



## CONCRETO PERMEÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS: UMA REVISÃO

João Marcos Bosi Mendonça de Moura<sup>1</sup>, Ivone Gohr Pinheiro<sup>2</sup> e Abraão Bernardo Rohden<sup>3</sup>

**Resumo:** O aproveitamento de resíduos no concreto permeável pode reduzir a poluição ambiental assim como contribuir para a diminuição do consumo de matéria prima virgem e da disposição final de resíduos. Neste estudo de revisão analisou-se o resultado de pesquisas sobre concreto permeável com incorporação de resíduos como agregados ou finos. Os artigos selecionados foram buscados em periódicos científicos da base de dados do Science Direct e Scielo entre o ano de 2013 e 2020. A busca resultou em 69 estudos que avaliaram a incorporação de resíduos no concreto permeável. Observou-se predomínio do uso de resíduos da construção civil compostos por concreto, argamassas, blocos e revestimentos cerâmicos. A influência da incorporação de resíduo nas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas do concreto permeável foi analisada, revelando que os melhores resultados são obtidos quando os resíduos são incorporados no concreto permeável como finos.

**Palavras-chave:** Reciclagem; Concreto permeável; Resíduo; Agregado reciclado; Finos.

### 1 Introdução

O concreto permeável é um material cimentício utilizado para revestir pavimentos permeáveis, uma técnica compensatória que visa reservar água pluvial e aumentar a recarga do lençol freático (ABNT, 2015). A produção de concreto permeável exige controle tecnológico diferenciado para que resista aos esforços mecânicos e simultaneamente tenha capacidade de infiltração da água pluvial (NGUYEN et al., 2014).

Alguns impactos ambientais negativos são gerados na produção dos seus componentes, especialmente na produção de cimento e agregados (CALDAS et al., 2016; DEMIREL; ESKIN, 2017; BRAGA; SILVESTRE; BRITO, 2017). Nesse contexto, o aproveitamento de materiais passíveis de serem recicláveis na produção de concretos pode reduzir a poluição ambiental ao evitar o uso de matéria prima virgem extraída de fontes finitas e por meios que impactam negativamente o meio ambiente. A reciclagem também reduz a disposição final de resíduos, o que no Brasil se traduz na redução de rejeitos e no aumento da vida útil de aterros sanitários (MOURA et al., 2018b).

Em vista desses benefícios, pesquisas foram realizadas visando à

reciclagem de materiais em argamassas (KIM; YI; ZI, 2015; LU; POON, 2018; MOURA et al., 2018a; SAIKIA et al., 2015) e concretos (CORDEIRO et al., 2017; MIHOMEM; SILVA; COSTA, 2018), bem como buscaram elaborar estudos de revisão no âmbito destes temas (BRASILEIRO; MATOS, 2015; JANI; HOGLAND, 2014; MO et al., 2018; SAIKIA; BRITO, 2012). Cresce também o número de pesquisas que avaliam as propriedades do concreto permeável com incorporação de resíduos. Portanto, na perspectiva de integrar tecnologias de aproveitamento de resíduos sólidos e de manejo de água pluvial, objetivou-se nesse estudo realizar uma revisão sobre concreto permeável com incorporação de resíduos. Apresentam-se estudos que incorporam resíduos como agregados ou finos e discutem-se perspectivas de futuros trabalhos que abordem a reciclagem de resíduos no concreto permeável.

### 2 Metodologia

O levantamento de estudos de incorporação de resíduos no concreto permeável foi realizado por meio da base de dados do Science Direct e Scielo. As palavras-chave utilizadas para a busca foram:

<sup>1</sup>E-mail: joaomarcosmm@hotmail.com

FURB - Universidade Regional de Blumenau. PPGEA – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. CAMPUS II - Complexo Tecnológico. Rua São Paulo, 3250 – Itoupava Seca CEP 89.030-000 - BLUMENAU - SC, Brasil

<sup>2</sup>E-mail: ivonegp@furb.br

<sup>3</sup>E-mail: arohden@furb.br

pervious concrete, pervious concrete with waste, recycled pervious concrete, porous concrete, construction and demolition waste, fly ash, rice husk ash, furnace slag, silica fume, glass powder, sludge. Buscou-se empregar de forma intencional termos amplos, de modo a contemplar a maior quantidade possível de produções, evitando que estudos importantes não fossem identificados.

As publicações consideradas correspondem ao período de 2013 a 2020 e abordam exclusivamente o uso de resíduo no concreto permeável. Não houve restrição quando ao idioma, sendo selecionados estudos em português, inglês e espanhol. Foram incluídos na análise somente artigos publicados em periódicos. Desconsideraram-se outras publicações (livros, capítulo de livros, resumos expandidos, artigos publicados em evento etc.) buscando garantir que os trabalhos tenham sido avaliados por pares.

Foram selecionados estudos que contemplassem simultaneamente o levantamento de propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas do concreto permeável. Na discussão os estudos foram categorizados entre aqueles que incorporam resíduos como agregados e aqueles que os incorporam como finos (< 75 µm). Estudos que incorporam resíduos em ambas as formas (como agregados e finos) foram colocados na categoria com a qual pudessem dar maior contribuição para a discussão dos resultados.

### 3 Resultados

No total foram identificados 9.735 estudos, dentre os quais 69 avaliaram as propriedades do concreto permeável contendo resíduos. Nestes observa-se o predomínio do uso de resíduos da construção civil (RCC), em geral, compostos por agregados de concreto, argamassas, blocos e revestimentos cerâmicos (Quadro 1). Nenhum estudo utiliza RCC na forma de finos. Um número importante de pesquisas utiliza escória de alto forno, cinza volante, sílica ativa e cinza pesada provenientes da indústria metalomecânica ou da queima da casca de arroz.

Várias pesquisas fizeram uso de mais de um tipo de resíduo (TOGHROLI et al., 2020; LU et al., 2019; CHANG et al., 2016; CHEN et al., 2019; OPISO; SUPREMO; PERODES, 2019; LI; ZHANG; LIU, 2017; DAI et al., 2020). Na classificação “Outros” (Quadro 1) são citados estudos que avaliam resíduos encontrados em não mais que um artigo. Trata-se de resíduos plásticos (TOGHROLI et al., 2020), resíduos de vidro (LU et al., 2019), serragem (OPISO; SUPREMO; PERODES, 2019), resíduos da indústria do papel (SCHACKOW et al., 2020), resíduos de biomassa (LIU et al., 2020), agregados reciclados de dióxido de titânio (XU et al., 2020) e agregados reciclados de carvão (ZAETANG et al., 2015).

Na sequência discute-se o efeito que os resíduos mais utilizados exercem sobre as propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas de concretos permeáveis com resíduos incorporados na forma de agregados ou finos.

#### 3.1 Resíduos como agregados no concreto permeável

Foram analisadas a composição e as propriedades de concretos permeáveis com agregados reciclados de RCC (Tabela 1) ou de outras origens (Tabela 2). A maioria das pesquisas que incorporam agregado reciclado de RCC no concreto permeável utilizam também aditivos químicos ou fibras (Tabela 1). Poucos foram os estudos que incorporaram aditivos ou fibras em concreto permeável com agregado reciclado de outra origem (Tabela 2).

##### 3.1.1 Propriedades físicas de concretos permeáveis com agregado reciclado

Os agregados são os materiais que ocupam o maior volume no concreto permeável, portanto, a sua massa específica influencia diretamente a massa específica do concreto permeável. Nas Tabelas 1 e 2 observa-se que os métodos de medição da massa específica do concreto permeável no estado endurecido possuem distintas metodologias. O método da ASTM C1754 (2012a) permite determinar a massa específica no estado endurecido, bem como a porosidade.

**Quadro 1 – Estudos sobre concreto permeável com incorporação de resíduos**

Tipo de resíduo	Forma de incorporação no concreto permeável	Quantidade de estudos	Estudos
Resíduo da construção civil	Agregados	20	Aliabdo, Elmoaty e Fawzy (2018), Bhutta et al. (2013), Debnath e Sakar (2019; 2020), Ibrahim et al. (2020), Gaedicke, Marines e Miankodila (2014a; 2014b), Gaedicke et al. (2015), Güneyisi et al. (2016), Liu et al. (2019b), Lu et al. (2019), Tavares e Kazmierczak (2016), Mikami, Kummer e Döll (2020), Mikami et al. (2018), Sandoval et al. (2019), Toghroli et al. (2020), Ulloa-Mayorga et al. (2018), Yap et al. (2018), Zaetang et al. (2016) e Zhang et al. (2017)
Escória de alto forno	Agregados e finos	15	Chang et al. (2016), Chang et al. (2016), Chen et al. (2019), Chen et al. (2020a), Chen et al. (2020b), Grubeša et al. (2018), Lang et al. (2019), Lori, Hassani e Sedghi (2019), Sandoval et al. (2019), Shen et al. (2020), Sun, Lin e Vollpracht (2018), Yeih e Chang (2019), Yeih et al. (2015), Zhang et al. (2020) e Wang et al. (2020a; 2020b)
Cinza volante	Finos	16	Chen et al. (2019), Dai et al. (2020), Hwnag et al. (2017), Hesami, Ahmadi e Nematzadeh (2014), Jo et al. (2015), Khankhaje et al. (2018), Li et al. (2017), Liu et al. (2019a), López-Carrasquillo e Hwnag (2017), Mohammed et al. (2018), Saboo et al. (2019), Soto-Pérez e Hwang (2016), Opiso, Supremo e Perodes (2019), Vázquez-Rivera et al. (2015), Xu et al. (2018) e Wang et al. (2019)
Sílica ativa	Finos	7	Adil, Kevern e Mann (2020), Chen et al. (2013), Chang et al. (2016), Dai et al. (2020), Li et al. (2017) e Zhong e Wille (2015; 2016)
Casca de dendê	Agregados	4	Ibrahim, e Razak (2016), Ibrahim, Razak e Abutaha (2017), Khankhaje et al. (2016) e Khankhaje et al. (2017),
Cinza pesada	Finos	3	Kim et al. (2017), Kuo, Liu e Su (2013) e Wu et al. (2016)
Borracha de pneus	Agregados	2	Gesoğlu et al. (2014a; 2014b)
Casca de marisco	Agregados	2	Nguyen et al. (2013) e Nguyen et al. (2017)
Outros <sup>1</sup>	Agregados e finos	7	Liu et al. (2020), Lu et al. (2019), Opiso, Supremo e Perodes (2019), Schackow et al. (2020), Toghroli et al. (2020), Xu et al. (2020) e Zaetang et al. (2015)

<sup>1</sup> Estudos que avaliam resíduos encontrados em não mais que um artigo.

Tabela 1 – Estudos sobre concreto permeável contendo agregados de resíduos da construção civil

Tipo de resíduo	Quantidade incorporada de agregado reciclado – em massa (%)	Dimensão máxima característica (mm): Agregado natural (N) e reciclado (R)	Traço (em massa)			Aditivos e outros (% em relação à massa de aglomerante)	Propriedades físicas <sup>3</sup>	Propriedades mecânicas <sup>4</sup>	Coeficiente de permeabilidade (mm.s <sup>-1</sup> )	Referência
			Relação a/c <sup>1</sup>	Relação ag./c <sup>2</sup>						
Resíduos da construção civil	0 e 100	9,50	0,3	4,5 a 5,0	Escória de alto forno: 15 e 30%	P: 20% (MONTES. VALAYALA. HASELBACH, 2005)	C: 12,0-20,0 MPa (ASTM, 2012b)	4-10 (KEVERN et al., 2005)	Gaedicke et al. (2015)	
	0, 25, 50, 75 e 100	9,50	0,27 e 0,32	3,7; 5,75	-	P: 21,3-25,3% ME: 1781-1986 kg.m <sup>-3</sup> Ambos: ASTM C1754 (2012)	C: 12,0-20,0 MPa (ASTM, 2012b) T: 1,0-1,3 MPa (ASTM C496, 2011)	5,6-12,8 (não mencionado)	Güneyisi et al. (2016)	
	50 e 100	19,0 (N) 25,4 (R)	0,3 a 0,4	2,4 a 4,8	Emprego de fibra de vidro (12 e 24 mm): 1,5%	MR: 2600-2900 kg.m <sup>-3</sup> (ABNT, 2009)	C: 10,8-23,4 MPa (ABNT, 2007)	0-35 (ABNT, 2000)	Tavares e Kazmierczak (2016)	
	0 e 100	22,0	0,3	5,9	Aditivos poliméricos: 3 e 5%	P: 22-28% (JCA, 2004)	C: 7,0-12,0 MPa TF: 1,8-3,0 MPa Ambos: JCA (2004)	24-37 (JCA, 2004)	Bhutta et al. (2013)	
	0, 20, 40, 60, 80 e 100	4,75 (N e R)	0,35	3,6	-	P: 17,6-22,5% (não especificado)	C: 5,0-11,0 MPa (EN 12390, 2003) TF: 1,7-2,5 MPa T: 1,0-1,4 MPa Ambos: não especificado.	1,4-2,6 (NEITHALATH; SUMANASOORIYA;DEO, 2010)	Yap et al. (2018)	
	0, 20, 40, 60, 80 e 100	9,50	0,24	4,5	Superplastificante: 0,75%	P: 13-25% (ASTM, 2012a)	C:13,4-17 MPa (ASTM, 2012b) TF: 3-5 MPa (ASTM, C293, 2020) T: 2,8-4,1 MPa (ASTM C496, 2011)	2,2-10,1 (ACI, 2010)	Zaetang et al. (2016)	
	0 e 100	9,75	0,34	4,34	Redutor de água: 1,2%	P: 15,3-16,5% (JCA, 2004)	C: 15,5-24,2 MPa TF: 2,6-3,6 MPa Ambos: GB50081 (2011)	3,1-3,8 (JCA, 2004)	Zhang et al. (2017)	

<sup>1</sup> Relação água/aglomerante / <sup>2</sup> Relação agregado/aglomerante / <sup>3</sup> Propriedades físicas: massa específica aparente (ME); massa específica real (MR); porosidade (P) / <sup>4</sup> Propriedades mecânicas: Abrasão por impacto (AI) ; Abrasão superficial (AS); Resistência à compressão (C); Resistência à tração na flexão (TF); Resistência à tração direta ou por compressão diametral (T).

Tabela 2 – Estudos sobre concreto permeável contendo agregados reciclados não provenientes da construção civil

Tipo de resíduo	Quantidade incorporada de agregado reciclado – em massa (%)	Dimensão máxima característica (mm): Agregado natural (N) e reciclado (R)	Traço (em massa)			Aditivos e outros (% em relação à massa de aglomerante)	Propriedades físicas <sup>3</sup>	Propriedades mecânicas <sup>4</sup>	Coeficiente de permeabilidade (mm.s <sup>-1</sup> )	Referência
			Relação a/c <sup>1</sup>	Relação ag./c <sup>2</sup>						
Escória de alto forno como agregado	0, 20, 40, 50, 60, 80 e 100%	9,5 (N e R)	0,30	5,8-4,4	Superplastificante	P: 20,4-22,7% (ASTM, 2012a)	C:17,9-23,4 (EN 12390, 2003) TF: 3,2-3,8 (ASTM C78, 2018)	3,1-3,5 (não mencionado)	Lori, Hassani e Sedghi (2019)	
	100	9,5 (R)	0,35	2,3-4,1	-	P:8,5-22,1% (ASTM, 2012a) ME: 2153-2414 kg.m <sup>-3</sup> (ASTM C138, 2014)	C: 9,6-26,7 (ASTM, 2012b) TF: 2,1-6,9 (ASTM, 2010a)	0,3-2,4 (JRA, 1996)	Yeih e Chang (2019)	
Casca de dendê	0, 25, 50 e 75	9,5 (N e R)	0,32	4,3	-	P: 19-29% (ASTM, 2012a) ME: 1314-1777 kg.m <sup>-3</sup> (não mencionado)	C: 6,0-12,0 (ASTM, 2012b) T: 0,8-2,5 (ASTM C496, 2011)	4,0-16,0 (não mencionado)	Khankhaje et al. (2016)	
	0, 25, 50, 75 e 100	9,5 (N e R)	0,30	4,79	-	P: 23,9-35,2% (ASTM, 2012a) ME:1238–1717 kg.m <sup>-3</sup> (não mencionado)	C: 3,4-9,5 (EN 12390, 2003)	4,6-8,3 (não mencionado)	Ibrahim e Razak (2016)	
Cinza pesada como agregado	0 e 100	12,50 (N e R)	0,30-0,50	2,5-6,5	-	P: 10,3-32,7% (não mencionado)	C: 4,0-12,0 (não mencionado) T: 0,4-1,4 (não mencionado) TF: 1,2-3,0 (não mencionado)	6-41 (ASTM D2434, 2006)	Kuo, Liu e Su (2013)	
Casca de marisco	0, 20, 40	4,0 (N) 4,0 (R)	0,30	4,9	-	P: 31,8-34,9% AFGC–AFREM (1997) ME: 1780 - 1868 kg.m <sup>-3</sup> (não mencionado)	C: 10,5-16,4 (EN 12390, 2003) T: 1,8-2,6 (NF-EM 1338, 2010)	3,0-8,4 (não mencionado)	Nguyen et al. (2013)	

<sup>1</sup> Relação água/aglomerante / <sup>2</sup> Relação agregado/aglomerante / <sup>3</sup> Propriedades físicas: densidade (D); massa específica aparente (ME); porosidade (P) / <sup>4</sup>Propriedades mecânicas: Resistência à compressão (C); Resistência à tração na flexão (TF); Resistência à tração direta ou por compressão diametral (T).

A NBR 16416 (ABNT, 2015) recomenda um valor mínimo de 1600 kg.m<sup>-3</sup> para massa específica no estrado endurecido. Concretos permeáveis com massa específica no estado endurecido abaixo de 1600 kg.m<sup>-3</sup> (Tabelas 3) tiveram baixa resistência à compressão (3,4 a 12,0 MPa). Neste caso, a quantidade de substituição do agregado virgem pelo agregado reciclado (> 75%) e a reduzida resistência desses últimos foram determinantes para o baixo desempenho mecânico do material (KHANKHAJE et al. 2016; IBRAHIM; RAZAK, 2016).

Os menores valores de massa específica do concreto permeável são encontrados nos estudos que empregam casca de dendê no concreto permeável (Tabela 2) porque além de possuírem menor massa específica, também são os agregados reciclados com o maior alongamento e lamelaridade. A forma longa e lamelar do agregado possibilita um arranjo do esqueleto granular mais propenso a produzir poros, e, portanto, tende a reduzir a massa específica do concreto permeável no estado endurecido (NEVILLE; BROOKS, 2013). A elevada massa específica encontrada por Tavares e Kazmierczak (2016) se deve ao fato que determinam a massa específica real do concreto permeável pelo método da NBR 9778 (ABNT, 2009), isto é, desconsideram o volume de vazios do material analisado.

A porosidade é outro parâmetro físico importante do concreto permeável. Ele pode ser proveniente da pasta cimentícia, do agregado, da zona intergranular e da zona de transição interfacial. A zona intergranular é a responsável pela maior parcela dos vazios no concreto permeável (NGUYEN et al., 2014). A porosidade é quantificada em todos os estudos (Tabelas 2 e 3), com exceção do artigo de Tavares e Kazmierczak (2016). A determinação da porosidade se baseia em sua maioria na metodologia da ASTM C1754 (2012), a qual contempla o método da balança hidrostática. A porosidade variou de 8,5 a 35,2% (Tabelas 2 e 3), sendo que os valores recomendados são de 15 a 30% (ACI, 2010). Estudos indicam que, no intervalo recomendado pela ACI (2010), o concreto permeável poderá apresentar uma adequada resistência mecânica e coeficiente de permeabilidade (ACI, 2010; NGUYEN et al., 2014; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Os agregados mais alongados e lamelares como aqueles formados por blocos cerâmicos (DEBNATH; SARKAR, 2019; 2020; BHUTTA et al., 2013), casca de marisco

(NGUYEN et al., 2013; NGUYEN et al., 2017) e de dendê (KHANKHAJE et al., 2016; KHANKHAJE et al., 2017; IBRAHIM; RAZAK, 2016; IBRAHIM; RAZAK; ABUTAHA, 2017) fornecem concreto permeável com maior porosidade (Tabelas 1 e 2). Isto não necessariamente se traduz em maior coeficiente de permeabilidade porque os vazios podem ser ou não conectados (contínuos). Por exemplo, Bhutta et al. (2013) estudaram concreto permeável com agregados provenientes de resíduos de blocos cerâmicos. A porosidade dos concretos permeáveis variou entre 22,0 e 28,0% (Tabela 1), contudo, seu coeficiente de permeabilidade apresentou valores de três a cinco vezes maiores que aqueles encontrados por Güneyisi et al. (2016), cujos concretos permeáveis possuíam intervalos de porosidade semelhantes, de 21,3 a 25,3% (Tabela 1).

### 3.1.2 Propriedades mecânicas de concretos permeáveis com agregado reciclado

A ASTM C39 (2012) e EN 12390 (2003) são as referências metodológicas mais usadas para determinar a resistência à compressão de concreto permeáveis com agregados recicláveis. Nos testes de resistência à tração encontrou-se uma maior variedade de metodologias (Tabelas 1 e 2).

Um desafio particular no desenvolvimento do concreto permeável é obter um equilíbrio entre resistência mecânica e coeficiente de permeabilidade. Nesse sentido, os estudos apontam que o aumento da porosidade do concreto permeável com agregados reciclados faz reduzir sua resistência à compressão.

Os resultados com maior resistência foram obtidos com relações agregado/cimento que variaram de 2,3 a 4,4. Esta faixa é considerada como aquela em que a mistura não é pobre demais a ponto de reduzir a aderência entre a pasta e o agregado, ou rica demais a ponto de prejudicar o coeficiente de permeabilidade do material (ACI, 2010).

Os valores de resistência à compressão encontrados nos estudos foram de 3,4 a 26,7 MPa (Tabelas 1 e 2). Os concretos permeáveis com menor resistência à compressão (entre 3,4 e 12,0 MPa) foram aqueles que empregaram a casca de dendê, agregados menos resistentes. Os melhores

resultados foram alcançados com a utilização dos agregados de escória de alto forno (LORI; HASSANI; SEDGHI, 2019; YEIH; CHANG, 2019). Nesse caso, os bons resultados podem ser provenientes também de outros fatores como, por exemplo, o maior consumo de cimento, o grau de compactação dos corpos de prova e o emprego de aditivos e fibras.

Lori, Hassani e Sedghi (2019) apontam que a porosidade nem sempre encontra relação direta com o comportamento mecânico do concreto permeável com resíduos. Neste caso, o agregado reciclado proveniente da escória de alto forno provavelmente seja mais resistente mecanicamente que o agregado natural, compensando os efeitos negativos resultantes do aumento da porosidade do concreto permeável. Além disso, o agregado reciclado de escória de alto forno possui textura mais rugosa que o agregado natural, o que aumenta a área de aderência com a pasta cimentícia, e, por consequência, aumenta também a resistência do concreto permeável (YEIH; CHANG, 2019).

Algumas pesquisas verificaram também o nível ótimo de incorporação do ponto de vista da resistência à compressão. Os valores variam entre 20 e 60% (em massa) de agregados naturais substituídos por agregados reciclados (ZAETANG et al., 2016; LORI; HASSANI; SEDGHI, 2019; NGUYEN et al., 2013). Agregados mais resistentes contribuem para que se aumente o nível ótimo de incorporação, proporcionando benefícios ambientais importantes associados ao menor descarte dos resíduos e à redução do uso de matéria prima virgem.

Os melhores resultados foram obtidos com o emprego de RCC de concreto e escórias (TAVARES; KAZMIERCZAK, 2016; ZHANG et al., 2017; LORI; HASSANI; SEDGHI, 2019; YEIH; CHANG, 2019). Estas pesquisas registraram resistência característica à compressão igual ou maior que 20 MPa. Do ponto de vista mecânico e segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), esses resultados indicam viabilidade da aplicação deste concreto permeável com agregados reciclados no formato de peças (*pavers*).

As resistências à tração na flexão e à tração (direta ou por compressão diametral) variam respectivamente de 1,2 a 6,9 MPa e de 0,4 a 4,1 MPa (Tabelas 1 e 2). Do ponto de vista mecânico, os concretos com resistência característica à tração na flexão maior que 2 MPa podem ser aplicados como revestimentos de pavimento permeável

moldado no local (ABNT, 2015). A maioria dos estudos encontrou resultados que superaram o valor mínimo exigido pela NBR 16416 (Tabelas 1 e 2).

Pode-se observar que são distintos os efeitos dos agregados reciclados na resistência à compressão e à tração na flexão. O estudo de Yap et al. (2018) ilustra este fato ao registrar que concreto permeáveis que continham alta quantidade de agregados reciclados (de 60 a 100%) registraram maior redução da resistência à compressão (queda de 49 e 53%) do que na resistência à tração na flexão (queda de 30 e 32%).

Em algumas pesquisas não se identificam alterações significativas na resistência à tração na flexão ou à tração (direta ou por compressão diametral) com a incorporação de até 80% de agregados de RCC (BHUTTA et al., 2013; ZAETANG et al., 2016). Um dos principais motivos provavelmente seja a maior aspereza dos agregados reciclados, os quais se aderem melhor à pasta cimentícia, criando uma zona de transição mais densa e resistente mecanicamente. Nesses casos a incorporação pode representar um ganho ambiental sem impactar negativamente as propriedades mecânicas dos concretos permeáveis.

Outro aspecto igualmente interessante trata-se da incorporação de fibras no concreto permeável. O emprego de fibras poderia atribuir maiores resistências à tração na flexão e à tração. Porém, nenhum destes estudos avaliou este efeito no concreto permeável com agregado reciclado. Apesar de Tavares e Kazmierczak (2016) incorporarem fibras de vidro, não se avaliou o efeito delas na resistência à tração na flexão ou à tração (direta ou por compressão diametral) do material.

### **3.1.3 Coeficiente de permeabilidade de concretos permeáveis com agregado reciclado**

Observa-se uma grande variedade de fontes metodológicas adotadas para a determinação do coeficiente de permeabilidade (Tabelas 1 e 2), sendo que nenhuma pesquisa aplicou o método do anel de infiltração, isto é, o teste específico para concreto permeável contemplado pela norma americana (ASTM C1701, 2017) e brasileira (ABNT, 2015).

Há casos de pesquisas que adaptam métodos e instrumentos de determinação da

condutividade hidráulica dos solos para aplicá-los ao concreto permeável (TAVARES; KAZIERCZAK, 2016; KUO; LIU; SU, 2013). Quatro estudos utilizaram permeômetros de carga variável (BHUTTA et al., 2013; ZHANG et al., 2017; LORI; HASSANI; SEDGHI, 2019; NGUYEN et al., 2013) e dez empregaram permeômetros com carga constante (GAEDICKE et al., 2015; GÜNEYISI et al., 2016; TAVARES; KAZIERCZAK, 2016; YAP et al., 2018; ZAETANG et al., 2016; YEIH; CHANG, 2019; KHANKHAJE et al., 2016; IBRAHIM; RAZAK, 2016; KUO; LIU; SU, 2013; NGUYEN et al., 2013). Nguyen et al. (2013) aplicam ambos (carga variável e constante).

Observa-se uma importante variação no coeficiente de permeabilidade com valores entre 0 e 41 mm.s<sup>-1</sup> (Tabelas 1 e 2), porém não são todos os estudos que encontram uma alteração significativa do coeficiente de permeabilidade devido a incorporação de agregados reciclados. A relação entre o coeficiente de permeabilidade e a incorporação de agregados reciclados não se expressa com uma mesma tendência, uma vez que outros parâmetros também interferem nesta relação. Güneyisi et al. (2016) constataram que a incorporação de agregados não alterou significativamente o coeficiente de permeabilidade, possivelmente por ser o agregado reciclado morfológicamente semelhante ao natural, gerando uma matriz igualmente similar, com poros de tamanhos semelhantes.

A compactação é um fator que pode alterar o coeficiente de permeabilidade do concreto permeável porque modifica a tortuosidade dos canais formados pelos poros conectados (MONTES; HASELBACH, 2006; PIERALISI; CAVALARO; AGUADO, 2016). Com exceção de alguns traços com elevado volume de pasta, como o de Tavares e Kazmierczak (2016), todos os traços com agregados reciclados tiveram coeficiente de permeabilidade  $\geq 1$  mm.s<sup>-1</sup> (Tabelas 1 e 2), o que os torna adequadamente funcionais do ponto de vista hidráulico (ABNT, 2015; YAHIA; KABAGIRE, 2014).

### 3.2 Resíduos finos no concreto permeável

O cimento é um dos materiais mais consumidos do mundo e a sua indústria tem avançado na redução dos impactos ambientais negativos ao buscar novas fontes de energia (combustão de resíduos em fornos de produção do clínquer) e ao utilizar resíduos

com atividade pozzolânica (HOSSAIN et al., 2018; SHEN et al., 2017; DELLA; KÜHN; HOTZA, 2002). Entretanto, a grande escala de produção ainda mantém esse setor como um dos responsáveis por uma parcela importante de emissão de gases poluentes na atmosfera (SHEN et al., 2017).

Estudos avaliam propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas de concretos permeáveis com incorporação finos como cinzas volantes e escória de alto forno (Tabela 3). Nenhuma dessas pesquisas verificou se o resíduo incorporado possui pozzolanidade à luz dos requisitos normativos nacionais ou internacionais.

#### 3.2.1 Propriedades físicas de concretos permeáveis com resíduos finos

A massa específica dos concretos permeáveis analisados variou entre 1466 e 2300 kg.m<sup>-3</sup>. Os valores foram fortemente influenciados pela porosidade dos concretos permeáveis obtidos, porém a massa específica dos agregados é uma variável a ser considerada como no estudo de Chang et al. (2016), no qual a incorporação de 100% de escória de alto forno em substituição ao cimento fez o concreto permeável possuir uma porosidade baixa (12%) e, conseqüentemente uma massa específica elevada.

Valores de porosidade maiores que 30% implicaram em massas específicas abaixo de 1600 kg.m<sup>-3</sup>, isto é, abaixo do recomendado pela norma brasileira (ABNT, 2015). Como consequência, observaram-se baixas resistências mecânicas destes concretos, especialmente a resistência à compressão (ZAETANG et al., 2015).

Os valores de porosidade de concretos permeáveis com resíduos como finos variaram entre 2,0 e 33,7%, sendo que todos os autores empregaram o método da balança hidrostática para a determinação da porosidade. A incorporação desses finos pode alterar a porosidade da pasta cimentícia, todavia, nenhum estudo quantifica esta porosidade isoladamente.

#### 3.2.2 Propriedades mecânicas de concretos permeáveis com resíduos finos

As propriedades mecânicas do concreto permeável com resíduos finos são diretamente influenciadas pelas reações pozzolânicas formadas na interação entre

cimento, resíduo e água ao longo do tempo. Um exemplo é o ganho de resistência à compressão obtido com a incorporação de cinza de casca de arroz (CCA) no concreto permeável. Devido à elevada área superficial, a CCA é altamente reativa, podendo reagir com hidróxido de cálcio rapidamente e produzir gel de C-S-H (HESAMI; AHMADI; NEMATZADEH, 2014).

A CCA pode ser composta por 85 a 95% de sílica amorfa e é justamente esta uma das principais causadoras da reação pozolânica (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2002). No processo de hidratação do cimento, formam-se grandes quantidades de cristais de hidróxido de cálcio e estes cristais são formados principalmente na zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento. Estes produtos são importantes para garantir a resistência mecânica do concreto e se formam quando outros resíduos pozolânicos também são incorporados no concreto permeável (CHANG et al., 2016; HESAMI; AHMADI; NEMATZADEH, 2014; ZAETANG et al., 2015).

Os valores de resistência à compressão apresentaram uma alta variação, de 5,7 a 45,0 MPa, nos estudos avaliados com a incorporação de diferentes resíduos finos (Tabela 3). Embora uma elevada resistência à compressão possa ser observada em concretos permeáveis com porosidade menor que 10% (CHANG et al., 2016) estes concretos possuem um coeficiente de permeabilidade inadequado ( $< 1 \text{ mm.s}^{-1}$ ) (Tabela 3).

Em alguns casos, observou-se que a incorporação de cinzas volantes e escória de alto forno aumentou a resistência à compressão dos concretos permeáveis. Do ponto de vista mecânico, o nível ótimo de cinza volante variou de 8 a 20%, em relação à massa de cimento. As quantidades de resíduos incorporadas são expressivas e possibilitam que benefícios ambientais sejam alcançados de uma parte com a reciclagem de resíduos e, de outra, com a redução do consumo de cimento.

Chang et al. (2016) encontram as melhores respostas com a incorporação de resíduos finos. Os autores investigaram as propriedades do concreto permeável com escória de alto forno provenientes do processo de produção de aço em forno de

arco elétrico. A incorporação da escória se deu em forma de finos e agregados. A resistência à compressão aos 28 dias do concreto permeável com 100% de substituição do cimento pela escória de alto forno alcançou 35 MPa, com um coeficiente de permeabilidade de  $4,9 \text{ mm.s}^{-1}$ , e, portanto, com propriedade mecânica e hidráulica tecnicamente adequada (ABNT, 2015; NEVILLE; BROOKS, 2013).

Este comportamento pode ser explicado em parte pelo fato também de haver agregado reciclado (CHANG et al., 2016). O agregado reciclado é constituído por escória de alto forno “petrificada”, material que possui elevada resistência mecânica e textura áspera (CHANG et al., 2016). No concreto convencional a resistência à compressão dos agregados geralmente é maior do que da pasta cimentícia, logo, a qualidade da pasta é determinante para as propriedades do concreto. No concreto permeável há mais vazios do que o concreto convencional, logo, sua propriedade mecânica depende principalmente da coesão da matriz (CHANG et al., 2016). Sendo assim, a boa resistência mecânica encontrada por Chang et al. (2016) pode ser explicada também pela natureza áspera e porosa do agregado reciclado utilizado, que permitiu uma forte adesão da pasta nos agregados, possibilitando valores mais altos de resistência à compressão que aqueles encontrados em traços com materiais não reciclados. Por outro lado, um fator que contribuiu também para o bom desempenho do concreto permeável foi que este consumiu mais aglomerante ( $349\text{-}651 \text{ kg.m}^{-3}$ ) do que se costuma empregar no concreto permeável ( $270\text{-}415 \text{ kg.m}^{-3}$ ) (ACI, 2010; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Não foram considerados aspectos ambientais como a capacidade de “encapsulamento” do resíduo no material.

Embora Hesami, Ahmadi e Nematzadeh (2014) relacionem a resistência à tração na flexão com a resistência à compressão, não foi possível verificar a mesma relação a partir de outros estudos. Hesami, Ahmadi e Nematzadeh (2014) consideram que o uso de fibras de aço, de polímeros e de vidro pode proporcionar concretos permeáveis com adequados valores de resistência à tração na flexão conforme requisitos da NBR 16416 (ABNT, 2015).

Tabela 3 – Estudos sobre concreto permeável contendo resíduos na forma de finos

Tipo de resíduo	Quantidade incorporada de resíduo em relação ao aglomerante (%)	Dimensão máxima característica dos agregados naturais (mm)	Traço (em massa)			Propriedades físicas <sup>3</sup>	Propriedades mecânicas <sup>4</sup>	Coeficiente de permeabilidade de (mm.s <sup>-1</sup> )	Referência
			Relação a/c <sup>1</sup>	Relação ag./c <sup>2</sup>	Aditivos e outros (% em relação à massa de aglomerante)				
Escória de alto forno	0, 100	2,36-4,75	0,35	2,6-3,7	-	P: 2,0-24,0% (JCA, 1998) ME: 1600-2300 kg.m <sup>-3</sup> (ASTM C138, 2014)	C: 11-45 (ASTM, 2012b)	0,0-7,0 (JCA, 1996)	Chang et al. (2016)
	0, 10, 20,30 e 40	13,2	0,31	4,55	Superplastificante e sílica ativa	P: 20,9-23,3 (não mencionado)	C: 20,1-34,5 (não mencionado)	6,1-7,1 (não mencionado)	Wang et al. (2019)
Cinza volante	0, 2, 4, 6, 8, 10 e 12	2,36-19,0	0,27; 0,33; 0,40	4,4-5,0	Superplastificante, fibras de aço, polímeros e vidro.	P: 9,0-29,0% (ASTM, 2012a)	C:12-21 (ASTM, 2012b) TF: 2,1-2,8 (ASTM, 2010b) T: 1,6-2,5 (ASTM C496, 2011)	0,8-4,8 (não mencionado)	Hesami, Ahmadi e Nematzadeh (2014)
	0, 5, 10 e 15	4,75	0,30	3,7	-	P: 30,5-33,7% ME: 1466-1502 kg.m <sup>-3</sup> Ambos: ASTM C1754 (2012)	C: 5,7-8,6 (ASTM C39, 2012) T: 0,69-1,28 (ASTM C496, 2011)	6,0-13,0 (não mencionado)	Zaetang et al. (2015)

<sup>1</sup> Relação água/aglomerante; <sup>2</sup> Relação agregado/aglomerante; <sup>3</sup> Propriedades físicas: densidade (D); massa específica aparente (ME); porosidade (P); <sup>4</sup> Propriedades mecânicas: Perda de massa por abrasão por impacto (AI); Perda de massa por abrasão superficial (AS); Resistência à compressão (C); Resistência à tração na flexão (TF); Resistência à tração (direta ou por compressão diametral) (T).

### 3.2.3 Coeficiente de permeabilidade de concretos permeáveis contendo resíduos finos

O coeficiente de permeabilidade dos concretos permeáveis com resíduos finos foi quantificado por meio de permeâmetro de carga constante e variável. Os valores variaram entre 0,0 e 13,0 mm.s<sup>-1</sup> (Tabela 3), variação menor que aquela dos concretos permeáveis com incorporação de agregado reciclado que foi de 0 a 41 mm.s<sup>-1</sup> (Tabelas 2 e 3).

Hesami, Ahmadi e Nematzadeh (2014) foram os únicos que avaliaram o parâmetro hidráulico com permeâmetro de carga variável e a porosidade. Os autores não especificam os níveis d'água empregados durante o ensaio, o que dificulta qualquer comparação com os demais estudos.

## 4 Conclusões

Nos estudos que desenvolveram concretos permeáveis com resíduos incorporados como agregados ou finos, observou-se predomínio do uso de resíduos da construção civil compostos por concreto, argamassas, blocos e revestimentos cerâmicos descartados. Constatou-se que há uma tendência que melhores resultados físicos e mecânicos sejam alcançados com o emprego de agregados densos e mecanicamente resistentes como, por exemplo, os agregados de concreto reciclado ou provenientes de escória de alto forno. A influência da incorporação de resíduo nas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas do concreto permeável mostrou que os melhores resultados são obtidos quando o resíduo é utilizado na forma de finos. Em

relação à incorporação de resíduos como finos, um fator importante para o bom desempenho físico e mecânico foi o consumo de cimento e a coesão da pasta com o agregado.

O coeficiente de permeabilidade foi o parâmetro cuja determinação envolveu a maior variação de fontes metodológicas. O levantamento teórico mostrou a necessidade de uma padronização dos métodos de determinação do coeficiente de permeabilidade. É certo que já há métodos contemplados pela NBR 16416 e ASTM C1701, porém eles são vantajosos e recomendados para análises em campo, não destrutivas. Já os permeâmetros permitem em laboratório um controle mais rigoroso a respeito do carregamento hidráulico aplicado. Resíduos que proporcionam um aumento da porosidade contribuíram para que o coeficiente de permeabilidade se elevasse. Observou-se isto no caso em que agregados naturais mais arredondados foram substituídos por agregados reciclados mais longos e lamelares. Futuras pesquisas podem contemplar de maneira aprofundada esta questão ao analisar a influência da incorporação de resíduos na porosidade de concretos permeáveis.

A maior parte dos estudos não utiliza método de dosagem para definir a composição dos concretos permeáveis estudados. Visando o equilíbrio entre resistência mecânica e coeficiente de permeabilidade futuros trabalhos podem desenvolver métodos de dosagem de concreto permeável que contemplem a incorporação de resíduos. Os métodos de dosagem podem proporcionar maior otimização das propriedades do material, o que produziria materiais reciclados com melhor desempenho e qualidade ambiental.

---

## 5 Pervious concrete containing waste: a review

**Abstract:** *Recycling waste in pervious concrete can reduce environmental pollution as well as contribute to decreasing the consumption of raw material and the waste final disposal. In this review study, the research results about pervious concrete containing recycled aggregate or fine powder were analyzed. The selected articles were searched in scientific journals from the Science Direct and Scielo database between 2013 and 2020. The search resulted in 69 studies that evaluated the waste incorporation in pervious concrete. Construction and demolition waste containing concrete, mortar, bricks, and ceramic tile were those predominantly used. Waste incorporation influence on pervious concrete physical, mechanical and hydraulic properties was analyzed, and the best results take place when wastes are incorporated into the pervious concrete as fine.*

**Keywords:** Recycling; Pervious concrete; Waste; Recycled aggregate; Fine powder.

---

## 6 Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16416 – Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: 2007.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14545: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro: 2000.

ACI – American Concrete Institute. ACI 522R-10 – Report on Pervious Concrete. ACI: USA, 2010.

ADIL, G.; KEVERN, J. T.; MANN, D. Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 247, p. 118453, 2020.

AFGC–AFREM. Proceedings of technical meeting AFPC–AFREM. França: 1997.

ALIABDO, A. A.; ABD E. M.; FAWZY, A. M. Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 193, p. 105-127, 2018.

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM C1754 – Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete. In: *Annual Book of ASTM Standards*, 2012a.

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM C293 – Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading). In: *Annual Book of ASTM Standards*, 2010a.

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM C39 – Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. In: *Annual Book of ASTM Standards*, 2012b.

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM C496/C496M – Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. In: *Annual Book of ASTM Standards*, 2011.

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM C138/C138M-14a – Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. In: *Annual Book of ASTM Standards*, 2014.

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM C1701 - Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. In: *Annual Book of ASTM Standards*, 2017.

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM C78 - Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Thrid-Point Loading). In: *Annual Book of ASTM Standards*, 2018.

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM C78 - Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Thrid-Point Loading). In: *Annual Book of ASTM Standards*, 2010b.

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM D2434-68 – Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head). In: *Annual Book of ASTM Standards*, 2006.

BHUTTA, M. A. R. et al. Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). *Construction and building materials*, v. 47, p. 1243-1248, 2013.

BRAGA, A. M.; SILVESTRE, J. D.; BRITO, J. Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, v. 162, p. 529-543, 2017.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. *Cerâmica*, v. 61, p. 178-189, 2015.

CALDAS, L. R. et al. Sustentabilidade na construção civil: avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO2 de fachadas para habitações sociais. *Sustentabilidade em Debate*, v. 7, n. 2, p. 238-256, 2016.

CHANG, J. J. et al. Properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag and alkali-activated slag cement. *Construction and Building Materials*, v. 109, p. 34-40, 2016.

CHEN, X. et al. Design of a chitosan modifying alkali-activated slag pervious concrete with the function of water purification. *Construction and Building Materials*, v. 251, p. 118979, 2020a.

CHEN, X. et al. Evaluating engineering properties and environmental impact of pervious concrete with fly ash and slag. *Journal of Cleaner Production*, v. 237, p. 117714, 2019.

- CHEN, X. et al. Microscopic characterizations of pervious concrete using recycled Steel Slag Aggregate. *Journal of Cleaner Production*, v. 254, p. 120149, 2020b.
- CHEN, Y. et al. Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 42, p. 97-104, 2013.
- CHUNG, S. et al. Investigation of the permeability of porous concrete reconstructed using probabilistic description methods. *Construction and Building Materials*, v. 66, p. 760-770, 2014.
- CORDEIRO, L. N. P et al. Influence of the mixing processes in concrete with aggregates coarse recycled concrete. *Ambiente Construído*, v. 17, n. 3, p. 255-265, 2017.
- COSIC, K. et al. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 78, p. 69-76, 2015.
- CROUCH, L. K. et al. Estimating pervious PCC pavement design inputs with compressive strength and effective void content. In: *Concrete technology fórum. Proceedings... National Ready Mixed Concrete Association*, Silver Spring, Maryland; 2006. 15p.
- DAI, Z. et al. Multi-modified effects of varying admixtures on the mechanical properties of pervious concrete based on optimum design of gradation and cement-aggregate ratio. *Construction and Building Materials*, v. 233, p. 117178, 2020.
- DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Characterization of pervious concrete using over burnt brick as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 242, p. 118154, 2020.
- DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 213, p. 643-651, 2019.
- DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Rice husk ash as an alternate source for active silica production. *Materials Letters*, v. 57, n. 4, p. 818-821, 2002.
- DEMIREL, E. et al. Relation between environmental impact and financial structure of cement industry. *International Journal of Energy Economics and Policy*, v. 7, n. 1, 2017.
- DEO, O.; NEITHALATH, N. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 11, p. 4181-4189, 2011.
- GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MIANKODILA, F. Assessing the abrasion resistance of cores in virgin and recycled aggregate pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 68, p. 701-708, 2014.
- GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MIANKODILA, F.. Effect of recycled materials and compaction methods on the mechanical properties and solar reflectance index of pervious concrete. *Revista Ingeniería de Construcción*, v. 30, n. 3, p. 159-167, 2015.
- GB50081. Ministry of Housing and Urban-Urban Construction of the People's Republic of China - Standard for test methods of mechanics performance of common concrete. 2011.
- GESOĞLU, M. et al. Abrasion and freezing–thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 19-24, 2014a.
- GESOĞLU, M. et al. Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. *Construction and Building Materials*, v. 63, p. 206-213, 2014b.
- GRUBEŠA, I. N. et al. Draining capability of single-sized pervious concrete. *Construction and building materials*, v. 169, p. 252-260, 2018.
- GÜNEYISI, E. et al. Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete. *Materials and Structures*, v. 49, n. 1-2, p. 521-536, 2016.
- HESAMI, S.; AHMADI, S.; NEMATZADEH, M.. Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. *Construction and Building materials*, v. 53, p. 680-691, 2014.
- HOSSAIN, M. U. et al. Evaluation of environmental impact distribution methods for supplementary cementitious materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 597-608, 2018.
- HWANG, V. et al. Fly ash-amended pervious concrete pavement followed by bamboo bioretention basin with *Dracaena sanderiana* for urban stormwater runoff control. *Construction and Building Materials*, v. 132, p. 161-169, 2017.
- IBRAHIM, H. A. et al. Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 253, p. 119251, 2020.
- IBRAHIM, H. A.; RAZAK, H. A. Effect of palm oil clinker incorporation on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 115, p. 70-77, 2016.
- IBRAHIM, H. A.; RAZAK, H. A.; ABUTAHA, F. Strength and abrasion resistance of palm oil clinker

pervious concrete under different curing method. *Construction and Building Materials*, v. 147, p. 576-587, 2017.

JANI, Y.; HOGLAND, W. Waste glass in the production of cement and concrete—A review. *Journal of environmental chemical engineering*, v. 2, n. 3, p. 1767-1775, 2014.

JCA – Japan Concrete Association. *Pavement Testing Manual*. Japan: 1996.

JCA – Japan Concrete Association. *Test methods for properties of porous concrete*. Japan: 1998.

JCI – Japan Concrete Institute. *Construction and recent applications of porous concrete*. Japan Concrete Institute, Tokyo: 2004.

JO, M. et al. Optimum mix design of fly ash geopolymer paste and its use in pervious concrete for removal of fecal coliforms and phosphorus in water. *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 1097-1104, 2015.

JRA – Japan Road Association. *Pavement Testing Manual, Supplement volume*, JRA: 1996, 317p.

KEVERN, J.T. et al. *Pervious Concrete Proportions for Improved Freeze-Thaw Durability*. ASTM International: 2005.

KHANKHAJE, E. et al. Properties of quiet pervious concrete containing oil palm kernel shell and cockleshell. *Applied Acoustics*, v. 122, p. 113-120, 2017.

KHANKHAJE, E. et al. Properties of sustainable lightweight pervious concrete containing oil palm kernel shell as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 126, p. 1054-1065, 2016.

KHANKHAJE, E. et al. Sustainable clean pervious concrete pavement production incorporating palm oil fuel ash as cement replacement. *Journal of Cleaner Production*, v. 172, p. 1476-1485, 2018.

KIM, G. M. et al. Water purification characteristics of pervious concrete fabricated with CSA cement and bottom ash aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 136, p. 1-8, 2017.

KIM, J.; YI, C.; ZI, G. Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar. *Construction and Building Materials*, v. 75, p. 242-246, 2015.

KUO, W.; LIU, C.; SU, D. Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in pervious concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 37, p. 328-335, 2013.

LANG, L.; DUAN, H.; CHEN, B. Properties of pervious concrete made from steel slag and magnesium phosphate cement. *Construction and Building Materials*, v. 209, p. 95-104, 2019.

LI, J. et al. Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement. *Construction and Building Materials*, v. 138, p. 479-485, 2017.

LIU, P. et al. Preparation of pervious concrete with 3-thiocyanatopropyltriethoxysilane modified fly ash and its use in Cd (II) sequestration. *Journal of Cleaner Production*, v. 212, p. 1-7, 2019a.

LIU, R. et al. Application of *Sterculia foetida* petiole wastes in lightweight pervious concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 246, p. 118972, 2020.

LIU, T. et al. Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method. *Cement and Concrete Research*, v. 122, p. 72-82, 2019b.

LÓPEZ-CARRASQUILLO, V.; HWANG, S. Comparative assessment of pervious concrete mixtures containing fly ash and nanomaterials for compressive strength, physical durability, permeability, water quality performance and production cost. *Construction and Building Materials*, v. 139, p. 148-158, 2017.

LORI, A.R.; HASSANI, A.; SEDGHI, R. Investigating the mechanical and hydraulic characteristics of pervious concrete containing copper slag as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 197, p. 130-142, 2019.

LU, J. et al. Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*, v. 234, p. 1102-1112, 2019.

LU, J.; POON, C. S. Use of waste glass in alkali activated cement mortar. *Construction and Building Materials*, v. 160, p. 399-407, 2018.

MIKAMI, R. J. et al. Influência do teor de cerâmica vermelha do agregado reciclado nas propriedades do concreto permeável. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 23, n. 3, e-12163, 2018.

MIKAMI, R.I.J.; KUMMER, A. C. B.; DÖLL, M. M. R. Leaching of Pervious Concrete Produced Using Mixed Recycled Aggregates. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 63, e20180408, 2020.

MILHOMEM, P. M.; SILVA, J. M.; COSTA, P. S. Avaliação das propriedades mecânicas do concreto produzido com resíduo de isoladores elétricos de porcelana. *REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 14, n. 1, 2018.

MO, K. H. et al. Recycling of seashell waste in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, v. 162, p. 751-764, 2018.

MOHAMMED, B. S. et al. Properties of nano-silica modified pervious concrete. *Case studies in construction materials*, v. 8, p. 409-422, 2018.

- MONTES, F.; HASELBACH, L.. Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete. *Environmental Engineering Science*, v. 23, n. 6, p. 960-969, 2006.
- MONTES, F.; VALAVALA, S.; HASELBACH, L. A new test method for porosity measurements of portland cement pervious concrete. *Journal of ASTM International*, v. 2, n. 1, p. 1-13, 2005.
- MOURA, J. M. B. M. et al. Cement plates and pavers made with waste from the sorting process in Blumenau, SC, Brazil. *Ambiente Construído*, v. 18, n. 1, p. 345-359, 2018a.
- MOURA, J. M. B. M.; GOHR PINHEIRO, I.; CARMO, J. L. Gravimetric composition of the rejects coming from the segregation process of the municipal recyclable wastes. *Waste management*, v. 74, p. 98-109, 2018b.
- NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M. S.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. *Materials characterization*, v. 61, n. 8, p. 802-813, 2010.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do concreto*. 2. ed. Porto Alegre : Bookman, 2013. 448 p, il.
- NF EM 12390-3. Testing hardened concrete—Part 3: Compressive strength of test specimens. *European Standard*: 2003.
- NF EM 1338. Concrete paving blocks – requirements and test methods. *European Standard*: 2010.
- NGUYEN, D. H. et al. Durability of pervious concrete using crushed seashells. *Construction and Building Materials*, v. 135, p. 137-150, 2017.
- NGUYEN, D. H. et al. Durability of pervious concrete using crushed seashells. *Construction and Building Materials*, v. 135, p. 137-150, 2017.
- NGUYEN, D. H. et al. Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. *Construction and Building Materials*, v. 49, p. 151-160, 2013.
- NGUYEN, D. H. et al. A modified method for the design of pervious concrete mix. *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 271-282, 2014.
- OPISO, E. M.; SUPREMO, R. P.; PERODES, J. R. Effects of coal fly ash and fine sawdust on the performance of pervious concrete. *Heliyon*, v. 5, n. 11, p. e02783, 2019.
- PIERALISI, R.; CAVALARO, S. H. P.; AGUADO, A. Discrete element modelling of the fresh state behavior of pervious concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 90, p. 6-18, 2016.
- SABOO, N. et al. Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties. *Construction and Building Materials*, v. 223, p. 322-328, 2019.
- SAIKIA, N. et al. Pre-treatment of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash for utilisation in cement mortar. *Construction and Building Materials*, v. 96, p. 76-85, 2015.
- SAIKIA, N.; BRITO, J. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, v. 34, p. 385-401, 2012.
- SANDOVAL, G. F. B. et al. Pervious concrete made with electric furnace slag (FEA): mechanical and hydraulic properties. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 12, n. 3, p. 590-607, 2019.
- SCHACKOW, A. et al. Permeable concrete plates with wastes from the paper industry: Reduction of surface flow and possible applications. *Construction and Building Materials*, v. 250, p. 118896, 2020.
- SHEN, W. et al. Cement industry of China: Driving force, environment impact and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 75, p. 618-628, 2017.
- SHEN, W. et al. Ecological carbonated steel slag pervious concrete prepared as a key material of sponge city. *Journal of Cleaner Production*, v. 256, p. 120244, 2020.
- SONEBI, M.; BASSUONI, M. T. Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. *Construction and Building Materials*, v. 38, p. 147-154, 2013.
- SOTO-PÉREZ, L.; HWANG, S. Mix design and pollution control potential of pervious concrete with non-compliant waste fly ash. *Journal of environmental management*, v. 176, p. 112-118, 2016.
- SUN, Z.; LIN, X.; VOLLPRACHT, A. Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers. *Construction and Building Materials*, v. 189, p. 797-803, 2018.
- TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis. *RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal*, v. 9, n. 1, 2016.
- TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. *Pervious Concrete Pavements*. EB302.02, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA, 2004.
- TOGHROLI, A. et al. Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial

and recycled fibers. *Construction and Building Materials*, v. 252, p. 118997, 2020.

ULLOA-MAYORGA, V A. et al. Performance of pervious concrete containing combined recycled aggregates. *Ingeniería e Investigación*, v. 38, n. 2, p. 34-41, 2018.

VÁZQUEZ-RIVERA, N. I. et al. Optimization of pervious concrete containing fly ash and iron oxide nanoparticles and its application for phosphorus removal. *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 22-28, 2015.

WANG, G. et al. Mechanical performance study of pervious concrete using steel slag aggregate through laboratory tests and numerical simulation. *Journal of Cleaner Production*, p. 121208, 2020.

WANG, H. et al. Investigation on the mechanical properties and environmental impacts of pervious concrete containing fly ash based on the cement-aggregate ratio. *Construction and Building Materials*, v. 202, p. 387-395, 2019.

WU, M. et al. Characteristics of pervious concrete using incineration bottom ash in place of sandstone graded material. *Construction and Building Materials*, v. 111, p. 618-624, 2016.

XU, G. et al. Investigation on the properties of porous concrete as road base material. *Construction and Building Materials*, v. 158, p. 141-148, 2018.

XU, Y. et al. Studying the mix design and investigating the photocatalytic performance of pervious concrete containing TiO<sub>2</sub>-Soaked recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, v. 248, p. 119281, 2020.

YAHIA, A.; KABAGIRE, K. D. New approach to proportion pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 62, p. 38-46, 2014.

YAP, S. P. et al. Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, v. 181, p.155-165, 2018.

YEIH, W. et al. Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 737-745, 2015.

YEIH, W.; CHANG, J. J. The influences of cement type and curing condition on properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag as aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 197, p. 813-820, 2019.

ZAETANG, Y. et al. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 111, p. 15-21, 2016.

ZAETANG, Y. et al. Use of coal ash as geopolymer binder and coarse aggregate in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 96, p. 289-295, 2015.

ZHANG, G. et al. Properties of pervious concrete with steel slag as aggregates and different mineral admixtures as binders. *Construction and Building Materials*, v. 257, p. 119543, 2020.

ZHANG, J. et al. Numerical study on seepage flow in pervious concrete based on 3D CT imaging. *Construction and Building Materials*, v. 161, p. 468-478, 2018.

ZHANG, Z. et al. Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 135, p. 112-118, 2017.

ZHONG, R.; WILLE, K. Compression response of normal and high strength pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 109, p. 177-187, 2016.

ZHONG, R.; WILLE, K. Material design and characterization of high performance pervious concrete. *Construction and Building materials*, v. 98, p. 51-60, 2015.

## 7 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecemos o suporte financeiro dado pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina (FAPESC) – Termo de Outorga nº 2019TR187.