ENARC
FOZ DO IGUAÇU-2023

DOSAGEM DE CONCRETOS COM AGREGADOS DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS PELO MÉTODO DO EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL (MEC)

Mix proportioning of concretes with recycled rubber aggregates from tires using the Compressible Packing Method (CPM)

Késsio Raylen Jeronimo Monteiro
Universidade de Brasília | Brasília, DF | eng.kessio@gmail.com

Matheus Galvão Cardoso
Universidade de Brasília | Brasília, DF | matheus-ssdo@hotmail.com

Rodrigo de Melo Lameiras
Universidade de Brasília | Brasília, DF | rmlameiras@gmail.com

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é conduzir estudos preliminares para avaliar a possibilidade de racionalizar o processo de dosagem de concretos com agregados reciclados. O foco está na determinação da compacidade desses agregados e na verificação da teoria que embasa o Método do Empacotamento Compressível (MEC) quando aplicada a agregados reciclados. Foram realizados testes para determinar a densidade de empacotamento de misturas de agregado de borracha com diferentes frações granulométricas de areia. Esses resultados foram posteriormente comparados com os resultados analíticos previstos pelas equações do MEC, demonstrando que a densidade de empacotamento real das misturas se aproxima dos valores estimados pelas equações teóricas. Por fim, utilizando um programa computacional baseado no MEC, realizou-se a simulação da dosagem de concretos e a comparação com concretos previamente definidos por métodos de dosagem convencionais. O procedimento foi bem-sucedido, apresentando uma variação inferior a 4,5% entre as quantidades de agregados definidas pelos dois métodos, e as variações na resistência à compressão foram inferiores a 2,5 MPa.

Palavras-chave: Método de Empacotamento Compressível; Agregado reciclado; Concreto emborrachado.

ABSTRACT

The main objective of this work is to conduct preliminary studies to assess the possibility of rationalizing the proportioning process of concrete with recycled aggregates. The focus is on determining the compactness of these aggregates and verifying the theory that underlies the Compressible Packing Method (CPM) when applied to recycled aggregates. Tests were conducted to determine the packing density of mixtures of rubber aggregate with different particle size fractions of sand. These results were subsequently compared with the analytical results predicted by CPM equations, demonstrating that the actual packing density of the mixtures approaches the values estimated by theoretical equations. Finally, using a computer program based on CPM, concrete proportioning simulations were performed and compared to concretes previously defined by conventional proportioning methods. The procedure was successful, showing a variation of less than 4.5% between the quantities of aggregates defined by both methods, and compressive strength variations were less than 2.5 MPa.

Keywords: Compressible Packing Method; Recycled aggregate; Rubberized concrete.

1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções sustentáveis na construção não é recente, sendo diversos estudos que abordam a utilização ou reutilização de materiais, como é o caso dos agregados de borracha de pneus descartados, que possam reduzir o impacto causado pelo setor (KAZMI *et al*., 2021; SHAHJALAL *et al*., 2021; SENTHIL, SANJITH, 2022; KARIMI *et al*., 2022; JUVERIA *et al*., 2023; e KALOUSH, CAMINHO, ZHU, 2005).

O Método do Empacotamento Compressível (MEC), proposto por Larrard (1999), baseia-se em princípios científicos, observação de fenômenos, levantamento de hipóteses e na criação de modelos matemáticos para representá-los. O MEC está implementado computacionalmente através do *software Bétonlab Pro* que auxilia na otimização das misturas granulares para alcançar as propriedades desejadas do concreto, como resistência e trabalhabilidade (CARDOSO; LAMEIRAS, 2020). O *software* tem como propósito simular dosagens otimizadas de concretos e argamassas por meio de correlações previamente programadas. Além disso, oferece a flexibilidade de incluir novos materiais, contanto que esses sejam devidamente caracterizados. Dessa maneira, é possível efetuar simulações de dosagens utilizando materiais regionais.

Diante do exposto, este estudo consiste nas primeiras análises para produção de concretos com ABR utilizando dosagem cientifica. Portanto, tem-se como objetivo realizar estudos preliminares para avaliar a possibilidade de racionalização do processo de dosagem desse material por meio do MEC.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo teve como objetivo avaliar a utilização das misturas de areia e ABR apresentam correspondência entre os valores reais e os valores virtuais. Esse procedimento foi necessário para validar o comportamento do ABR como agregado para concretos e argamassas, uma vez que as equações apresentadas estão implementadas no MEC e num *software* para dosagem científica de concretos baseado no MEC. Além disso, um banco de dados foi criado no programa para simular proporções usando ambos os tipos de agregados, que foram comparadas às proporções experimentais pré-determinadas por métodos tradicionais de dosagem.

2.1 DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO PARA PARTÍCULAS MENORES QUE 100µM

Para determinar a densidade de empacotamento do aglomerante, seguimos o procedimento descrito por Pereira (2021), conforme a Figura 1. Utilizamos um misturador planetário de 2 litros, no qual colocamos 350 gramas do material analisado e uma quantidade inicial de 30 mililitros de água foi introduzida, sendo a mistura agitada em baixa velocidade durante 1 minuto. Em seguida, adições de água foram efetuadas de forma sequencial, enquanto o material ainda estava sendo agitado. Essas adições prosseguiram até que se pudesse observar a formação do estado capilar no material, indicando que o nível de umidade desejado havia sido alcançado. O resultado do ensaio de demanda de água é necessário para compor o banco de dados do *software*, não sendo comparados com valores simulados. Foi utilizado o cimento CPIV-RS da Ciplan como aglomerante no estudo.

Figura 1: Procedimento para realização do ensaio de demanda d'água.



Fonte: Pereira (2021).

2.2 DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO PARA PARTÍCULAS MAIORES QUE 100µM

O equipamento para o ensaio de compactação e vibração, conforme ilustrado na Figura 2, consistiu na utilização de um volume padrão de agregado, inserido em um tubo cilíndrico metálico de 150 milímetros de diâmetro e 226,50 milímetros de altura, preso sobre uma mesa vibratória. Durante o processo, a amostra é comprimida por um peso cilíndrico maciço de 149 milímetros de diâmetro e 19,71 quilogramas. Em seguida, a amostra é vibrada por um período de 2 minutos (PEREIRA, 2021).

Figura 2: Aparato do ensaio de compactação e vibração.



O valor experimental essencial para a utilização do *software* consiste na determinação da densidade de empacotamento real de cada classe de agregado, por fração granulométrica. Desta forma, para realizar o ensaio, primeiramente, a areia e o ABR foram divididos em faixas granulométricas, conforme apresentado na Tabela 1. Optou-se por utilizar apenas uma faixa granulométrica do ABR, visto que essa faixa representa aproximadamente 70% do material.

Tabela 1: Frações granulométricas dos agregados.

Passante (mm)	Retido (mm)	Nomenclatura
2,36	1,18	Areia 1 (A1)
1,18	0,6	Areia 2 (A2)
0,6	0,3	Areia 3 (A3)
0,3	0,15	Areia 4 (A4)
0,6	0,3	ABR 1 (ABR1)

Foram pesados 2.000 gramas de areia de cada uma das frações granulométricas (A1, A2, A3, A4) e submetidos ao ensaio. Além disso, para verificar a validade do MEC ao utilizar o ABR, substituiu-se a massa de areia nos teores de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% pelo ABR, conforme apresentado na Tabela 2. Essas misturas foram então submetidas ao ensaio de compactação e vibração e após finalizado o ensaio de cada mistura o material era descartado. É importante ressaltar que a massa de areia substituída foi corrigida pelo equivalente em volume do ABR. Posteriormente, os valores reais de empacotamento foram comparados com os valores virtuais encontrados para as misturas.

Tabela 2: Quantidade de material para cada combinação de agregados submetidos ao ensaio.

Material	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5	Mix 6
Areia (A1, A2, A3 e A4)	2000 g	1600 g	1200 g	800 g	400 g	0 g
ABR (ABR1)	0 %	20 %	40 %	60%	80 %	100 %

2.3 SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DE DOSAGEM UTILIZANDO O *BÉTONLAB PRO*

Para realizar a simulação de dosagem utilizando o programa, foi preciso conhecer algumas características dos agregados e do aglomerante utilizados. Os ensaios de caracterização necessários para a utilização do *software* foram os listados na Tabela 3.

Para considerar a interação no *software* entre o aglomerante e os agregados, realizou-se dosagens com diferentes proporções dos materiais e mediu-se a resistência à compressão dos concretos produzidos. Inicialmente, foram criados dois traços usando o método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992). Posteriormente, definiu-se mais dois traços, nos quais foram substituídos 5% em volume da areia pelo ABR. Esses traços são apresentados na Tabela 4 e foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão,

seguindo a NBR 5739 (ABNT, 2018). Esse procedimento de calibração do *software* gera dois coeficientes, conhecidos como *p* e *q*, para cada classe de agregado.

Tabela 3: Propriedades dos materiais necessárias para criação do banco de dados no programa *Bétonlab Pro*.

Propriedades	Cimento	Areia	ABR
Massa específica	ABNT NBR 16605 (2017)	NBR NM 52 (2009)	NBR NM 52 (2009)
Absorção de água	-	NBR NM 30 (2001)	NBR NM 30 (2001)
Granulometria	Granulometria a laser	NBR NM 248 (2003)	NBR NM 248 (2003)
Densidade de empacotamento	Demanda d'água	Compressão e Vibração	Compressão e Vibração
Resistência à compressão com areia padrão – IPT	ABNT NBR 7215 (2019)	-	-
Resistência à compressão com areia do estudo	ABNT NBR 5739 (2018)	-	-
Composição química	ABNT NBR 16697 (2018)	-	-

Tabela 4: Traços de referência para avaliação da interação entre o cimento e os agregados por meio da resistência à compressão.

Traço	Cimento (kg/m³)	Areia (kg/m³)	ABR (kg/m³)	Água (kg/m³)
A	482,40	1447,19	0	274,97
B	248,94	1618,08	0	291,26
C	485,2	1382,8	32,2	270,77
D	250,7	1548,1	36,0	286,23

Usando o *software Bétonlab Pro 3*, foram simulados dois traços com as quantidades de cimento e água pré-determinadas, mantendo uma proporção de 90% de areia e 10% de ABR. É importante destacar que, ao contrário dos métodos tradicionais de dosagem, o *software* utiliza o MEC para determinar a quantidade ideal de agregados e que o procedimento adotado consiste em somente uma das possibilidades mais simplificadas de utilização do *software*. Posteriormente, essas quantidades de agregados foram avaliadas. As informações inseridas para a definição das quantidades de agregados estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Informações inseridas no *software* para o processo de simulação de dosagem.

Cimento (kg/m³)	Areia (kg/m³)	ABR (kg/m³)	Água (kg/m³)
488,0	90%	10%	266,5
252,5	90%	10%	281,1

Para avaliar a simulação de dosagem foram definidos aleatoriamente dois traços, utilizando o método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992), com as mesmas quantidades de cimento, água e proporção de agregados que estão contidos na Tabela 5. Esses traços são apresentados na Tabela 6 e foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, seguindo a NBR 5739 (ABNT, 2018). Foram utilizados para verificar a concordância entre a simulação realizada pelo *software* e os métodos tradicionais de dosagem, bem como para avaliar a capacidade em estimar com precisão os resultados de resistência à compressão.

Tabela 6: Traços de referência para avaliar a simulação de dosagem realizada pelo *software*.

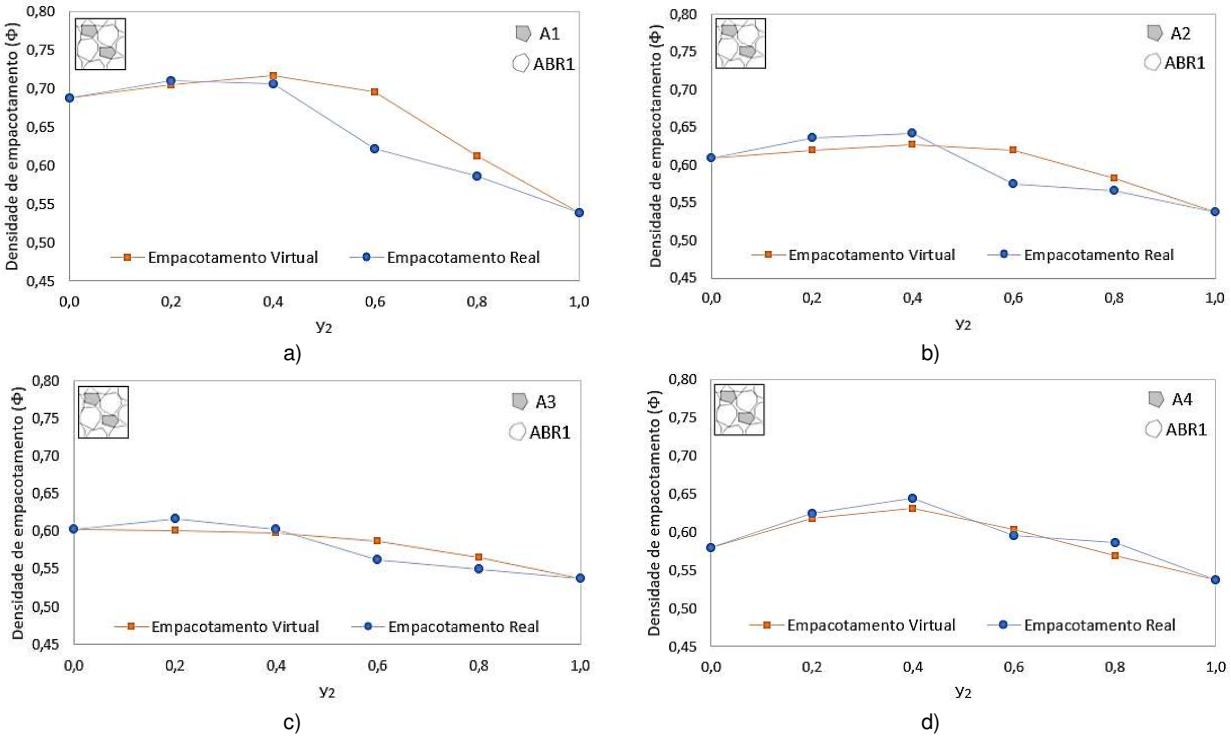
Traço	Cimento (kg/m³)	Areia (kg/m³)	ABR (kg/m³)	Água (kg/m³)
REF1	488,0	1317,6	64,8	266,5
REF2	252,5	1477,1	72,6	281,1

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS BINÁRIAS

Os valores experimentais dos ensaios de compactação e vibração, e os virtuais da densidade de empacotamento das misturas binárias são apresentados na Figura 3. Nas duas primeiras combinações, os diâmetros médios das areias (A1 e A2) eram maiores que do ABR ($d_1 > d_2$), enquanto nas duas últimas, os diâmetros médios das areias (A3 e A4) eram iguais ou menores que o do ABR ($d_1 \leq d_2$). Observou-se que a densidade de empacotamento atingiu valores maiores para um mesmo protocolo de ensaio quando uma classe de material apresentava o diâmetro característico do agregado maior que o da outra classe, com a combinação A1 e ABR1 apresentando valores maiores que A2 e ABR1. Este resultado também foi verificado por Cardoso (2020), que concluiu que quanto maior a diferença entre os diâmetros das partículas, maior será o adensamento da mistura.

Figura 3: Resultados experimentais da densidade de empacotamento para as combinações: a) A1 e ABR1; b) A2 e ABR1; c) A3 e ABR1 e; d) A4 e ABR1.



No caso das combinações A3 e ABR1 e A4 e ABR1, em que na primeira o diâmetro médio dos agregados é semelhante ($d_1 = d_2$) e na segunda o diâmetro da areia é menor que o do ABR ($d_1 < d_2$), observou-se que a densidade de empacotamento foi menor em comparação com as situações anteriores.

Os erros médios entre os valores reais e experimentais estão apresentados na Tabela 7. No geral, eles apresentaram resultados inferiores a 5%. Apenas dois pontos apresentaram erros maiores: mistura com 40% de areia A1 e 60% de ABR, que apresentou um erro igual a 11,74% e mistura com 40% de areia A2 e 60% de ABR, que apresentou um erro igual a 7,69%. Estes erros maiores podem ter sido obtidos por uma falha no procedimento experimental, uma vez que o ABR tem uma tendência a sair do tubo cilíndrico quando inicia o procedimento de vibração. Desprezando estes dois pontos e considerando apenas as misturas binárias (desprezando os casos de 0 e 100% de areia e ABR), o erro médio obtido nas densidades de empacotamento foi de 2,01%. Este valor sugere que o ABR possui um comportamento que pode ser previsto no MEC, o que pode indicar ser possível utilizar esta teoria para a dosagem de concretos utilizando ABR.

Tabela 7: Erros entre valores teóricos e experimentais para densidades de empacotamento de misturas binárias entre diferentes faixas granulométricas de areia e ABR.

MIX	A1	A2	A3	A4
1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2	0,82%	2,51%	2,47%	1,10%
3	1,63%	2,16%	0,69%	2,01%
4	11,74%	7,69%	4,22%	1,45%
5	4,55%	2,92%	2,69%	2,92%
6	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

3.2 SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DOSAGEM PELO *SOFTWARE BÉTONLAB PRO 3*

Os resultados dos ensaios de caracterização realizados, que são necessários para a utilização do *Bétonlab Pro 3,* são apresentados nos Tabela 8, 9 e 10. Após a inserção dos dados mencionados, o *software* calcula os parâmetros *p* e *q* para cada um dos agregados empregados, resultando em valores de 0,7632 e 0,00546 para a areia, e 0 e 0,04543 para o ABR, respectivamente. Utilizando o procedimento de simulação de dosagem do software foi possível definir dois traços e suas respectivas projeções de resistência à compressão, sendo eles apresentados na Tabela 11.

Tabela 8: Propriedades do aglomerante CPIV-RS.

Propriedade	Método de ensaio		CPIV-RS
Massa específica (g/cm³)	ABNT NBR 16605 (2017)		2,85
Granulometria (µm)	Granulometria a laser	Diâmetro a 10%	0,89
		Diâmetro a 50%	7,20
		Diâmetro a 90%	22,2
Densidade de empacotamento	Demanda d'água		0,55
Resistência à compressão com areia padrão - IPT (MPa)	ABNT NBR 7215 (2019)	3 dias	26,50
		7 dias	32,72
		28 dias	40,61
Composição química (%)	ABNT NBR 16697 (2018)	Clínquer (%)	95,00

Tabela 9: Propriedades dos agregados.

Propriedade	Método de ensaio		Areia	ABR
Massa específica (g/cm³)	NBR NM 52 (2009)		2,60	1,15
Absorção (%)	NBR NM 30 (2001)		0,58	30
Granulometria (%)	NBR NM 248 (2003)	4,75 - 2,36 (mm)	5,3	0
		2,36 - 1,18 (mm)	14,95	0
		1,18 - 0,6 (mm)	27,55	0
		0,6 - 0,3 (mm)	30,15	100
		0,3 - 0,15 (mm)	19,35	0
		> 0,15(mm)	2,70	0
Resistência à compressão média (MPa)	ABNT NBR 5739 (2018)	A - 28 dias	27,81	
		B - 28 dias	7,14	
		C - 28 dias	23,96	
		D - 28 dias	6,02	

Tabela 10: Valores individuais de densidade de empacotamento dos agregados.

A1	A2	A3	A4	ABR1
0,688	0,610	0,603	0,579	0,538

Tabela 11: Dosagens realizadas pelo programa *Bétonlab Pro.*

Traço	Cimento (kg/m³)	Areia (kg/m³)	ABR (kg/m³)	Água (kg/m³)	F_c 28 dias (MPa)
SIMUL1	488	1264,3	62,1	266,5	22,6
SIMUL2	252,5	1417,2	69,7	281,1	7,3

Ao solicitar que as quantidades de aglomerante e água fossem os mesmos que os dos traços REF1 e REF2, verificou-se que as diferenças entre as quantidades de areia entre os traços variaram em 4,05% entre os traços REF1 e SIMUL1, e em 4,06% entre os traços REF2 e SIMUL2. Além disso, as diferenças entre as quantidades de ABR entre os traços variaram em 4,17% entre os traços REF1 e SIMUL1, e em 3,99% entre os traços REF2 e SIMUL2. As resistências à compressão média, aos 28 dias de idade, dos traços REF1 e REF2 são apresentadas na Tabela 12. Ocorreu uma variação de 1,8 MPa entre os traços REF1 e SIMUL1 e 2,26 MPa entre os traços REF2 e SIMUL2, correspondendo a 8,86% e 44,84%, respectivamente.

Tabela 12: Resultados experimentais das resistências à compressão média dos traços REF1 e REF2.

Traço	Resistência à compressão média aos 28 dias (MPa)
REF1	20,76
REF2	5,04

4 CONCLUSÃO

Neste estudo pode-se verificar que:

1. A substituição da areia pelo ABR precisa ser ajustada considerando o seu volume, sendo definido neste estudo um procedimento para viabilizar o ensaio de vibração e compressão.
2. A utilização do ABR como agregado para concretos e argamassas no MEC e no *software* foi validada pelo modelo matemático de composição de misturas binárias, apresentando erro máximo de 11,74%.
3. Foi verificado que no processo de compactação, a seleção dos diâmetros dos materiais tem um impacto substancial na densidade geral das misturas. É preferível utilizar materiais com diferentes tamanhos de partículas.
4. Foi possível realizar a simulação de dosagens no *software* utilizando o ABR, com variações entre a quantidade de cada classe de material não excedendo 4,5%, em relação aos modelos tradicionais de dosagem.

5. O *Bétonlab Pro* conseguiu identificar adequadamente a redução da resistência à compressão associada ao uso do ABR, o que permite considerar a viabilidade da utilização de outros agregados reciclados na composição de concretos e argamassas utilizando o MEC.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Gabriella Puente de. **Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado miúdo de resíduo de concreto**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - PPEC, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação de absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

CARDOSO, Matheus Galvão. **Contribuições para dosagem de concretos autoadensáveis reforçados com fibras pelo método do empacotamento compressível**. 2020. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – PECC, Universidade de Brasília, 2020.

CARDOSO, M. G.; LAMEIRAS, R. M. **Estudo da dosagem de concreto autoadensável reforçado com fibras adotando o Método do Empacotamento Compressível (MEC)**. A aplicação do conhecimento científico na engenharia civil 2. Ed. Atena. Ponta Grossa, 2020. ISBN 978-65-5706-170-1.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientifi c approach**. London: 1999. ISBN 1482272059.

JUVERIA, F. *et al*. Impact of stabilisation on mechanical properties of recycled concrete aggregate mixed with waste tyre rubber as a pavement material. **Case Studies in Construction Materials** 18. 2023.

KALOUSH, K.; CAMINHO, G. B.; ZHU, H. **Properties of crumb rubber concrete**. In: Concrete Materials 2005, 2005. cap. 84th Annual Meeting of the Transportation-Research-Board, p. 8-14.

KARIMI, P. *et al*. Impact of polypropylene fibers on the mechanical and durability characteristics of rubber tire fine aggregate concrete. ***Materials*** 15.22. 2022.

KAZMI, S. *et al.* Application of waste tire rubber and recycled aggregates in concrete products: a new compression casting approach. ***Resources, Conservation and Recycling*** 167. 2021.

PEREIRA, Mara Monaliza Linhares. **Avaliação de desempenho mecânico e de durabilidade em concretos autoadensáveis com resíduo de marmoraria**. 2021. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – PECC, Universidade de Brasília, 2021.

SHAHJALAL, M. *et al*. Flexural response of fiber reinforced concrete beams with waste tires rubber and recycled aggregate. ***Journal of Cleaner Production*** 278. 2021.

SENTHIL, M. SANJITH, M. Experimental investigation of concrete with recycled tyre-rubber waste as fine aggregate material. **Materiali in Tehnologije.** 2022. Vol.56.