

## INCORPORAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO NA PRODUÇÃO DE BLOCOS PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Julia Maria Faggioni de Paula (IC) e Eric Ribeiro da Silva (Orientador)

**Apoio: PIBIC Mackpesquisa**

### RESUMO

A exploração dos recursos naturais e a degradação do meio ambiente têm sido fonte de preocupação mundial. A busca por soluções alternativas que não causem ou que diminuam os impactos ambientais tornou-se comum na sociedade. Nesse contexto, a pavimentação vem contribuindo significativamente com soluções alternativas para destinação final de diversos tipos de resíduos, principalmente os oriundos da indústria da construção civil. Os resíduos da construção e demolição (RCD) podem ser transformados em agregados reciclados e serem aplicados em diversos serviços de engenharia. Portanto, o presente estudo se propôs a avaliar o emprego do agregado reciclado, produzido a partir da britagem de corpos de prova usados no controle tecnológico de concretos, visando a produção dos blocos pré-moldados de concreto (pavers) para pavimentação. Além do traço de controle (sem a utilização de agregado reciclado), foram produzidos e testados pavers de concreto substituição parcial de 20% e 40% de agregado natural por agregado reciclado. Os resultados mostraram que a substituição de até 20% agregado reciclado proveniente da britagem de corpos de prova utilizados no controle tecnológico do concreto apresenta uma resistência média à compressão equivalente a 93% da resistência obtida nos pavers moldados com o traço de controle.

**Palavras-chave:** Paver. Resíduo de construção e demolição. Reciclagem.

### ABSTRACT

The exploitation of natural resources and the degradation of the environment have been a source of worldwide concern. The search for alternative solutions that do not cause or reduce environmental impacts has become common in society. In this context, paving has been contributing significantly with alternative solutions for the destination of several types of waste, mainly from the civil construction industry. Construction and demolition waste (RCD) can be transformed into recycled aggregates and be applied in various engineering services. Therefore, the present study aimed to evaluate the use of recycled aggregate, produced from the crushing of specimens used in the technological control of concrete, aiming at the production of precast concrete blocks (pavers) for paving. In addition to the control mix (without the use of recycled aggregate), concrete pavers with partial substitution of 20% and 40% of

natural aggregate for recycled aggregate were produced and tested. The results showed that the replacement of up to 20% recycled aggregate from the crushing of test specimens used in the technological control of concrete presents an average compressive strength equivalent to 93% of the strength obtained in the pavers molded with the control mix.

**Keywords:** Construction and demolition waste. Recycling.

## 1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, as questões ambientais estão sendo cada vez mais questionadas e cuidadas, com isso existe uma grande preocupação do mundo com o meio ambiente. A engenharia civil por sua vez, tem uma grande influência em relação ao impacto que vem proporcionando, seja diretamente ou indiretamente, isso se deve ao grande volume de resíduos que são gerados e descartados pela construção civil diariamente.

A exploração dos recursos naturais, a degradação do meio ambiente e a preocupação com a destinação dos resíduos de construção e demolição (RCD) têm motivado a realização de estudos sobre o reaproveitamento dos resíduos em diversos países, buscando por soluções ou alternativas que reduzam os impactos ambientais causados. Nesse contexto, a área da pavimentação vem contribuindo significativamente com soluções e alternativas para a destinação final dos resíduos de construção e demolição, principalmente os oriundos da indústria da construção civil que sempre foi uma das maiores geradoras.

Sendo assim, diversos estudos têm buscado avaliar a influência do emprego de agregado reciclado na produção de concretos, viabilizando a diminuição da exploração dos recursos naturais, a degradação do meio ambiente e de buscar expandir suas possibilidades de reaplicação na construção civil além de entender o desempenho desses materiais reciclados.

Assim, estabelecemos o seguinte problema de pesquisa: seria possível empregar agregado reciclado de concreto com substituição parcial e produzir blocos pré-moldados de concreto que atendam os parâmetros de controle descritos na norma ABNT NBR 9781 (2013)?

Para fins de controle da resistência do concreto empregado nas mais diversas obras no país é necessário a avaliação de suas características a partir de ensaios de laboratório em corpos de prova moldados em campo. Estes corpos de prova são testados em laboratórios especializados no controle tecnológico do concreto. Além disso, as empresas fornecedoras de concreto também possuem laboratório para avaliação do próprio material fornecido as obras. De modo geral, após a realização dos ensaios para a avaliação da resistência de concreto estes corpos de prova costumam ser descartados e, em muitos, casos são empregados na construção de muros entre outras aplicações.

Deste modo, a produção de agregado reciclado a partir de corpos de prova de concreto rompido pode resultar em um material de boa qualidade e menor variabilidade nas propriedades dos elementos de concreto que serão produzidos, além de reduzir os custos e a necessidade de exploração de recursos naturais. Com isso, para a produção de concreto com agregado reciclado, é necessário abordar uma grande quantidade de variáveis e etapas

que podem modificar suas características e seu desempenho, como por exemplo: a quantidade desse material, o traço do concreto, a homogeneidade do material, os equipamentos, a mão de obra e os métodos utilizados podem afetar as propriedades do concreto produzido com agregado reciclado.

Por fim, o presente estudo se propôs a avaliar o emprego do agregado reciclado, produzido a partir da britagem de corpos de prova usados no controle tecnológico de concretos, visando a produção dos blocos pré-moldados de concreto para pavimentação.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

O setor da construção civil, apesar de sua importância dentro da economia, sempre esteve muito ligado a questões relacionadas a desperdícios, gerando grande quantidade de resíduos que contribuem para o impacto ambiental.

Segundo Wedler e Hummel (1946) apud Levy (1997), só a partir de 1928 começaram a ser desenvolvidas pesquisas de forma sistemática, para avaliar o efeito do consumo de cimento, da quantidade de água e da granulometria dos agregados, oriundos de alvenaria britada. Porém, a primeira aplicação significativa do uso de agregados reciclado só foi registrada após o final da Segunda Guerra Mundial, na reconstrução de diversas cidades europeias que tiveram seus edifícios totalmente demolidos e os escombros ou entulhos resultantes, britados para a produção de agregados. Assim, pode-se dizer que a partir de 1946 teve início o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem dos resíduos de construção civil.

Silva (2004, p.17) diz que no Brasil, a primeira usina de reciclagem de RCD foi inaugurada em novembro de 1991, em Itatinga, sul de São Paulo. A instalação da usina custou mais de 1 milhão de dólares e devido a problemas de localização – era distante da região central – andou um tempo desativada. De acordo com PINTO (1993), “faltou planejamento na implantação da usina, porque ninguém anda quilômetros para levar entulho à usina”.

Um exemplo bem-sucedido vem ocorrendo na cidade de Belo Horizonte, onde vem sendo desenvolvido, desde 1993, um plano de gestão denominado “Programa de Correção Ambiental e Reciclagem dos Resíduos de Construção”, coordenado pelo Arquiteto Tarcísio de Paula Pinto, o plano faz parte de um conjunto maior de ações que constitui o Modelo de Gestão de Resíduos Sólidos de Belo Horizonte (SLU, 1993) desenvolvido pela equipe técnica da Superintendência de Limpeza Urbana. O plano foi premiado pela Fundação Ford e Fundação Getúlio Vargas, em 1996, como a melhor experiência de gestão municipal brasileira (SILVA, 2004).

Segundo Pinto (1999), em cidades brasileiras de médio e grande porte, os resíduos originados de construções e demolições representam de 40 a 70% de todos os sólidos nas cidades brasileiras, cujo destino incorreto traz prejuízos econômicos, sociais e ambientais.

Oliveira e Bonetto (2018, p. 5) dizem que no Brasil, a disposição irregular de resíduos da construção civil tem causado enchentes, perda de infraestrutura de drenagem por entupimento de galerias e assoreamento de canais, além da proliferação de vetores, poluição e do aumento desnecessário dos custos da administração pública. Em algumas cidades este material ainda é depositado em aterros sanitários, procedimento este, que é considerado um desperdício duplo de dinheiro. Assim, a reciclagem de resíduos de construção civil é uma das formas de reduzir os impactos negativos causados pelo setor da construção civil. De acordo com a resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) os resíduos gerados pela construção civil classificados em quatro diferentes classes:

- Classe A – resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados (por exemplo, tijolo, concreto, materiais cerâmicos, pré-moldados, materiais de pavimentação e terraplanagem, etc.);
- Classe B – resíduos reutilizáveis ou recicláveis para outras indústrias (por exemplo, plástico, papel, vidro, etc.);
- Classe C – resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias viáveis que permitam sua reciclagem (por exemplo, gesso);
- Classe D – resíduos perigosos (por exemplo, tintas, solventes, etc.), ou contaminados (por exemplo, provenientes de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros).

Os resíduos que se enquadram na classe A e B, de acordo com a classificação contida na resolução 307 do CONAMA (2002), são resíduos com possibilidades de serem absorvidos por processos de reciclagem.

Os resíduos classe B, ou seja, papel, papelão, metal, plástico, gesso, entre outros, podem ser absorvidos por processos de reciclagem por indústrias externas ao setor da construção civil. Já os resíduos classe A (que se apresentam em maior quantidade) podem ser absorvidos pela cadeia principal da construção civil. Estes, uma vez reciclados, podem ser utilizados, por exemplo, na execução de bases e sub-bases de pavimentação, na produção de blocos para vedação, entre outros (BLUMENSCHHEIN, 2007).

Segundo levantamentos feitos por Miranda et al. (2009), em 2009 existiam cerca de 48 usinas de reciclagem de RCD instaladas no país, sendo que cerca de metade destas usinas eram públicas. De acordo com Brasil Engenharia (2015), em 2015 a quantidade de

usinas especializadas na reciclagem de resíduos da construção e demolição era de 310 usinas, classificadas em pequenas e médias empresas.

Com a Política Nacional de Resíduos Sólidos nº 12305, de 02 de agosto de 2010, e sua última regulamentação, por meio de Decreto Presidencial nº 7404 de 23 de dezembro de 2010, um novo marco no setor de resíduos de construção foi promovido, dando nova força à correta gestão e reciclagem de RCD (MIRANDA et al., 2009).

Em 2012, instituiu-se, por meio da Resolução nº 448 do CONAMA, a responsabilidade ambiental que os geradores de resíduos terão de arcar, tratando da redução na geração e ampliação da reutilização, reciclagem e tratamento e disposição dos rejeitos finais.

A tendência atual é que o impacto produzido pela construção civil sobre o meio ambiente seja o menor possível e que haja uma maior preocupação com a sustentabilidade. Essa sustentabilidade sugere uma escolha mais cuidadosa dos tipos de materiais utilizados na construção, gerando reduções em custos e desperdícios em consonância com questões sociais e ambientais.

Nações tecnologicamente desenvolvidas como, Estados Unidos, Holanda, Japão, Bélgica, França e Alemanha entre outras, já perceberam a necessidade de reciclar os resíduos da construção civil e têm pesquisado o assunto intensamente visando atingir um grau de padronização dos procedimentos adotados para obtenção dos agregados, atendendo desta forma aos limites que permitem atingir um padrão mínimo de qualidade (LEVY, 1997).

FIEB (2018) apud Oliveira e Bonetto (2018), relatam que atualmente o foco na preservação do meio ambiente intensificou-se o reaproveitamento dos resíduos sólidos na construção civil por meio de regulamentações que sustentem e orientem os procedimentos de descarte e reaproveitamento adequado dos resíduos, garantindo por meio do reaproveitamento a redução na exploração de recursos naturais.

### **2.1 Pesquisas anteriores sobre o uso de agregado reciclado na produção de blocos pré-moldados de concreto.**

SILVA (2016) apud Knapton e Smith (2012), argumentam que os pavimentos revestidos com blocos pré moldados de concreto estão presentes em vários países ao redor do mundo e têm sido utilizados com sucesso em aplicações rodoviárias, aeroportuárias, pátios industriais, áreas de estacionamento e passeios públicos. Contudo, embora em muitos países a pavimentação de rodovias com blocos pré moldados de concreto se configure como uma prática comum, no Brasil, a maior demanda por este tipo de revestimento ainda se restringe a aplicações sujeitas ao tráfego leve e pequena magnitude de carga, como áreas de estacionamento ou, simplesmente, áreas de pedestres (calçadas e áreas de passeio),

existindo assim, poucos exemplos da aplicação deste tipo de pavimento em áreas sujeitas ao tráfego de veículos comerciais.

Embora nos últimos anos diversos estudos buscaram avaliar o efeito da incorporação de agregados reciclados na produção de concreto, um número limitado de estudos buscou investigar a incorporação de agregado reciclado na produção de blocos pré-moldados para pavimentação, como exemplo podemos citar os estudos de Bittencour (2012) e de Pederneiras et al. (2020).

Bittencour (2012) avaliou a resistência à compressão de blocos pré-moldados de concreto para pavimentação produzidos com agregado reciclado de RCD e areia de fundição. O estudo envolveu a elaboração de diversos traços com diferentes percentuais de substituição de agregado natural por agregado reciclado. Os resultados obtidos no estudo não atenderam à resistência esperada (35 MPa). Além disso, constatou-se que o aumento na proporção de substituição implicou na redução da resistência à compressão dos blocos pré-moldados de concreto.

Pederneiras et al. (2020) analisou o desempenho de blocos pré-moldados de concreto com incorporação de agregados reciclados de RCD. O estudo envolveu a caracterização dos agregados utilizados, bem como a condição do agregado reciclado (seco, lavado ou saturado). O desempenho dos blocos pré-moldados foi avaliado por meio dos testes de resistência à compressão mecânica e absorção de água. Ademais, o estudo envolveu a construção de um pavimento em escala real. Embora a resistência à compressão obtida tenha sido inferior a resistência mínima (de 35 MPa) apontada na NBR 9781 (2013), os resultados mostraram que não houve diferença significativa entre os blocos produzidos com agregado reciclado e o grupo de controle (blocos de concreto sem incorporação de agregado reciclado).

Vieria e Dal Molin (2004) verificaram que além das questões relacionadas ao traço do concreto e o controle na produção dos blocos pré-moldados de concreto. A variabilidade nas características do agregado reciclado de RCD pode ser considerado como um fator que contribui para o desempenho insatisfatório dos blocos produzidos com incorporação do agregado reciclado.

### **3. METODOLOGIA**

Para fabricação das peças, é especificado que o concreto deve ser constituído de cimento Portland de qualquer um dos tipos descritos na NBR 9781 da ABNT (2013). As dimensões da peça devem estar de acordo com os limites de comprimento nominal máximo de 250 mm e de largura mínima de 97 mm para a área a que será aplicada a carga no ensaio

de resistência à compressão e de espessura nominal mínima de 60 mm, em múltiplos de 20 mm. A tolerância dimensional da peça para comprimento, largura e espessura é de 3 mm para mais ou para menos. As peças devem ter um espaçador incorporado, com espessura que atenda à NBR 15953 da ABNT (2011). O chanfro do paver depende de diversos fatores construtivos, estruturais e de conforto, podendo as peças sequer possuírem chanfros em casos específicos. No caso de peças que apresentem chanfro, deve haver um intervalo de 3 mm a 6 mm em suas projeções horizontais e verticais referentes ao bloco. As arestas devem ser retangulares em todas as suas faces, devendo apresentar ângulo de inclinação de 90°, a ser avaliado por esquadro enquanto a peça estiver apoiada sob superfície plana.

### **3.1 Ensaios**

Para fins de realização do presente estudo, além da revisão da literatura sobre o tema proposto, foram realizados estudos experimentais a fim de verificar as características dos blocos de concreto produzidos com incorporação de agregado reciclado. Assim, a metodologia envolveu os seguintes aspectos.

#### **3.1.1 Granulometria**

Para a determinação do tipo de brita, que resultará da britagem do concreto recebido, são utilizadas séries de peneiras sucessivas, com aberturas de malhas normatizadas pela NBR NM 248 da ABNT (2003). Com o resultado, realiza-se a classificação considerando-se as dimensões nominais do agregado (número e tipo), de acordo com a NBR 7211 da ABNT (2019).

#### **3.1.2 Ensaio de resistência à compressão**

Para a análise da resistência à compressão dos pavers obtidos, é realizado o ensaio normatizado pela NBR 9781 da ABNT (2013). As peças devem atender a valores de resistência à compressão que estejam em conformidade com a norma, e, para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais (caminhões e ônibus), a resistência característica a compressão aos 28 dias deve ser superior ou igual a 35 MPa.

#### **3.1.3 Determinação de absorção de água**

Para determinar se a peça está de acordo com as normas vigentes, deve-se medir o incremento de massa que elas terão ao serem imersas em água à temperatura ambiente por 24 horas, conforme o anexo B da NBR 9781 da ABNT (2013). Com os procedimentos da norma executados e as peças devidamente pesadas, o valor médio de incremento de massa obtido deverá ser menor ou igual a 6%, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7%.



### 3.2 Estudo do traço

No presente estudo, definiu-se uma sigla para cada traço: o traço de controle é representado por uma letra maiúscula isolada enquanto, nos traços em que houve substituição de material natural por reciclado, é adicionado um número adjacente à letra, como exemplificado na Tabela 1.

Tabela 1. Exemplo de escolha da sigla do traço.

| Autor   | Sigla do Traço | Agregado Utilizado   |
|---------|----------------|--|
|         | Z              | Controle   |
| Exemplo | Z1             | Agregado Reciclado com substituição de 20% do agregado reciclado |
|         | Z2             | Agregado Reciclado com substituição de 40% do agregado reciclado |

Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.3 Produção do agregado reciclado

Os corpos de prova de concreto foram fornecidos por um laboratório de controle tecnológico parceiro do Mackenzie. A britagem dos corpos de prova para produção do agregado reciclado foi realizada nos laboratórios da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Após a produção do agregado reciclado foi realizado o peneiramento para separação da fração de agregado reciclado que foi empregada na produção dos blocos pré-moldados, em conformidade com o traço definido.

### 3.4 Produção dos blocos pré-moldados

Com o traço definido, foram produzidos os blocos pré-moldados com a incorporação do agregado reciclado e as unidades de controle (blocos pré-moldados sem incorporação de agregado reciclado), ambos em quantidade e conformidade com os procedimentos descritos na norma NBR 9781 (2013). A produção dos blocos pré-moldados, bem como os testes de absorção e resistência à compressão foram realizados nos laboratórios da Escola de Engenharia do Mackenzie.

Figura 1. Registros de algumas etapas dos ensaios realizados.



Fonte: Imagens registradas pela autora.

- a) Ensaio do agregado reciclado pelo Frasco de Chapman; b) Frações e separações do agregado reciclado após a análise granulométrica; c) Slump-test; d) Separação dos materiais para a produção dos concretos; e) Produção do concreto na betoneira de eixo vertical; f) Paver rompido após o ensaio de compressão; g) Saturação dos pavers em água a  $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ , por no mínimo 24 h antes do ensaio; h) Ensaio de resistência à compressão. (\*): As fotos não estão na ordem dos ensaios realizados.

#### 4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Neste estudo os blocos pré-moldados de concreto foram produzidos a partir de três traços, sendo um de controle (Z) e dois com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado (Z1 = 20%) e (Z2 = 40%). Além disso, optou-se pela utilização do cimento Portland CPV-ARI-RS, com aditivo superplastificante Muraplast da MC Bauchemie que tem como finalidade melhorar a trabalhabilidade e reduzir a relação água/cimento ( $a/c$ ).

Inicialmente foi realizada a caracterização dos agregados graúdos e miúdos, tanto o natural como o reciclado. Quanto aos agregados naturais, utilizamos, para a parcela miúda, areia fina e areia média com dimensão máxima característica (DMC) de 0,60 mm e 4,75 mm e módulo de finura (MF) de 1,03 e 2,80, respectivamente. Para a parcela graúda natural, foi utilizada brita 0 granítica. Para os materiais reciclados, utilizamos RCD com DMC de 19,0 mm e MF igual a 4,99. Esse material reciclado foi britado no laboratório da Universidade Presbiteriana Mackenzie. O traço escolhido foi o apresentado na Tabela 2, com parcela de utilização do material reciclado variando, de 20% e 40% desse, a partir de 0%, para um traço de controle, de modo a observar a influência desses RCD nas características dos blocos.

Todos os agregados empregados nesse estudo foram utilizados em estado seco. Foram produzidos 18 pavers, sendo 6 para cada traço com dimensões aproximadas entre 10 x 20 x 8 cm conforme prescrito na norma NBR 9781 (2013) e o ensaio de resistência à compressão para ambos os traços foi realizado aos 28 dias de maturidade do concreto.

Tabela 2. Traços utilizados.

| Traço  | Cimento (kg) | Areia (kg) | Brita 0 (kg) | Agregado graúdo reciclado (kg) | Água (l) | Água/cimento (a/c) | Aditivo (ml) |
|--|--------------|------------|--------------|--------------------------------|----------|--------------------|--------------|
| Z (Controle)   | 5            | 8          | 12           | 0                              | 2        | 0,4                | 0,03         |
| Z1 (20%)   | 5            | 8          | 9,6          | 2,4                            | 2        | 0,4                | 0,03         |
| Z2 (40%)   | 5            | 8          | 7,2          | 4,8                            | 2        | 0,4                | 0,03         |
| Traço de controle (Z) em volume: 1 : 1,6 : 2,4 : 0,40 : 0,03 |              |            |              |                                |          |                    |              |

Fonte: Dados coletados e elaborados pela autora.

Para a produção do concreto, todas as peças foram produzidas utilizando a mesma metodologia. Todos os agregados foram previamente secos em estufa para realização dos ensaios e posteriormente foram colocados na betoneira de eixo vertical em ordem de maior granulometria, buscando uma melhor homogeneização e por fim acrescentou-se o aditivo superplastificante Muraplast da MC Bauchemie. Para cada traço foi realizado no estado fresco o Slump Test conforme ABNT NBR NM 67 (1998), buscando um abatimento de 0 a 20 mm indicado para concretos vibrados. As peças foram moldadas em fôrmas plásticas duplas com o uso do vibrador de concreto e, posteriormente, ensaiados em uma prensa hidráulica da marca Instron, modelo GR049, para obter os resultados de resistência à compressão, sendo que todos os procedimentos foram realizados de acordo com a ABNT NBR 9781 (2013), desde a execução como também deixar submerso antes do ensaio e lixar caso não tenha como retificar as peças. Todo o processo foi realizado dentro do laboratório da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Além de que também foram realizados os ensaios de Absorção de água (Tabela 3); Análise granulométrica (Tabela 4); Massa específica (Tabela 5 e 6).

Tabela 3. Ensaio de absorção do agregado reciclado.

| Amostra | mu(g) | ms(g) |
|---------|-------|-------|
| 1       | 3000  | 2780  |
| 2       | 3000  | 2780  |
| AA%     | 7,91  |       |

Fonte: Dados coletados e elaborados pela autora.

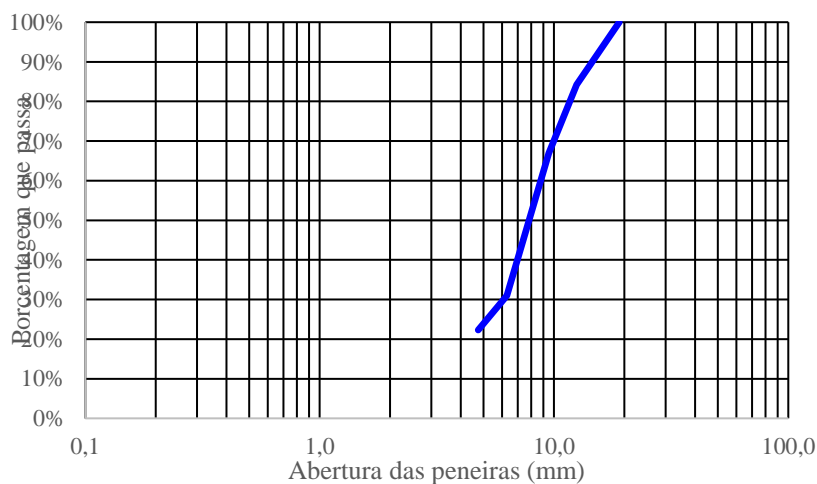
Tabela 4. Análise granulométrica do agregado graúdo reciclado.

| Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado |                                      |                |                                      |                |           |                                     |            |
|--|--------------------------------------|----------------|--------------------------------------|----------------|-----------|-------------------------------------|------------|
| Abertura das peneiras (mm)                             | Parcelas retidas em cada peneira (g) |                | Porcentagens retidas individuais (%) |                |           | Porcentagens retidas acumuladas (%) | % Passante |
|  | 1ª determ. (a)                       | 2ª determ. (b) | 1ª determ. (a)                       | 2ª determ. (b) | Média (m) |                                     |            |
| 19   | 0                                    | 0              | 0,0%                                 | 0,0%           | 100%      | 100%                                | 100%       |
| *12,5  | 416,1                                | 528,1          | 13,9%                                | 17,7%          | 86,1%     | 82,3%                               | 84,2%      |
| 9,5  | 561,5                                | 477,4          | 32,7%                                | 33,6%          | 67,3%     | 66,4%                               | 66,9%      |
| *6,3   | 1051,9                               | 1096,2         | 67,8%                                | 70,3%          | 32,2%     | 29,7%                               | 31,0%      |
| 4,75   | 277,4                                | 242,1          | 77,1%                                | 78,4%          | 22,9%     | 21,6%                               | 22,3%      |
| 2,36   | 0                                    | 0              | 77,1%                                | 78,4%          | 22,9%     | 21,6%                               | 22,3%      |
| 1,18   | 0                                    | 0              | 77,1%                                | 78,4%          | 22,9%     | 21,6%                               | 22,3%      |
| 0,6  | 0                                    | 0              | 77,1%                                | 78,4%          | 22,9%     | 21,6%                               | 22,3%      |
| 0,3  | 0                                    | 0              | 77,1%                                | 78,4%          | 22,9%     | 21,6%                               | 22,3%      |
| 0,15   | 0                                    | 0              | 77,1%                                | 78,4%          | 22,9%     | 21,6%                               | 22,3%      |
| Fundo  | 686,1                                | 646,5          | 100%                                 | 100%           | 0,0%      | 0,0%                                | 0,0%       |
| Totais   | 2993                                 | 2990,3         |                                      |                |           |                                     |            |
| Dimensão máxima característica (DMC)                   |                                      |                | 19 mm                                |                |           |                                     |            |
| Módulo de finura (MF)                                  |                                      | 4,99           |                                      |                |           |                                     |            |

(\*) - As peneiras 6,3 e 12,5 mm foram descartadas.

Fonte: Dados coletados e elaborados pela autora.

Figura 2. Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado.



Fonte: Dados coletados e elaborados pela autora.

Tabela 5. Massa específica pelo método do frasco Chapman.

| Agregado reciclado pelo Frasco de Chapman |                      |                             |                   |                         |   |
|---|----------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------------|---|
| Agregado                                  | Massa de amostra (g) | Volume inicial de água (mL) | Volume total (mL) | Volume do agregado (mL) | Massa específica (g/mL) ou (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 1   | 1000                 | 1200                        | 1620              | 420                     | 2,38  |
| 2   | 1000                 | 1200                        | 1620              | 420                     | 2,38  |

Fonte: Dados coletados e elaborados pela autora.

Tabela 6. Método da balança hidrostática.

| Agregado miúdo pela Balança Hidrostática |                      |  |  |                                      |   |
|--|----------------------|--|--|--------------------------------------|---|
| Agregado                                 | Massa de amostra (g) | Massa do frasco vazio imerso em água (g) | Massa do frasco cheio imerso em água (g) | Massa do agregado imerso em água (g) | Massa específica (g/mL) ou (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 1  | 5000                 | 320                                      | 3189,59                                  | 2869,59                              | 2,35  |
| 2  | 5000                 | 320                                      | 3187,51                                  | 2867,51                              | 2,34  |

Fonte: Dados coletados e elaborados pela autora.

Os resultados de resistência à compressão e absorção de água dos pavers ensaiados aos 28 dias são apresentados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7. Resistência à compressão de cada traço estudado: Controle (Z), 20% (Z2) e 40% (Z).

| Ensaio de Resistência à compressão aos 28 dias |              |            |            |  |
|--|--------------|------------|------------|--|
| Dados  | Controle (Z) | 20% (Z1)   | 40% (Z2)   |  |
| Número de amostras consideradas (n)            | 6            | 6          | 6          |  |
| Resistência à compressão média ( $\mu$ ) [MPa] | 35,44        | 32,92      | 25,79      |  |
| Desvio padrão ( $\sigma$ ) [MPa]               | 6,57         | 6,70       | 5,81       |  |
| Coefficiente de variação (cv%) [%]             | 18,54        | 20,35      | 22,53      |  |
| NBR 9781 (ABNT 2013) ( $\geq 35$ MPa)          | Atende       | Não atende | Não atende |  |

Fonte: Dados coletados e elaborados pela autora.

Tabela 8. Ensaio de absorção de água nos pavers de cada traço estudado: Controle (Z), 20% (Z2) e 40% (Z).

| Ensaio de Absorção de água dos pavers aos 28 dias |              |          |          |  |
|---|--------------|----------|----------|--|
| Dados   | Controle (Z) | 20% (Z1) | 40% (Z2) |  |
| Número de amostras consideradas (n)               | 3            | 3        | 3        |  |
| Absorção de água média (AAm%) [%]                 | 4,47         | 3,96     | 3,61     |  |
| NBR 9781 (ABNT 2013) ( $\leq 6$ %)                | Atende       | Atende   | Atende   |  |

Fonte: Dados coletados e elaborados pela autora.

Como se pode constatar ao analisar os resultados de resistência à compressão, a resistência média do traço de controle atende a resistência mínima (35 MPa) estabelecida pela norma NBR 9781 da ABNT (2013). O traço com 20% de substituição de agregado natural por agregado reciclado apresenta resistência à compressão média equivalente a 93% da resistência obtida no traço de controle enquanto, no traço com 40% substituição de agregado natural por agregado reciclado a resistência média é da ordem de 73% da resistência obtida no traço de controle, evidenciando a queda significativa de resistência à compressão com aumento da quantidade de agregado reciclado. O resultado indica a viabilidade da substituição parcial de 20% de agregado natural por agregado reciclado proveniente da britagem de corpos de prova. Todavia, é importante observar que o elevado coeficiente de variação obtido nos três traços estudados pode estar relacionado a forma como os corpos de prova foram produzidos que se distingue do processo de produção industrial geralmente empregado.

Em relação a absorção de água os resultados mostraram que todos os traços estudados atenderam a tolerância de até 6% estabelecida pela NBR 9781 da ABNT (2013).

O outro ponto a ser destacado é o valor elevado da resistência à compressão exigido pela NBR 9781 da ABNT (2013). De acordo com Fioriti, Ino e Akasaki (2007), países como a Nova Zelândia, Austrália e África do Sul, estabelecem a resistência mínima de 25 MPa, dependendo da finalidade de sua utilização. A capacidade de carga que um bloco de concreto deve suportar para conseguir a resistência mínima de 25 MPa é muito elevada. Fioriti, Ino e Akasaki (2007) afirmam que, para se atingir uma resistência à compressão de 25 MPa, o bloco deve suportar aproximadamente 157500 N, contra aproximadamente 94500 N para conseguir se estabelecer uma resistência à compressão de 15 MPa, valor que foi adotado como exemplo pois, segundo os autores é suficiente para suportar a sobrecarga que será exercida sobre calçadas, praças e locais de trânsito leve. Portanto, os autores concluem que os valores exigidos pela norma brasileira são demasiadamente conservadores para aplicações destinadas ao tráfego de pedestres, como calçadas, e demais áreas onde não há o tráfego de veículos podendo ser revistos considerando-se a categoria de uso. Caso a resistência à compressão ideal fosse estipulada em 15 MPa para fins de calçadas, praças e locais de trânsito leve, os três traços apresentados seriam viáveis.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os agregados reciclados de RCD possuem grande potencial para a utilização na produção ou fabricação de *pavers*, não só por fins ecológicos, mas também econômicos e,

em alguns casos, de ganho de propriedades mecânicas. Além de que foi possível concluir que a parcela ideal de substituição de agregado reciclado oriundo de RCD pelo agregado natural gira em torno de 20%, pois a parcela com 40% apresentou resultados significativamente inferiores de resistência à compressão, observando que a tendência conforme aumenta a porcentagem e quantidade de agregado reciclado no traço, por sua vez, a resistência também tende a diminuir. A produção dos blocos de concreto para pavimentos intertravados é uma tarefa de alto grau de complexidade, em que variações como o uso de vibro prensa, o uso de agregados devidamente lavados e separados com a granulometria correta e a experiência do operador que realizou tais ensaios influenciam diretamente no resultado. No entanto, para fins de utilização em vias de menor movimento, calçadas e parques, a substituição de parte do agregado natural por agregados reciclados de RCD se mostra uma alternativa viável. Para pesquisas futuras, sugere-se uma investigação mais detalhada da influência de equipamentos e de seu manuseio na confecção dos blocos, que vise a medir a necessidade de suporte de carga para o emprego dos *pavers* em ambientes diversos, como passeios, vias de tráfego leve e vias de tráfego pesado, com o objetivo de apontar a necessidade ou não da revisão da norma vigente no país.

## 6. REFERÊNCIAS

AMADEI, D. I. B. “**Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda/PR.**” 2011. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011. Disponível em: <http://www.peu.uem.br/Daysa2.pdf>. Acesso em: 05 de maio de 2022.

ANDRADE, D. T.; VIEIRA, S. P.; OLIVEIRA, D. R.; MORAIS, H. P. “**Avaliação da utilização de agregados reciclados na produção de peças para pavimentação (Pavers).**” In: ANAIS DO 60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. CBC, 2018. FOZ DO IGUAÇU. Acesso em: 01 de maio de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (ABRECON). História do Entulho. Disponível em: <https://abrecon.org.br/entulho/historia-do-entulho/>. Acesso em: 18 de abril de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45 (2006):** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR/NM 26 (2001) -** Agregados -Amostragem: Procedimento. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53 (2003) - Agregado Graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2003.

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

BALBO, J. T. **“Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração.”** Oficina de Textos, São Paulo, 2007.

BITTENCOURT, S. F. **“Avaliação da resistência à compressão de pavers produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição.”** 2012. 108 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/267789>

BLUMENSCHHEIN, R. N. **“Gestão de Resíduos Sólidos em Canteiros de Obras.”** Brasília, DF: Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico, Universidade de Brasília, 2007.

BLUMENSCHHEIN, R., GONÇALVES, M. A. **“Programa Entulho Limpo.”** Cartilha publicada em parceria com o SINDUSCON/DF, Eco Atitude Ações Ambientais e Universidade de Brasília. Brasília, 2002.

BLUMENSCHHEIN, R., SPOSTO, ROSA. **“Programa de gestão de materiais.”** Cartilha publicada em parceria com o SINDUSCON/DF, SINDUSCON/GO, Prefeitura de Goiânia, Sebrae/DF e UnB. Goiânia, 2003.

BLUMENSCHHEIN, R. N. **“A sustentabilidade da cadeia produtiva da indústria da construção”**, (Tese de Doutorado), Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

BRASIL ENGENHARIA, 2015 – **“Brasil recicla cerca de 20% dos resíduos de construção.”**

Disponível em: [http://www.brasilengenharia.com/portal/noticias/noticias-daengenharia/14151-brasil-recicla-cerca-de-20-dos-residuos-deconstrucao#:~:text=%2D%20O%20setor%20de%20reciclagem%20de,de%20reais%20no%20C3%BAltimo%20ano](http://www.brasilengenharia.com/portal/noticias/noticias-daengenharia/14151-brasil-recicla-cerca-de-20-dos-residuos-deconstrucao#:~:text=%2D%20O%20setor%20de%20reciclagem%20de,de%20reais%20no%20C3%BAltimo%20ano.). Acesso em: 21 de outubro de 2022.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA n. 307, de 5 de julho de 2002. **“Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção civil.”** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul. 2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/conama> - Acesso em: 17 de novembro de 2022.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA n. 448, de 18 de janeiro de 2012. **“Ao considerar a necessidade de adequação da Resolução 307/2002 que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção civil.”** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 jan. 2012. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=116060> - Acesso em: 26 de novembro de 2022.



COSTA, FARMOSO, “**Gestão de resíduos na construção civil: Redução, Reutilização, Reciclagem**”, 2006. Disponível em: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjz-3DIJzwAhUbrZUCHUIOAFUQFjAAegQIAhAD&url=http%3A%2F%2Fwww.fieb.org.br%2FAdm%2FConteudo%2Fuploads%2FLivro-Gestao-deResiduos\\_id\\_177\\_\\_xbc2901938cc24e5fb98ef2d11ba92fc3\\_2692013165855\\_.pdf&usg=AOvVaw2iihMSf9ajDfUVfYOkJPd1](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjz-3DIJzwAhUbrZUCHUIOAFUQFjAAegQIAhAD&url=http%3A%2F%2Fwww.fieb.org.br%2FAdm%2FConteudo%2Fuploads%2FLivro-Gestao-deResiduos_id_177__xbc2901938cc24e5fb98ef2d11ba92fc3_2692013165855_.pdf&usg=AOvVaw2iihMSf9ajDfUVfYOkJPd1) - Acesso em: 18 de dezembro de 2022.

COSTA, N. A. A. da. “**A reciclagem do resíduo de construção e demolição: uma aplicação da Análise Multivariada.**” Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2003. Panorama Atual do Setor de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição no Brasil, 2016. Disponível em: [http://www.infohab.org.br/entac/2016/ENTAC2016\\_paper\\_708.pdf](http://www.infohab.org.br/entac/2016/ENTAC2016_paper_708.pdf)

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. “**Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus.**” Ambiente Construído, Porto Alegre, out./dez., 2007.

GARCIA, Enrique Apicella Mazzon; LAURINO, Gabriel Galdino; DIB, Luiz Felipe Portugal. “**Estudo do reaproveitamento de resíduos de concreto para produção de pavers.**” Artigo do Trabalho de Conclusão do Curso (TCC) (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2021.

KNAPTON, J., SMITH D.R. “**Port and industrial pavement design with concrete pavers**”, interlocking Concrete Pavement Institute, second edition, Ontario, 2012.

LEVY, S, M.; HELENE, P.R.L. “**Reciclagem de entulhos na construção civil e a solução política e ecologicamente correta.** In: 1º Simpósio Brasileiro de Tecnologias de Argamassa”, pp. 315-325, Goiânia, 1995.

LEVY, S. M. “**Reciclagem de entulho de construção civil para utilização como agregado de argamassas e concreto.**” Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

MIRANDA, L.F.R. “**A Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição no Brasil: 1986 – 2008.**” Revista Ambiente Construído v.9, n.1. Porto Alegre, 2009.

MOREIRA, L. H. H.; FIGUEIREDO, A. D. “**Influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural.**” EPUSP - Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/563. São Paulo, 2010.

OLIVEIRA, M. R.; BONETTO, N. C. F. “**Reutilização de resíduos da construção civil.**” Centro de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão Oswaldo Cruz. São Paulo, 2018.

PEDERNEIRAS, C. M.; DURANTE, M. D. P.; AMORIM, Ê. F. e FERREIRA, R. L. S. “**Desempenho de blocos de concreto com incorporação de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição.**” *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* [online]. 2020, vol.13, n.4, e13405.

PINTO, T.P.; LIMA, J. A. R., “**Industrialização de componentes a partir de uma política de reciclagem de resíduos da construção urbana.**” In: Simpósio Ibero - Americano sobre técnicas construtivas industrializadas para habitação de interesse social; 3., São Paulo, 1993.

PINTO, T. P. P. “**Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.**” Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

RAMOS, M. A.; PINTO, A. C. P.; MELO, A. A. O. “**O Gerenciamento dos Resíduos Sólidos da Construção Civil e Demolição no Município de Belo Horizonte**”, 2013/2014. SUPERINTENDÊNCIA DE LIMPEZA URBANA (SLU) de Belo Horizonte. **Modelo de gestão de resíduos sólidos em Belo Horizonte**, Belo Horizonte, 1993.

SILVA, E. R. “**Análise do comportamento estrutural e funcional de um pavimento experimental com blocos pré-moldados de concreto.**” Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (POLI-USP), São Paulo, 2016.

SILVA, L. R. A. “**Utilização do entulho como agregado para a produção de concreto reciclado.**” Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, 2004.

SIMIELI, D. “**Utilização de agregados reciclados em pavimentos intertravados.**” *Exacta*, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 231-241, jul./dez. 2007. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/1171>. Acesso em: 17 de novembro de 2022.

SALGADO, F. A.; SILVA, F. A., “**Properties of recycled aggregates from different composition and its influence on concrete strength,**” *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, vol. 14, no. 6, e14605, 2021, <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000600005>. Acesso em: 05 de julho de 2022.

TSUTSUMOTO, N. Y. “**Materiais de Construção Alternativos: valorização de resíduos,**” Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2014.

Vieria, I. G; Dal Molin, D. C.C. “**Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.**” Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, Porto Alegre, 2004.

WIEBBELLING, P. O. G. “**Pavimentos com blocos intertravados de concreto: estudo de casona Univates.**” Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2015.

#### **Contatos:**

Julia Maria Faggioni de Paula – [31613111@mackenzista.com.br](mailto:31613111@mackenzista.com.br)

Eric Ribeiro da Silva – [eric.silva@mackenzie.br](mailto:eric.silva@mackenzie.br)