

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id4975>

ARTIGO ORIGINAL

Análise de pisos intertravados com substituição do agregado miúdo por resíduo de construção e demolição

SUBMETIDO 01/10/2020

APROVADO 06/01/2021

PUBLICADO ON-LINE 14/08/2021

PUBLICADO Junho de 2022

EDITOR ASSOCIADO

Nelma Mirian Chagas Araújo Meira

 Gabriel de Oliveira Bins ^[1]

 Felipe Nascimento Arroyo ^[2]

 André Luis Christoforo ^[3]

 Túlio Hallak Panzera ^[4]

 Diogo Aparecido Lopes Silva ^[5]

[1] gabriel.the.bins@gmail.com.
Faculdades Integradas de Cacoal, Brasil

[2] lipe.arroyo@gmail.com.

[3] christoforoal@yahoo.com.br.
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar),
Brasil

[4] panzera@ufsj.edu.br. Universidade
Federal de São João del-Rei (UFSJ), Brasil

[5] diogo.apls@ufscar.br. Universidade
Federal de São Carlos (UFSCar), Campus
Sorocaba, Brasil

RESUMO: A construção civil está em constante busca por desenvolvimento sustentável e inovações, entre as quais está a utilização de pisos intertravados de concreto na pavimentação de vias, estacionamentos e calçadas. Essa área tem passado por transformações, visando à utilização dos resíduos gerados pela construção e demolição (RCD) em sua fabricação. Posto isso, o objetivo desta pesquisa foi avaliar, aos 7 dias e aos 28 dias, o desempenho da resistência à compressão e a absorção de água de pisos intertravados com a implementação do RCD. Foram utilizadas quatro dosagens de RCD (0%, 25%, 50% e 100%) em substituição do agregado miúdo. Após a moldagem, as peças foram submetidas aos ensaios propostos pela NBR 9781 (ABNT, 2013), verificando-se que apenas a dosagem de referência (0% RCD) alcançou 35 MPa de resistência à compressão, conforme as premissas da norma supracitada. Enquanto isso, nos ensaios de absorção de água, apenas as dosagens de 0% e 25% de RCD obtiveram os parâmetros estabelecidos pela norma. Sendo assim, a implementação do RCD em pisos intertravados não alcançou as exigências normativas estabelecidas pela NBR 9781 (ABNT, 2013). Porém, no mercado da pavimentação, existem pisos intertravados comerciais com resistência a partir de 25 MPa para tráfegos leves, o que implica que a dosagem com teor de 25% de RCD apresenta potencial de uso em tais condições.

Palavras-chave: blocos de pavimentação; RCD; resistência à compressão.

Analysis of interlocking floors with replacement of fine aggregate by construction and demolition waste

ABSTRACT: Civil construction is in constant search of sustainable development and innovations, including the use of interlocking concrete floors for paving roads, parking lots, and sidewalks. This area has transformed, aiming at using

the waste generated by construction and demolition (CDW in its manufacture. Thus, the research objective was to evaluate compressive strength performance at 7 and 28 days and water absorption of interlocked floors with CDW implementation. Four CDW dosages (0%, 25%, 50%, and 100%) were used in the fine aggregate place. After molding, the parts were subjected to the tests proposed by NBR 9781:2013, noting that only the reference dosage (0% CDW) reached the standard requirements of 35 MPa. In the water absorption tests, only the dosages of 0% and 25% of CDW obtained results established by this standard. Therefore, the RCD implementation on interlocking floors did not meet the normative requirements established by NBR 9781 (ABNT, 2013). However, in the market, there are interlocking floors with resistance from 25 MPa for light traffic, implying that the dosage with 25% CDW content has potential for use in such conditions.

.....
Keywords: paving blocks; CDW; compressive strength.
.....

1 Introdução

O ramo da construção civil está em constante busca por desenvolvimento sustentável e inovações, entre as quais está a utilização de pisos intertravados de concreto na pavimentação de vias, estacionamentos e calçadas. As vantagens e a simplicidade dos processos de produção desses pavimentos são conhecidas no meio técnico devido à versatilidade desse artefato de concreto, ao método simples de estocagem e homogeneidade, além de suas características mecânicas, que permitem a utilização imediata e distribuição de carga adequada, impedindo que ocorra transmissão e aparecimento de trincas das camadas de base na superfície do pavimento. Dessa maneira, a camada de rolamento agrega maior rigidez e, por consequência, as peças pré-moldadas adquirem funções de peças estruturais, além da função de pavimentação (HALLACK, 2001).

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), piso intertravado é um pavimento flexível no qual a estrutura é constituída por uma camada de base, acompanhada por outra de revestimento. Esse piso é composto por peças de concreto sobrepostas em uma base assentada, cujas juntas são preenchidas por material de rejuntamento. Dessa forma, o intertravamento é resultado da contenção destas peças de concreto.

Godinho (2009) ressaltou que a crescente utilização de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação e o desenvolvimento tecnológico em torno desse tema são resultados da sua multifuncionalidade e de seu processo econômico e qualitativo. Além disso, essas peças agregam contribuição no que se refere ao caráter ecológico, com implementações de materiais reciclados em sua composição.

No setor da construção civil, um dos materiais que vêm sendo estudados frequentemente para a reciclagem são os resíduos da construção e demolição (RCD). De acordo com os dados publicados pelo Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017 (ABRELPE, 2018), os municípios brasileiros coletaram, em 2017, 123.421 toneladas de RCD por dia, sendo aproximadamente 45 milhões de toneladas no ano, representando em torno de 60% da massa total de resíduos sólidos urbanos gerados nesse ano.

O RCD é um material muito variável, pois a cadeia produtiva da construção civil engloba diversas atividades no canteiro de obras. Consequentemente, os resíduos gerados por essas atividades são compostos de diversos materiais, tais como plástico,

metais, areia, blocos cerâmicos etc. (AMADEI, 2011; LEITE, 2001; ZORDAN, 2019). A Resolução nº 307 de 2013 do Conselho Nacional do Meio Ambiente definiu como resíduos de construção civil materiais oriundos de construções, reformas, demolições e demais atividades exercidas por esse setor, como preparação e escavação de terrenos, reformas, entre outras.

Diversos estudos vêm sendo realizados com o objetivo de avaliar o desempenho de pisos intertravados com a incorporação de RCD e outros tipos de resíduos. Os estudos se baseiam na NBR 9781 (ABNT, 2013), a qual exige que a absorção de água dos pisos intertravados para pavimentação seja inferior ou igual a 6%, permitindo uma variação de 1%. Além disso, essa mesma norma estabelece que a resistência à compressão deve ser superior a 35 MPa. Entretanto, Hood (2006) afirma que, para aplicações com pouca solitação de carga, pisos de 25 MPa são comercializados.

Como exemplo de pisos intertravados, Hood (2006) confeccionou pisos utilizando RCD (classe A-b) como substituto do agregado miúdo, nas proporções de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, com módulo de finura de 3,15. Para a fabricação, utilizou vibroprensa PMB-10 VIBROMAQ com ciclos de vibração de 30 segundos (motor 3 hp). A relação a/c foi de 0,37 e traço 1:4, e os corpos de prova foram deixados úmidos por 7 dias para cura. Como matérias-primas, foram utilizados o cimento CP-V-ARI, considerado o mais puro e de alta resistência, dois tipos de agregado miúdo (areia fina e areia média, com módulos de finura de 1,03 e 2,80 e absorção de água 0,51% e 0,43%, respectivamente) e brita zero (módulo de finura de 5,94). Dessas composições, a que mais se aproximou de atender à norma foi a que continha 25% de RCD. Como sugestão para trabalhos futuros, diferentes módulos de finura do RCD podem ser adicionados.

Já Poon e Chan (2006) desenvolveram pisos intertravados utilizando RCD com duas granulometrias: 10 mm e menores que 5 mm, com absorções de água de 2,29% e 10,30% respectivamente. O cimento utilizado foi o comum, com traço de 1:4,8. Para a fabricação, foi utilizada uma prensa com taxa de compressão de 600 kN/min, sendo que foram aplicadas duas sessões: uma de 50 s e outra de 60 s. Para o processo de cura, os blocos foram deixados submersos em água até o momento do ensaio. A relação a/c foi de 0,62; 0,80; 0,85; e 1, respectivamente para as seguintes composições: 0%, 25%, 50% e 75% de RCD. Assim como Hood (2006), Poon e Chan (2006) concluíram que a melhor porcentagem foi de 25% de RCD, visto que quanto maior a porcentagem do RCD, menor foi a resistência.

Posto isso, o presente estudo objetiva avaliar, aos 7 dias e aos 28 dias, as propriedades do desempenho da resistência à compressão e a absorção de água de pisos intertravados com a implementação do RCD. Como visto na literatura, porcentagens altas de RCD tendem a diminuir consideravelmente a resistência. Entretanto, o tipo de prensa e os materiais utilizados afetam significativamente os resultados, por isso foram adotadas três dosagens de RCD – 25%, 50% e 100% em substituição do agregado miúdo –, além da dosagem de referência (0% de RCD). Conforme sugerido por Hood (2006), um módulo de finura menor para o RCD também foi adotado. Dessa forma, com a substituição do agregado miúdo pelo RCD, espera-se propor à indústria da construção civil uma funcionalidade para a grande quantidade de RCD gerado por ano, principalmente com a adição de 25%.

2 Materiais e métodos

Para produzir uma dosagem de concreto, é necessário o estudo individual de cada material utilizado, a fim de se obter uma melhor proporção dos materiais. Sendo assim,

primeiramente buscou-se conhecer as características dos materiais utilizados para a produção dos pisos intertravados. Para a obtenção desses resultados, foi utilizado o Guia básico de utilização do cimento Portland da ABCP (2002) e as normas técnicas NBR NM 52 (ABNT, 2009b), NBR NM 53 (ABNT, 2009c), NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2009a).

2.1 Descrição da estrutura

Sabendo-se da variabilidade do RCD, a Resolução n° 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) classificou os resíduos da construção civil em quatro classes, explicitadas no Quadro 1.

Quadro 1 ►

Classificação dos resíduos da construção civil pela Resolução n° 307 do CONAMA (2002).
Fonte: adaptado da Resolução n° 307 do CONAMA (CONAMA, 2002)

Classe	Especificações da classe
A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos, argamassa e concreto; c) processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto.
B	Plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e gesso.
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação.
D	Tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais, telhas e demais objetos que contenham amianto.

Conforme a Resolução n° 307 do CONAMA (2002), o resíduo de construção e demolição utilizado nesta pesquisa possui duas classificações: A-a e A-b, pois contém componentes cerâmicos (tijolos, telhas, blocos etc.) e solos provenientes de terraplanagem, argamassa e concreto.

2.2 Confeção dos blocos

Para conseguir alcançar as exigências da NBR 9781 (ABNT, 2013), é necessária a utilização de vibroprensa para a confecção dos pisos intertravados. O concreto a se utilizar em máquinas é influenciado pela proporção de materiais, pela relação de a/c e pela vibração e compactação da prensa. Além do mais, esse concreto deve possuir uma consistência que aparente ser seca e que obtenha um abatimento 0, mas procurando manter uma coesão entre os materiais para não afetar o produto final depois da desmoldagem, que é feita imediatamente após a moldagem na vibroprensa (FIORITI, 2007).

No concreto seco, ao invés de se utilizar a pasta de cimento mais água para ocupar os vazios dos agregados – como é feito no concreto plástico –, os vazios são retirados através de vibrocompressão. Dessa forma, a dosagem utilizada para uma prensa dificilmente será a mesma para outra, pois a força de vibração e a de compactação para confecção das peças são diferentes entre vibroprensas, fazendo-se necessária uma adaptação dessa dosagem para eliminar os vazios existentes (FRASSON, 2000; SCHVAICKARDT; MATTOS, 2018).

Neste estudo foi utilizada a vibroprensa Sahara modelo LX 3000 Industrial Pneumática (Figura 1), com capacidade para moldar três peças de piso intertravado de $20 \times 10 \times 8$ cm cada, tendo uma alta vibração na horizontal e compactação pneumática. Foram executados 96 corpos de prova (12 por composição para cada idade, sendo 9 para ensaio de compressão e 3 para ensaio da absorção de água).

Figura 1 ►
Vibroprensa Sahara
modelo LX 3000
industrial pneumática.
Fonte: arquivo dos autores



2.3 Método de dosagem do concreto seco e corpos de prova

A dosagem do concreto seco é pouco utilizada e menos estudada em laboratório em comparação com o concreto plástico, pois suas características dependem muito do tipo do maquinário, como a vibroprensa, por exemplo. A vibração para prensagem não é facilmente reproduzida em laboratório; por conta disso, vários autores têm estudado esse tipo de dosagem, a fim de propor concretos secos de melhor trabalhabilidade e mais acessíveis para a utilização (SCHVAICKARDT; MATTOS, 2018).

Partindo da literatura, observa-se que o maior desafio para a formulação do concreto seco é obter qualidade (trabalhabilidade e coesão adequada) no estado final da peça para o uso em pavimentos (moldagem e desmoldagem do piso intertravado). Para cumprir esse objetivo, é necessário que se atinja o máximo possível de compactação dos materiais, obtendo uma peça menos porosa e com resistência adequada, resultando em maior longevidade (FERNANDES, 2009).

Sabendo-se disso, utilizou-se o método proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002) para achar a proporção ideal dos agregados. Esse método consiste basicamente em compactar proporções desses agregados em recipientes e pesá-los, a fim de encontrar o recipiente com maior massa possível e, conseqüentemente, encontrar a proporção ideal.

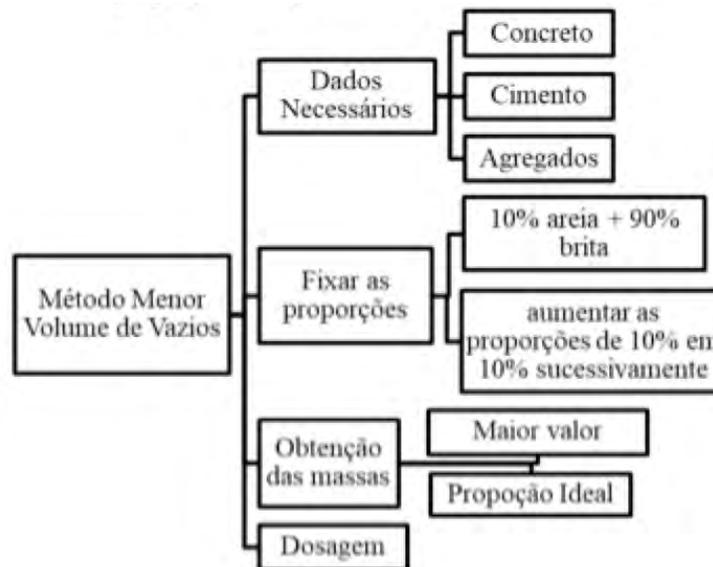
Após a determinação da melhor composição dos agregados, deve ser feita a determinação da quantidade de água e de cimento para o concreto seco. A água é determinada até o limite em que as peças aumentam a coesão e começam a grudar no recipiente. Já a quantidade de cimento está ligada diretamente à resistência desejada.

Para realização do ensaio proposto pela presente pesquisa, foi utilizado um recipiente de volume e peso conhecidos, no qual foram compactados os agregados várias vezes e com diferentes proporções, utilizando um soquete, a fim de obter melhor proporção dos agregados. Para um melhor entendimento do método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), foi feito um diagrama, ilustrado pela Figura 2.

Figura 2 ►

Diagrama de dosagem para encontrar uma proporção ideal para concreto seco.

Fonte: elaborado pelos autores



No entanto, como se trata de concreto seco vibroprensado, mesmo com uma dosagem calculada, ajustes em relação às proporções dos materiais e da água foram realizados por meio de testes de tentativa e erro.

Partindo de uma pesquisa bibliográfica (BARBOSA; BASTOS, 2012) sobre dosagens de concretos secos, que apresentaram uma resistência à compressão aos 28 dias de 35 Mpa, conforme exigido pela NBR 9781 (ABNT, 2013), verificou-se que as dosagens apresentaram relações entre cimento e o total de agregados situadas em um intervalo de 1:4 a 1:5. Sendo assim, como ponto de partida, foi utilizada uma dosagem de 1:5.

Entretanto, foram submetidas ao maquinário várias dosagens diferentes, a fim de obter uma combinação que se adequasse à vibroprensa utilizada¹. Após a determinação da dosagem de referência (0% de RCD), definiram-se os teores de substituição do agregado miúdo (areia natural) pelo RCD. No entanto, como os materiais têm características distintas, realizou-se, a partir da densidade de cada material, uma equivalência entre eles por meio da Equação 1, que foi adaptada do estudo de Caputo (1996). Esse autor avaliou que, para substituir um material natural (areia) pelo RCD, a quantidade não deve ser a mesma, pois é necessário um balanceamento de suas características. Essa avaliação foi realizada no intuito de diminuir os testes de tentativa e erro para encontrar as dosagens com teores de substituição do RCD.

$$M_{RCD} = \frac{M_{Areia}}{\gamma_{Areia}} \cdot \gamma_{RCD} \quad (1)$$

sendo: M_{RCD} a massa do RCD, em kg; M_{Areia} a massa da areia natural, em kg; γ_{RCD} o peso específico do RCD, em kg/m³; e γ_{Areia} o peso específico da areia natural, em kg/m³.

[1] Como dito por Frasson (2000) e Schvaickardt e Mattos (2018), cada vibroprensa pode exigir um tipo de dosagem diferente..

Quatro dosagens foram definidas para o estudo em questão, com um teor de argamassa de 75%. A dosagem utilizada como referência (DR) não tem teor de RCD, sendo 100% de areia natural. A dosagem 1 (D1) tem um teor de 75% de areia natural e 25% de RCD. A dosagem 2 (D2) tem um teor de 50% de areia e 50% de RCD, enquanto a dosagem 3 (D3) é composta de 100% de RCD. Podem-se verificar as dosagens obtidas pelo método de concreto seco na Tabela 1.

Tabela 1 ▶
Dosagens obtidas pelo método de concreto seco.
Fonte: dados da pesquisa

	Cimento (kg)	Areia (kg)	RCD (kg)	Brita (kg)	Água (kg)
DR	1,00	2,3	-	1,00	0,32
D1	1,00	1,72	0,48	1,00	0,33
D2	1,00	1,15	0,96	1,00	0,34
D3	1,00	-	1,92	1,00	0,35

Com as dosagens definidas, foram moldadas novas peças (Figura 3), as quais passaram pela inspeção visual estabelecida pela NBR 9781 (ABNT, 2013), que consiste em verificar se essas peças não apresentam defeitos que possam vir a prejudicar o assentamento, o desempenho mecânico ou a estética do pavimento.

Figura 3 ▶
Pisos intertravados aprovados na inspeção visual. *Fonte: arquivo dos autores*



2.4 Limites de resistência e absorção de água

A NBR 9781 (ABNT, 2013) também estabelece dois “tipos de solicitação” de tráfegos e seus respectivos limites de resistência à compressão que devem ser alcançados, como exposto no Quadro 2.

Quadro 2 ▶

Resistência característica à compressão mínima.

Fonte: adaptado da NBR 9781 (ABNT, 2013)

Solicitação	Resistência característica à compressão aos 28 dias (MPa)
Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	≥ 35
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	≥ 50

Dessa forma, a resistência à compressão aos 28 dias precisa ser superior a 35 MPa, no intuito de respeitar o parâmetro exigido para o tráfego de pedestres e veículos leves estabelecido pela norma brasileira (NBR 9781 – ABNT, 2013). Além disso, essa mesma norma define que, para a melhor utilização desse tipo de material, a absorção de água não pode ser superior a 6%, sendo permitida uma variação de 1%, ou seja, a absorção de água não pode ser superior a 7%.

2.5 Método de cura

Foi adotada neste processo a cura úmida, que é um dos métodos mais comuns e fáceis entre as fábricas do ramo de pavimentação de pisos intertravados (POON; CHAN, 2006). Esse método consiste em molhar quatro vezes ao dia os corpos de prova superficialmente e cobri-los com uma lona preta, a fim de diminuir os efeitos da evaporação prematura da água no concreto e, por consequência, retardar o surgimento de fissuras e trincas no concreto até o momento do ensaio.

2.6 Ensaios de resistência à compressão e à absorção de água

Para os ensaios de resistência à compressão, a NBR 9781 (ABNT, 2013) define que as peças devem estar saturadas em água por 24 horas antes do ensaio, além da necessidade de capeá-las com argamassa. O capeamento foi feito com argamassa de traço 1:4 de cimento e água nas partes inferior e superior da peça, para que suas superfícies ficassem paralelas e niveladas.

Essa mesma norma também estabelece que, para o rompimento das peças, devem ser colocadas placas auxiliares de ensaio, como ilustrado na Figura 4. Essas placas devem ter uma largura mínima de 97 mm e ser colocadas na parte superior, de forma que os eixos da peça e das placas coincidam.

Figura 4 ▶

Posicionamento das placas auxiliares para o ensaio de resistência à compressão.

Fonte: arquivo dos autores



De acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013), a resistência à compressão é obtida através da divisão da carga de ruptura pela área de carregamento, multiplicando-se esse valor por um fator “p” em função da altura da peça, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 ▶
Fator de correção “p”.
*Fonte: adaptada da
NBR 9781 (ABNT, 2013)*

Altura nominal da peça (mm)	Fator multiplicativo “p”
60	0,95
80	1,00
100	1,05

Para os ensaios de absorção de água, a NBR 9781 (ABNT, 2013) define que as peças da mesma dosagem, aos 28 dias, sejam submetidas à imersão em água por 24 horas e, após a saturação, sejam pesadas e colocadas em estufa por mais 24 horas. Após a secagem, cada peça deve ser pesada e colocada novamente na estufa, repetindo-se esse processo a cada duas horas, até que duas leituras seguidas sejam iguais ou apresentem uma diferença de até 0,5% entre si.

2.7 Análise estatística (teste de Tukey)

O teste de Tukey foi utilizado para contrastar as médias de cada fator idealizado, considerado ao nível de 5% de significância, possibilitando identificar os níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes, assim como os níveis associados ao menor e ao maior valor médio. Grupos que dividem a mesma letra são considerados estatisticamente iguais. Em ordem alfabética, a letra A sempre representará a propriedade que obteve maior valor analisado.

3 Resultados e discussões

Após os ensaios realizados, foram feitas análises com embasamento técnico e teórico, além da comparação com outros pisos intertravados pesquisados na literatura.

3.1 Caracterização das matérias-primas

A Tabela 3 a seguir mostra os resultados das características dos materiais utilizados, identificadas a partir do Guia básico de utilização do cimento Portland (ABCP, 2002) e das normas NBR NM 52 (ABNT, 2009b), NBR NM 53 (ABNT, 2009c), NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2009a).

Tabela 3 ►

Características dos materiais utilizados.

Fonte: dados da pesquisa

Material	Massa específica [kg/dm ³]	Massa unitária [kg/dm ³]	Diâmetro máximo característico [mm]	Módulo de finura	Absorção de água [%]
Areia média	2,48	1,65	4,80	2,48	0,94
RCD	2,52	1,38	4,80	2,84	8,11
BRITA 0	2,94	1,62	9,50	-	-
Cimento Portland CII-E	3,10	-	-	-	-

Pode-se notar que a absorção de água do RCD é muito superior à da areia, o que explica o fato de a absorção de água do piso intertravado utilizando RCD ser superior à da referência (que utiliza areia).

3.2 Dosagem

Através do processo explicado no item 2.3, a proporção que apresentou melhor resultado foi a de 50% de areia e 50% de brita. Partindo dessa proporção, foi calculada a dosagem de referência para a fabricação dos pisos intertravados, conforme exibido anteriormente.

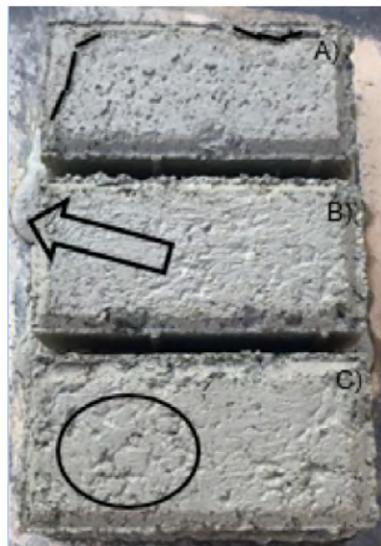
Após os testes com uma dosagem de 1:5 (cimento:agregados)², verificou-se que, utilizando a vibroprensa Sahara modelo LX 3000 Industrial Pneumática, a dosagem escolhida não atingiu as exigências estabelecidas, apresentando problemas como fissuras, escoamento de pasta pelas laterais e volume de vazios muito alto nos blocos de piso intertravado moldados, como apresentados na Figura 5.

[2] Diferentemente do traço de concreto, que define todas as matérias-primas existentes para esse tipo de material, é comumente utilizada apenas a relação de cimento com o restante dos materiais, conforme Hood (2006). Caso se adotasse a mesma nomenclatura de dosagem adotada para o concreto, esta seria 1:3:2 (cimento:areia média:brita 0)

Figura 5 ►

Pisos intertravados com dosagem de 1:5 de cimento e agregados: A) fissuras, B) escoamento de pasta e C) volume de vazios alto.

Fonte: arquivo dos autores



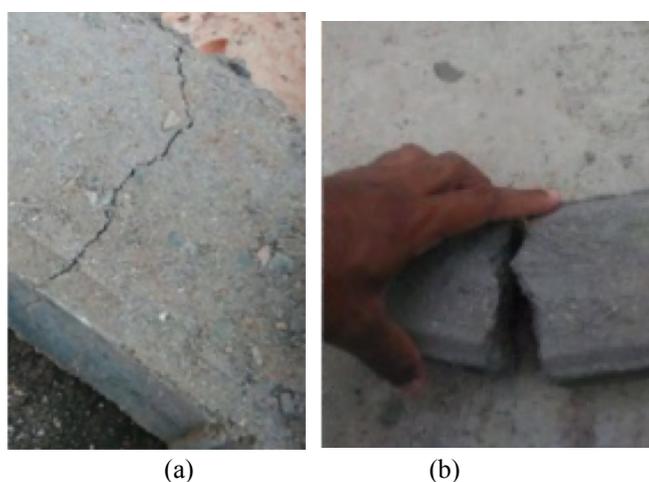
Em vista disso, testes adicionais foram feitos e o traço adotado foi alterado, conforme mostrado anteriormente na Tabela 1.

3.3 Ensaio de resistência à compressão

Como descrito anteriormente, foram feitas três dosagens de teores de substituição do agregado miúdo pelo RCD. No entanto, nos resultados de resistência à compressão aos 7 dias, não são apresentados os dados das dosagens de 25% e 100% de RCD. Essa ocorrência se deu em virtude de algumas peças que, ao serem desmoldadas no ato da fabricação dos blocos, apresentaram-se superficialmente em perfeito estado. Contudo, ao longo do processo de cura, apresentaram fissuras que contornavam o corpo das peças verticalmente e ocasionaram o rompimento dessas peças ao serem submetidas aos processos de preparação para os ensaios, como apresentado na Figura 6.

Figura 6 ▶

Peças da dosagem 1 após 2 dias de cura:
A) apresentação de fissura e
B) ruptura da peça.
Fonte: arquivo dos autores



O rompimento pode ter sido ocasionado por temperatura excessiva, que excedeu os 34 °C nos dias após a moldagem, pois houve peças da mesma dosagem e de outras que não passaram por esse problema.

Sendo assim, foram utilizados os critérios estabelecidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013), apresentados anteriormente, e as peças não danificadas foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão aos 7 dias. Após a realização dos ensaios, foram calculadas a resistência característica à compressão (f_{pk}) das dosagens, a média (\bar{X}), o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação ($C.V.$), resultando nos dados da Tabela 4.

Tabela 4 ▶
Resultados da média, do desvio padrão, do coeficiente de variação e da resistência característica à compressão aos 7 dias.
Fonte: dados da pesquisa

Dosagem (% de RCD)	\bar{X} (MPa)	σ (MPa)	$C.V.$	f_{pk} (MPa)
DR (0%)	20,11	1,51	7,48	18,72
D2 (50%)	5,69	0,71	12,44	5,05

Primeiramente, foram verificados os parâmetros estatísticos para constatar se o desvio padrão não se afastou muito da média e se o coeficiente de variação indicava um desvio padrão acima de 25. Os resultados de valor estatísticos (σ e $C.V.$) indicaram que o lote

de peças utilizado para os ensaios de resistência à compressão aos 7 dias apresentou resultados homogêneos.

A partir dessa avaliação, partiu-se para a análise dos resultados, em que foi constatado que a dosagem 2 (D2 – 50% RCD) apresentou, aos 7 dias, uma resistência à compressão de 85,57% do exigido pela norma (35 MPa) e 73,02% abaixo da dosagem de referência (DR). No entanto, comparando os resultados com os de Hood (2006), que utilizou CPIV-ARI-RS e obteve como resultado para o teor de 50% de RCD uma média de resistência à compressão aos 7 dias de 9,75 MPa, os resultados desta pesquisa foram positivos e satisfatórios, visto que o cimento utilizado não era de alta resistência como o utilizado por esse autor.

Já aos 28 dias, foi alcançada a resistência característica à compressão exigida pela NBR 9781 (ABNT, 2013). No entanto, só a dosagem de referência cumpriu as exigências normativas, como descrito na Tabela 5.

Tabela 5 ▶
Resultados da média, do desvio padrão, do coeficiente de variação e da resistência característica à compressão aos 28 dias.
Fonte: dados da pesquisa

Dosagem (% de RCD)	\bar{X} (MPa)	σ (MPa)	<i>C.V.</i>	f_{pk} (MPa)
DR (0%)	39,74	1,74	4,39	38,14
D1 (25%)	28,49	1,65	5,81	26,97
D2 (50%)	14,98	1,42	9,51	13,67
D3 (100%)	8,81	0,59	6,78	8,26

Após uma análise dos parâmetros estatísticos (σ e *C.V.*), foi observado que o lote de peças para cada dosagem utilizada para os ensaios de resistência à compressão aos 28 dias também se mostrou com resultados homogêneos.

Partindo dos resultados obtidos, expostos na Tabela 5, pode-se observar que os pisos intertravados apresentaram uma queda de resistência à compressão conforme a porcentagem de RCD aumentava. Os pisos com incorporação de 25% de RCD apresentaram uma queda da resistência à compressão de 29,30% em comparação à referência, uma queda considerada pequena em comparação aos resultados obtidos com a implementação de 50% e 100% de RCD, que forneceram resistências muito abaixo das exigências estabelecidas pela norma.

O resultado de 26,97 MPa da dosagem de 25%, no entanto, é superior aos resultados de Hood (2006), que obteve uma resistência à compressão aos 28 dias de 26,67 MPa. Importante ressaltar novamente que o cimento utilizado nesta pesquisa era de menor resistência. A resistência final aos 28 dias pode ter sido superior devido a alguns fatores: o módulo de finura do RCD utilizado ser menor; a prensa utilizada ter produzido blocos de melhor qualidade; a diferença do tipo de RCD usado – A-a e A-b nesta pesquisa e A-b na pesquisa de Hood (2006); ou a diferença do método de cura, visto que Hood (2006) deixou os corpos de prova úmidos por apenas 7 dias, enquanto nesta pesquisa estes foram mantidos úmidos até o dia do ensaio.

Quando comparados com os resultados obtidos por Poon e Chan (2006), os valores alcançados nesta pesquisa são inferiores. Entretanto, vale frisar que os blocos desenvolvidos neste estudo utilizando 25% do RCD tiveram uma perda menor quando comparados com a referência. No material produzido por Poon e Chan (2006), a perda em relação à referência foi de 37%; já neste trabalho, foi de 29,30%. Posto isso, pode-se concluir que a metodologia proposta foi mais efetiva, pois não teve grandes perdas de resistência, em comparação a Poon e Chan (2006).

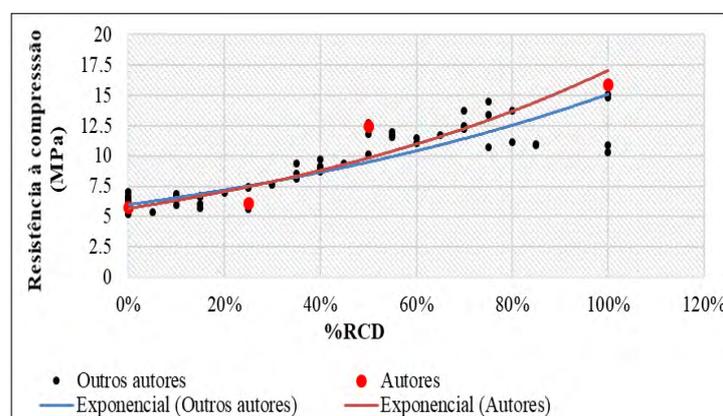
É importante observar que, tanto nesta pesquisa como na desenvolvida por Poon e Chan (2006), foi evidenciada uma queda de resistência à compressão à medida que a presença de agregado miúdo reciclado oriundo de RCD aumentava. Dessa forma, pode-se concluir que o aumento da substituição do agregado miúdo natural pelo RCD tende a diminuir a resistência à compressão dos blocos, independentemente do tipo de prensa utilizada.

A fim de aderir um grau a mais de confiança aos valores obtidos no presente estudo e melhor compreender as diferenças entre as pesquisas (HOOD, 2006; POON; CHAN, 2006), conforme explicado anteriormente, foi elaborada uma tabela com informações importantes de cada estudo e um gráfico comparando duas linhas de tendência exponenciais: uma a partir dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias de outros autores (HOOD, 2006; POON; CHAN, 2006) e a outra a partir dos resultados obtidos neste trabalho (definida como “Autores”). A perda de resistência mostrada no Quadro 3 concerne à referência (sem adição do RCD).

Quadro 3 ►
Informações das pesquisas que utilizaram RCD como substituto do agregado miúdo aos 28 dias. *Fonte: dados da pesquisa*

Informações	Hood (2006)	Poon e Chan (2006)	Autores (2019)
Resíduo	RCD	RCD	RCD
Classe	A-b	-	A-a e A-b
% RCD	25%	25%	25%
Módulo finura RCD	3,15	-	2,84
Absorção de água RCD (%)	-	6,30	8,11
Cimento	CP-V-ARI	Comum	CP-II-E
a/c	0,37	0,62 a 1,00	0,32 a 0,35
Cura	Úmidos por 7 dias	Mantida a umidade até o ensaio	
Resistência à Compressão	26,67 MPa	39,60 MPa	26,97 MPa
Perda de Resistência	18%	37%	29,30%

Figura 7 ►
Comparação das linhas de tendência exponencial das resistências à compressão aos 28 dias. *Fonte: dados da pesquisa*



Partindo de uma análise da Figura 7, observa-se que muitos estudos que utilizaram metodologia e materiais recicláveis semelhantes aos do presente estudo apresentaram resultados de resistência à compressão aos 28 dias muito parecidos com os encontrados na presente pesquisa. Dessa forma, este trabalho mostrou que, mesmo com resistências à

compressão aos 28 dias abaixo das exigências da NBR 9781 (ABNT, 2013), os resultados têm grau de confiança, pois apresentam uma conformidade com os outros estudos.

3.4 Ensaio de absorção de água

Após os passos estabelecidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013), foram alcançados valores da massa seca e saturada, obtendo-se assim a absorção de água para cada dosagem, apresentadas na Tabela 6. Também foram verificados o coeficiente de variação e o desvio padrão, que por sua vez indicaram que os resultados podem ser considerados homogêneos.

Tabela 6 ►
Absorção de água.
Fonte: dados da pesquisa

Dosagens (% de RCD)	Absorção de água (%)	σ (%)	C.V. (%)
DR (0%)	5,81	0,08	1,44
D1 (25%)	6,14	0,14	3,08
D2 (50%)	12,52	0,03	5,42
D3 (100%)	15,88	0,12	6,91

Observou-se que, neste estudo, apenas a dosagem de 0% de RCD ficou abaixo de 6% de absorção de água, como pede a norma NBR 9781 (ABNT, 2013). Entretanto, a mesma norma estabelece que a absorção de água deve ser menor que 6%, mas admite valores que não ultrapassem 7%. Sendo assim, a dosagem de 25% de RCD, que obteve 6,14% de absorção de água, é considerada como tendo um resultado satisfatório.

É notável que, quanto mais RCD no piso intertravado, maior a absorção de água. Isso ocorre porque o material de RCD tem uma taxa de absorção de água maior e menor compactidade em comparação ao material natural (areia), tendo em sua composição elementos como cerâmicas (telhas, tijolos etc.) e solos oriundos da terraplanagem.

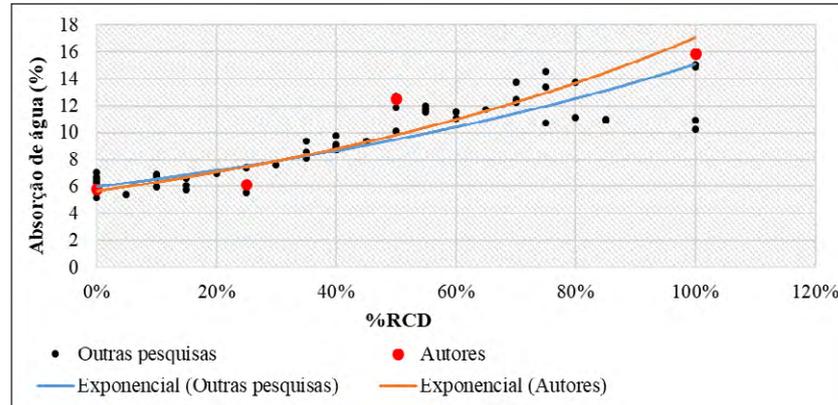
Ao realizar uma análise comparativa com os resultados obtidos por Hood (2006), observa-se que não há diferenças significativas em relação aos pisos intertravados. Em sua pesquisa, foi obtida uma umidade de 7,39% quando adicionados 25% de RCD. Embora a diferença seja pequena, o bloco elaborado não poderia ser utilizado, por não atender ao máximo permitido por norma. Já Poon e Chan (2006) obtiveram valores superiores para blocos de concreto, alcançando uma absorção de água de 13,70%, extremamente alta quando comparada com a do bloco elaborado nesta pesquisa.

Para acentuar o grau de confiança deste estudo por meio de comparações, foi feito um gráfico a partir dos resultados de absorção de água de outras pesquisas (HOOD, 2006; POON; CHAN, 2006) em comparação aos resultados obtidos no presente estudo (definido como “Autores”), visando provar que quanto mais RCD na mistura, maior vai ser a absorção de água.

Figura 8 ▶

Comparação das linhas de tendência exponencial das absorções de água.

Fonte: dados da pesquisa



3.5 Análise estatística (teste de Tukey)

As Tabelas 7 e 8, mostram os resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão aos 28 dias e para a absorção de água. Dosagens que apresentam o mesmo número são consideradas estatisticamente iguais.

Tabela 7 ▶

Resultados do agrupamento da resistência à compressão aos 28 dias.

Fonte: dados da pesquisa

Dosagens (% de RCD)	N	Média	Agrupamento
DR (0%)	9	38,14	A
D1 (25%)	9	26,97	B
D2 (50%)	9	13,67	C
D3 (100%)	9	8,26	D

Tabela 8 ▶

Resultados do agrupamento da absorção de água aos 28 dias.

Fonte: dados da pesquisa

Dosagens (% de RCD)	N	Média	Agrupamento
D3 (100%)	3	15,88	A
D1 (50%)	3	12,52	A
D2 (25%)	3	6,14	B
D3 (0%)	3	5,81	B

Dessa forma, é possível concluir que todas as resistências à compressão foram diferentes, ou seja, as proporções de RCD utilizadas afetaram essa propriedade. Já para a absorção de água, o acréscimo de 25% não afetou essa propriedade, que aumentou apenas quando foram adicionados 50% de RCD, que proporcionou a mesma absorção da proporção de 100%.

4 Conclusões

O presente estudo teve como objetivo primário analisar o desempenho da resistência à compressão e da absorção de água de pisos intertravados com a substituição do agregado

miúdo natural por resíduos de construção e demolição. Partindo de uma análise baseada nos resultados desta pesquisa, foi possível evidenciar que a incorporação do RCD em pisos intertravados não atende às exigências estabelecidas pela NBR 9781 (ABNT, 2013), mas tais pisos mostram potencial em seu uso. Com os resultados deste artigo e com a pesquisa bibliográfica feita, chegamos às seguintes conclusões:

- a. Mesmo não obtendo resistências superiores a 35 MPa, como exige a norma, Hood (2006) descreve que o mercado desse tipo de piso o comercializa com resistências de 25 MPa para tráfegos específicos ou pouco solicitados. Dessa forma, o piso intertravado com 25% de RCD atende a esse requisito;
- b. O piso desenvolvido nesta pesquisa, comparando-se com a literatura, foi o único que atendeu ao máximo de 7% de absorção de água exigido pela norma brasileira;
- c. O tipo de prensa utilizada afeta as propriedades do material. Dessa forma, compreendemos que quanto melhor a compactação, melhores serão os resultados dos pisos fabricados;
- d. A classificação do RCD pode alterar a resistência e a absorção de água do piso fabricado;
- e. Quanto maior a quantidade do RCD, menor será a resistência e maior será a absorção de água, o que foi comprovado estatisticamente pelo teste de Tukey;
- f. O piso intertravado com 25% de RCD desta pesquisa, quando comparado com os fabricados por Hood (2006), apresentou melhores propriedades, chegando mais próximo de atender ao limite exigido por norma, mesmo adotando um cimento de resistência mais baixa;
- g. O piso elaborado por Poon e Chan (2006) obteve uma resistência à compressão superior ao desta pesquisa. Entretanto, teve uma maior perda de resistência quando comparado com a referência (37% de perda, enquanto o desta pesquisa perdeu 29,30%);
- h. O piso intertravado fabricado com RCD acaba tendo uma absorção de água maior, pois esse material possui uma absorção maior quando comparado com a areia; e
- i. A temperatura do corpo de prova pode ocasionar seu rompimento, como aconteceu nos corpos de prova que ficaram em uma temperatura superior a 34 °C.

Referências

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. ed. São Paulo, 2002. 28 p. (BT-106).

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009c.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. São Paulo, 2018. Disponível em: http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf. Acesso em: 20 abr. 2019.

AMADEI, D. I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda/PR**. 2011. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/3546>. Acesso em: 12 maio 2022.

BARBOSA, M. R.; BASTOS, P. S. **Traços de concreto para obras de pequeno porte**. 8 p. Bauru: UNESP/Faculdade de Engenharia de Bauru, 2012. Disponível em: https://www.feb.unesp.br/pbastos/site_paulo/Artigo%20Tracos%20Concreto-Paulo%20Bastos.pdf. Acesso em: 12 maio 2022.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996. Cap. 3, p. 21.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF: CONAMA, 2002. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2002_Res_CONAMA_307.pdf. Acesso em: 12 maio 2022.

FERNANDES, I. D. **Blocos de pavimento**: produção e controle de qualidade. 1. ed. Ribeirão Preto: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais, 2009.

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. 2007. 218 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.18.2007.tde-27092007-184727>.

FRASSON JUNIOR, A. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2000. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/78274>. Acesso em: 12 maio 2022.

GODINHO, D. P. **Pavimento intertravado**: uma reflexão sob a ótica da durabilidade e sustentabilidade. 2009. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/MMMD-8PDFFY>. Acesso em: 12 maio 2022.

HALLACK, A. Pavimento intertravado: uma solução universal. **Revista Prisma**, v. 1, n. 1, p. 25-27, dez. 2001.

HOOD, R. S. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2006. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/12112> . Acesso em: 12 maio 2022.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/21839> . Acesso em: 12 maio 2022.

POON, C. S.; CHAN, D. Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 8, p. 569-577, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.044> .

SCHVAICKARDT, C. M.; MATTOS, J. R. G. Proposta de traço para blocos de concreto de pavimento intertravado. **Tecno-lógica**, Santa Cruz do Sul, v. 22, n. 2, p. 157-166, jul./dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v22i2.11797> .

ZORDAN, S. E. Entulho da Indústria da Construção Civil. **Fichas Técnicas**, 2000. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/78785791/Ficha-Tecnica-Entulho-da> . Acesso em: 15 maio 2019.