

PEÇAS INTERTRAVADAS DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE PÓ DE VIDRO: UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL COM TRATAMENTO ESTATÍSTICO

INTERLOCKED CONCRETE PARTS WITH ADDITION OF GLASS POWDER: AN EXPERIMENTAL ANALYSIS WITH STATISTICAL TREATMENT

Antonio Rafael de Souza Alves Bôso Alho 1
Talline Pereira Parrião 2
Esdras Souza Ferreira 3
Roberta Paula Medeiros Silva 4
Adriano dos Guimarães de Carvalho 5

Doutor em Química pela UFG, UniCatólica. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0965547414059401>, ORCID: 0000-0002-3113-9246. E-mail: rafaelbosso@catolica-to.edu.br | 1

Engenheira Civil, UniCatólica. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2896545528723756>, ORCID: 0000-0001-9257-8878. E-mail: tallineparriao@gmail.com | 2

Engenheiro Civil, UniCatólica. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8526397101491011>, ORCID: 0000-0002-5895-147X. E-mail: esdras-s-f@outlook.com | 3

Mestre em Mecânica das Estruturas, UFG. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5349213998665996>, ORCID: 0000-0001-5984-6930. E-mail: roberta.medeiros@p.catolica-to.edu.br | 4

Doutor em Ciências do Ambiente, UFT. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8261115135036352>, ORCID: 0000-0002-9130-2877. E-mail: agcarvalho@ifto.edu.br | 5

Resumo: O objetivo desta pesquisa foi analisar características físicas e mecânicas de pavimentos intertravados de concreto com a incorporação de pó de vidro, oriundos das embalagens long neck. A metodologia consistiu na dosagem de um traço padrão para atender a NBR 9781:2013 no que tange à resistência característica de elementos intertravados de 60 mm no valor de 35 MPa. Foram desenvolvidos mais três traços com a substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado (pó de vidro) proveniente de garrafas do tipo long neck nas proporções 5% (T2), 10% (T3) e 15% (T4) em relação a massa. A variável processo de cura também foi incorporada à pesquisa, adotando-se dois procedimentos distintos: cura ao ar livre e por aspersão. As respostas experimentais obtidas para os ensaios de absorção de água e resistência a compressão dos pisos intertravados, foram avaliadas pelo teste estatístico de comparação de Tukey ao nível de significância de 5%. Quanto a resistência à compressão dos diferentes traços infere-se que o traço T3 (10% de substituição) da cura por aspersão, apresentou-se como o de melhor performance, tanto no quesito de sustentabilidade, quanto no de resistência. Portanto, o vidro mostrou-se viável para utilização na fabricação de peças de pavimentos intertravados.

Palavras-chave: Pavimentos intertravados. Vidro. Reutilização.

Abstract: The concern with the high production of solid waste combined with the socio-environmental responsibility of firm provides an important scenario for the study of the reuse of these inputs, for example, as a raw material for the production of concrete in civil construction. The high production and the inappropriate disposal of long neck bottles, presents the need for reuse, providing an efficient alternative for the study of the incorporation of this residue in the concrete. The objective of this research was to analyze the physical and mechanical properties of concrete paving blocks interlock with the incorporation of long neck powder in partial replacement to the aggregate of natural sand, coming from rivers. The methodology consisted of the dosage of a standard to meet NBR 9781: 2013 regarding the compressive strength of interlocking elements with a height of 60 mm, with a value of 35 MPa. Three other features were developed with the partially replace of the natural fine aggregate with recycled fine aggregate (glass powder) from long neck bottles in the proportions 5% (T2), 10% (T3) and 15% (T4) in mass. The variable type of curing process also included in the research, adopting two distinct procedures: open-air cure and sprinkler cure. The responses obtained for the experimental tests of water absorption and compressive strength of the interlocking concrete blocks were evaluated by the statistical test of comparison of Tukey at the significance level of 5%. The T3 trait (10% substitution of natural sand for glass powder) with sprinkler cure, presented the best performance, in terms of both sustainability, as well as the test compressive strength of concrete.

Keywords: Interlocking Concrete Blocks. Glass Poder. Reuse.

Introdução

O planejamento na gestão e no gerenciamento de resíduos sólidos não acompanha o crescimento exacerbado do consumo, que está diretamente relacionado ao crescimento da população, provocando assim inúmeros impactos ao meio ambiente (BRITO, 2015). Nesse aspecto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, 02 de agosto de 2010, no seu artigo 3º, inciso XVI, define os resíduos sólidos como:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Braga (2015) destaca que no meio ambiente o resíduo é visto como um 'invasor', já que a natureza segue um ciclo natural para decomposição dos refugos, porém, esta mesma natureza se torna incapaz de absorver a excessiva quantidade de matérias dispostos no meio ambiente, devido principalmente ao consumo exacerbado. Então, cabe as empresas, ao poder público e a população em geral se adequarem a padrões que visem a diminuição da geração de resíduos, além da adoção de procedimentos de reciclagem e reutilização dos mesmos. Atualmente a prática socioambiental em algumas empresas vem se tornando cada vez mais salutar, por isso a relevância de estudos de cunhos sustentáveis.

De acordo com Andrade *et al.* (2002), percebe-se uma crescente preocupação relativo à responsabilidade socioambiental por parte das organizações, pois seus resultados econômicos, estão atrelados a adoção de princípios de sustentabilidade, haja vista que a cada dia, os consumidores se perguntam antes de realizar suas compras, sobre quais as práticas sustentáveis adotadas para a produção de determinado produto ou serviço. Sendo assim, fica claro que empresas que adotam essas condutas, em grande parte das vezes têm negócios que agregam boa imagem socioambiental.

No Brasil, segundo CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem (2013), são produzidas cerca de 980 mil embalagens de vidro por ano, sendo na sua grande maioria garrafas. As embalagens de vidro não retornáveis são resíduos gerados em grande escala, e em grande parte das situações são descartadas no meio ambiente. Porém, considerando que tal material pode ser reciclado, e ainda, que porventura pode ser empregado ou reutilizado em algumas aplicações, a busca por novas soluções sustentáveis se faz necessárias para diminuir o impacto causado por este descarte.

Os vidros tradicionais pertencem a classe dos materiais cerâmicos, de forma geral, sua composição é a base de sílica e outros óxidos, especialmente CaO (óxido de cálcio), Na₂O (óxido de sódio), K₂O (óxido de potássio) e Al₂O₃ (trióxido de alumínio), que definem suas propriedades. Por ser um material amorfo e possuir um elevado teor de sílica, o vidro pode apresentar condições favoráveis para reação pozolânica (Callister, 2008).

Uma alternativa para a destinação sustentável desse material, seria a incorporação do mesmo na construção civil. Segundo Righi *et al.* (2011), a substituição da areia pelo vidro moído de embalagens *long neck* tem um impacto positivo não somente no aspecto ambiental, mas também quanto a resistência do concreto. Sendo assim, é um material com potencial para ser incorporado ou substituído como agregado miúdo no concreto, e empregado em diversos artefatos pré-moldados.

Portanto, este trabalho objetivou analisar estatisticamente as propriedades físico-mecânicas de peças de pavimento intertravados de concreto, que é um material de crescente uso na construção civil. O estudo visa incorporar e substituir parcialmente o agregado miúdo natural por vidro moído proveniente de embalagens do tipo *long neck*, que até então seriam descartadas no meio ambiente.

Metodologia

Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa constituíram-se do cimento Ciplan CP-V-ARI, agregado miúdo areia do tipo média (lavada de rio) e agregado graúdo brita 0 (rocha britada), fornecidos pelo Centro Universitário Católica do Tocantins - UniCatólica. O vidro utilizado foi proveniente da coleta seletiva de garrafas do tipo *long neck* em bares e restaurantes da cidade de Palmas – TO, em agosto de 2018 (Figura 1).

Figura 1. Garrafas coletadas.



Fonte: Autores, 2019.

Métodos

Caracterização do vidro

As garrafas coletadas foram limpas, e em seguida foram moídas por meio do moinho de martelos e o Abrasão Los Angeles, adotando-se a ABNT NM 51 (2001) como referência, adquirindo diferentes granulometrias. O material utilizado foi o passante da peneira 4 (#4,8 mm) (Figura 2).

Figura 2. Vidro moído.



Fonte: Autores, 2019.

Traço referência

Desenvolveu-se um traço referência (T_1) no laboratório do UniCatólica, em novembro de 2018, através do método de dosagem ACI - *American Concrete Institute* para atender a resistência característica de peças de pisos intertravados de 60 mm no valor de 35 MPa, a qual a

norma NBR 9781 (ABNT, 2013) determina como o mínimo para a utilização para tráfego leve e pesado. Os corpos de provas confeccionados para esta análise foram adensados manualmente e submetidos a 7 dias de cura (por aspersão e ao ar livre na sombra). A proporção em massa para cada material utilizado foi 1:1,38:1,4:0,41, sendo respectivamente, cimento, areia, brita e água.

Fabricação das peças de pavimento intertravado

A partir do traço referência foram realizados os cálculos das substituições de agregado miúdo pelo vidro moído, nas proporções de 5% (T_2), 10% (T_3) e 15% (T_4). Desta forma, obteve-se a quantidade de cada material utilizado na fabricação das peças com resíduo de vidro moído, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Materiais utilizados para a produção das peças intertravadas.

| | Materiais (Kg) | | | | |
|-------|----------------|-------|-------|-------|------|
| | Cimento | Areia | Vidro | Brita | Água |
| T_1 | 24,19 | 33,46 | 0,00 | 33,81 | 9,92 |
| T_2 | 24,19 | 31,80 | 1,67 | 33,81 | 9,92 |
| T_3 | 24,19 | 30,11 | 3,35 | 33,81 | 9,92 |
| T_4 | 24,19 | 28,44 | 5,02 | 33,81 | 9,92 |

Fonte: Autores, 2019.

A produção das peças de intertravados ocorreu no pátio da obra do Hospital do Amor de Palmas – TO, no mês de maio de 2019, em que todo o material utilizado foi levado do UniCatólica para obra. A produção seguiu as etapas de pesagem do material, mistura do mesmo na betoneira, adensamento do concreto nas formas pela mesa vibratória (Figura 3).

Figura 3. Peças produzidas na obra do Hospital do Amor em Palmas – TO.



Fonte: Autores, 2019.

Foram produzidas 80 peças, sendo 20 para cada tipo de traço. Após 24 horas as peças foram desmoldadas e transportadas para o UniCatólica, logo em seguida foram submetidas a dois processos de cura, conforme descritos a seguir (Figura 4):

10 peças de cada traço foram submetidas ao procedimento de cura ao ar livre à sombra, por um período de quatorze dias;

Outras 10 peças de cada traço foram expostas à cura úmida por aspersão no mesmo período, com a adição de molhagem uma vez ao dia com duração de dois minutos por peça.

Figura 4. Peças no processo de cura ao ar livre à sombra e cura úmida por aspersão, respectivamente.



Fonte. Autores, 2019.

Ensaios Físicos e Mecânicos

Foram realizados dois ensaios para análise da viabilidade do emprego do vidro em peças de pavimento intertravado, com base na NBR 9781:2013, como disposto na Tabela 2.

Tabela 2. Ensaios laboratoriais realizados segundo a NBR 9781:2013.

| Finalidade | Ensaio | Nº de amostras | Parâmetro normativo - NBR 9781:2013 |
|---|---|----------------|-------------------------------------|
| Determinação de características físicas | Índice de absorção de Água | 5 | Valor médio $\leq 6\%$ |
| Determinação de característica mecânica | Resistência à compressão característica | 5 | A partir de 35 MPa |

Fonte. Autores, 2019.

Para a característica mecânica, foi verificada a resistência à compressão das peças de pavimentos intertravados, com a análise de 5 peças para cada traço de concreto: T1, T2, T3, T4. Todos os corpos de prova foram capeados para a regularização da superfície com argamassa convencional (areia, cimento e água) (Figura 5a). Após o capeamento, aguardou-se 24 horas para o rompimento de forma a se permitir a determinação de sua resistência à compressão (Figura 5b). A característica física dos elementos intertravados de concreto foi verificada utilizando 5 peças de cada traço, de acordo com a NBR 9781:2013 para obtenção da absorção de água.

Figura 5. Peças de pisos intertravado de concreto após regularização das faces com argamassa e ensaio de resistência a compressão em prensa manual.



Fonte. Autores, 2019.

Análise Estatística

Os dados experimentais foram analisados por meio da estatística descritiva, sendo composta pela média, variância amostral, desvio padrão amostral, coeficiente de variação, tabelas e gráficos estatísticos. Também foram utilizadas ferramentas, como o teste de Tukey para comparar as médias obtidas e o intervalo de confiança para estimação de parâmetros populacionais.

Teste de Tukey

Utilizado para comparar médias apontando onde está a diferença entre cada par num conjunto de médias. O teste de Tukey é dado pela Equação (LEVIN, 2012):

$$HSD = q_{\alpha; k; k(n-1)} \cdot \sqrt{\frac{QM_{Dentro}}{n}}$$

Onde, $q_{\alpha; k; k(n-1)}$ é a amplitude estudentizada no nível α de significância desejada, neste caso 5% com k tratamentos e n repetições, QM_{Dentro} corresponde ao quadrado médio dentro dos k tratamentos da análise de variância. A sigla HSD significa diferença honestamente significativa e deve ser interpretada como sendo o maior valor para que não exista diferença entre duas médias, ou seja, qualquer diferença entre duas médias maior que o HSD significa que as médias são diferentes estatisticamente de acordo com o nível de significância escolhido, neste caso 5%. (LEVIN, 2012).

No presente trabalho o teste de Tukey permitiu investigar se há diferenças estatísticas entre as resistências médias dos traços de concreto do estudo, sendo $\alpha = 5\%$, $k = 4$, $n = 5$, $q_{0,05; 4; 16} = 4,05$. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Intervalo de Confiança para a Média Populacional usando a Distribuição t Student

O intervalo de confiança para a média populacional μ usando a distribuição t Student permitir obter uma ferramenta estatística que envolve a distribuição de probabilidade para fazer inferências de repetições de experimentos. Por exemplo, o intervalo a seguir significa que ao repetir 100 vezes um determinado experimento a média populacional μ deverá estar dentro do intervalo em $100\% - \alpha$ vezes das repetições (LARSON, 2016):

$$P\left(\bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2}; n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2}; n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha$$

Em que P é a probabilidade, \bar{x} é a média, s desvio padrão amostral, n é o número de repetições para cada traço, t é a distribuição de Student e α é o grau de significância, adotado de 5%.

Intervalo de Confiança para o Desvio Padrão Populacional usando a Distribuição Qui-Quadrado

O intervalo de confiança para o desvio padrão populacional σ usando a distribuição Qui-Quadrado permitir obter uma ferramenta estatística que envolve a distribuição de probabilidade para fazer inferências de erros de experimentos. Por exemplo, o intervalo a seguir significa que ao repetir 100 vezes um determinado experimento o desvio padrão populacional σ deverá estar dentro do intervalo em $100\% - \alpha$ vezes das repetições (LARSON, 2016):

$$P \left(\sqrt{\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}; n-1}}} \leq \sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}; n-1}}} \right) = 1 - \alpha$$

Em que P é a probabilidade, s^2 é a variância amostral, n é o número de repetições para cada traço, χ^2 é a distribuição Qui-Quadrado e α é o grau de significância, adotado de 5%.

Resultados e discussões

Característica Física

Conforme Metha (2004), a absorção da água de um material é a quantidade absorvida pelo material seco com relação a massa total. Isso indica a penetração da água e sinaliza a quantidade de vazios de uma determinada peça de concreto. A média dos resultados individuais do ensaio de índice de absorção de água das peças de pavimentos intertravados para cada traço são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados do ensaio de absorção de água das peças de piso intertravados.

| | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Média (%) | 5,24 | 6,12 | 6,76 | 6,24 |

Fonte. Autores, 2019.

Em detrimento aos aspectos recomendados pela NBR 9781:2013, na qual determina que a amostra deve apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6 %, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7 %, todos os resultados obtidos apresentaram valores que atendem às exigências da norma, apesar do aumento nas peças que possuem vidro em sua composição em relação ao traço padrão.

Característica Mecânica

A característica mecânica dos intertravados foi expressa por meio da resistência à compressão individual, determinada conforme NBR 9781:2013. Nas Tabelas 4 e 5 estão apresentados os resultados da estatística descritiva da característica mecânica do concreto representada pela resistência à compressão axial aos 14 dias de cura ao ar livre à sombra e úmida por aspersão, respectivamente. Em todos os traços trabalhou-se com cinco corpos de provas, $n = 5$. No entanto, no traço T₃ e T₄ da Tabela 4 (cura ao ar livre à sombra) e no traço T₁ da Tabela 5 (cura úmida por aspersão) um corpo de prova poderia ser considerado *outline* por divergência nos valores individuais do traço, entretanto, seu valor foi considerado no cálculo da média.

Tabela 4. Medidas estatísticas da resistência à compressão aos 14 dias, com cura ao ar livre à sombra.

| Grandeza | Cura ao Ar Livre à Sombra (MPa) | | | |
|----------|---------------------------------|-------|-------|-------|
| | T1 | T2 | T3 | T4 |
| n | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Média | 29,23 | 27,68 | 20,72 | 25,14 |
| Var | 12,50 | 10,74 | 16,38 | 35,23 |
| s | 3,53 | 3,28 | 4,05 | 5,94 |
| cv (%) | 12,09 | 11,84 | 19,53 | 23,61 |

Fonte: Autores, 2019.

Onde, n é a quantidade de blocos; \bar{x} é a resistência média dos blocos a compressão; s^2 é a variância amostral da resistência a compressão dos blocos; s é o desvio padrão amostral da resistência a compressão dos blocos; cv é o coeficiente de variância amostral da resistência a compressão dos blocos.

Nas Tabelas 4 e 5 através do coeficiente de variação é possível classificar como baixa a dispersão para todos os traços, exceto para T_4 (cura úmida por aspersão) que possui dispersão mediana.

Tabela 5. Medidas estatísticas da resistência à compressão aos 14 dias de cura úmida por aspersão.

| Grandeza | Cura Úmida por Aspersão (MPa) | | | |
|----------|-------------------------------|-------|-------|-------|
| | T1 | T2 | T3 | T4 |
| n | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Média | 25,64 | 27,65 | 30,61 | 25,20 |
| Var | 35,03 | 3,40 | 3,50 | 5,42 |
| s | 5,92 | 1,84 | 1,87 | 2,33 |
| cv (%) | 23,09 | 6,66 | 6,11 | 9,24 |

Fonte: Autores, 2019.

Aplicando a metodologia do teste de Tukey foi possível investigar se há diferenças estatísticas entre as resistências médias dos traços de concreto do estudo, sendo $\alpha = 5\%$, $k = 4$, $n = 5$, $q_{0,05; 4; 16} = 4,05$. Para os dados do tipo de cura ao ar livre à sombra foi obtido $QM_{Dentro} = 18,71$ (MPa)² e $HSD = 7,06$ MPa, como está apresentado na Tabela 6. Para os dados do tipo de cura úmida por aspersão foi obtido $QM_{Dentro} = 11,84$ (MPa)² e $HSD = 5,61$ MPa. Os resultados estão apresentados na 7.

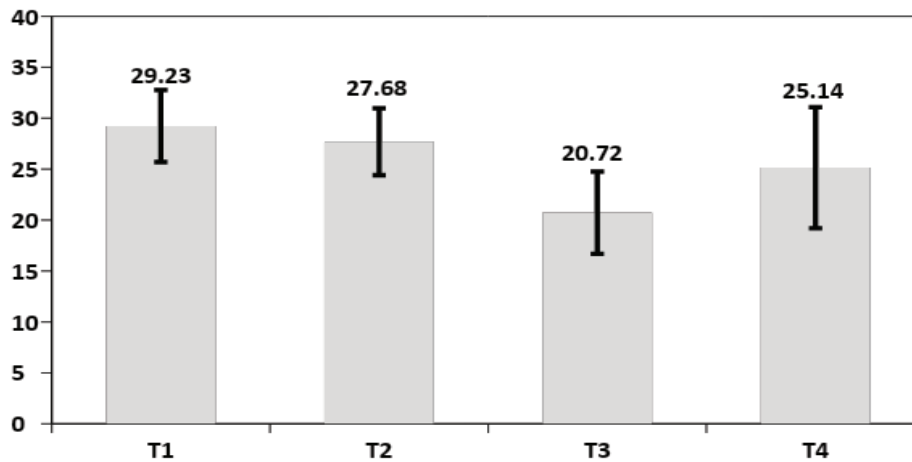
Tabela 6. Resumo do teste de Tukey da resistência à compressão aos 14 dias, com cura ao ar livre à sombra.

| Traço | Média | Diferença entre as médias (Cura ao ar livre à sombra - MPa) | | | | Código |
|-------|-------|---|------|------|----|--------|
| | | T1 | T2 | T3 | T4 | |
| T1 | 29,23 | | | | | a |
| T2 | 27,68 | 1,55 | | | | ab |
| T3 | 20,72 | 8,51 | 6,96 | | | b |
| T4 | 25,14 | 4,09 | 2,54 | 4,42 | | ab |
| HSD | 7,06 | | | | | |

Fonte: Autores, 2019.

Conforme os dados apresentados na Tabela 6 foi verificado que para a cura ao ar livre à sombra as médias de T_1 e T_2 , T_1 e T_4 são estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%, e estatisticamente diferente ao mesmo nível de significância para T_1 e T_3 . Para uma melhor visualização das médias da Tabela 6, foi elaborado o gráfico da Figura 6.

Figura 6. Resistência a compressão aos 14 dias de cura seca.



Fonte: Autores, 2019.

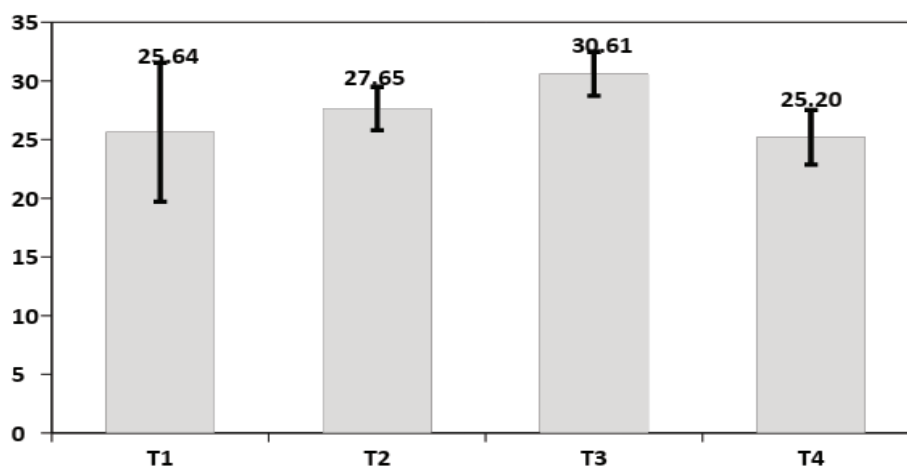
Tabela 7. Resumo do teste de Tukey da resistência a compressão aos 14 dias, com cura úmida por aspersão.

| Traço | Média | Diferença entre as médias (Cura Úmida por Aspersão- MPa) | | | | Código |
|-------|-------|--|------|------|----|--------|
| | | T1 | T2 | T3 | T4 | |
| T1 | 25,64 | | | | | a |
| T2 | 27,65 | 2,02 | | | | a |
| T3 | 30,61 | 4,97 | 2,96 | | | a |
| T4 | 25,20 | 0,44 | 2,45 | 5,41 | | a |
| HSD | 5,61 | α | 0,05 | | | |

Fonte: Autores, 2019.

Para a cura úmida por aspersão, T_4 se mostrou diferente dos demais traços avaliados, ao nível de 5% de significância.

Figura 7. Resistência a compressão aos 14 dias, com cura úmida por aspersão.



Fonte: Autores, 2019.

As resistências à compressão dos elementos intertravados atingiram um patamar próximo ao esperado com idade de 14 dias, que é cerca de 80% da resistência mínima (35 MPa) definida no estudo de dosagem.

Intervalo de Confiança para a Média Populacional usando a distribuição *t Student*

Usando a metodologia do intervalo de confiança para a média populacional através da distribuição de *t Student* foram obtidas as Tabelas 8 e 9. Os valores da média aritmética \bar{x} , do desvio padrão amostral *s* e da quantidade *n* de corpos de provas estão nas Tabelas 4 e 5. O valor crítico *t* da distribuição de Student é $t_{2,5\%;4} = 2,78$.

Tabela 8. Intervalo de Confiança para a média populacional usando a distribuição *t Student* a 5% de nível de significância da resistência a compressão aos 14 dias de cura ao ar livre à sombra.

| Traço | $\bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2};n-1} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}$ | $\bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2};n-1} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}$ |
|----------------|---|---|
| T ₁ | 24,84 | 33,62 |
| T ₂ | 23,61 | 31,75 |
| T ₃ | 15,70 | 25,75 |
| T ₄ | 17,77 | 32,51 |

Fonte: Autores, 2019.

Tabela 9. Intervalo de Confiança para a média populacional usando a distribuição *t Student* a 5% de nível de significância da resistência a compressão aos 14 dias de cura úmida por aspensão.

| Traço | $\bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2};n-1} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}$ | $\bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2};n-1} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}$ |
|----------------|---|---|
| T ₁ | 18,29 | 32,98 |
| T ₂ | 25,37 | 29,94 |
| T ₃ | 28,29 | 32,93 |
| T ₄ | 22,31 | 28,09 |

Fonte: Autores, 2019.

As Tabelas 8 e 9 significam que ao repetir os experimentos 100 vezes, em 95 vezes a média da resistência a compressão axial de cada traço deve estar dentro do intervalo obtido. Por exemplo, na Tabela 8 ao repetir 100 vezes o experimento do traço T₃ espera-se que em 95 vezes a resistência média do T₃ esteja dentro do intervalo $P(17,95 \text{ MPa} < \mu < 19,95 \text{ MPa}) = 95\%$.

Intervalo de Confiança para o Desvio Padrão Populacional usando a distribuição Qui-Quadrado

Usando a metodologia do intervalo de confiança para o desvio padrão populacional através da distribuição de Qui-Quadrado foram obtidas as Tabelas 10 e 11. Os valores da variância amostral s^2 e da quantidade n de corpos de provas estão nas Tabelas 4 e 5. O valor crítico t da distribuição Qui-Quadrado de cada cauda são: $\chi^2_{2,5\%;4} = 11,14$ e $\chi^2_{97,5\%;4} = 0,48$.

Tabela 10. Intervalo de Confiança para o desvio padrão populacional em MPa usando a distribuição Qui-Quadrado a 5% de nível de significância da resistência a compressão aos 14 dias de cura ao ar livre à sombra.

| Traço | $\sqrt{\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}; n-1}}}$ | $\sqrt{\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}; n-1}}}$ |
|----------------|---|---|
| T ₁ | 2,12 | 10,16 |
| T ₂ | 1,96 | 9,42 |
| T ₃ | 2,42 | 11,63 |
| T ₄ | 3,56 | 17,06 |

Fonte: Autores, 2019.

Tabela 11. Intervalo de Confiança para o desvio padrão populacional em MPa usando a distribuição Qui-Quadrado a 5% de nível de significância da resistência a compressão aos 14 dias de cura úmida por aspersão.

| Traço | $\sqrt{\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}; n-1}}}$ | $\sqrt{\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}; n-1}}}$ |
|----------------|---|---|
| T ₁ | 3,55 | 17,01 |
| T ₂ | 1,10 | 5,30 |
| T ₃ | 1,12 | 5,38 |
| T ₄ | 1,39 | 6,69 |

Fonte: Autores, 2019.

O comprimento do intervalo de confiança para a Tabela 11 em comparação com a Tabela 10 é menor para cada traço. Isso mostra que a cura úmida por aspersão é mais homogênea e uniforme no processo de cura.

A Tabela 12 apresenta uma comparação da cura ao ar livre à sombra com a cura úmida por aspersão entre os traços que tenham a mesma proporção de insumos a 5% de nível de significância usando o teste de Tukey. Percebe-se que a cura tem diferença significativa no traço T₃, em que a substituição do agregado miúdo convencional (areia) pelo agregado miúdo reciclado proveniente do vidro foi de 10% em massa. Sendo a intensidade maior na cura úmida.

Tabela 12. Comparação do tipo de cura entre os traços que tenham a mesma proporção de insumos a 5% de nível de significância usando o Teste Tukey.

| Cura ao ar livre à sombra | Cura úmida por aspersão | Análise |
|---------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| T1 | T1 | São iguais estatisticamente |
| T2 | T2 | São iguais estatisticamente |
| T3 | T3 | São diferentes estatisticamente |
| T4 | T4 | São iguais estatisticamente |

Fonte: Autores, 2019.

A análise para o elemento estatisticamente diferente, foi observado no traço *T3* com substituição de 10% de pó de vidro com cura úmida por aspersão, pode-se sugerir que essa faixa de incorporação tenha maior interferência na resistência à compressão. Visto que, em maior porcentagem de substituição do pó de vidro, a resistência a compressão das peças intertravadas resultou em produto de maior resistência. Que pode ser explicado devido a granulometria muito fina do resíduo desempenhado o efeito pozolânico na matriz cimentícias.

Conclusões

A incorporação do vidro moído na produção de elementos intertravados apresentou variações nos níveis de absorção de água em relação ao traço convencional, evidenciando assim que apesar das proporções de substituição serem relativamente baixas, aumentou-se em parte a porosidade do bloco.

Quanto a resistência à compressão das peças, constatou-se que o traço *T3* com cura úmida por aspersão obteve resultados mais satisfatórios do que os demais traços, por apresentar resistência próxima ao traço sem substituição, além da quantidade maior pó de vidro que foi empregado no traço.

Apesar da dispersão, tanto nos resultados de absorção da água quanto na resistência das peças, o vidro se mostrou viável para ser utilizado na fabricação de peças de pavimentos intertravados. Desta forma, tal substituição (agregado miúdo por vidro moído) pode proporcionar uma destinação mais adequada para garrafas *long Neck* de vidro, pois não somente possibilita a reciclagem das garrafas, mas também, segundo o estudo aqui realizado, pode agregar valor em termos de resistência à compressão das peças de pavimentos intertravados.

Referências

ANDRADE, R.O.B.; TACHIZAWA, T.; CARVALHO, A.B. **Gestão Ambiental: enfoque estratégico ao desenvolvimento sustentável**. 2. ed. São Paulo: *Pearson Education* do Brasil, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51**: Agregado graúdo - Ensaio de Abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação Especificação e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro. 2013.

BRAGA, R. L.. **Avaliação do gerenciamento de resíduos sólidos gerados em uma feira do Município de Ananindeua/PA**. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

BRASIL. Lei n.12.305: **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: Diário Oficial da União - DOU, 2010.

BRITO, F. S. L.; PIMENTEL, B. A.; MORAIS, M. S.; ROSÁRIO, K. K. L.; CRUZ, R. H. R.. Impactos socioambientais provocados por um vazadouro a céu aberto: uma análise no distrito de Marudá/PA. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 5, p. 128-139, 2019. **DOI:** <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.005.0012>.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de materiais: Uma introdução**. Tradução Sergio Murilo. [S.1]: LCT, 2008.

LARSON, R.; FABER, B. **Estatística Aplicada**. 6 ed. Tradução: José Fernando Pereira Gonçalves; Revisão técnica: Manoel Henrique Salgado. São Paulo: *Pearson Education* do Brasil, 2016.

MEHTA, P. K.; Monteiro, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedade e materiais**. 1ª Ed. São Paulo, editora Pini Ltda. 1994. 573 p.

RIGHI1, D., KÖHLER L., KIRCHHOF L., LIMA R. **Efeitos da Substituição de Areia por Vidro Moído no Comportamento de Concretos em Elevadas Temperaturas**, 2011.

Recebido em 27 de novembro de 2020.

Aceito em 22 de junho de 2021.