2016.

DUARTE, A. P. C; SILVA, B. A; SILVESTRE, N; BRITO, J; JÚLIO, E; CASTRO, J. M. Tests and design of short steel tubes filled with rubberised concrete, **Engineering Structures**, v. 112, pp. 274-286, Apr. 2016.

ELCHALAKANI, M; HASSANEIN, M. F; KARRECH, A; FAWZIA, S; YANG, B; PATEL, V. I. Experimental testes and design of rubberised concrete-filled double skin circular tubular short columns, **Structures**, v. 15, pp. 196-210, Aug. 2018b.

ELCHALAKANI, M; HASSANEIN, M. F; KARRECH, A; YANG, B. Experimental investigation of rubberised concrete-filled double skin square tubular columns under axial compression, **Engineering Structures**, v. 171, pp. 730-746, Sep. 2018a.

ELGHAZOULI, A. Y; BOMPA, D. V; XU, B; TERAN, A. M. R; STAFFORD, P. J. Performance of rubberised reinforced concrete members under cyclic loading, **Engineering Structures**, v. 166, pp. 526-545, Jul. 2018.

ELSAYED, M; TAYEH, B. A; KAMAL, D. Effect of crumb rubber on the punching shear behaviour of reinforced concrete slabs with openings, **Construction and Building Materials**, v. 311, pp. 125345, Oct. 2021.

ELSAYED, M; TAYEH, B. A; MOHAMED, M; ELYMANY, M; MANSI, A. H. Punching shear behaviour of RC flat slabs incorporating recycled coarse aggregates and crumb rubber, **Journal of Building Engineering**, v. 44, pp. 103363, Jul. 2021.

FENG, W; TANG, Y; HE, W; WEI, W; YANG, Y. Mode I dynamic fracture toughness of rubberised

concrete using a drop hammer device and split Hopkinson pressure bar, **Journal of Building Engineering**, v. 48, pp. 0-15, Jan. 2022.

GOUVEIA, N., Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social, **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, pp.1503- 1510, Jun. 2012.

GUPTA, T; PATEL, K. A; SIDDIQUE, S; SHARMA, R. K; CHAUDHARY, S. Prediction of Mechanical Properties of Rubberised Concrete Exposed to Elevated Temperature Using ANN, **Measurement**, v. 147, pp. 106870, Dec. 2019.

HALL, M. R; NAJIM, K. B. Structural behaviour and durability of steel-reinforced structural Plain/Self-Compacting Rubberised Concrete (PRC/SCRC), **Construction and Building Materials**, v. 73, pp. 490-497, Dec. 2014.

HALL, M. R; NAJIM, K. B; HOPFE, C. J. Transient thermal behaviour of crumb rubber-modified concrete and implications for thermal response and energy efficiency in buildings, **Applied Thermal Engineering**, v. 33-34, pp. 77-85, Feb. 2012.

HARON, Z; JUSLI, E; NOR, H. M; JAYA, R. P; YAACOB, H; YAHYA, K; MOHAMAD, A; YAHYA, M. N. Prediction of Sound Absorption Coefficient for Double Layer Rubberised Concrete Blocks, **International Journal of Engineering & Technology**, v. 7, pp. 704-710, 2018.

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, pp. 128230, July. 2021.

KURZ, M. N; BRANDELLI, T. M; PALIGA, C. M; TORRES, A. S. A potencialidade do uso de resíduo de borracha de pneu em argamassa: análise das propriedades físicas e mecânicas, **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, Oct. 2018.

MAVROULIDOU, M; FIGUEIREDO, J. Discarded tyre rubber as concrete aggregate: A possible outlet for used tyres, **Global NEST Journal**, v. 12, n. 4, pp. 359-367, 2010.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Microestrutura, propriedades e materiais. 3ª ed., São Paulo, IBRACON, 2008.

MISHRA, M; PANDA, K. C. Influence of Rubber on Mechanical Properties of Conventional and Self Compacting Concrete, **Advances in Structural Engineering**, pp. 1785-1794, 2015.

MOHAMMADI, I; KHABBAZ, H. Shrinkage performance of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements, **Cement & Concrete Composites**, v. 62, pp. 106-116, Sep. 2015.

MOHAMMADI, I; KHABBAZ, H; VESSALAS, K. Enhancing mechanical performance of rubberised concrete pavements with sodium hydroxide treatment, **Materials and Structures**, v. 49, pp. 813-827, 2016.

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**, v. 71, pp. 456-471, Nov. 2014.

MUJDECI, A; BOMPA, D. V; ELGHAZOULI, A. Y. Confinement effects for rubberised concrete in tubular steel cross-sections under combined loading, **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 21, n. 2, pp. 1-20, 2021.

OTIENO, M; MUSHUNJE, K. Creep deformation characteristics of rubberised structural concrete, **Construction and Building Materials**, v. 312, pp. 125418, Oct. 2021.

PANDA, K. C; PARHI, P. S; JENA, T. Scrap-Tyre-Rubber Replacement for Aggregate in Cement Concrete: Experimental Study, **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, v. 5, n. 6, pp. 1692-1701, Dec. 2012.

PCZIECZEK, A; EFFTING, C; GOMES, I. R; SCHACKOW, A; HENNING, E. Análise estatística de propriedades mecânicas de argamassas com cinza volante e resíduo de borracha de pneus, **IBRACON de Estruturas e Materiais***,* São Paulo, v. 12, n. 4, pp. 790– 811, Aug. 2019.

PEREIRA, R. R; PAULA, H. M; BONFIM, W. B; SILVA, I. A. C; PINTO, H. S. D. Reciclagem de borracha de pneu e resíduo de concreteira na produção de tijolos de concreto: dosagem e otimização, **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 3, Jan. 2021.

POLYDOROU, T; CONSTANTINIDES, G; NEOCLEOUS, K; KYRIAKIDES, N; KOUTSOKERAS, L; CHRYSOSTOMOU, C; HADJIMITSIS, D. Effects of pre-treatment using waste quarry dust on the adherence of recycled tyre rubber particles to cementitious paste in rubberised concrete, **Construction and Building Materials**, v. 254, pp. 119325, Sep. 2020.

POLYDOROU, T; NEOCLEOUS, K; ILLAMPAS, R; KYRIAKIDES, N; ALSAIF, A; CHRYSOSTOMOU, C; PILAKOUTAS, K; HADJIMITSIS, D. Steel fibre-reinforced rubberised concrete barriers as forgiving infrastructure, In: THE INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE 5TH

INTERNATIONAL FIB CONGRESS, Oct. 2018, Melbourne, Austrália.

RAFFOUL, S; GARCIA, R; MARGARIT, D. E; GUADAGNINI, M; HAJIRASOULIHA, I; PILAKOUTAS, K. Behaviour of unconfined and FRP-confined rubberised concrete in axial compression, **Construction and Building Materials**, v. 147, pp. 388-397, Aug. 2017.

RAFFOUL, S; GARCIA, R; PILAKOUTAS, K; GUADAGNINI, M; MEDINA, N. F. Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation, **Construction and Building Materials**, v. 124, pp. 391-404, Oct. 2016.

SGOBBA, S; BORSA, M; MOLFETTA, M; MARANO, G. C. Mechanical performance and medium-term degradation of rubberised concrete, **Construction and Building Materials**, v. 98, pp. 820-831, Nov. 2015.

SILVA, A. S; NACIF, G. C. L; PANZERA, T. H2; CHRISTOFORO, A. L; BATISTA, F. B; MANO, V. Incorporação de resíduos de borracha em compósitos de matriz polimérica termorrígida, **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 17, n.4, pp. 1158-1165, Mar. 2012.

SILVA, F. M; VAZ, V. V; BARBOSA, L. A. G; LINTZ, R. C. C. Avaliação da resistência mecânica de pisos intertravados de concreto sustentáveis (PICS), **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, Jun. 2017a.

SILVA, T. D; PAULA, H. M; SILVA, D; CARVALHO, I. M; FONTE, J. T; PEREIRA, R. R. Uso de granulado de borracha em substituição parcial ao agregado miúdo na produção de tijolos ecológicos, **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 4, Oct. 2017b.

SILVA, L. S; MOUTA, J. R; COSTA, M. C. B; GOMES, L. G. Concreto com borracha de recauchutagem de pneu para uso em pavimentação de baixo tráfego, **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, Jun. 2019.

SILVEIRA, P. M; ALBUQUERQUE, M. C. F; CASSOLA, S; BORTOLUCCI, A. A; PAULLI, L. D; VILLA, F. M. D. Estudo do comportamento mecânico do concreto com borracha de pneu, **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, pp. 416-428, Jun. 2016.

SINKHONDE, D; ONCHIRI, R. O; OYAWA, W. O; MWERO, J. N. Response surface methodology-based optimisation of cost and compressive strength of rubberised concrete incorporating burnt clay brick powder, **Heliyon**, v. 7, n. 12, pp. e08565, Dec. 2021a.

SINKHONDE, D; ONCHIRI, R. O; OYAWA, W. O; MWERO, J. N. Ductility performance of reinforced

rubberised concrete beams incorporating burnt clay powder, **Heliyon**, v. 7, n. 11, pp. e08310, Nov. 2021b.

VALIZADEH, A; HAMIDI, F; ASLANI, F; SHAIKH, F. U. A. The effect of specimen geometry on the compressive and tensile strengths of self-compacting rubberised concrete containing waste rubber granules, **Structures**, v. 27, pp. 1646-1659, Oct. 2020.

WANG, T. A; LEE, D; CHOU, Y. T. Flexural and compressive behaviours of sustainable AC/RC composite system with various supplementary materials, **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n. 9, pp. 2922- 2936, 2022.

WANG, Z; HAJIRASOULIHA, I; GUADAGNINI, M; PILAKOUTAS, K. Axial behaviour of FRP-confined rubberised concrete: An experimental investigation, **Construction and Building Materials**, v. 267, pp. 121023, Jan. 2021.

WANG, Z; HU, H; HAJIRASOULIHA, I; GUADAGNINI, M; PILAKOUTAS, K. Tensile stress-strain characteristics of rubberised concrete from flexural tests, **Construction and Building Materials**, v. 236, pp. 117591, Mar. 2020.

WERDINE, D; OLIVER, G. A; ALMEIDA, F. A; NORONHA, M. L; GOMES, G. F. Analysis of the properties of the self-compacting concrete mixed with tire rubber waste based on design of experiments, **Structures**, v. 33, pp. 3461–3474, Oct. 2021.

XU, B; BOMPA, D. V; ELGHAZOULI, A. Y; TERAN, A. M. R; STAFFORD, P. J. Behaviour of rubberised concrete members in asymmetric shear tests, **Construction and Building Materials**, v. 159, pp. 361-375, Jan. 2018.

XU, B; BOMPA, D. V; ELGHAZOULI, A.Y. Cyclic stress-strain rate-dependent response of rubberised concrete, **Construction and Building Materials**, v. 254, pp. 119253, Sep. 2020.

YI, O; MILLS, J. E; ZHUGE, Y; MA, X; GRAVINA, R. J; YOUSSF, O. Case study of the structural performance of composite slabs with low strength CRC delivered by concrete truck, **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, pp. e00453, Dec. 2020.

YOUSSF, O; HASSANLI, R; MILLS, J. E; SKINNER, W; MA, X; ZHUGE, Y; ROYCHAND, R; GRAVINA, R. Influence of Mixing Procedures, Rubber Treatment, and Fibre Additives on Rubcrete Performance, **Journal of Composites Science**, v. 3, 2019.

ZHU, X; CHEN, X; LIU, S; LI, S; XUAN, W; CHEN, Y. Experimental study on flexural fatigue

ISSN 2178-6925
performance of rubberised concrete for pavement, **International Journal of Pavement Engineering**, v. 21, n. 9, pp. 1135- 1146, 2020.