

Incorporação de PRFV em pavimentos intertravados: uma solução ecológica para resíduos industriais

Incorporation of GFRP in interlocking floors: an ecological solution for industrial waste

Arthur Henrique Knorst Colling 

Eduardo Pavan Korf 

Suelen Cristina Vanzetto 

Gabriel André Tochetto 

Resumo

O uso de polímeros na indústria está em expansão, principalmente o de polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV). Na produção de peças com PRFV, inevitavelmente, são geradas quantidades significativas de resíduos, que carecem de destino em aterros industriais, o que representa um custo para o setor industrial e um problema ambiental. A busca por soluções que possam incorporar esses resíduos no processo ou como substituinte de matérias-primas é um dos focos atuais de pesquisas na área de materiais. Assim, este estudo avaliou a aplicação do resíduo de PRFV em misturas de concreto para a produção de peças para pavimento intertravado. O resíduo apresentou granulometria de agregado miúdo, com módulo de finura de 1,71. A morfologia revelou haver uma superfície heterogênea, com grânulos de diferentes tamanhos e bastonetes alongados lisos. A substituição parcial da areia pelo resíduo de PRFV (5%, 10% e 15%) resultou em peças com menor resistência à compressão (< 31 MPa) quando comparadas ao controle, sem PRFV. Entretanto, os resultados de resistência permitem a aplicação dos pavers em lugares com tráfego leve ou mesmo em calçadas, com a vantagem de a peça ser mais leve.

Palavras-chave: Fibra de vidro. Agregado miúdo. Paver. Peças de concreto.

Abstract

The use of polymers in industry is expanding, especially glass fiber reinforced polymers (GFRP). The production process of GFRP parts generates significant amounts of waste, which then needs to be disposed of in industrial landfills, which both generates financial costs for the industrial sector and constitutes an environmental problem. The search for solutions that incorporate the waste either in the process or as a substitute for raw materials is one of the current concerns of research into materials. This study evaluates the application of GFRP waste in concrete mixtures for the production of interlocking pavers. The waste presented fine aggregate granulometry, with a fineness modulus of 1.71. The morphology revealed a heterogenous surface, with granules of different sizes and smooth and elongated stems. The partial replacement of sand by GFRP residue (5%, 10% and 15%) resulted in pavers with lower compressive strength (< 31 MPa) when compared to the control specimens without GFRP, however, the strength results allow the application of pavers in places with light traffic or on sidewalks, with the advantage that these pavers are lighter.

Keywords: Fiberglass. Fine aggregate. Paver. Concrete pieces.

¹Arthur Henrique Knorst Colling
¹Universidade Federal da Fronteira Sul
Erechim - RS - Brasil

²Eduardo Pavan Korf
²Universidade Federal da Fronteira Sul
Erechim - RS - Brasil

³Suelen Cristina Vanzetto
³Universidade Regional Integrada do
Alto Uruguai e das Missões
Erechim - RS - Brasil

⁴Gabriel André Tochetto
⁴Universidade Federal de Santa
Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

Recebido em 11/02/22
Aceito em 26/06/22

Introdução

Os polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV), segundo Wait (2010), são amplamente utilizados pela indústria na confecção de peças de diferentes formatos e aplicações. A produção em PRFV, segundo a Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos, alcançou 172,2 mil toneladas (ASSOCIAÇÃO..., 2019). Como características desses laminados são mencionadas altas propriedades mecânicas, alta resistência à tração, flexão e impacto, leveza, não condução de corrente elétrica, resistência à corrosão e integralidade de suas formas e dimensões quando submetidos a condições extremas de uso, devido ao baixo coeficiente de dilatação térmica e à baixa absorção de água (RISSON *et al.*, 1998; ZATTERA *et al.*, 2000; FARINHA; DE BRITO; VEIGA, 2019).

O PRFV é produzido mediante a junção de fibra de vidro com uma matriz polimérica, sendo aplicado em um molde, aberto ou fechado. O método do molde aberto é o mais utilizado, devido ao custo reduzido, contudo a geração de resíduos é maior. Também ocorrem desperdícios de material em rebarbas e acabamentos de peças.

Os resíduos gerados precisam ser dispostos de forma ambientalmente adequada em aterros controlados, por causa de sua natureza não inerte (ASOKAN; OSMANI; PRICE, 2009). Entretanto, reutilizar um resíduo, agregando valor a ele, é um dos princípios previstos na Política Nacional dos Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). A partir do momento em que o resíduo se torna um bem econômico e de valor, que pode ser reaproveitado no mesmo processo produtivo ou em outros, verificam-se vários ganhos, tais como a diminuição de gastos com a disposição em aterros controlados, ganhos com a venda do resíduo, minimização dos custos com matéria-prima e preservação ambiental.

Na literatura há estudos para aplicar o resíduo no mesmo processo produtivo, como no trabalho de Barros (2019), em que o resíduo de PRFV é utilizado como substituto da fibra de vidro. Entretanto, o grande destaque está em buscar novas maneiras de empregar esse material (FARINHA; DE BRITO; VEIGA, 2019). Entre os nichos de utilização do resíduo, está a aplicação no setor de construção civil, em substituição a matérias-primas, que têm maior custo, entregando um produto que atenda às especificações técnicas. As possibilidades são muitas, entre elas a aplicação em concreto/cimento (ASOKAN; OSMANI; PRICE, 2009; CORREIA; ALMEIDA; FIGUEIRA; 2011; CORINALDESI, 2012), argamassa (TITTARELLI; MORICONI, 2005; FARINHA; DE BRITO; VEIGA, 2019) e geopolímeros (RIVERA *et al.*, 2018).

A utilização de blocos intertravados de concreto para pavimentação, ou pavers, vem crescendo, devido a suas características:

- (a) baixo custo de manutenção;
- (b) aumento no escoamento e infiltração das águas superficiais;
- (c) tráfego imediato de pessoas e veículos;
- (d) mão de obra não necessariamente especializada;
- (e) facilidade de assentamento das peças; e
- (f) material com diversidade de cores e formatos (WIEBBELLING, 2015).

Os estudos sobre pavers também vêm aumentando. Na literatura se encontra a utilização de diferentes resíduos e subprodutos para sua produção. Eles são adicionados na mistura de cimento e em agregados naturais como forma de destinação deles, além de baratear o custo de produção do paver (BITTENCOURT, 2012). Entre esses materiais há conchas do mar (NGUYEN *et al.*, 2013), resíduos de construção/demolição (KUMAR; SHRIVASTAVA; GUPTA, 2020), fibra de juta (KUNDU; CHAKRABORTY; CHAKRABORTY, 2018), resíduo de pavimento asfáltico (HOSSINEY *et al.*, 2020), resíduo de pedras ornamentais (AMARAL *et al.*, 2018) e casca de coco (PENNARASI; SOUMYA; GUNASEKARAN, 2019). Também há estudos em que se utilizam resíduos de natureza polimérica, assim como o PRFV, como o policloreto de vinila (PVC) (SANTOS; FERRARI, 2019) e politereftalato de etileno (PET) (ALMEIDA, 2016). No entanto, até o momento não se explorou adequadamente a utilização de resíduo PRFV na fabricação de pavers.

O resíduo de PRFV utilizado neste estudo foi obtido em uma indústria localizada no município de Erechim, RS, que trabalha com o método de aplicação de resina de poliéster insaturada com fibra de vidro em moldes abertos. Nessa indústria foram observadas elevadas perdas de material durante a produção, somado às rebarbas que são removidas das peças durante o acabamento, que resultam na geração de cerca de 1 ton por mês de resíduo de PRFV, conforme informado pela empresa. Esse material precisa ser enviado de forma ambientalmente adequada a aterros controlados.

Diante do cenário apresentado, o presente trabalho estuda a aplicação de resíduo de PRFV como matéria-prima complementar ao agregado miúdo visando à produção de peças de concreto para pavimento intertravado, de forma a estimular a valorização e a reciclagem do resíduo.

Materiais e métodos

Os procedimentos metodológicos foram desenvolvidos tendo como base normas técnicas desenvolvidas pela ABNT, aceitas e aplicadas no Brasil e no Mercosul. Ainda, utilizou-se de estudos técnicos e/ou científicos encontrados na literatura a respeito da utilização do resíduo de PRFV no desenvolvimento de peças de concreto. A metodologia consistiu:

- (a) na coleta, redução, beneficiamento e caracterização do resíduo;
- (b) na produção e avaliação da qualidade das peças de concreto;
- (c) na análise e tratamento dos resultados de resistência à compressão, absorção de água e perda de massa entre as diferentes substituições;
- (d) na análise estatística dos erros para comparação dos resultados; e
- (e) na determinação do melhor teor para a substituição.

Resíduo de PRFV

O resíduo de PRFV foi moído em um moinho de facas na própria indústria, obtendo-se um resíduo de granulometria heterogênea e grosseira (Figura 1). A coleta da amostra do resíduo seguiu os procedimentos descritos na NBR NM 26 (ABNT, 2001), a fim de obter representatividade na amostra. Por estar armazenado em um depósito comercial, seguiu-se o procedimento para amostragem em pilhas, onde se recolheram 25 kg de resíduo para os ensaios de caracterização, em 5 amostras parciais, devido ao tamanho dele ser menor ou igual a 9,5 mm. Realizaram-se a redução e a homogeneização da amostra, pela metodologia de quarteamento, segundo a NBR NM 27 (ABNT, 2000), até se obter a quantidade necessária de material, cerca de 10 kg. Utilizou-se esse total de resíduo desde os ensaios até a produção das peças de concreto, sendo novamente quarteado quando necessárias quantidades menores. Realizou-se um processo de moagem, executada em um moinho de facas do tipo Willye, com a peneira de saída do moinho na abertura de 2 mm, ou 10 mesh.

Caracterização do resíduo de PRFV

Ambiental

O material teve sua classificação ambiental analisada através da NBR 10004 (ABNT, 2004), conforme laudos emitidos pela empresa geradora, para destinar o resíduo. Segundo essa norma, os resíduos sólidos podem ser enquadrados em duas grandes classes: perigosos (classe I) e não perigosos (classe II). Dentro da segunda classe ainda podem ser considerados não inertes (classe II-A) e inertes (classe II-B).

Figura 1 - Peça produzida em PRFV contendo rebarbas (a) e resíduo moído em seu estado bruto (b)



Granulométrica

A distribuição granulométrica do resíduo foi realizada conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), que prevê a caracterização de agregados miúdos e graúdos para uso em concreto. Os resíduos foram colocados em peneiras de diversas aberturas e, posteriormente, foram agitados em uma mesa vibratória. Assumiu-se uma tolerância menor que 0,3% de diferença entre o somatório das pesagens e da massa inicial. O módulo de finura do material foi calculado com base na Equação 1.

$$MF = \frac{\sum(p*n)}{100} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

p é a porcentagem em peso retido em cada peneira;

n representa o fator multiplicativo de peneiras usadas; e

MF indica o módulo de finura.

Morfológica

As características microestruturais do resíduo foram obtidas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV, VEGA LM 3, TESCAN), em que um feixe de elétrons com alta energia é disperso na superfície do material, gerando diferentes sinais, que o equipamento consegue detectar, de forma a se obterem micrografias tridimensionais do PRFV. Adicionalmente a esse processo, os raios X emitidos pelo resíduo são captados pelo equipamento, sendo possível identificar elementos químicos presentes na amostra por meio de microanálise elementar (EDS, OXFORD Instruments). As análises de micrografias foram realizadas no Laboratório de Metalografia da Universidade de Passo Fundo (UPF).

Física

Realizou-se também o ensaio de picnometria de gás hélio com o objetivo de determinar a massa específica do material. Para o ensaio, seguiram-se as normas D5550-14 (AMERICAN..., 2014) e NBR 16605 (ABNT, 2017). O resíduo foi colocado em uma câmara de volume conhecido, e pela diferença de pressão com e sem o material obteve-se o resultado. O equipamento utilizado nesse ensaio foi um picnômetro a gás hélio.

Produção das peças de paver

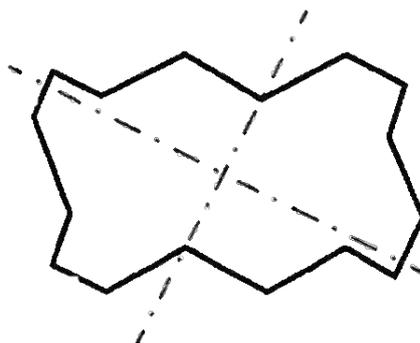
O concreto foi produzido utilizando-se água, cimento, agregado fino, agregado graúdo, aditivo químico e resíduo de PRFV, seguindo o procedimento e as recomendações descritos na NBR 9781 (ABNT, 2013), sobre peças de concreto para pavimentação. Para a escolha dos materiais foram consultadas algumas empresas que produzem paver no município de Erechim, RS, a fim de tentar aproximar o estudo de uma possível produção pela empresa. A aplicação dependeria dos resultados obtidos neste trabalho, sendo possível enquadrar em tráfego de pessoas ou até de veículos. Utilizou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) (9,61 kg), uma areia média quartzosa como agregado miúdo natural, pedrisco de origem basáltica (brita 0) como agregado graúdo (24,97 kg) e um aditivo superplastificante de natureza líquida na proporção de 0,1% da quantidade de cimento (96,1 g). A relação água-cimento (a/c) utilizada foi de 0,43. O traço de concreto foi determinado em consonância com os teores utilizados por uma indústria produtora de paver situada na mesma cidade. Produziram-se as peças em quatro diferentes proporções de substituição de areia pelo resíduo em análise, conforme apresentado na Tabela 1. Os teores de substituição foram escolhidos com base em estudos preliminares do grupo de pesquisa. Nessas condições, 12 corpos de prova para cada traço foram produzidos.

As peças de pavimento intertravado foram produzidas em laboratório, sob condições controladas e seguindo os procedimentos previstos em especificações técnicas, conforme descrito na NBR NM 67 (ABNT, 1998). A fim de garantir a padronização das amostras e de permitir uma análise rigorosa, o concreto fresco foi submetido ao ensaio de tronco de cone, no qual se determina a consistência do concreto em estado fresco pela medida de seu assentamento. A maior quantidade de água adicionada foi para a substituição de 15% (240 mL), seguida de 10% e 5% (100 mL), enquanto para a amostra sem substituição de PRFV não foi necessário fazer esse ajuste. Os quatro traços foram preparados a partir do valor de referência para esse ensaio (70 ± 10 cm), conferindo representatividade ao lote. O concreto foi colocado em formas plásticas de formato do tipo I, de 16 faces, por permitirem maior intertravamento, como apresentado na Figura 2.

Tabela 1 - Quantidades de material (traço) em cada porcentagem de substituição de areia por resíduo de polímero reforçado com fibra de vidro

Substituição (%)	Areia (kg)	Resíduo de PRFV (kg)
0	13,45	0
5	13,05	0,40
10	12,65	0,80
15	12,25	1,20

Figura 2 - Peça de concreto do tipo I de 16 faces e seus planos (comprimento e largura) para avaliação dimensional



Fonte: ABNT (2013).

Também se aplicou desmoldante antes da inserção do concreto, para facilitar a retirada da peça da forma. Para garantir uma mistura homogênea dos materiais, as peças foram adensadas com o auxílio de uma mesa vibratória. Os corpos de prova foram identificados e colocados em uma superfície plana. Após 24 h, ocorreu a desmoldagem das peças, as quais permaneceram 28 dias em uma câmara úmida para completar o processo de cura exigido pela norma, para posteriormente serem avaliadas quanto à qualidade.

Avaliação da qualidade das peças

Todas as peças de concreto intertravados produzidas passaram por uma criteriosa análise, a fim de verificar a aceitação das peças para pavimentação sujeita a tráfego de pedestres. Para tanto, foram realizados os ensaios de:

- (a) inspeção visual;
- (b) avaliação dimensional;
- (c) resistência à compressão simples; e
- (d) absorção de água, conforme descrito na NBR 9781 (ABNT, 2013).

A perda de massa também foi determinada, por gravimetria.

Os dados resistência à compressão simples e absorção de água foram analisados através do Teste de Tukey da Diferença Honestamente Significativa (HSD), por meio do software Statistica 10. O objetivo dessa avaliação era definir a melhor porcentagem de substituição de areia por resíduo de PRFV considerando desvios padrão entre as amostras de paver.

Inspeção visual

A inspeção visual consiste em buscar dentro do lote produzido, no mínimo 6 peças, defeitos que possam afetar negativamente o assentamento, o desempenho estrutural ou a estética do pavimento. Para tanto, inspecionou-se em cada peça as arestas, os ângulos, a presença de rebarbas e outros problemas.

Avaliação dimensional

Na avaliação dimensional, descrita no Anexo D da NBR 9781 (ABNT, 2013), realizou-se a medição dos planos (comprimento, largura e espessura), conforme apresentado na Figura 3, com o auxílio de um paquímetro digital com resolução 0,1 mm. A NBR 9781 (ABNT, 2013) estabelece que a peça possua 240

mm de comprimento, 100 mm de largura e 60 mm de espessura, sendo aceitável uma tolerância de 3 mm, levando-se em conta a utilização da forma de 16 faces do tipo I (ABNT, 2013).

Resistência à compressão simples

Já a avaliação da resistência à compressão simples consiste em aplicar uma força sobre a peça de concreto e avaliar qual a máxima resistência suportada, até a ruptura. Para tanto, seguiu-se o procedimento descrito no Anexo A da NBR 9781. Utilizou-se uma prensa hidráulica como máquina de ensaio. Seis corpos de prova foram saturados por 24 h antes do ensaio e dispostos, um por vez, na prensa, juntamente com as placas auxiliares. Aplicou-se um carregamento contínuo, com velocidade de $550 \pm 200 \text{ kPa s}^{-1}$, até a ruptura do corpo de prova (ABNT, 2013).

Absorção de água

O ensaio de absorção de água, descrito no Anexo B da NBR 9781, representa a penetração de água nos poros da peça, através do aumento da massa, em relação ao estado seco. Realizou-se o ensaio através da saturação das peças, durante 24 h, para então tomar a medida da massa na condição saturada com superfície seca (m_2), obtida ao se drenar a peça sobre uma tela metálica por 1 min e remover a água superficial. Repetiu-se o processo a cada 2 h, até que não houvesse diferença de 0,5% entre as duas últimas medidas. Após a medição, as peças foram levadas à estufa a $110 \pm 5 \text{ °C}$ por 24 h, para então tomar novamente a medida da massa das peças em estado seco (m_1), respeitando-se a condição de não alteração de 0,5% entre duas medições no período de 2 h. Com as medições das massas saturada e seca, calculou-se a absorção de água (A), em porcentagem (Equação 2) (ABNT, 2013).

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

Perda de massa

Por meio da determinação da massa de todas as peças produzidas (sem e com substituição), foi possível avaliar o efeito da substituição parcial de agregados naturais na leveza do paver.

Resultados e discussões

Caracterização

Com os laudos de caracterização obtidos na indústria geradora do resíduo de PRFV, este foi classificado ambientalmente como classe II-A, ou seja, não é perigoso, porém também não inerte (ABNT, 2004).

A inserção do PRFV em paver permite controlar possíveis transformações físicas, químicas ou biológicas do resíduo com o tempo, através do efeito de encapsulamento. Esse processo consiste em prender o resíduo em um meio solidificante, reduzindo sua mobilidade e toxicidade, e, muitas vezes, tornando-o inerte (TRUSSELL; SPENCE, 1994). Esse método é aplicado para diferentes resíduos de natureza perigosa (SUCEK *et al.*, 2005). Para o efeito de encapsulamento cumprir com o objetivo de reduzir a mobilidade, precisa ser realizado com revestimento selante no paver ou com um pré-tratamento, utilizando-se cimentos especiais e aditivos (MAGAGNIN FILHO, 2015), visto que pode ocorrer interação da água que infiltra pelos poros e entra em contato com o resíduo, lixiviando ou solubilizando alguns contaminantes. Dessa forma, é esperado que a classificação ambiental continue como II, assim como observado no estudo semelhante utilizando-se PET de Almeida (2016).

Outro resultado encontrado na caracterização foi a massa específica do resíduo ($1,53 \text{ g cm}^{-3}$). Quando é realizada uma rápida comparação com outros materiais, como a areia média ($2,59 \text{ g cm}^{-3}$) e a brita 0 ($2,73 \text{ g cm}^{-3}$), percebe-se que o PRFV é menos denso, o que torna as peças concebidas mais leves. Esse resultado pode ser confirmado pela análise da diminuição da massa com o aumento do percentual de substituição (Figura 7). Um exemplo disso foi a necessidade de adicionar mais água para obter um concreto com consistência adequada. O resíduo é um material menos denso que a areia e, portanto, possui maior volume para a mesma massa. Dessa forma, com maior volume de material, é necessário maior quantidade de água para a mistura ter trabalhabilidade. Esse resultado corrobora o estudo de Rahmani *et al.* (2013), que cita a necessidade de maior quantidade de água para substituições de areia por materiais mais leves.

Os resíduos de PRFV a serem reutilizados ou reciclados passam por um processo de beneficiamento a fim de obter granulometria de agregado fino (materiais passantes na peneira de 4,75 mm) (ABNT, 2003). O material em estudo passou por um pré-tratamento de moagem antes de sua utilização como agregado miúdo,

com o objetivo de reduzir as dimensões granulométricas das partículas e, conseqüentemente, homogêneizá-las ainda mais (MORALES, 1999). Na Figura 3 observa-se a curva granulométrica do PRFV.

Para efeitos de comparação, observaram-se os dados granulométricos da areia média (utilizada neste estudo) descritos por Cima (2017). Pela observação dos dados, pode-se perceber que, apesar do comportamento diferente entre os dois materiais, o resíduo possui maior quantidade de finos, principalmente pela quantidade de material retido no fundo. Dessa forma, o resíduo tem potencial para preencher vazios, os quais não seriam preenchidos utilizando-se apenas areia, comprovado pelos valores de módulo de finura, menores para o PRFV ($MF_{PRFV} = 1,71 < MF_{AREIA} = 1,98$).

A microscopia eletrônica de varredura é uma das tecnologias mais importantes aplicadas no estudo de materiais sólidos, principalmente naqueles que até então não eram submetidos a análises, pois fornece informações sobre a morfologia e os elementos químicos de uma amostra sólida (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007). Assim, as características morfológicas do resíduo foram obtidas pelo MEV, ampliadas em 70, 300 e 2.000 vezes. Na Figura 4a-b é possível identificar que a superfície é heterogênea, com grânulos de diferentes dimensões e bastonetes alongados lisos de face plana orientados de forma aleatória. Quando essa imagem é ampliada (Figura 4c) a micrografia permite confirmar as observações anteriores. Rivera *et al.* (2018) realizaram a caracterização de três tipos de resíduos de vidro (garrafa, janela e lâmpada) para fins de aplicação em concreto, tendo obtido resultados similares ao resíduo de PRFV na caracterização morfológica. A não uniformidade no tamanho e na forma das partículas observadas nas micrografias (Figura 4) também foi constatada em outros trabalhos (PINTO, 2002). Segundo Trentin *et al.* (2020), a microestrutura desordenada das partículas indica que o resíduo pode ser empregado na produção de pavers, devido às possibilidades de combinação e arranjo com outros materiais.

Pela microanálise elementar (EDS) realizada na amostra de PRFV foi possível identificar predominância de carbono e, em quantidades traço, observou-se a presença de cálcio, silício, magnésio, alumínio, ferro e titânio. O estudo de Pinto (2002) caracterizou o resíduo de PRFV fabricado em molde aberto, sendo este o mesmo processo de fabricação pelo qual o resíduo em estudo passou. Através da espectroscopia de fluorescência de raios X, constatou-se que o resíduo de PRFV coletado em uma indústria do município de Erechim tem muita similaridade em sua composição química com o material de Pinto (2002). Há maior presença de C, cerca de 83,73%, seguido por Ca (7,33%), Si (5,88%) e Al (1,22%). A predominância do carbono e dos demais constituintes na forma de óxidos é um resultado esperado, devido ao uso deles como reforços termoplásticos de baixo custo na confecção do PRFV (OTA, 2004; SOARES *et al.*, 2007). Quanto à composição química do resíduo de PRFV, alguns elementos identificados pela análise elementar (EDS) podem ser atribuídos a materiais vítreos. Ca, Si e Al, por exemplo, foram observados em garrafas, janelas e lâmpadas de vidro (RIVERA *et al.*, 2018).

Figura 3 - Curva granulométrica do resíduo de PRFV beneficiado conforme sua retenção na série de peneiras solicitadas para determinação granulométrica de um agregado

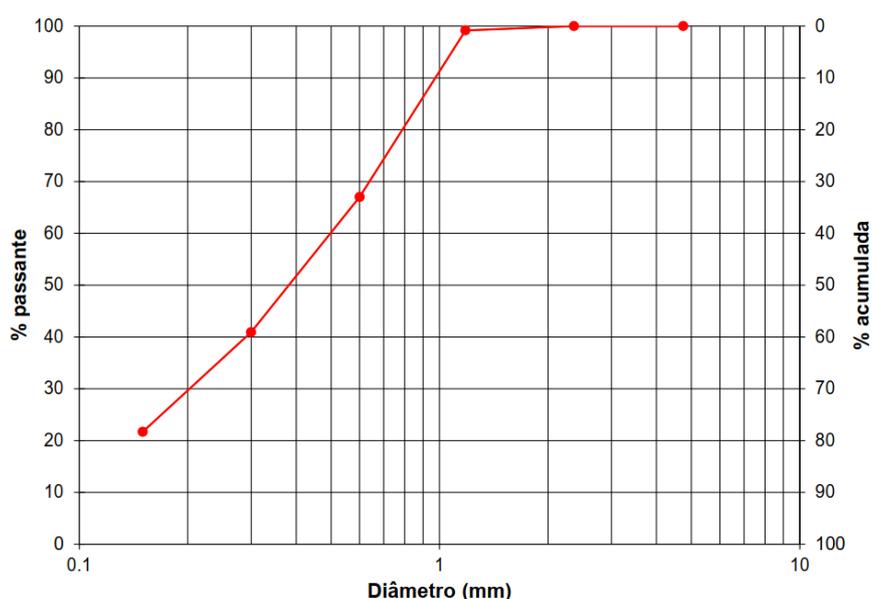
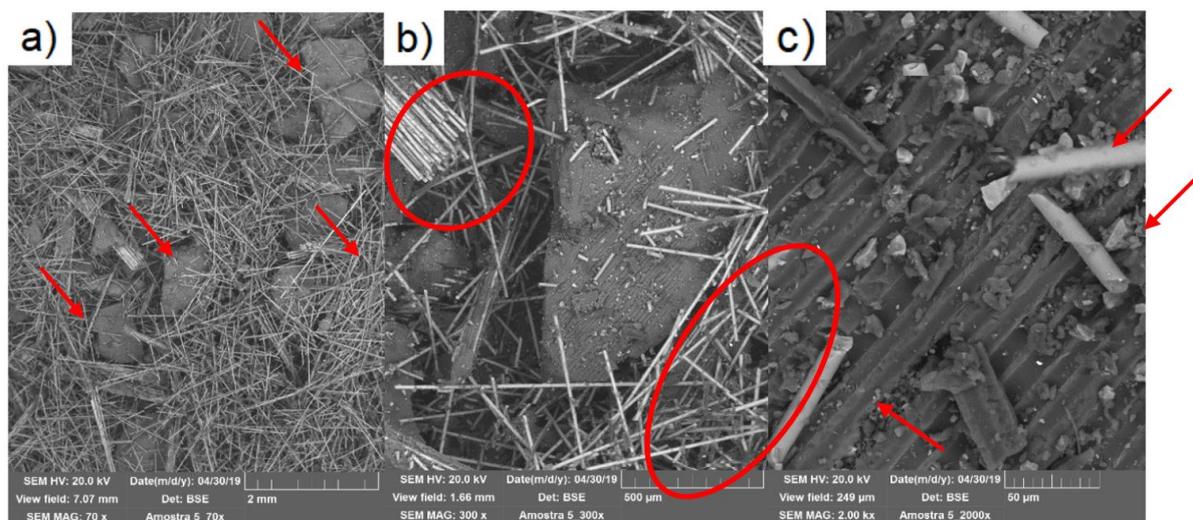


Figura 4 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do resíduo de polímero reforçado com fibra de vidro, ampliações de (a) 70x, (b) 300x e (c) 2.000x



Produção e avaliação da qualidade das peças

As peças produzidas neste estudo foram avaliadas quanto à inspeção visual e dimensional, em que se observaram pequenos defeitos na homogeneidade, como formação de bolhas de ar, devido ao assentamento, assim como ocorrido no estudo de Cima (2017). Já as dimensões das peças foram padronizadas pelo uso de formas. Assim, as medidas nos planos comprimento e largura obtiveram os mesmos valores. A Figura 5 apresenta algumas das peças produzidas com os quatro traços de substituição avaliados.

A avaliação da resistência à compressão é um dos principais ensaios realizados e tem o objetivo de determinar a durabilidade do material (TRENTIN *et al.*, 2020; KOLLER *et al.*, 2007). O valor da resistência permite classificar as peças entre duas finalidades: tráfego leve, com resistência maior ou igual 35 MPa, e tráfego pesado, para resistência maior ou igual a 50 MPa (ABNT, 2013). Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para cada um dos traços, após 28 dias, são apresentados na Figura 6. Percebe-se que o maior valor de resistência do paver é encontrado no controle (sem adição de PRFV), cerca de 37,87 MPa. Quando é feita a substituição parcial da areia média pelo resíduo, há diminuição da resistência para 31,08 MPa, 27,59 MPa e 25,64 MPa para as substituições de 10%, 5% e 15% respectivamente. Analisando-se os dados obtidos, conclui-se que, apesar de as peças produzidas com substituição possuírem alguns valores dentro do mínimo solicitado pela norma, somente as peças sem substituição atendem à legislação, com média acima dos 35 MPa. A substituição de 10% é a mais bem-sucedida, conforme verificado na Figura 6, por seu limite superior estar mais próximo estatisticamente do valor de 35 MPa, ainda assim com uma perda de aproximadamente 18% de resistência em relação ao padrão. Apesar disso, o Teste de Tukey indica que, com 95% de confiança, as três substituições têm a mesma significância, devido ao fato de seus intervalos se cruzarem. Considerando o erro experimental, não são observadas diferenças entre as substituições, de modo que as três substituições (5%, 10% e 15%) apresentam o mesmo valor de resistência. Os valores não são distantes dos mínimos 35 MPa exigidos pela norma nacional, a qual se mostra antiquada quando comparada às de países que utilizam essa tecnologia há mais tempo, em que os valores de resistência à compressão são menores, além de avaliarem parâmetros como resistência à abrasão. Inclusive, os valores obtidos neste estudo se enquadrariam em normas internacionais. Por exemplo, a norma sul-africana define valores de resistência à compressão de 25 MPa para tráfego leve e de 35 MPa para pesado. A norma australiana cita 15 MPa para ciclovias e estacionamentos, os mesmos 25 MPa para tráfego leve, e 60 MPa para pesado (BITTENCOURT, 2012).

Ao comparar a resistência com pavers produzidos com outros resíduos poliméricos – PVC, segundo Santos e Ferrari (2019), e PET, segundo Almeida (2016) –, observa-se que o decréscimo na resistência é próximo aos valores obtidos em uma substituição de 10% (cerca de 18%). O caso do PVC é muito próximo ao deste estudo, pois o melhor resultado foi obtido na substituição de 10%, sendo 5% e 15% também inferiores. Já no caso do PET, menores substituições obtiveram melhores resultados (2,5%, 5% e 7,5%).

Em outros estudos sobre a substituição de agregado miúdo por resíduo de PRFV para produção de concreto também se observaram decréscimos na resistência à compressão, como em Asokan, Osmani e Price (2009) e

Correia, Almeida e Figueira (2011). Essa redução na resistência pode ser explicada, segundo Sharma e Bashal (2016), pelo fato de os materiais poliméricos, quando inseridos na produção de concreto, reduzirem a resistência, o que ocorre devido à fraca ligação superficial entre esses e a mistura de concreto. Para corrigir essa fraca ligação, seria necessário fazer um tratamento químico na superfície do polímero com substâncias reativas. Nesse caso, a superfície tratada reagiria produzindo reações pozolânicas adicionais.

Os resultados da absorção de água pelas peças de concreto são apresentados na Figura 6. Para todas as substituições, os valores se encontraram dentro da norma, ou seja, média menor que 6% e nenhum valor individual acima de 7%. A peça sem substituição obteve o melhor resultado, seguido pelas substituições de 10% e 15% com valores estatisticamente iguais (Teste de Tukey com 95% de confiança), enquanto a substituição de 5% obteve o resultado mais elevado, mas ainda dentro do permitido. Pelo ensaio também foi possível perceber que a substituição torna o produto final mais leve e que todas as substituições reduzem a massa final do paver. Para a maior porcentagem de substituição, ocorre redução de cerca de 9% da massa (Figura 7). Comparando-se novamente com os estudos que envolvem PVC (SANTOS; FERRARI, 2019) e PET (ALMEIDA, 2016), pode-se perceber que o resíduo de PVC causou redução na absorção de água, enquanto o PET teve comportamento similar ao do resíduo de PRFV, com aumento na absorção. Na produção de concreto com resíduo de PRFV por Correia, Almeida e Figueira (2011), houve redução na absorção de água para o traço de 5%, enquanto para os traços com maior substituição houve aumento na absorção de água, com um comportamento similar ao apresentado. Esse aumento na absorção de água para os traços com substituição de areia por resíduo, segundo os autores, se deve ao fato de se utilizar mais água na produção.

Figura 5 - Peças de concreto produzidas substituindo areia por resíduo de PRFV, nas porcentagens de (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% e (d) 15%

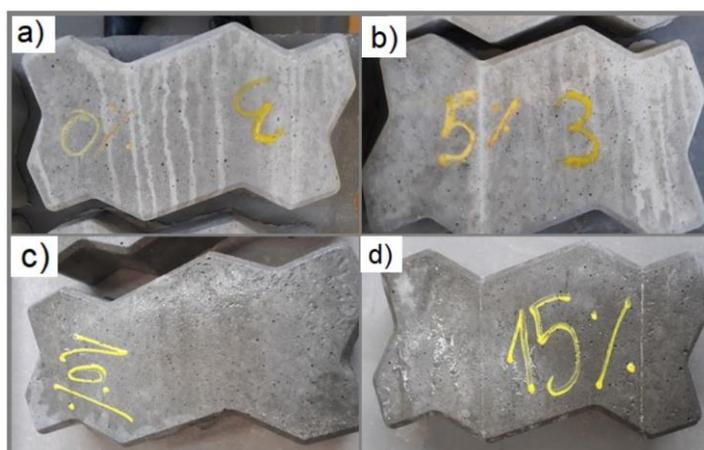


Figura 6 - Resistência à compressão simples e absorção de água das peças de concreto com substituição de areia por resíduo de PRFV em 0%, 5%, 10% e 15%, após 28 dias

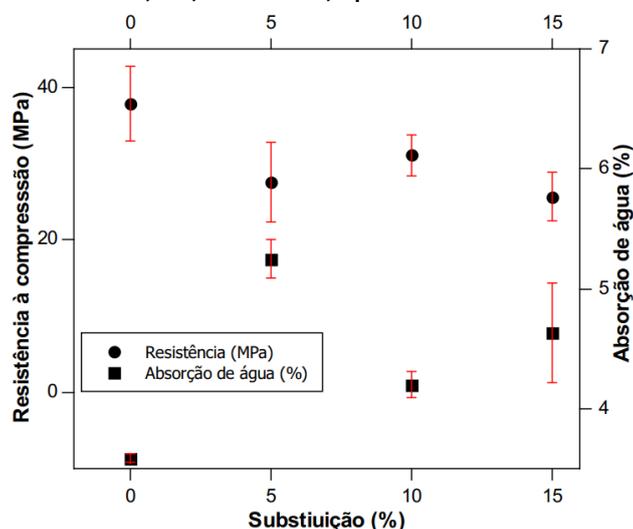
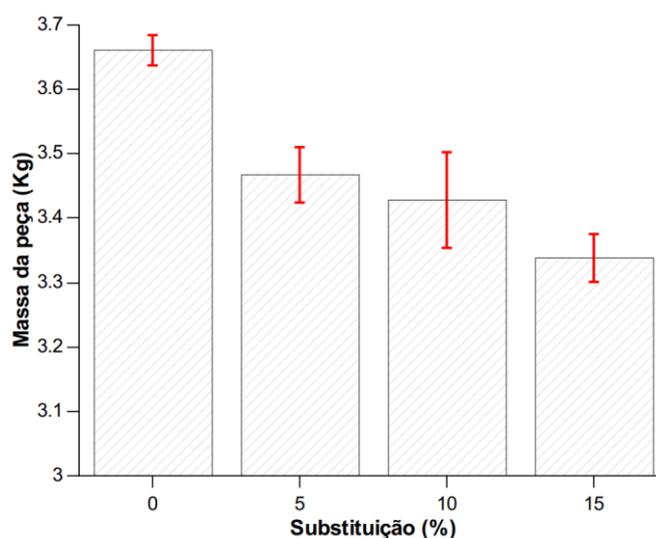


Figura 7 - Perda de massa das peças de concreto intertravado nas diferentes substituições de areia por resíduo de PRFV



Conclusão

Com um viés ambiental, social e econômico, o presente trabalho apresentou uma forma possível e inovadora de utilizar o resíduo de PRFV como matéria-prima na confecção de pavers. O resultado final é o de um resíduo encapsulado em peças de concreto, uma forma de destinação satisfatória. Quanto ao comportamento mecânico, as peças com substituição obtiveram um bom resultado, apresentando decréscimo mínimo de 18% na resistência, valor próximo ao obtido em estudos com outros resíduos, que se enquadra em normas internacionais. O resultado do ensaio de absorção de água foi satisfatório, pois todos os traços ficaram dentro dos limites avaliados. Pode-se perceber, portanto, que os resíduos provenientes de empresas que confeccionam peças em PRFV, após beneficiamento, apresentam potencial e podem substituir a areia, em proporção de 10% a 15%, conforme os resultados obtidos neste trabalho, para a produção de concreto para confecção de peças para pavimento intertravado.

Referências

- ALMEIDA, S. P. **Uso de politereftalato de etileno (PET) como agregado em peças de concreto para pavimento intertravado**. Campina Grande, 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- AMARAL, L. F. *et al.* Development of ceramic paver with ornamental rock waste. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, p. 599-608, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5550-14**: standard test method for specific gravity of soil solids by gas pycnometer. West Conshohocken, 2014.
- ASOKAN, P.; OSMANI, M.; PRICE, A. D. F. Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete and cement composites. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, p. 821-829, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: cimento Portland e outros meteraisi em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781**: peças de concreto para pavimentação: especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26**: agregados: amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: agregados: redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DE MATERIAIS COMPÓSITOS. **Caracterização dos indicadores produtivos e monitoramento do desempenho da indústria de materiais compósitos no Brasil**. São Paulo, 2019.

BARROS, L. H. V. **Reciclagem de resíduos de plástico reforçado com fibras de vidro na indústria de piscinas**. Natal, 2019. Dissertação (Mestrado em Uso Sustentável de Recursos Naturais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

BITTENCOURT, S. F. **Avaliação da resistência à compressão de pavers produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição**. Limeira, 2012. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Universidade de Campinas, Limeira, 2012.

BRASIL. Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010, Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, p. 1-21, 2010.

CIMA, E. **Aplicação de resíduos de construção e demolição na fabricação de peças para pavimento intertravado (pavers)**. Erechim, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharias e Ciência da Computação, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2017.

CORINALDESI, V. Influence of lightweight aggregates and GRP by-product powders on the properties of self-compacting concretes. **Advanced Materials Research**, v. 548, p. 215-220, 2012.

CORREIA, J. R.; ALMEIDA, N. M.; FIGUEIRA, J. R. Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p. 17451753, 2011.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: Edipucrs, 2007.

FARINHA, C.B.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. Assessment of glass fibre reinforced polymer waste reuse as filler in mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1579-1594, 2019.

HOSSINEY, N. *et al.* Alkali-activated concrete paver blocks made with recycled asphalt pavement (RAP) aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, p. e00322, 2020.

KOLLER, D. R. P. *et al.* Avaliação da resistência à compressão de argamassas produzidas com vidro moído. **Disciplinarium Scientia Série: Ciências Naturais e Tecnológicas**, v. 8, p. 17-23, 2007.

KUMAR, G.; SHRIVASTAVA, S.; GUPTA, R. C. Paver blocks manufactured from construction & demolition waste. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 311-317, 2020.

KUNDU, S. P.; CHAKRABORTY, S.; CHAKRABORTY, S. Effectiveness of the surface modified jute fibre as fibre reinforcement in controlling the physical and mechanical properties of concrete paver blocks. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 554-563, 2018.

MAGAGNIN FILHO, N. **Resíduos da construção civil na cidade de Londrina**: análise da política de gerenciamento de resíduos da construção civil adotada pelo município e estudo de caso utilizando uma proposta de reciclagem baseada na técnica de estabilização por solidificação à base de cimento Portland. São Carlos, 2015. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

MORALES, G. Aproveitamento do lodo de esgoto sanitário como matéria-prima para a produção de pozzolana. **Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 18, p. 39-45, 1999.

NGUYEN, D. H. *et al.* Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 151-160, 2013.

OTA, W. N. **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional**. Curitiba, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

PENARASI, G.; SOUMYA, S.; GUNASEKARAN, K. Study for the relevance of coconut shell aggregate concrete paver blocks. **Materials Today: Proceedings**, v. 14, p. 368-378, 2019.

- PINTO, N. C. K. **Reciclagem de resíduos de materiais compósitos de matriz polimérica: poliéster insaturado reforçado com fibras de vidro**. São Paulo, 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- RAHMANI, E. *et al.* On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1302-1308, 2013.
- RISSON, P. *et al.* Reaproveitamento de resíduos de laminados de fibra de vidro na confecção de placas reforçadas de resina poliéster. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 1, p. 89-96, 1998.
- RIVERA, J. F. *et al.* Novel use of waste glass powder: production of geopolymeric tiles. **Advanced Powder Technology**, v. 29, p. 3448-3454, 2018.
- SANTOS, A. G.; FERRARI, A. K. Influência do resíduo de PVC como agregado no concreto para peças de pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, p. 39-51, 2019.
- SHARMA, R.; BANSAL, P. P. Use of different forms of waste plastic in concrete: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 473-482, 2016.
- SOARES, R. R. *et al.* Influência do tipo de fibra nas propriedades de compósitos processados por moldagem por transferência de resina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 9., Campina Grande, 2007. **Anais [...]** Campina Grande, 2007.
- SUCEK, T. M. *et al.* Encapsulamento de metais pesados da indústria automobilística (do processo de fosfatização) em matriz de cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL; CICLO DE CONFERÊNCIAS SOBRE POLÍTICA E GESTÃO AMBIENTAL, Florianópolis, 2004. **Anais [...]** Florianópolis, 2005.
- TITTARELLI, F.; MORICONI, G. Re-use of GRP industrial waste in cementitious products. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON YOUNG RESEARCHERS, Dundee, 2005. **Proceedings [...]** Dundee, 2005.
- TRENTIN, P. O. *et al.* Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa. **Revista Matéria**, v. 25, p. 1-14, 2020.
- TRUSSELL, S.; SPENCE, R. D. A review of solidification/stabilization interferences. **Waste Management**, v. 14, p. 507-519, 1994.
- WAIT, C. F. **The reuse and recycling of glass fibre waste**. Birmingham, 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – School of Metallurgy and Materials, University of Birmingham, Birmingham, 2010.
- WIEBBELLING, P. O. G. **Pavimento com blocos intertravados de concreto**: estudo de caso na Univates. Lajeado, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2015.
- ZATTERA, A. J. *et al.* Reúso de resíduos de laminados de fibra de vidro na construção civil. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS, São Paulo, 2000. **Anais [...]** São Paulo, 2000.

Arthur Henrique Knorst Colling

Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária | Universidade Federal da Fronteira Sul | ERS-135, 200 | Erechim - RS - Brasil | CEP 99700-000 | Tel.: (54) 3321-7301 | E-mail: ahcolling@gmail.com

Eduardo Pavan Korf

Conceitualização, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária | Universidade Federal da Fronteira Sul | E-mail: eduardo.korf@uffs.edu.br

Suelen Cristina Vanzetto

Conceitualização, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharias e Ciências da Computação | Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões | ERS-331 | Erechim - RS - Brasil | CEP 99700-000 | Tel.: (54) 99147-0974 | E-mail: suelen.van@hotmail.com

Gabriel André Tochetto

Análise de dados, Pesquisa, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos | Universidade Federal de Santa Catarina | Campus Reitor João David Ferreira Lima | Florianópolis - SC - Brasil | CEP 88040-970 | Tel.: (48) 3721-5231 | E-mail: gabriel.tochetto@posgrad.ufsc.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.