



Estado do Paraná

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - Unioeste**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS - PPGCA**

**PRODUÇÃO DE PAVIMENTOS INTERTRAVADOS  
CONTENDO RESÍDUO DE FILTRO DE CERVEJARIA**

**Ana Paula Rodrigues Figueira**

Toledo – Paraná – Brasil

2021



Estado do Paraná

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - Unioeste**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS - PPGCA**

## **PRODUÇÃO DE PAVIMENTOS INTERTRAVADOS CONTENDO RESÍDUO DE FILTRO DE CERVEJARIA**

**Ana Paula Rodrigues Figueira**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Unioeste/*Campus* Toledo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Cleber Antônio Lindino  
Co-orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris

JUNHO/2021

Toledo – PR

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Rp Rodrigues Figueira, Ana Paula  
Produção de pavimentos intertravados contendo  
resíduo de filtro de cervejaria / Ana Paula  
Rodrigues Figueira; orientador Cleber Antônio  
Lindino; coorientador Gustavo Savaris. -- Toledo,  
2021.  
77 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de  
Toledo) -- Universidade Estadual do Oeste do  
Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas,  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais,  
2021.

1. Recursos Naturais. 2. Indústria Cervejeira.  
3. Terra Diatomácea. 4. Concreto. I. Lindino,  
Cleber Antônio, orient. II. Savaris, Gustavo,  
coorient. III. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Ana Paula Rodrigues Figueira**

“Produção de pavimentos intertravados contendo resíduo de filtro de cervejaria”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais – Mestrado, do Centro de Engenharias e Ciências Exatas, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, pela Comissão Examinadora composta pelos membros:

### COMISSÃO EXAMINADORA



---

Prof. Dr. Cleber Antônio Lindino  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Presidente)



---

Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná



---

Prof. Dra. Lucia Bressiani  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Aprovada em: 10 de junho de 2021.  
Local de defesa: Via Remota Síncrona.

## AGRADECIMENTOS

À Deus por iluminar meus caminhos e pelas bênçãos imensuráveis.

À minha família, pelo amor incondicional, apoio diário, incentivo ao crescimento pessoal e profissional.

Ao orientador, Prof. Dr. Cleber Lindino, pela imensa compreensão, amizade, entusiasmo, encorajamento ao longo destes anos e por me guiar nesta pesquisa, clareando meus caminhos.

Ao coorientador, Prof. Dr. Gustavo Savaris, pelos conhecimentos compartilhados, atenção dispensada e contribuição para que este trabalho fosse desenvolvido com perfeição.

À Unioeste, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e a todos os professores por proporcionar a oportunidade de realizar esta pesquisa e pela excelente qualidade de ensino.

À comunidade terapêutica e fábrica de artefatos de cimento Beit Abba, por abrir as portas para investir seu tempo e colaboradores neste estudo.

À Silvio Antônio Corso, mestre cervejeiro da INAB Cervejaria, pelas valiosas informações e por ceder o resíduo de Terra Diatomácea.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Toledo, por permitir a realização de ensaios no laboratório de Materiais de Construção.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Universidade Federal do Paraná, *Campus* Palotina, pelos excelentes serviços prestados com cordialidade.

Ao Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, por intermédio da Prof. Me. Débora Felten, por possibilitar a utilização do laboratório de Construção Civil.

À Capes pelo investimento em meu desenvolvimento acadêmico.

Aos colegas de curso pela cooperação mútua durante estes anos.

Aos amigos pelo incentivo, motivação, torcida e companheirismo inestimáveis.

A todos que participaram na conquista e realização deste sonho, enriquecendo o meu processo de aprendizado, minha eterna gratidão.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	18
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b>	20
3.1	Objetivo Geral	20
3.2	Objetivos Específicos	20
<b>4</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	21
4.1	Terra Diatomácea	21
4.2	Indústria Cervejeira – Produção e Geração de resíduos de TD	22
4.3	Aspectos Gerais dos Pavimentos Intertravados	24
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA DA PESQUISA</b>	26
5.1	Materiais Utilizados	26
5.2	Caracterização das Matérias-Primas	28
5.2.1	Resíduo de Terra Diatomácea	28
5.2.2	Atividade Pozolânica	29
5.2.3	Estabilidade Térmica	31
5.2.4	Composição Granulométrica	31
5.2.5	Massa Específica e Absorção de Água dos Agregados Miúdos	32
5.2.6	Massa Específica e Absorção de Água do Agregado Graúdo	33
5.2.7	Massa Unitária	34
5.2.8	Teor de Material Pulverulento	35
5.3	Dosagem Experimental do Concreto	36
5.4	Moldagem e Cura do Concreto	37
5.5	Caracterização do Concreto no Estado Endurecido	38
5.5.1	Resistência à Compressão Axial	38
5.5.2	Absorção de Água	39
5.6	Microestrutura do Concreto	40
5.6.1	Microscopia Óptica-Digital	40
5.6.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	40
5.7	Análise Estatística	40
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	42
6.1	Caracterização das Matérias-Primas	42
6.1.3	Estabilidade Térmica	46
6.1.4	Análise Granulométrica	47
6.1.5	Massa Específica e Absorção de Água dos Agregados	50

6.1.6	Massa Unitária.....	51
6.1.7	Teor de Material Pulverulento.....	52
6.2	Concreto no Estado Endurecido .....	53
6.2.1	Resistência à Compressão Axial .....	53
6.2.2	Absorção de Água .....	57
6.3	Microestrutura do Concreto .....	59
6.3.1	Microscopia Óptica-Digital .....	59
6.3.2	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	60
6.4	Utilização da água de lavagem do resíduo .....	64
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>66</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>68</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Extração mundial de materiais, 1970 – 2017, milhões de toneladas. ....	13
Figura 2 – Estrutura morfológica de diatomita oriunda do Estado do Rio Grande do Norte. ....	21
Figura 3 – Produção mundial de cerveja, 1998 – 2019, bilhões de litros. ....	22
Figura 4 – a) Micrografia eletrônica de varredura de Terra Diatomácea <i>in natura</i> ; b) Micrografia eletrônica de varredura de Terra Diatomácea saturada com material orgânico.....	23
Figura 5 – Estrutura típica dos pavimentos intertravados. ....	24
Figura 6 – Característica do resíduo retirado na indústria.....	27
Figura 7 – Sequência de imagens demonstrando a determinação de atividade pozolânica: a) Amostras sob agitação; b) Filtragem das soluções; c) Titulação das amostras.....	30
Figura 8 – Sequência de procedimento para obtenção da densidade e massa úmida: a) Secagem da amostra; b) Aplicação de golpes; c) Banho em temperatura ambiente. ....	32
Figura 9 – Representação gráfica com o processo de fabricação dos pavimentos: a) Aplicação de desmoldante nas formas; b) Moldagem dos blocos; c) Corpos de prova finalizados. ....	37
Figura 10 – Representação gráfica do ensaio de Resistência à compressão: a) Blocos capeados; b) Prensa hidráulica utilizada.....	38
Figura 11 – Gráfico contendo a difratometria de Raios-X (DRX) da Terra Diatomácea FW-14 <i>in natura</i> .....	43
Figura 12 – Microscopia eletrônica de varredura TD FW-14. a) ampliação de 5.000 vezes. b) ampliação de 15.000 vezes. ....	44
Figura 13 – Microscopia eletrônica de varredura da TD FW-50. a) ampliação de 5.000 vezes. b) ampliação de 15.000 vezes. ....	44
Figura 14 – Imagens com as regiões onde se obteve a Espectroscopia de Energia Dispersiva em: (a) amostra FW-14 e em (b) amostra FW-50.....	45
Figura 15 – Curvas termogravimétricas: a) TD FW 14 pura; b) TD FW 50 pura. ....	46



Figura 16 – a) Curva termogravimétrica da TD obtida do filtro de cervejaria (misturas da FW-14 e FW-50); b) Derivada da curva termogravimétrica da TD obtida do filtro da cervejaria.....	46
Figura 17 – Gráfico com a curva granulométrica da areia com limites definidos pela ABNT NBR 7211:2009. ....	48
Figura 18 – Gráfico com a curva granulométrica do pó de pedra com limites definidos pela ABNT NBR 7211:2009.....	49
Figura 19 – Gráfico com a curva granulométrica do pedrisco com limites definidos pela ABNT NBR 7211:2009. ....	49
Figura 20 – Box Plot da Resistência à compressão dos pavimentos.....	55
Figura 21 – Microscopia óptica-digital da amostras com ampliação de 50 vezes: a) Referência; b) Resíduo seco 1%; c) Resíduo seco 2%; d) Resíduo lavado 1%; e) Resíduo lavado 2%. ....	59
Figura 22 – Imagem da superfície do concreto obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura do concreto referência, ampliação de 7.000 vezes. ....	60
Figura 23 – Imagem da superfície do concreto obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com ampliação de 7.000 vezes: a) Resíduo seco 1%; b) Resíduo seco 2%; c) Resíduo lavado 1%; d) Resíduo lavado 2%. ....	61
Figura 24 – Imagens das superfícies do concreto utilizadas para obter a Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) em: (a) Referência; b) Resíduo seco 1%; c) Resíduo seco 2%; d) Resíduo lavado 1%; e) Resíduo lavado 2%. ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exigências químicas, físicas e mecânicas para o CP V ARI. ....	26
Tabela 2 – Propriedades do CP V ARI.....	27
Tabela 3 – Proporção de materiais na dosagem de referência (kg).....	36
Tabela 4 – Resultados da caracterização do resíduo de Terra Diatomácea.....	42
Tabela 5 – Características da Terra Diatomácea <i>in natura</i> . ....	43
Tabela 6 – Resultados obtidos no ensaio de Chapelle Modificado. ....	45
Tabela 7 – Massa Específica e Absorção de Água dos agregados. ....	50
Tabela 8 – Determinação da Massa Unitária dos agregados segundo a ABNT NBR 45:2006. ....	51
Tabela 9 – Resultados do ensaio de Material Pulverulento. ....	52
Tabela 10 – Tabela com os valores da Resistência à compressão dos corpos de prova (MPa). ....	53
Tabela 11 – Resumo da Análise de Variância da Resistência à compressão.....	56
Tabela 12 – Resultados da Análise de Variância da Resistência à compressão. ....	56
Tabela 13 – Tabela com os valores do ensaio de Absorção de água nos pavimentos intertravados.....	57
Tabela 14 – Quadro resumo da Análise de Variância de Absorção de água. ....	58
Tabela 15 – Resultados da Análise de Variância de Absorção de água. ....	58
Tabela 16 – Tabela contendo o resultado da análise EDS nas amostras referência, resíduo seco e lavado 1% e 2%. Média dos valores em % com desvio padrão (n = 4). ....	64

## RESUMO

FIGUEIRA, A. P. R. Produção de pavimentos intertravados contendo resíduo de filtro de cervejaria. 77 páginas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE. Toledo, 10 de junho de 2021.

O desenvolvimento urbano provocou extração em massa de recursos naturais, como areia, cascalho e brita. A mineração é de grande importância para o desenvolvimento social, contudo provoca impactos significativos ao meio ambiente, alguns irreversíveis. A cadeia produtiva da construção é uma das atividades que mais consome matérias-primas, sendo a fabricação de concreto a prática de maior solicitação de agregados naturais, tais como areia e brita. Diante deste cenário, o reuso de resíduos provenientes de atividades industriais se configura como estratégia para o setor construtivo, além de minimizar os danos ambientais. A indústria cervejeira é responsável pela geração de elevado volume de resíduos de Terra Diatomácea (TD), sendo este mineral empregado no processo de filtração da bebida. Aliado à necessidade de minimizar os problemas ambientais deste resíduo, a pesquisa avaliou a influência da incorporação de resíduo de Terra Diatomácea, proveniente de filtros da indústria cervejeira, na fabricação de pavimentos intertravados, subsidiando estudos de materiais voltados à sustentabilidade nas áreas da construção civil e indústria. Para a fabricação dos pavimentos foram consideradas cinco dosagens, referência, resíduo seco e resíduo lavado nos níveis de 1% e 2%, em massa, respectivamente. As propriedades físicas e mecânicas dos blocos foram avaliadas por meio de ensaios de Resistência à compressão axial e absorção de água no concreto no estado endurecido, com idade de 28 dias, sendo que as peças foram fabricadas em escala industrial com uso de mesa vibratória, em fábrica de artefatos de cimento. A microestrutura do concreto foi observada fundamentando-se em análises de Microscopia Óptica-Digital e Microscopia Eletrônica de Varredura. No que tange a Resistência à compressão, os resultados demonstraram que a adição de resíduo seco e lavado em até 2% em substituição ao agregado miúdo, foram superiores a 50 MPa, estando em conformidade com o limite mínimo de 35 MPa, estabelecido pela ABNT NBR 9781:2013, para o tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha. Para a absorção de água, todas as dosagens apresentaram resultados em conformidade com a ABNT NBR 9781:2013, sendo menor que 6%. Os resultados da análise microestrutural indicaram uma pasta de cimento compacta e homogênea, com desenvolvimento de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional nos concretos contendo resíduo seco nas proporções de 1% e 2%, justificando as resistências mais elevadas. Esta pesquisa possibilitou alterar a caracterização de resíduo para recurso, constituindo ligação benéfica entre os ramos da indústria cervejeira e construção civil.

**PALAVRAS-CHAVE:** Recursos Naturais; Indústria Cervejeira; Terra Diatomácea; Concreto; Microestrutura.

## ABSTRACT

FIGUEIRA, A. P. R. Production of interlocking pavements containing brewery filter residue. 77 pages. Dissertation (Master's degree) - Western Parana State University - UNIOESTE. Toledo, June 10, 2021.

Urban development caused massive extraction of natural resources, such as sand and gravel. Mining is of great importance for social development, but it causes significant impacts on the environment, some are irreversible. The construction production chain is one of the activities that consumes the rawest materials, with concrete manufacturing being the practice with the greatest demand for natural aggregates, such as sand and gravel. Given this scenario, the reuse of waste from industrial activities is configured as a strategy for the construction sector, in addition to minimizing environmental damage. The brewing industry is responsible for the generation of a large volume of waste from Diatomaceous Earth (DE), this mineral used in the beverage filtration process. Combined with the need to minimize the environmental problems of this residue, the research evaluated the influence of the incorporation of Diatomaceous Earth residue, coming from filters of the beer industry, in the manufacture of interlocking pavements, subsidizing studies of materials aimed at sustainability in the areas of civil construction and industry. For the manufacture of the pavements, five dosages were considered, reference, dry residue, and washed residue at the levels of 1% and 2%, by weight, respectively. The physical and mechanical properties of the blocks were evaluated through tests of resistance to axial compression and water absorption in the hardened concrete, at the age of 28 days, and the pieces were manufactured on an industrial scale using a vibrating table, in a concrete artifact factory. The microstructure of the concrete was observed, based on analyzes of Optical-Digital Microscopy and Scanning Electron Microscopy. Regarding the compressive strength, the results showed that the addition of dry and washed residue in up to 2% to replace the fine aggregate, was greater than 50 MPa in accordance with the minimum limit of 35 MPa, established by ABNT NBR 9781:2013, for pedestrian traffic, light vehicles, and commercial vehicles. For water absorption, all dosages in accordance with ABNT NBR 9781:2013, being less than 6%. The results of the microstructural analysis indicated a compact and homogeneous cement paste, with the development of additional hydrated calcium silicate (C-S-H) in concretes containing dry residue in the proportions of 1% and 2%, justifying the higher resistances. This research made it possible to change the characterization of waste to resource, constituting a beneficial link between the branches of the beer industry and civil construction.

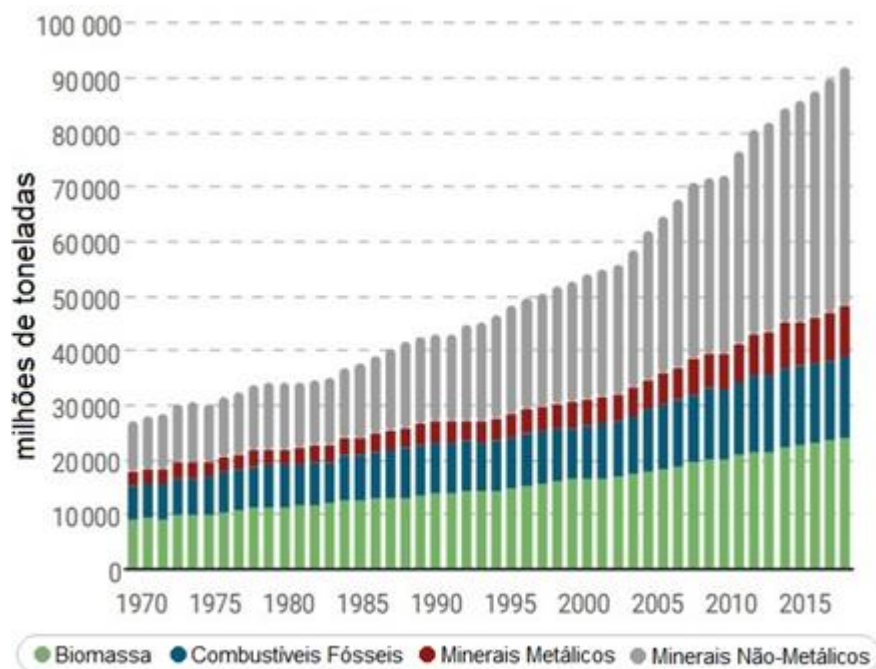
**KEY WORDS:** Natural Resources; Brewing Industry; Diatomaceous Earth; Concrete; Microstructure.

# 1 INTRODUÇÃO

Conforme o *United Nations Environment Programme* (UNEP, 2019b), a areia é um material onipresente nos setores construtivo e industrial, caracterizando-se pelo custo acessível, versatilidade e facilidade de obtenção. Logo após a água, a areia e o cascalho correspondem ao segundo maior volume de recursos naturais sujeitos à extração e comercialização. Contudo, é uma prática com regulamentação deficiente em diversas regiões e a superexploração em ambientes marinhos, costeiros e de água doce torna esta situação um obstáculo expressivo para a sustentabilidade ambiental.

A partir da década de 1970, constatou-se que a população mundial dobrou e o Produto Interno Bruto (PIB) quadruplicou. Este crescimento acelerado demandou volumes elevados de recursos naturais visando impulsionar a economia e ampliar o bem-estar da sociedade. Nos últimos 50 anos, não ocorreu estabilização ou decréscimo na solicitação mundial de materiais, mas, contrariamente, a remoção de recursos se intensificou rapidamente. Constatou-se que no ano de 2017 a extração alcançou cerca de 92 bilhões de toneladas, em relação a 27 bilhões de toneladas no período de 1970 (Figura 1), correspondendo ao aumento médio de 2,6% por ano (UNEP, 2019a).

**Figura 1** – Extração mundial de materiais, 1970 – 2017, milhões de toneladas.



Os agregados naturais se originam mediante erosões no decorrer de milhares de anos, entretanto, o problema se concentra na extração descontrolada que excede à renovação natural (JIANG et al., 2019). Os principais minerais empregados como agregados são rochas e sedimentos, tais como areia e cascalho (BERTOLINO; PALERMO; BERTOLINO, 2012). Estima-se que, a cada ano, 40 a 50 bilhões de toneladas de agregados são removidas em regiões como poços, cursos d'água e ecossistemas marinhos (BEISER, 2018). Segundo o *World Wide Fund for Nature* (WWF, 2018) estas fontes são propícias para a extração por diversos motivos, como: os centros urbanos se situam nas proximidades dos rios, minimizando os custos com transporte; a energia do curso d'água fragmenta as rochas em agregados, descartando a mineração e etapas como moagem e triagem; os minerais oriundos dos rios se caracterizam por serem resistentes e com formato angular, favoritos do setor construtivo.

Simultaneamente, a mineração nos rios pode afetar consideravelmente os ecossistemas aquáticos e a biodiversidade, reduzir os níveis dos lençóis freáticos, modificar a turbidez da água, a paisagem e o clima, este último devido à emissão de gases poluentes, como dióxido de carbono, oriundo do transporte de materiais (UNEP, 2014). A fotossíntese também é prejudicada, em razão das intensas sedimentações e minimização da luz (FRASER et al., 2017).

Segundo o *United Nations Environment Programme* (UNEP, 2014) a construção civil é responsável por absorver elevado volume de agregados naturais sendo que, somente no ano de 2012 o setor consumiu mundialmente entre 25,9 bilhões a 29,6 bilhões de toneladas. O Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2020) afirma que no Brasil, em 2019, o setor construtivo foi responsável pela extração de 532 milhões de toneladas de agregados, como areia, cascalho, saibro e brita. Os minerais relacionados a este segmento são nitidamente extraídos para atender a excessiva demanda (TIBIRIÇÁ, 2018).

De acordo com o *U.S. Geological Survey* (USGS, 2013), o consumo mundial de agregados pode ser avaliado por meio das informações relativas à fabricação do concreto. Estima-se que para cada tonelada de cimento empregado são necessários seis a sete vezes mais toneladas de agregados, como areia e cascalho. No ano de 2012 a fabricação global de concreto atingiu 10 bilhões de metros cúbicos, sendo consumidos 3,8 Gigatoneladas (Gt) de cimento, 2 Gt de água e 17,5 Gt de agregados (MILLER; HORVATH; MONTEIRO, 2016).

O exorbitante consumo mundial de agregados contribui significativamente para o esgotamento de recursos naturais, caracterizando-se como uma barreira ao desenvolvimento sustentável. Diante deste cenário, subprodutos oriundos de indústrias se mostram como alternativa na construção civil, tornando possível a preservação do meio ambiente e o equilíbrio ecológico (SHARMA; KHAN, 2017).

As dificuldades existentes, como os desafios relacionados ao meio ambiente e as transformações necessárias nos modos de consumo e produção, conduzem a oportunidades para o desenvolvimento sustentável, neste caso, a criação de tecnologias e materiais emergem como soluções revolucionárias (UNEP, 2019a). Neste sentido, academia e indústria têm trabalhado na construção de estratégias visando a redução dos impactos negativos ao meio ambiente, ocasionados pelas atividades mineradora e industrial (ABRÃO; CARDOSO; JOHN, 2019).

Uma estratégia relevante é a substituição de componentes do concreto, cimento ou agregados, por materiais reciclados, tais como resíduos, contribuindo diretamente para a redução da utilização de água potável e matérias-primas (ABRÃO; CARDOSO; JOHN, 2019). Assim, avaliar os teores satisfatórios na matriz cimentícia e amplificar os tipos de resíduos incorporados ao concreto são tópicos significativos nas pesquisas que tangem a sustentabilidade (WANG; CHIN; XIA, 2019). Outrossim, a inclusão de aditivos minerais, como sílica ativa, escória, cinzas volantes e pozolanas, em matrizes cimentícias é extremamente relevante no meio científico. A diatomita é um destes minerais que apresenta elevada proporção de sílica ativa amorfa, sendo constituída principalmente por sílica e porções reduzidas de minerais residuais (MACEDO et al., 2020).

A acentuada preocupação com os resíduos originados pelas cervejarias e agroindústrias motivou pesquisadores a desenvolverem estratégias na produção de materiais a partir da incorporação dos resíduos (LI et al., 2019). Entre estas estratégias, se destacam a introdução de detritos industriais em compostos cimentícios, como concretos e argamassas, havendo a substituição do cimento e agregados que integram estes materiais (MARVILA et al., 2019).

Galán-Arboledas et al. (2017) realizaram estudos sobre o uso de resíduos de Terra Diatomácea oriundos do refino de óleos vegetais e fabricação de cerveja, como matéria-prima na construção de tijolos. Os teores de substituição da argila se situaram entre 3 e 10%, em massa, comparando os resultados com materiais convencionais. Os resultados evidenciaram que estes subprodutos industriais atuaram como

nutrientes, aperfeiçoando o comportamento dos materiais durante a secagem e elevaram a porosidade das peças.

Abrão, Cardoso e John (2019) investigaram dois tipos de Cimento Portland misturados com Terra Diatomácea *in natura*, comparando-os com cimento contendo elevado teor de clínquer<sup>1</sup>. Os materiais foram caracterizados física e quimicamente; avaliou-se a reatividade, quantidade de água e resistência mecânica das argamassas produzidas, verificando as emissões de CO<sub>2</sub>, devido à elaboração de cimento.

Ahmadi et al. (2018) substituíram o cimento por diatomita *in natura* em argamassas. Foram avaliados teores de 0%, 15%, 30% e 40%, em massa, de diatomita em substituição ao material cimentício. Os impactos da diatomita nas propriedades das argamassas foram avaliados em ensaios de resistência à compressão, tração e absorção direta. Os resultados foram bem-sucedidos, sendo que o mineral estudado pode ser empregado em até 40% em substituição ao cimento, não havendo redução da resistência à compressão. Simultaneamente, houve elevação na resistência à tração, representando um material cimentício ecológico.

Li et al. (2019) analisaram os impactos da substituição de 40% do cimento por Terra Diatomácea *in natura* no concreto. Características como densidade, trabalhabilidade, resistência mecânica, solidez e impactos ao meio ambiente, devido a fabricação da matriz cimentícia, foram examinados. As misturas desenvolvidas apresentaram solidez, resistência a compressão elevada aos 7, 28 e 90 dias, podendo substituir, em porcentagens de 10% a 30%, o cimento convencional. Além disso, a mistura com teor de 30%, em massa, reduziu o uso de energia em mais de 30% e minimizou significativamente as emissões de poluentes a atmosfera.

Macedo et al. (2020) investigaram os efeitos da Terra Diatomácea calcinada a 1000 °C, em matrizes cimentícias. Neste caso, foram adicionadas 5% e 10%, em massa, de diatomita no concreto. Identificou-se que a sílica presente no mineral reagiu com o hidróxido de cálcio encontrado no cimento; também houve aumento da resistência à compressão. Além disso, a diatomita não provocou modificações significativas na porosidade e absorção de água do concreto, sendo constatado resultados satisfatórios com teor de 10% de incorporação.

---

<sup>1</sup> A produção do cimento tem início com a mistura de materiais calcários, argilosos ou outros materiais contendo silício, alumina e óxido de ferro, sendo estes os compostos fundamentais do cimento. As matérias-primas passam por processo de moagem, sendo posteriormente encaminhadas para queima em fornos rotativos, havendo a sinterização e fusão da mistura, produzindo o clínquer (NEVILLE; BROOKS, 2013).



Aliado às preocupações citadas anteriormente, a necessidade de minimizar a exploração dos recursos naturais e o acentuado uso de blocos de concreto no mundo, provocaram estudos relativos à inserção de diferentes resíduos como materiais alternativos em pavimentos intertravados (SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2017). Muitos destes estudos empregaram resíduos como substitutos aos agregados comumente utilizados, por exemplo: resíduos de construção e demolição (RODRÍGUEZ et al., 2017); cinza do bagaço da cana-de-açúcar e resíduo de pneus (ALTOÉ; SALES; MARTINS, 2019); areia de desmoldagem, proveniente de indústrias de fundição (PEREIRA et al., 2018) e lodo oriundo do tratamento de água (LIU et al., 2020).

## 2 JUSTIFICATIVA

Por meio de verificação *in loco*, observou-se que a quantidade de resíduos produzidos em indústria cervejeira localizada no município de Toledo – PR, somente no processo de filtração, corresponde a quinze toneladas por mês, representando uma elevada proporção de materiais que necessitam de destinação adequada. Estima-se que para a filtração de aproximadamente 5 milhões de litros de cerveja, sejam consumidos cerca de 7,5 toneladas de Terra Diatomácea<sup>2</sup>.

Devido aos altos custos para reciclagem, os resíduos de Terra Diatomácea são constantemente dispostos em aterros sanitários, provocando a emissão de monóxido de carbono e dióxido de carbono para a atmosfera, intensificando as variações climáticas no planeta e o desenvolvimento de micróbios (ILIESCU et al., 2009).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos instaurada pela Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) destaca a necessidade da reutilização e destinação ambientalmente adequada dos resíduos, estabelecendo que os subprodutos produzidos pelas indústrias sejam destinados a aterros monitorados, visto que, muitos destes alcançam sua capacidade máxima em poucos anos. Diante disto, é fundamental a reintrodução dos resíduos nas etapas nas quais foram originados ou em outros ramos produtivos (SANTOS; FERRARI, 2019).

A legislação caracteriza os resíduos como reutilizáveis e recicláveis, de valor social, capazes de promover trabalho e renda, além de fomentar a cidadania (ALTOÉ; SALES; MARTINS, 2019). É essencial que estes sejam considerados significativa fonte de matéria-prima para o setor industrial. Assim, estes materiais não são diferenciados dos demais, pois são de extrema relevância suas características, potencial de aplicação, minimização de subprodutos destinados a aterros, além da promoção do desenvolvimento sustentável (TURK et al., 2015).

Dada as características mencionadas, a aplicação de resíduos como substituição parcial das matérias-primas pode minimizar a extração de recursos naturais. Visando proporcionar conhecimentos científicos para o desenvolvimento de uma tecnologia inovadora, esta pesquisa avaliou a influência da incorporação de resíduo de Terra Diatomácea, proveniente de filtros da indústria cervejeira, na

---

<sup>2</sup> CORSO, S. A. Comunicação Pessoal, 2021.

fabricação de pavimentos intertravados, subsidiando estudos de materiais voltados à sustentabilidade nas áreas da construção civil e da indústria.

Além disso, atenção especial foi dada neste projeto à sustentabilidade nos âmbitos técnico e ambiental, nas esferas analisadas – indústria cervejeira e pavimentos intertravados – conectadas pela reutilização do resíduo de Terra Diatomácea. Buscou-se possibilitar o manejo de forma sustentável, alterando a caracterização de resíduo para recurso, sem eventuais custos, constituindo ligação benéfica entre os dois ramos.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

Conhecer a influência da incorporação de resíduo de Terra Diatomácea, proveniente de filtros da indústria cervejeira, na fabricação de pavimentos intertravados.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar diferentes proporções de substituição do agregado miúdo, areia natural, pelo resíduo de Terra Diatomácea;
- Verificar as propriedades físicas e mecânicas a partir de ensaios de Resistência à compressão axial e absorção de água no concreto no estado endurecido;
- Observar a microestrutura do concreto por meio de análises de Microscopia Óptica-Digital e Microscopia Eletrônica de Varredura;
- Definir o emprego mais adequado dos pavimentos obtidos, de acordo com a normativa vigente;
- Indicar estratégia para a destinação ambientalmente correta da água de lavagem do resíduo de Terra Diatomácea.

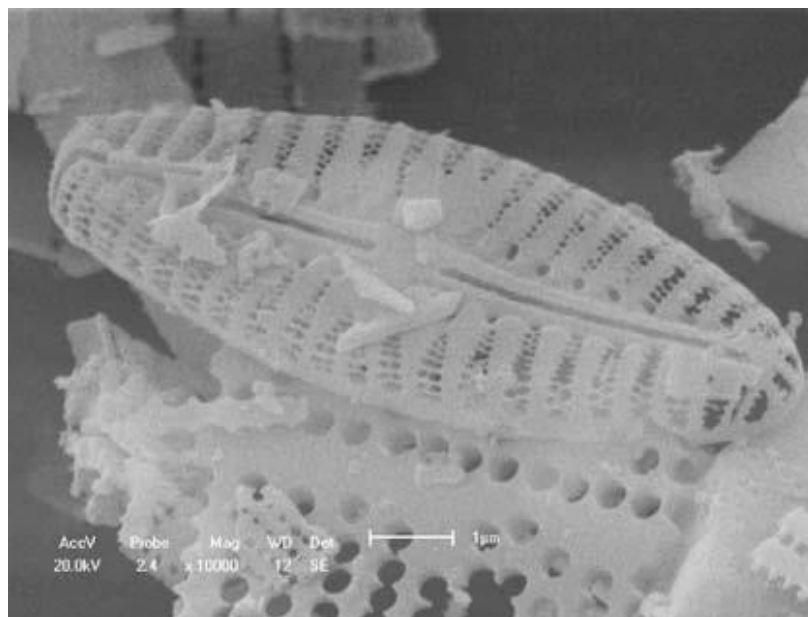
## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 Terra Diatomácea

Equivalente a cinza da casca de arroz, a microestrutura porosa das diatomáceas é capaz de elevar a absorção de fluidos no concreto (WEI; GENCTURK, 2018). Estas se tratam de organismos unicelulares, que apresentam exoesqueletos siliciosos, denominados frústulas. Se localizam especialmente na zona fótica de oceanos, mares e regiões de água doce (MORADI et al., 2017).

Conforme o *U.S. Geological Survey* (USGS, 2017) as diatomáceas se caracterizam como rochas sedimentares, similar ao giz, com cor clara, granulação extremamente fina, leves devido à baixa densidade, alta porosidade, possuindo em sua microestrutura milhares de cavidades, com tamanhos diversos. Se originam devido à concentração de paredes celulares de sílica de diatomáceas mortas, presentes no oceano. A estrutura destas algas unicelulares microscópicas, possui uma diversidade de formas, abrangendo cilindros, esferas e discos, como mostra a Figura 2.

**Figura 2** – Estrutura morfológica de diatomita oriunda do Estado do Rio Grande do Norte.



Fonte: Silva et al., 2009.

Nos Estados Unidos a diatomita é encontrada principalmente na superfície terrestre ou próxima a ela. Neste caso, a extração dos depósitos é realizada mediante

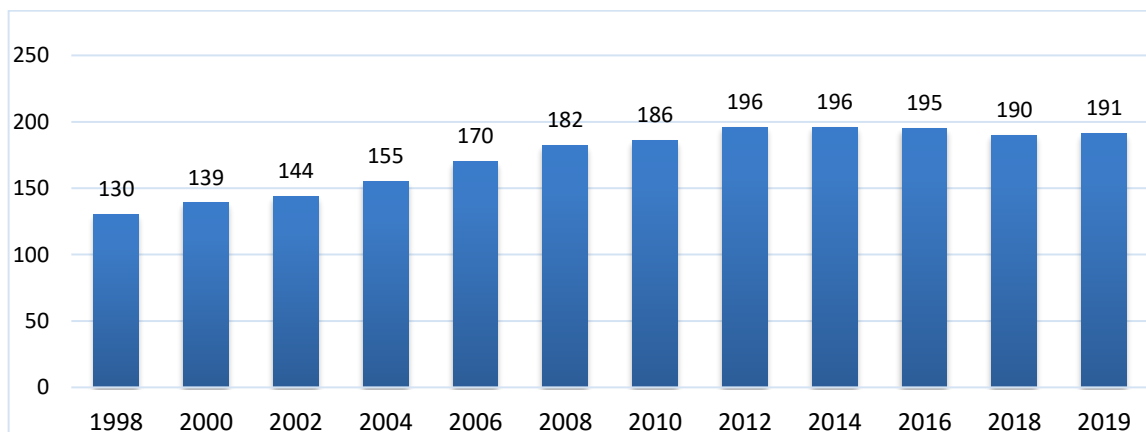
a mineração a céu aberto. Em outros países, a mineração subterrânea é comumente utilizada em virtude das restrições topográficas (USGS, 2020). No Brasil, os depósitos deste mineral se encontram em orlas marítimas, em terrenos lacustres de água doce, sendo originados a partir de esqueletos de sílica, que se localizam em profundidades de dois metros. A extração é realizada em lavras a céu aberto, e seu desmonte é efetuado com a utilização de pá escavadeira, descartando o emprego de explosivos, devido ao fato deste sedimento ser facilmente fragmentado (FRANÇA; LUZ; INFORÇATI, 2008).

As diatomitas no Brasil geralmente contém argila, areia de quartzo e óxidos de ferro, sendo necessário o beneficiamento para remover estas impurezas. Posteriormente, o mineral é submetido a calcinação, sendo misturado com barrilha ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), objetivando contribuir na aglomeração de partículas. Desta forma, as características físicas do produto comercial são determinadas na calcinação (FRANÇA; LUZ; INFORÇATI, 2008).

#### 4.2 Indústria Cervejeira – Produção e Geração de resíduos de TD

O setor cervejeiro denota elevada representatividade visto que em 1998 foram produzidos mundialmente cerca de 130 bilhões de litros de cerveja, evoluindo significativamente para 191 bilhões de litros, em 2019, principalmente na China, Estados Unidos e Brasil, líderes mundiais neste segmento, conforme a Figura 3. O Brasil, terceiro maior fabricante, gerou aproximadamente 14,13 bilhões de litros no ano de 2018 (STATISTA, 2021).

**Figura 3** – Produção mundial de cerveja, 1998 – 2019, bilhões de litros.

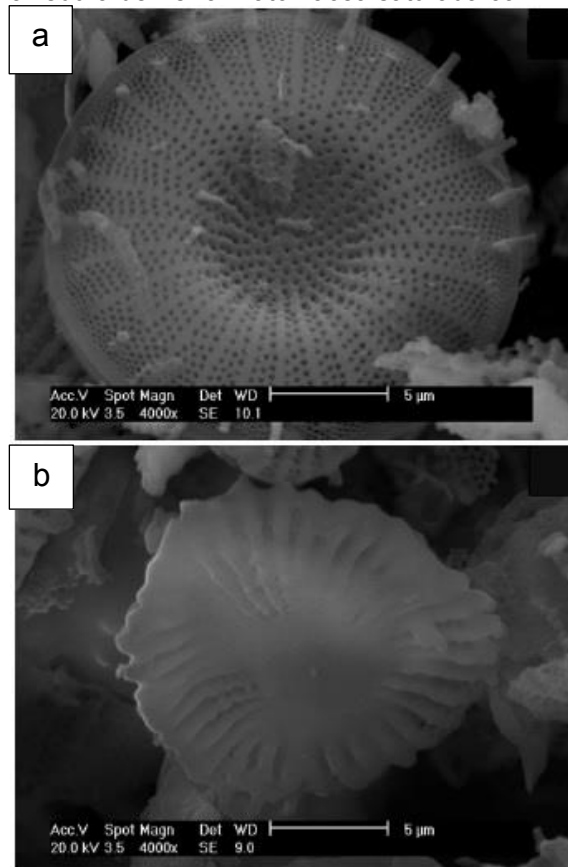


Fonte: STATISTA, 2021.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria da Cerveja (2021) o setor equivale a 1,6% do PIB nacional, caracterizando o Brasil como o terceiro maior fabricante mundial, gerando aproximadamente 14,1 bilhões de litros no ano de 2020. De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2021) os estados do São Paulo, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, Santa Catarina e Paraná concentram maior número de cervejarias, sendo superior a 83%.

O processo de filtração, compreendendo a purificação de bebidas e limpeza de graxas e óleos, é reconhecido como a aplicação predominante da Terra Diatomácea (USGS, 2020). Este mineral, quando empregado nos processos de filtração e clarificação das indústrias cervejeiras, demonstra utilização curta, devido a saturação com matéria orgânica, impossibilitando seu uso novamente como filtro (GOULART et al., 2011), como apresentado na Figura 4.

**Figura 4** – a) Micrografia eletrônica de varredura de Terra Diatomácea *in natura*; b) Micrografia eletrônica de varredura de Terra Diatomácea saturada com material orgânico.



Fonte: Goulart et al., 2011.

A indústria cervejeira se caracteriza como o maior gerador de resíduos de Terra Diatomácea (TD), visto que 100 litros de cerveja demandam aproximadamente 175

gramas de diatomáceas para a filtração (ILIESCU et al., 2009). No término da filtração, o lodo de Terra Diatomácea, composto por água e substâncias orgânicas, triplica em peso. Pelo viés econômico, o consumo e a disposição do resíduo se configuram como os maiores custos na etapa de filtração (FILLAUDEAU; BLANPAIN-AVET; DAUFIN, 2006).

Na Alemanha, entre os anos de 1989 e 1990, identificou-se que para filtração de 100 milhões de hectolitros de cerveja, foram empregados cerca de 17.500 toneladas de diatomáceas, sendo o resíduo composto por 70% de água, totalizando 70.140 toneladas, em peso, de materiais para descarte. Devido aos altos custos para reciclagem, os resíduos de Terra Diatomácea são constantemente dispostos em aterros sanitários, provocando a emissão de monóxido de carbono e dióxido de carbono para a atmosfera, intensificando as variações climáticas no planeta e o desenvolvimento de micróbios (ILIESCU et al., 2009).

### 4.3 Aspectos Gerais dos Pavimentos Intertravados

A norma NBR 9781 (ABNT, 2013) define pavimento intertravado como pavimento flexível composto por uma base subsequente a faixa de revestimento, constituída por peças de concreto, denominadas *pavers*. Estes são elaborados com Cimento Portland, agregados e água, sendo admitido o emprego de aditivos e adições, atendendo as especificações normativas para cada item. De acordo com a NBR 15953 (ABNT, 2011) a estrutura do pavimento intertravado é constituída pelos elementos: subleito, base, camada de assentamento, camada de revestimento e contenção, como mostra a Figura 5.



Fonte: Adaptado de ABCP, 2010.



Conforme a NBR 15953 (ABNT, 2011), o subleito pode ser entendido como a fundação do pavimento, tendo como principal função suportar as cargas oriundas do tráfego, podendo ser composto por solo natural ou derivado de empréstimo, sendo necessário a regularização e compactação, na altura definida em projeto, anteriormente a execução das camadas seguintes.

A base se refere a faixa responsável por resistir e distribuir as tensões verticais dos veículos. É constituída principalmente por materiais pétreos, como cascalho, agregados industriais ou reciclados e misturas com cimento. A camada de assentamento é formada por materiais granulares, tendo como função acomodar os blocos, promovendo o nivelamento adequado. Já o revestimento é integrado pelas peças de concreto e material de rejuntamento, suportando a ação de veículos, tráfego de pedestres ou cargas. Por fim, a contenção relaciona-se a uma estrutura ou dispositivo de caráter permanente ou provisório, mantendo os blocos e o material de rejuntamento na posição apropriada, resultando no travamento do conjunto (ABNT, 2011).

Os pavimentos intertravados se tornaram opções atraentes devido à rapidez e facilidade de instalação, manutenção reduzida, resistência à ruptura, vida útil elevada e estética agradável, sendo amplamente aplicado em regiões comerciais, industriais, estacionamentos e áreas de passeio (GIRSKAS; NAGROCKIENĖ; SKRIPKIŪNAS, 2017).

Os blocos de concreto podem também eliminar o escoamento das águas pluviais, preservando o solo; a mistura cimentícia pode incluir conteúdos reciclados, minimizando o consumo de energia elétrica e emissões de dióxido de carbono, integrando a infraestrutura verde das cidades, além de fomentar o desenvolvimento de áreas urbanas com impacto ambiental reduzido (PENTEADO; CARVALHO; LINTZ, 2016).

## 5 METODOLOGIA DA PESQUISA

O trabalho foi desenvolvido em parceria entre a Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, ambas situadas em Toledo – PR, Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, localizado em Cascavel – PR e Universidade Federal do Paraná – UFPR, *Campus Palotina*, para avaliação do potencial de utilização do filtro de cervejaria, composto principalmente por Terra Diatomácea, para a confecção de pavimentos intertravados de concreto. A produção dos blocos foi executada em fábrica de artefatos de cimento, localizada no município de Toledo – PR.

### 5.1 Materiais Utilizados

Para a fabricação dos pavimentos intertravados foi empregado Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI) como aglomerante devido ao emprego usual em fábricas de artefatos de cimento. De acordo com dados do fabricante (ITAMBÉ, 2021), as especificações químicas, físicas e mecânicas deste material atendem a norma NBR 16697 (ABNT, 2018), conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2.

**Tabela 1** – Exigências químicas, físicas e mecânicas para o CP V ARI.

<b>Ensaio Químicos (em % de massa)</b>	
Resíduo Insolúvel (RI)	≤ 3,5
Perda ao fogo (PF)	≤ 6,5
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	≤ 4,5
<b>Ensaio Físicos e Mecânicos</b>	
Finura na peneira 75 µm (%)	≤ 6,0
Tempo de início de pega (min)	≥ 60,0
Expansibilidade a quente (mm)	≤ 5,0
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	≥ 14,0
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	≥ 24,0
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥ 34,0
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	-

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018).

**Tabela 2** – Propriedades do CP V ARI.

<b>Características</b>	<b>Limites</b>
Resíduo Insolúvel (RI) (%)	0,89
Perda ao fogo (PF) (%)	3,69
Óxido de magnésio (MgO) (%)	3,46
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> ) (%)	2,73
Finura na peneira #200 (%)	0,05
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4,405
Tempo de início de pega (min)	185
Expansibilidade a quente (mm)	0,35
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	23,5
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	38,1
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	44,1
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	52,7

Fonte: ITAMBÉ (2021).

O aditivo utilizado foi o Sika® Concreto Forte. De acordo com informações técnicas do fabricante, este possui a finalidade de aditivo plastificante e redutor de água<sup>3</sup> para concretos, com densidade de  $1,06 \pm 0,02 \text{ kg L}^{-1}$  (SIKA, 2021).

Como agregados naturais foram empregados: areia, com mineralogia quartzosa, extraída do leito do rio Paraná em Guaíra – PR; pó de pedra e pedrisco, de origem basáltica, proveniente de uma empresa de britagem localizada em Cascavel – PR. Toda a água utilizada foi oriunda do abastecimento público do município de Toledo – PR. O resíduo de filtração foi cedido por cervejaria instalada no município de Toledo – PR, com as características demonstradas na Figura 6.

**Figura 6** – Característica do resíduo retirado na indústria.

Fonte: A autora.

<sup>3</sup> “Aditivo que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite a redução do conteúdo de água; ou que, sem alterar a quantidade de água, modifica a consistência do concreto, aumentando o abatimento ou fluidez; ou, ainda, aditivo que produz os dois efeitos simultaneamente” (ABNT, 2019, p. 14).

Este material é composto por Terra Diatomácea, da marca CELATOM, disponibilizado pela empresa Ever Intec, com proporção de 65% de Terra Diatomácea FW-50, diâmetro de partícula de 42  $\mu\text{m}$  e permeabilidade de 3.500 darcy<sup>4</sup> e 35% de FW-14 com diâmetro de partícula de 28  $\mu\text{m}$  e permeabilidade de 1.300 darcy.

## 5.2 Caracterização das Matérias-Primas

### 5.2.1 Resíduo de Terra Diatomácea

Para a fabricação dos pavimentos, as amostras saturadas, coletadas na indústria cervejeira, foram submetidas à secagem em forno a lenha durante 2 horas à temperatura de  $50 \pm 2,0$  °C, objetivando remover o álcool, materiais orgânicos e inorgânicos solúveis. Após este processo parte do resíduo seco foi reservado, e o restante submetido a lavagem em água corrente, à temperatura ambiente, para investigar se existem diferenças entre o resíduo seco e lavado no desempenho do concreto. A caracterização do resíduo de Terra Diatomácea empregado neste estudo, foi efetuada por Castanha (2019), visto que a autora utilizou o mesmo em sua pesquisa.

Castanha (2019) caracterizou o resíduo com os parâmetros de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO<sub>5</sub>), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Fósforo Total, Nitrogênio Total Kjeldahl, Sólidos Totais, Sólidos Fixos e Sólidos Voláteis pelo Laboratório de Limnologia do GERPEL, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, conforme as metodologias do *Standard Methods* (APHA, 2012).

Para definir a quantidade de material orgânico, o resíduo foi inicialmente seco a 105 °C por 3 horas em estufa Solab SL-100, para eliminar o excesso de água e voláteis como etanol e, em seguida, pesado em cadinhos de porcelana (duplicata) e submetidos a tratamento em mufla EDG W-one a 700°C por 3 horas com taxa de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup>. Após o resfriamento até a temperatura de 100 °C, os cadinhos foram mantidos em dessecador com sílica gel até temperatura ambiente e em seguida pesados até massa constante (CASTANHA, 2019).

Para estudo da cristalinidade da Terra Diatomácea *in natura*, foram empregadas medidas de Difractometria de Raios-X com equipamento Brucker modelo

---

<sup>4</sup> Velocidade do fluxo de um fluido através de um meio poroso.

D2Phaser com radiação  $K\alpha$  do Cu com  $\lambda = 1,54406$  Angstroms e varredura de ângulo  $2\theta$  entre  $5^\circ$  e  $100^\circ$  com incremento de  $0,02^\circ$  (CASTANHA, 2019).

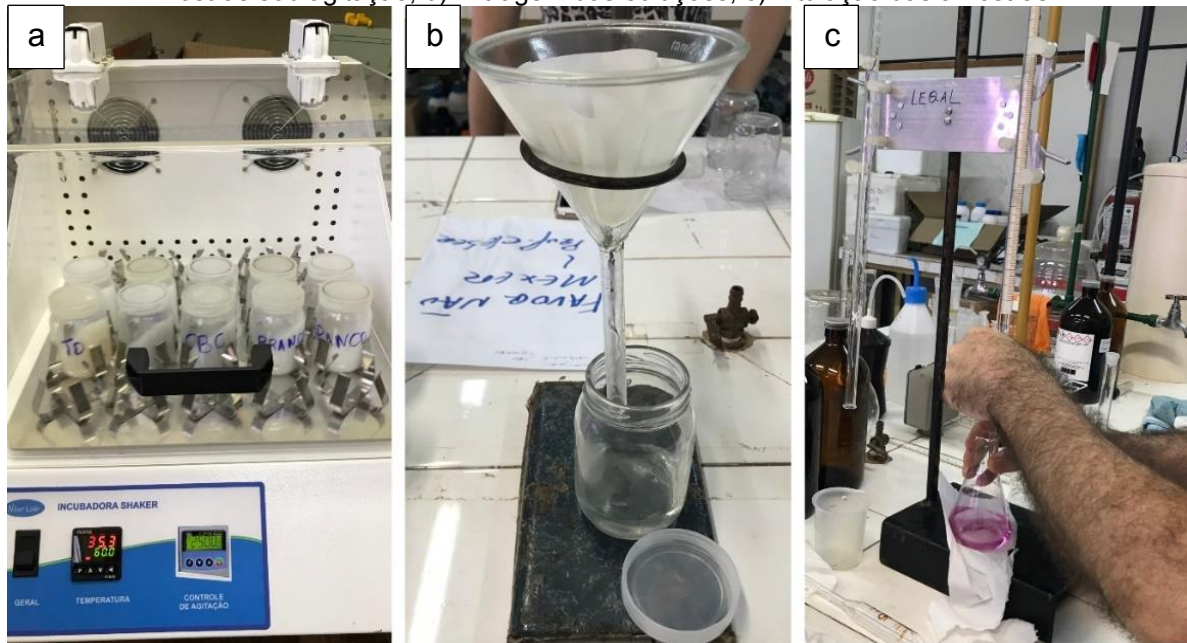
A avaliação da morfologia e a proporção dos átomos da Terra Diatomácea *in natura* foi realizada com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) realizados pelo Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Universidade Federal do Paraná – UFPR, *Campus* Palotina. As amostras foram colocadas em porta amostra sobre fita de carbono dupla face, sendo posteriormente secas e metalizadas com uma fina camada de ouro na superfície (*Sputtering*). As análises foram realizadas em equipamento da marca TESCAN, modelo VEGA3. As micrografias foram obtidas em diversos aumentos em módulo SE (*Secondary Electron*) com detector de elétrons secundários. A composição química das microrregiões das amostras foi analisada por EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva) com detector de Raios X da marca OXFORD INSTRUMENTS, modelo X-ACT (CASTANHA, 2019).

### 5.2.2 Atividade Pozolânica

Os procedimentos deste ensaio foram realizados conforme a NBR 15895 (ABNT, 2010), permitindo caracterizar a atividade pozolânica de uma adição mineral. Primeiramente foi necessário obter o óxido de cálcio (CaO), por meio da calcinação de 4,0 g de carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ), em mufla EDG a temperatura de  $1000 \pm 50$  °C, durante uma hora. Logo após, pesou-se  $2,000 \pm 0,001$  g de óxido de cálcio (CaO) obtido,  $1,000 \pm 0,001$  g de Terra Diatomácea FW-50 e FW-14, sendo colocados em frascos de 500 mL com tampa rosqueada, acrescentando 50 mL de água purificada, isenta de dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Estas amostras foram deixadas em banho ultrassônico a 60 °C por 5 minutos, permanecendo, em seguida, em agitação constante (250 rpm), a 60 °C por 24 horas.

Decorrido este período, os frascos foram resfriados em água corrente, acrescentando 50 mL de solução aquosa de sacarose a 24% m/v, sendo agitados mecanicamente (250 rpm) durante 15 minutos, em temperatura ambiente. As soluções foram filtradas em papel de filtração média preeguado, sendo pipetados 25 mL para Erlenmeyer, titulando-se com solução de HCl  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , utilizando fenolftaleína como indicador do ponto final, como mostra a Figura 7.

**Figura 7** – Sequência de imagens demonstrando a determinação de atividade pozolânica: a) Amostras sob agitação; b) Filtragem das soluções; c) Titulação das amostras.



Fonte: A autora.

Com estes valores encontrados, foi possível calcular o índice de atividade pozolânica Chapelle, que segundo a NBR 15895 (ABNT, 2010) é expresso pela porção de hidróxido de cálcio fixado por grama de adição mineral, como mostram as Equações 1, 2 e 3.

$$l_{Ca(OH)_2} = \frac{28 \times (V_3 - V_2) \times F_c}{m_2} \times 1,32 \quad (1)$$

$$F_c = \frac{M_{HCl}}{0,1} \quad (2)$$

$$M_{HCl} = \frac{m_1}{V_1 \times 0,19072} \quad (3)$$

Sendo:

$l_{Ca(OH)_2}$  → índice de atividade pozolânica Chapelle obtido no ensaio, que corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado, expresso em mg/g;

$M_{HCl}$  → molaridade real da solução de HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup>;

$m_1$  → massa de tetraborato de sódio (g);

- $m_2$  → massa de material pozzolânico (g);  
 $V_1$  → volume de HCl gasto na titulação (mL);  
 $V_2$  → volume de HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> consumido no ensaio com amostra (mL);  
 $V_3$  → volume de HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> consumido no ensaio em branco (mL);  
 $F_c$  → fator de correção do HCl para uma concentração de 0,1 mol L<sup>-1</sup>;  
1,32 → relação molar Ca(OH)<sub>2</sub>/CaO.

### 5.2.3 Estabilidade Térmica

As Análises Termogravimétricas (TGA) foram efetuadas no Laboratório de Química da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, *Campus Toledo*. A estabilidade térmica das Terras Diatomáceas FW-14 e FW-50 secas e do resíduo de filtro da cervejaria foram estudadas em equipamento Perkin Elmer, modelo STA 6000, faixa de temperatura de 30 °C a 800 °C com razão de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup>, massa de amostra de 5 a 10 mg e fluxo de nitrogênio de 50 mL min<sup>-1</sup>. Destaca-se que a amostra do resíduo foi previamente seca ao sol.

### 5.2.4 Composição Granulométrica

A análise granulométrica dos agregados foi realizada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2009). Os agregados foram secos em estufa, a temperatura de 105 ± 5 °C por 24 horas. Posteriormente foram submetidos a secagem à temperatura ambiente, sendo quarteados até resultarem em duas amostras de 300 g de areia, 2 kg de pó de pedra e 5 kg de pedrisco.

As amostras foram colocadas sobre um conjunto de peneiras, com abertura de malha crescente da base para o topo, definidas pelas normas NBR ISO 3310-1 (ABNT, 2010) e NBR ISO 3310-2 (ABNT, 2010), agitadas mecanicamente e manualmente, possibilitando a separação dos grãos. Após este processo, a massa retida em cada peneira foi pesada, sendo utilizada para a determinação das porcentagens médias, retidas e acumuladas, dimensão máxima característica e módulo de finura.

### 5.2.5 Massa Específica e Absorção de Água dos Agregados Miúdos

A absorção de água dos agregados miúdos foi realizada segundo a normativa NBR NM 30 (ABNT, 2001). O ensaio foi composto por quatro amostras de 1 kg, de areia e pó de pedra, secas em estufa a  $105 \pm 5$  °C por 24 horas, sendo homogeneizadas e quarteadas. As amostras foram preparadas, ficando em repouso em um recipiente coberto com água, por cerca de 24 horas. Após este período, foram dispostas em uma superfície plana para secagem com corrente de ar.

Em seguida, os agregados foram depositados em um molde troncocônico metálico, efetuando-se 25 golpes em sua superfície, com uso de uma haste de compactação, retirando o molde verticalmente. Na presença de umidade, o agregado permanece com o formato do molde, sendo necessário a secagem das amostras novamente. Conforme a NBR NM 30 (ABNT, 2001), o material atinge a condição saturado superfície seca<sup>5</sup> quando o cone desmorona durante a remoção do molde.

Utilizando as amostras do ensaio de absorção de água, foram realizados os ensaios para a determinação da massa específica, segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009). Desta forma, as amostras compostas por agregados saturados superfície seca foram pesadas,  $500,0 \pm 0,1$  g, inseridas em frascos aferidos com  $500 \text{ cm}^3$  de capacidade, sendo registradas as massas do conjunto. Imediatamente os frascos foram preenchidos com água até a marca de 500 mL, e agitados para eliminar as bolhas de ar. Em seguida, foram mantidos em banho, com água à temperatura de  $21 \pm 2$  °C, conforme a Figura 8.

**Figura 8** – Sequência de procedimento para obtenção da densidade e massa úmida: a) Secagem da amostra; b) Aplicação de golpes; c) Banho em temperatura ambiente.



Fonte: A autora.

<sup>5</sup> “São as partículas de agregado que culminaram suas possibilidades de absorver água e mantêm a superfície seca” (ABNT, 2009, p. 2).



Decorrido o período de uma hora, os tubos foram preenchidos com água até a marca de 500 mL, identificando-se a massa total. Os agregados foram removidos dos tubos, secos em estufa a cerca de  $105 \pm 5$  °C. Quando obtida a massa constante, a areia foi pesada como massa da amostra seca em estufa. Os cálculos para a determinação destes índices foram efetuados com uso das equações 4 a 6.

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (4)$$

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (5)$$

Na qual:

$d_3$  → massa específica do agregado (g/cm<sup>3</sup>);

$V$  → volume do frasco (cm<sup>3</sup>);

$V_a$  → volume de água adicionado ao frasco (cm<sup>3</sup>), conforme a equação 2 (cm<sup>3</sup>);

$m$  → massa da amostra seca em estufa (g);

$m_s$  → massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

$m_1$  → massa do conjunto (frasco + agregado) (g);

$m_2$  → massa total (frasco + agregado + água) (g);

$\rho_a$  → massa específica da água (g/cm<sup>3</sup>).

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (6)$$

Sendo:

$A$  → absorção de água (%);

$m_s$  → massa ao ar da amostra na condição saturado superfície seca (g);

$m$  → massa da amostra seca em estufa (g).

### 5.2.6 Massa Específica e Absorção de Água do Agregado Graúdo

Este ensaio foi efetuado segundo a NBR NM 53 (ABNT, 2009). As amostras de pedrisco foram coletadas de acordo com a NBR NM 26 (ABNT, 2009) e reduzidas em

conformidade com a NBR NM 27 (ABNT, 2001). Em seguida, foram expelidos, por via seca, os materiais passantes na peneira 4,75 mm, então lavados e secos em estufa a temperatura de  $105 \pm 5$  °C.

Duas amostras com 3 kg de pedrisco foram pesadas e submergidas em água por 24 horas. Decorrido este período, estas foram secas superficialmente com uso de pano absorvente e pesadas novamente em balança hidrostática, na condição agregado saturado superfície seca. Posteriormente as amostras foram submersas em água, a temperatura de  $23 \pm 2$  °C e pesadas na condição de massa em água.

Finalmente as amostras foram secas em estufa a  $105 \pm 5$  °C, até atingir massa constante e pesadas, sendo realizados os cálculos da massa específica e absorção de água, utilizando as Equações 7 e 8.

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (7)$$

Sendo:

$d$  → massa específica do agregado seco (g/cm<sup>3</sup>);

$m$  → massa ao ar da amostra seca (g);

$m_s$  → massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g);

$m_a$  → massa em água da amostra (g).

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (8)$$

Na qual:

$A$  → absorção de água (%);

$m_s$  → massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g);

$m$  → massa ao ar da amostra seca (g).

### 5.2.7 Massa Unitária

A massa unitária dos agregados comumente é aplicada para a conversão entre massa e volume, visto que nos casos em que a proporção será em volume é

necessário identificar a massa de agregado que ocupa um recipiente de volume unitário (NEVILLE, 2016).

Este ensaio foi efetuado com base na NBR NM 45 (ABNT, 2006), que define o procedimento para estabelecer a densidade e o volume de vazios dos agregados na condição compactado ou solto. O ensaio foi feito de acordo com o procedimento C da norma citada, determinando a massa do recipiente vazio. As amostras corresponderam a 150% da capacidade volumétrica dos recipientes. Logo após, os recipientes foram preenchidos com os agregados, sendo os materiais introduzidos em três camadas, compactadas com uma haste metálica.

Por fim, as superfícies foram niveladas com uma régua, havendo a medição da massa do conjunto, em quilos. Deste modo, a massa unitária foi calculada utilizando a Equação 9.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (9)$$

Na qual:

$\rho_{ap}$  → massa unitária do agregado (kg/m<sup>3</sup>);

$m_{ar}$  → massa do recipiente mais o agregado (kg);

$m_r$  → massa do recipiente vazio (kg);

$V$  → volume do recipiente (m<sup>3</sup>).

#### 5.2.8 Teor de Material Pulverulento

O teor de material pulverulento dos agregados foi determinado conforme as especificações da NBR NM 46 (ABNT, 2003), que possibilita indicar, por lavagem, a fração de material mais fino que a malha da peneira 75 µm. O ensaio foi composto por duas amostras de cada agregado com massa mínima de 100 g de areia, 1 kg de pó de pedra e 2,5 kg de pedrisco.

Primeiramente, as amostras foram secas em estufa, à temperatura aproximada de 110 ± 5 °C, por 24 horas. Logo após a secagem e registro da massa, os materiais foram colocados sob o conjunto de peneiras de 75 µm (inferior) e 1,18 mm (superior), adicionando água até o preenchimento completo dos recipientes.

As amostras foram agitadas, visando separar as partículas mais finas das maiores. Este procedimento foi repetido até que a água de lavagem se tornasse límpida, assim o material retido nas peneiras foi devolvido a amostra lavada. Por fim, os agregados foram secos em estufa, havendo a determinação da massa restante e cálculo do material pulverulento com uso da Equação 10.

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (10)$$

Sendo:

$m \rightarrow$  porcentagem de material mais fino que a peneira de 75  $\mu\text{m}$  por lavagem;

$m_i \rightarrow$  massa original da amostra seca (g);

$m_f \rightarrow$  massa da amostra seca após a lavagem (g).

### 5.3 Dosagem Experimental do Concreto

Esta pesquisa avaliou a substituição de areia natural, em massa, pelo resíduo de Terra Diatomácea, seco e lavado, nos níveis de 1,0% e 2,0% m/m. Estes percentuais foram fixados considerando os resultados alcançados por Macedo et al. (2020); Liu, Shao, Wang (2016) e Letelier et al. (2016), que empregaram teores de resíduos variando de 2,0 a 10,0% em volume, e demonstraram que esta faixa promove menor perda de resistência à compressão, quando relacionada a percentuais acima de 10,0%. Adotou-se a dosagem, em massa, demonstrada na Tabela 3.

**Tabela 3** – Proporção de materiais na dosagem de referência (kg).

Cimento	Areia	Pó de Pedra	Pedrisco	Água
1	0,77	2,33	1,11	0,43

Fonte: Fernandes (2012).

Segundo Fernandes (2012) este traço é comumente utilizado na fabricação de pavimentos intertravados e artefatos de concreto. A porcentagem de aditivo empregada foi de 0,20% em relação à massa de Cimento Portland, situando-se nos limites definidos pelo fabricante.

## 5.4 Moldagem e Cura do Concreto

Os pavimentos intertravados foram moldados em ambiente real de produção. A confecção dos blocos foi realizada na seguinte sequência: pesagem dos materiais, mistura em betoneira com capacidade de 220 litros e moldagem.

Utilizou-se uma mesa vibratória, com dimensão de 2,50 x 1,70 m, motor trifásico de 220 W e capacidade para 77 formas, e se encontra na empresa de artefatos de cimento que colaborou com esta pesquisa. As formas empregadas produzem blocos com dimensões de 10 x 20 x 6 cm. Estas receberam desmoldante antes da moldagem, visando facilitar o processo de retirada dos blocos. Foram confeccionados 150 corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão e 15 blocos para o ensaio de absorção de água, totalizando 165 pavimentos, como mostra a Figura 9.

**Figura 9** – Representação gráfica com o processo de fabricação dos pavimentos: a) Aplicação de desmoldante nas formas; b) Moldagem dos blocos; c) Corpos de prova finalizados.



Fonte: A autora.

Para a cura, os pavimentos permaneceram no pátio da fábrica, conforme o padrão empregado pela empresa nas peças comercializadas. Durante sete dias houve aspersão de água nos blocos três vezes ao dia, objetivando a manutenção da umidade, benéfica para a cura do concreto. Após este período, os *pavers* foram mantidos em ambiente coberto, sem condições especiais de armazenamento.

## 5.5 Caracterização do Concreto no Estado Endurecido

### 5.5.1 Resistência à Compressão Axial

A resistência à compressão axial das peças foi efetuada em conformidade com a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), sendo realizado em dez amostras, de cada dosagem, com idade de 7, 14 e 28 dias. Para a realização do ensaio foi empregada prensa hidráulica calibrada, do laboratório de Construção Civil do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, de Cascavel – PR.

Inicialmente as peças foram capeadas com pasta de enxofre, conforme as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2015) e foram saturadas em câmara úmida, durante 24 horas. Após este processo, os blocos foram posicionados na prensa, com os eixos verticais em completo alinhamento com o centro de carga dos cilindros de aço, com diâmetro de  $85 \pm 0,5$  mm, sendo o carregamento efetuado continuamente, com velocidade aproximada de 50 - 1500 kgf/s, até a ruptura, como mostra a Figura 10.

A resistência à compressão de cada pavimento foi calculada pela razão da carga máxima efetuada até sua ruptura e a área de carregamento, sendo o resultado multiplicado por 0,95, fator multiplicativo  $p$  especificado pela ABNT NBR 9781:2013, dado em função da altura do bloco.

**Figura 10** – Representação gráfica do ensaio de Resistência à compressão: a) Blocos capeados; b) Prensa hidráulica utilizada.



Fonte: A autora.

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013) a resistência característica pode ser determinada com uso das Equações 11 e 12.

$$f_{pk,est} = f_p - t \times s \quad (11)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_p - f_{pi})^2}{n - 1}} \quad (12)$$

Sendo:

$f_p$  → resistência média das peças (MPa);

$f_{pi}$  → resistência individual das peças (MPa);

$f_{pk,est}$  → resistência característica estimada à compressão (MPa);

$n$  → número de peças da amostra;

$s$  → desvio-padrão da amostra (MPa);

$t$  → coeficiente de *Student*, fornecido em função do tamanho da amostra.

### 5.5.2 Absorção de Água

Neste procedimento foram ensaiados três corpos de prova, para cada dosagem, segundo as especificações da NBR 9781 (ABNT, 2013). Aos 28 dias de cura, os blocos foram mantidos em câmara úmida à temperatura de  $23 \pm 5$  °C, pelo período de 24 horas, até alcançarem a saturação. Após este processo, a água superficial foi eliminada e as amostras na condição saturada superfície seca tiveram suas massas medidas em balança calibrada com resolução de 0,1 g, até não haver diferença superior a 0,5% entre duas pesagens consecutivas, efetuadas a cada duas horas. Assim, foi definida a massa saturada ( $m_2$ ).

Imediatamente, os corpos de prova foram inseridos em uma estufa a  $110 \pm 5$  °C, sendo mantidos por 24 horas. Em seguida, foram pesados determinando a massa seca ( $m_1$ ), sendo este processo realizado da mesma forma que a condição saturado superfície seca. De posse destes dados, a absorção de água de cada corpo de prova foi calculada por meio da Equação 13.

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (13)$$

Na qual:

$A$  → absorção de cada corpo de prova (%);

$m_1$  → massa do corpo de prova seco (g);

$m_2$  → massa do corpo de prova saturado (g).

## 5.6 Microestrutura do Concreto

### 5.6.1 Microscopia Óptica-Digital

Objetivando examinar o comportamento do resíduo de Terra Diatomácea na pasta de cimento, foram efetuadas análises com uso de microscópio óptico em 5 amostras coletadas de corpos de prova rompidos no ensaio de resistência à compressão. Estas não necessitaram de tratamento para a execução deste ensaio.

Foi utilizado microscópio digital da marca Aven, ZipScope USB, ampliação digital de 50 vezes, disponibilizado pelo laboratório de Química da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, *Campus Toledo*.

### 5.6.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para verificar a zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento, e a influência do resíduo de Terra Diatomácea na matriz cimentícia, foram realizadas análises da morfologia e proporção dos átomos de cinco amostras de corpos de prova, com uso de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), efetuado pelo Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Universidade Federal do Paraná – UFPR, *Campus Palotina*.

## 5.7 Análise Estatística

Com o intuito de verificar a significância das variáveis estudadas, resíduo de Terra Diatomácea nos blocos de concreto, na resistência à compressão axial e



absorção de água, efetuou-se a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey contendo nível de confiança de 95%, empregando o software *RStudio*.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Caracterização das Matérias-Primas

#### 6.1.1 Resíduo de Terra Diatomácea

Castanha et al. (2020) caracterizaram o resíduo de Terra Diatomácea e verificaram elevada carga orgânica, como mostra a Tabela 4.

**Tabela 4** – Resultados da caracterização do resíduo de Terra Diatomácea.

Parâmetros	Resultados (mg L <sup>-1</sup> )
DBO <sub>5</sub>	1,98 x10 <sup>5</sup>
DQO	230,10 x10 <sup>5</sup>
Fósforo Total	119,60
Nitrogênio Total Kjeldahl	3.990
Sólidos Totais	382,26
Sólidos Fixos	333,34
Sólidos Voláteis	48,92

Fonte: Castanha et al., 2020.

Conforme os valores encontrados de DBO<sub>5</sub> e DQO, foi possível identificar elevado índice de material orgânico presente no resíduo de Terra Diatomácea, do qual a quantidade de carbono orgânico biodegradável (DBO<sub>5</sub>) é inferior a quantidade de carbono oxidável ou não biodegradável (DQO) (CASTANHA et al., 2020).

Castanha et al. (2020) afirmam que a grande porção de sólidos totais, proveniente da somatória de sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos, demonstram que este elemento é capaz de ampliar o material sedimentável, quando disposto incorretamente, podendo resultar em aumento da turbidez em meio líquido. A quantidade de sólidos voláteis inferior aos sólidos totais se justifica devido ao etanol e compostos orgânicos voláteis derivados da filtração da cerveja. O tratamento em mufla determinou o total de matéria orgânica presente no resíduo, sendo 46,48% ± 0,04, com coeficiente de variação de 0,086%, resultados em triplicata.

A Terra Diatomácea utilizada apresentou a seguinte composição química: 89,0% de  $\text{SiO}_2$ ; 4,10% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 1,50% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e 5,4% de outros óxidos<sup>6</sup> (CASTANHA et al., 2020).

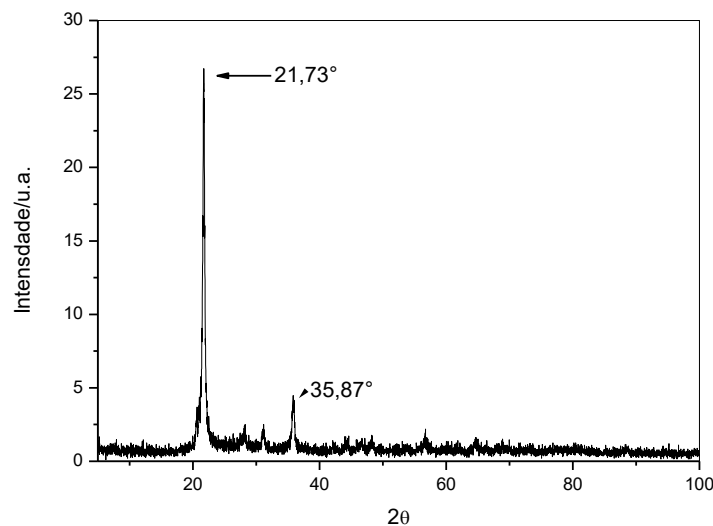
O difratograma (Figura 11) da Terra Diatomácea FW-14 evidenciou pico em  $21,73^\circ$ , específico da sílica ( $\text{SiO}_2$ ), e pico em  $35,83^\circ$ , relativo à caulinita ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (SOUZA et al., 2003; BORGES, 2018). Para a Terra Diatomácea FW-50, os resultados nos valores de  $2\theta$  obtidos diferenciaram menos de 1%. A Tabela 5 demonstra que os valores de cristalinidade e tamanho do menor cristalito também se diferenciam em 1,0 a 1,7% (CASTANHA et al., 2020).

**Tabela 5** – Características da Terra Diatomácea *in natura*.

Terra diatomácea	Cristalinidade (%)	Tamanho cristalito (nm)
FW-14	63,2	26,65
FW-50	63,8	27,10

Fonte: Castanha et al., 2020.

**Figura 11** – Gráfico contendo a difratometria de Raios-X (DRX) da Terra Diatomácea FW-14 *in natura*.

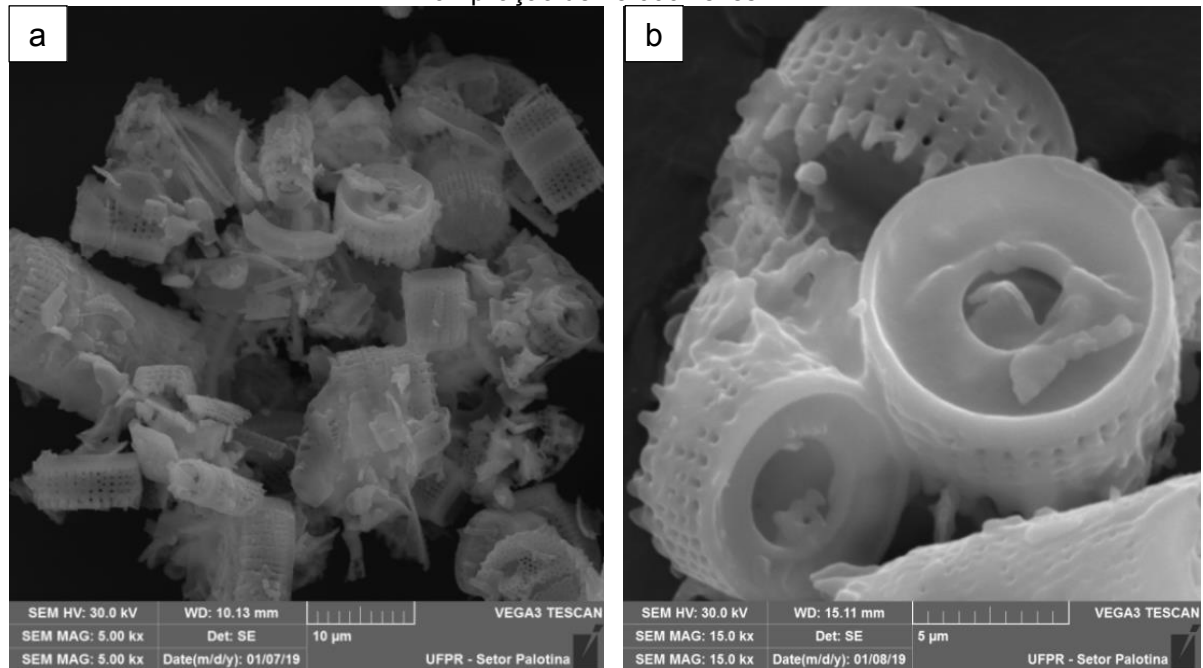


Fonte: Castanha et al., 2020.

A porcentagem de cristalinidade identificada mostrou que a maioria dos cristais são uniformes e com dimensões definidas (Figuras 12 e 13) (CASTANHA et al., 2020).

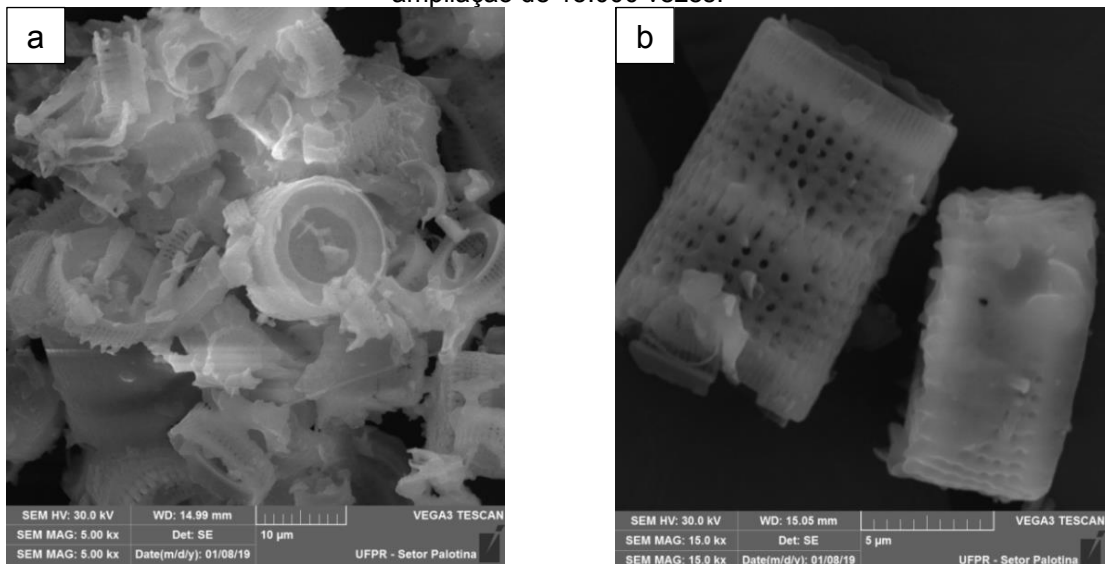
<sup>6</sup> Laudo do fabricante (Iver intec).

**Figura 12** – Microscopia eletrônica de varredura TD FW-14. a) ampliação de 5.000 vezes. b) ampliação de 15.000 vezes.



Fonte: Castanha et al., 2020.

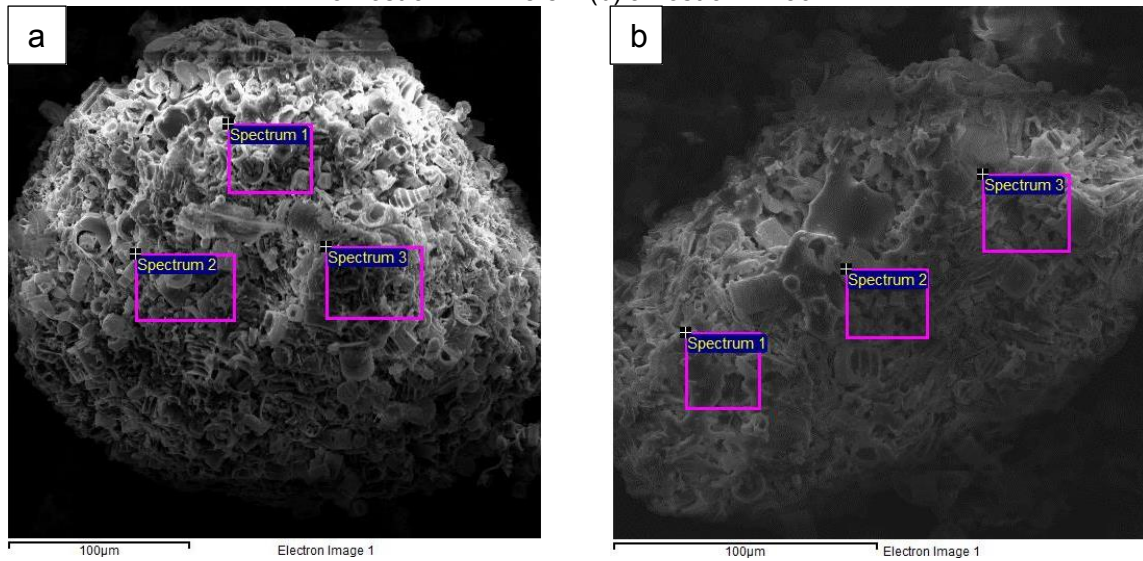
**Figura 13** – Microscopia eletrônica de varredura da TD FW-50. a) ampliação de 5.000 vezes. b) ampliação de 15.000 vezes.



Fonte: Castanha et al. 2020.

Por meio das micrografias das TD FW-14 e FW-50 *in natura*, verificou-se morfologia uniforme e que ambas possuem em sua maior proporção frústula de característica cilíndrica, com orifícios nas laterais e abertura central longitudinal (CASTANHA et al., 2020). A Figura 14 apresenta as análises de EDS das TD FW-14 e FW-50.

**Figura 14** – Imagens com as regiões onde se obteve a Espectroscopia de Energia Dispersiva em: (a) amostra FW-14 e em (b) amostra FW-50.



Fonte: Castanha et al., 2020.

Por meio da Figura 14 verificou-se que as análises de EDS das TD FW-14 e FW-50 demonstraram composição semiquantitativa dos principais elementos químicos, com elevada proporção de silício (Si) e oxigênio (O), indicador da presença de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e caulinita ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (CASTANHA et al., 2020).

### 6.1.2 Atividade Pozolânica

Os resultados da análise da atividade pozolânica da Terra Diatomácea *in natura* e do resíduo, são demonstrados na Tabela 6.

**Tabela 6** – Resultados obtidos no ensaio de Chapelle Modificado.

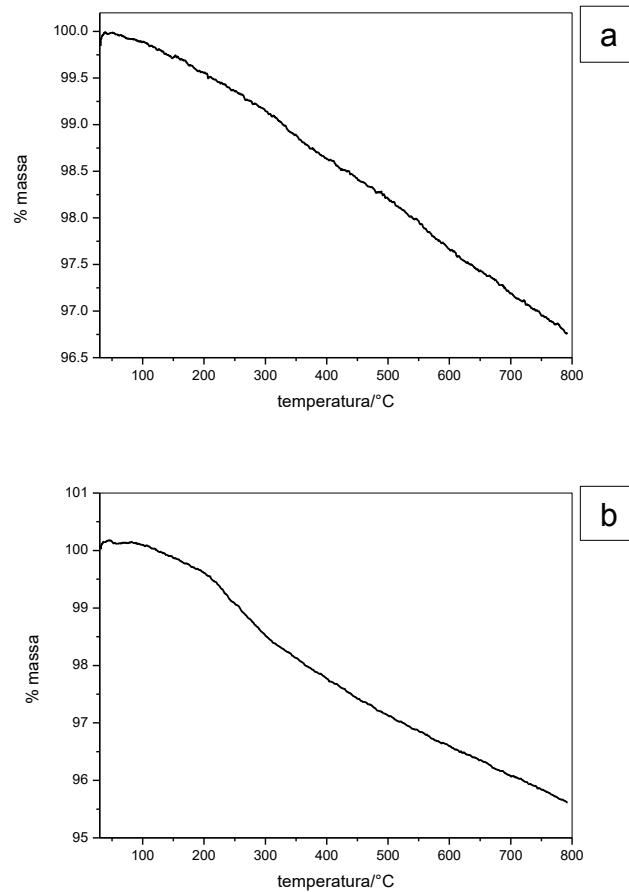
<b>Adições Minerais</b>	<b>Atividade Pozolânica (mg <math>\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}</math>)</b>
Terra Diatomácea FW-14	19,91
Terra Diatomácea FW-50	165,48
Resíduo	193,12

Raverdy et al. (1980) destacam que as adições são consideradas pozolanas a serem adicionadas à composição do Cimento Portland nos casos em que o consumo de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) exceda a 330 mg  $\text{CaO}/\text{g}$  de adição, correspondente a 436 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$  de adição, sendo este o valor mínimo especificado. Portanto, afirma-se que as adições minerais, de origem siliciosa não demonstraram reatividade, não havendo atividade pozolânica significativa.

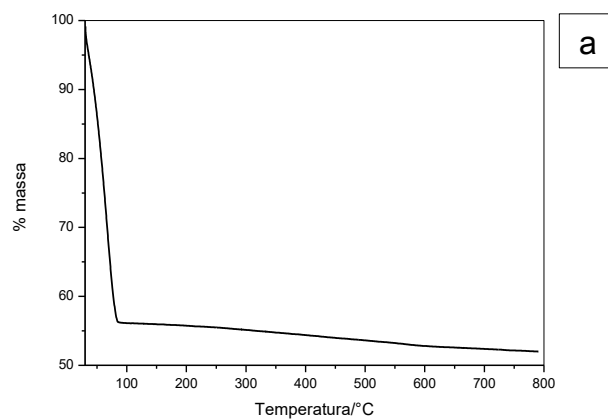
### 6.1.3 Estabilidade Térmica

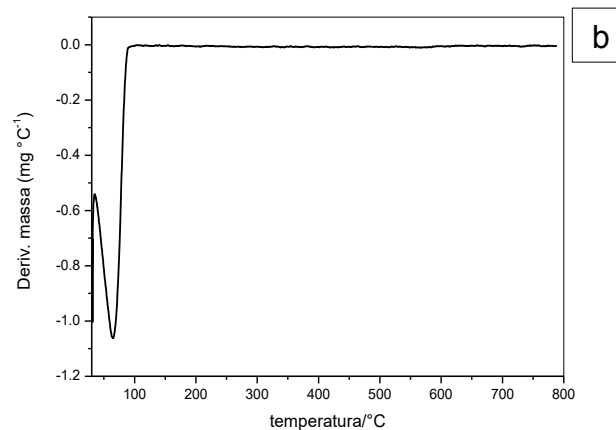
As curvas de termogravimetria (TGA) da Terra Diatomácea (TD) *in natura* e do resíduo do filtro estão apresentadas nas Figuras 15 e 16.

**Figura 15** – Curvas termogravimétricas: a) TD FW 14 pura; b) TD FW 50 pura.



**Figura 16** – a) Curva termogravimétrica da TD obtida do filtro de cervejaria (misturas da FW-14 e FW-50); b) Derivada da curva termogravimétrica da TD obtida do filtro da cervejaria.





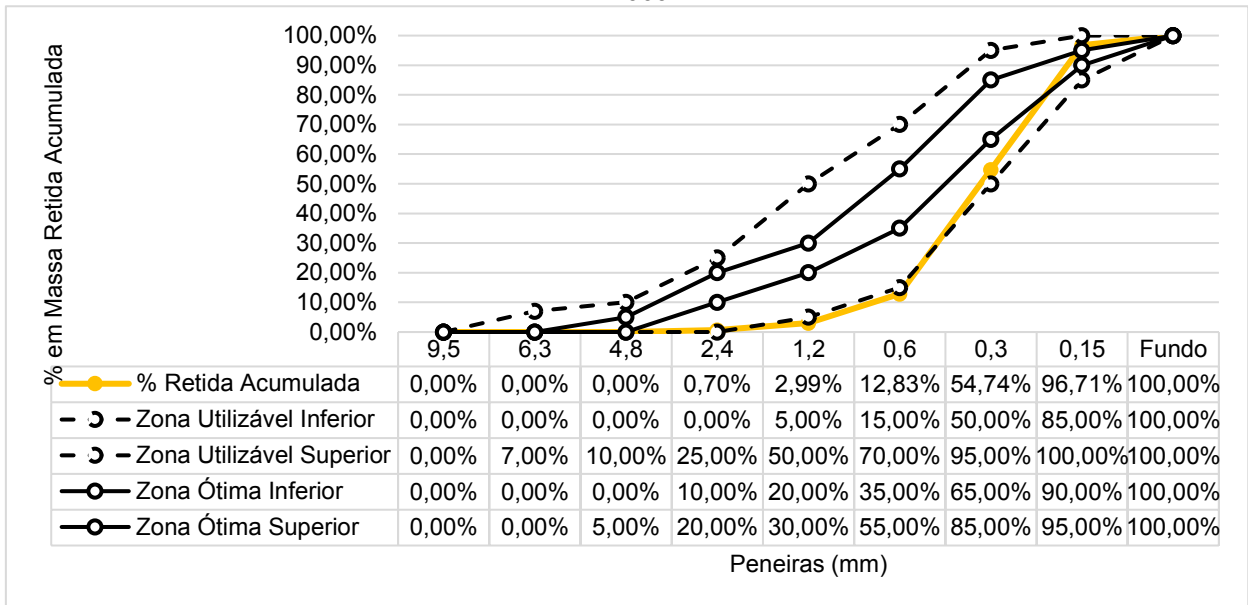
Para as Terras Diatomáceas puras não se observou nitidamente eventos térmicos de perda de água em menores temperaturas, mesmo utilizando as derivadas das curvas. Os valores de perda de massa total até 800 °C para FW-14 foi de 3,26% e para a FW-50 foi de 4,39%, que podem ser atribuídas a perda mínima de água adsorvida como também a deidroxilação de grupos Si-OH na superfície externa do material (YUAN et al., 2006; FERNÁNDEZ; BELLOTTI, 2017).

Para a Terra Diatomácea proveniente do filtro do processo cervejeiro, observou-se no gráfico da derivada um evento térmico em 65 °C e na curva termométrica inflexão em 86 °C, que indicam volatilização de água contida nos poros do material diatomáceo ou em sua superfície, assim como os compostos orgânicos presentes, provenientes do processo de filtração. A perda de massa até 86 °C correspondeu a 43,7% e entre 86 °C e 800 °C a perda foi de 4,27%, demonstrando deidroxilação de grupos Si-OH na superfície externa do material (YUAN et al., 2006; FERNÁNDEZ; BELLOTTI, 2017).

#### 6.1.4 Análise Granulométrica

A distribuição granulométrica da areia natural, encontrada mediante peneiramento, tal como as faixas granulométricas ótimas e utilizáveis, em conformidade com a NBR 7211 (ABNT, 2009) pode ser visualizada na Figura 17.

**Figura 17** – Gráfico com a curva granulométrica da areia com limites definidos pela ABNT NBR 7211:2009.



Com análise da Figura 17 é possível identificar que a curva granulométrica da areia se situou próxima a zona utilizável inferior, demonstrando distribuição com elevada porção de finos. O módulo de finura foi encontrado pelo somatório da porcentagem retida acumulada nas peneiras de série normal, dividido por cem, sendo 1,68. Este valor se encontra entre os limites do módulo de finura da zona utilizável inferior, que varia de 1,55 a 2,20, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), indicando que a areia natural avaliada é classificada comercialmente como fina.

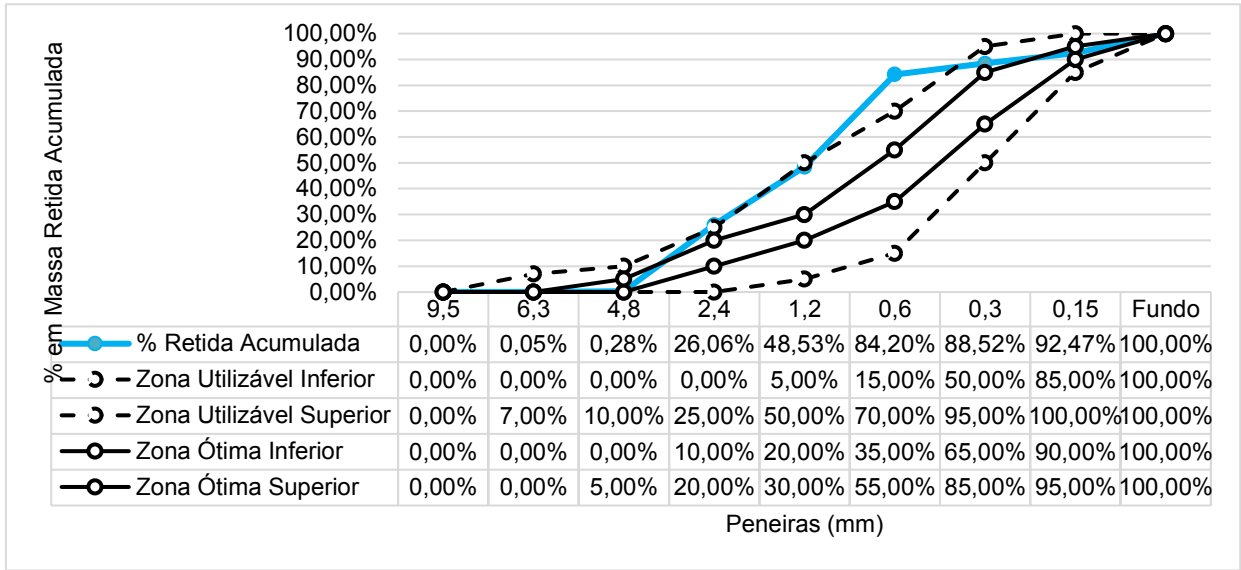
A granulometria está associada diretamente com a porção de vazios existente entre os grãos. Desta forma, é preciso variabilidade de partículas, de maneira que os grãos de tamanho inferior ocupem os espaços entre os grãos maiores (OLIVEIRA et al., 2000). É indispensável buscar a granulometria apropriada, todavia utilizando os agregados a disposição na região (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Areias muito finas favorecem misturas coesivas, porém possuem potencial para elevar a demanda de água. Por outro lado, para uma mesma proporção de agregados graúdos, areias mais finas necessitam um teor inferior de argamassa para índices satisfatórios de coesão e trabalhabilidade quando contrastado com areias mais grossas, sendo empregado em dosagens de concreto, como da Associação Brasileira de Cimento Portland (WEIDMANN, 2008).

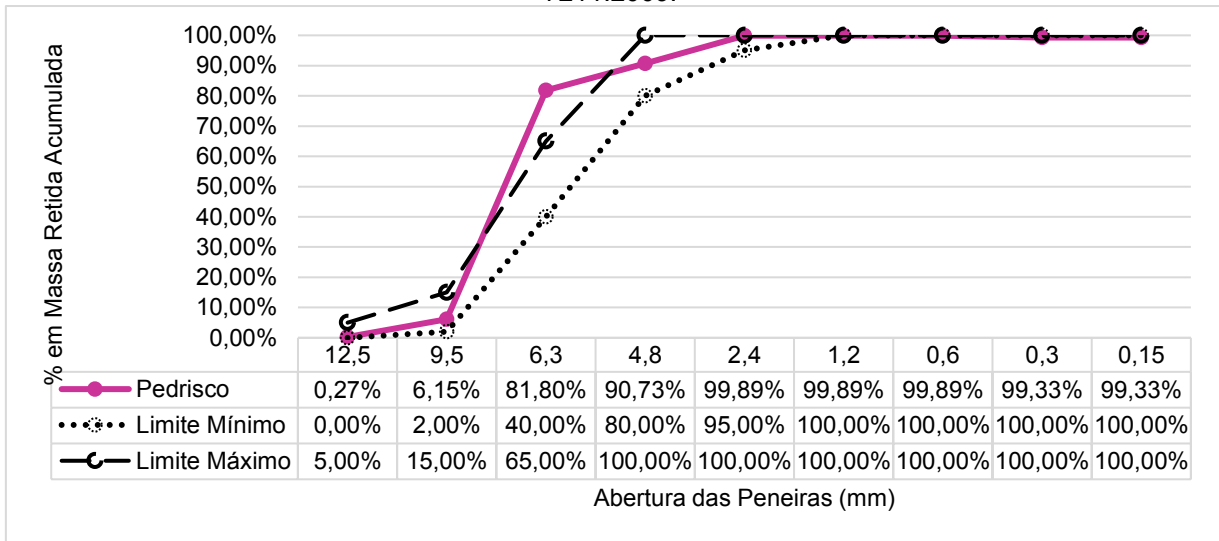
A curva granulométrica do pó de pedra e do pedrisco, contendo as faixas granulométricas ótimas e utilizáveis e os limites definidos pela ABNT NBR 7211:2009 estão exibidas nas Figuras 18 e 19.



**Figura 18** – Gráfico com a curva granulométrica do pó de pedra com limites definidos pela ABNT NBR 7211:2009.



**Figura 19** – Gráfico com a curva granulométrica do pedrisco com limites definidos pela ABNT NBR 7211:2009.



A curva do pó de pedra, exibida na Figura 18, se situou em maior parte da faixa granulométrica, apesar de estar com agregados passantes a mais, na peneira 0,6 mm, que a zona utilizável superior sugerida pela NBR 7211 (ABNT, 2009). O módulo de finura e a dimensão máxima característica<sup>7</sup> encontrados foram de 3,40 e 4,80, respectivamente.

<sup>7</sup> “Grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa” (ABNT, 2003, p. 4).

A curva granulométrica do pedrisco, demonstrada na Figura 19, apresentou excesso de partículas com dimensões 6,3 mm, entretanto, se encontrou em maior parte entre os limites da normativa, apresentando dimensão máxima característica igual a 12,5. Consoante a normativa citada, observou-se que o pedrisco se enquadra na zona granulométrica 4,75/12,5. Destaca-se que a dimensão máxima característica pode influenciar a dimensão das formas e o tempo de vibração, em casos de artefatos de concreto fabricados em vibro prensas (HELENE; TERIAN, 1992).

Os valores demonstrados anteriormente foram obtidos por meio da metodologia exposta no programa experimental, em ensaios de amostras e com, no mínimo, duas repetições com aproximação na terceira casa decimal. É importante salientar que os agregados naturais empregados são os mesmos utilizados pela empresa de artefatos de cimento que contribuiu com esta pesquisa.

#### 6.1.5 Massa Específica e Absorção de Água dos Agregados

Os resultados obtidos na determinação da massa específica e absorção de água da areia, pó de pedra e pedrisco são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7** – Massa Específica e Absorção de Água dos agregados.

<b>Índices Físicos</b>	<b>Areia</b>	<b>Pó de Pedra</b>	<b>Pedrisco</b>
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	3,04	3,07
Absorção de água (%)	0,37	2,81	2,14

Santos e Ferrari (2019), Filho et al. (2019) empregaram areias naturais com massas específicas iguais à 2,67 e 2,66 g/cm<sup>3</sup>, na devida ordem. É importante destacar que a massa específica da areia usada para a fabricação dos pavimentos intertravados (2,65 g/cm<sup>3</sup>) é consonante com os resultados encontrados pelos autores.

Weidmann (2008) identificou em sua pesquisa valores correspondentes a 2,95 g/cm<sup>3</sup> para a massa específica do pó de pedra. É previsto para o pó de pedra, que este índice seja mais elevado, visto a alta parcela de finos, resultando em quantidade de vazios por volume inferior, em relação a areia (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Para o pedrisco, Angelin, Lintz e Barbosa (2018), Fabro et al. (2011) identificaram massa específica correspondente à 2,96 g/cm<sup>3</sup> e 2,95 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

Os valores encontrados para a absorção de água foram semelhantes aos agregados utilizados para a confecção de blocos de concreto nos estudos realizados

por Carvalho et al. (2018), Liu et al. (2020) e Santos (2014). Cabe enfatizar que a massa específica não se trata de medida de qualidade. Para fins de dosagem do concreto é importante conhecer o espaço ocupado pelos grãos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

#### 6.1.6 Massa Unitária

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos no ensaio de massa unitária compactada para a areia, pó de pedra e pedrisco.

**Tabela 8** – Determinação da Massa Unitária dos agregados segundo a ABNT NBR 45:2006.

Agregados	Massa (kg)		Volume (m <sup>3</sup> )	Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )
	Recipiente	Recipiente+Agregado		
Areia	3,22	26,18	0,02	1494,66
Pó de Pedra	6,01	25,34	0,01	1889,18
Pedrisco	6,01	19,59	0,01	1327,21

São considerados agregados com peso normal aqueles que apresentam massa unitária de até 2400 kg/m<sup>3</sup>, sendo estes materiais comumente empregados para a confecção de concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Desta forma, os valores encontrados para a areia, pó de pedra e pedrisco (Tabela 5) são característicos de agregados naturais com peso normal.

Nas dosagens de concreto, quanto mais elevada a massa unitária dos grãos, representando um melhor empacotamento<sup>8</sup> das partículas, menor será o consumo de água ou menos pasta será preciso para uma determinada trabalhabilidade (QUIROGA; FOWLER, 2003).

Fernandez et al. (2018) confeccionaram pavimentos intertravados utilizando areia e pedrisco com massa unitária igual a 1440,0 kg/m<sup>3</sup> e 1350,0 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Fabro et al. (2011) ao produzir argamassas e concretos, utilizaram pó de pedra com massa unitária igual a 1850,0 kg/m<sup>3</sup>. Os valores encontrados neste estudo são semelhantes aos identificados pelos autores citados.

<sup>8</sup> “Estudo da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados de uma composição, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e, assim, sucessivamente” (OLIVEIRA et al., 2000).

### 6.1.7 Teor de Material Pulverulento

O percentual de material pulverulento da areia, pó de pedra e pedrisco estão apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9** – Resultados do ensaio de Material Pulverulento.

Material	Determinações	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Individual (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
Areia	A1	100	99,30	0,70	0,81	0,10
	A2	100	99,10	0,91		
Pó de Pedra	A1	1000	807,20	23,89	22,80	1,09
	A2	1000	821,60	21,71		
Pedrisco	A1	2500	2496,50	0,14	0,16	0,02
	A2	2500	2495,60	0,18		

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009) os limites máximos aceitáveis para o teor de material pulverulento são 3% para agregados miúdos e 1% para grãos, sendo estes minerais utilizados na produção de concreto sujeito ao desgaste superficial. Desta forma, o material pulverulento identificado na areia e pedrisco se situaram abaixo das definições da normativa. Para o pó de pedra, o teor excedeu expressivamente o valor recomendado pela norma.

Estas substâncias compõe minoritariamente os agregados miúdos e grãos, sendo capazes de afetar a trabalhabilidade, endurecimento e propriedades relacionadas a durabilidade dos concretos (MEHTA; MONTEIRO, 1994). É possível a utilização de agregados contendo materiais pulverulentos, uma vez que não haja atividade química. Contudo, a quantidade existente na massa total do agregado necessita ser controlada, visto que a finura destas impurezas, implica em uma quantidade mais elevada de água para a mesma característica do concreto (NEVILLE, 2016).

Nos pavimentos intertravados, o alto teor de finos contribui para o empacotamento das partículas no decorrer da prensagem dos blocos. Muitas dosagens de concreto para *pavers* introduzem pó de pedra em teores elevados, alcançando até 25% em relação ao agregado total. Nestes casos, o material pulverulento promove melhor fechamento dos poros, aprimorando a matriz cimentícia (COSTA; GUIMIERI; BRANDÃO, 2014).

Fabro et al. (2011) ao investigar os formatos dos agregados miúdos e quais seus efeitos nas características de argamassas e concretos, identificaram resistências

superiores em concretos contendo pó de pedra, devido ao maior empacotamento dos poros, ocasionado pelos materiais pulverulentos.

Sampaio, Souza e Gouveia (2014) demonstraram que as partículas finas das cinzas do bagaço da cana de açúcar são eficazes para promover o aumento da resistência à compressão do concreto, visto que os finos possibilitaram maior preenchimento dos poros da mistura cimentícia. No entanto, devido a granulometria fina do material, o consumo de água foi maior quando comparado ao concreto sem adição do resíduo agroindustrial.

Jiang et al. (2018) desenvolveram concreto arenoso com emprego de areia residual superfina e identificaram que as partículas dos resíduos desempenharam função benéfica no concreto, pois contribuíram para o preenchimento dos vazios. Os materiais finos ocuparam os espaços entre os grãos dos agregados e os poros presentes no interior das partículas de areia, resultando na ampliação da compactação.

## 6.2 Concreto no Estado Endurecido

### 6.2.1 Resistência à Compressão Axial

O ensaio de resistência à compressão foi exercido utilizando blocos de concreto retangulares, com dimensões de 10 x 20 x 6 cm, aos 7, 14 e 28 dias de idade. Foram ensaiadas dez amostras para cada dosagem, totalizando 150 corpos de prova. Na Tabela 10 estão demonstrados os resultados do ensaio.

**Tabela 10** – Tabela com os valores da Resistência à compressão dos corpos de prova (MPa).  
(continua)

Idade	Corpo de Prova	Referência	1% Resíduo Seco	2% Resíduo Seco	1% Resíduo Lavado	2% Resíduo Lavado
7 dias	1	55,37	41,96	56,42	50,77	58,39
	2	50,58	59,08	54,04	46,07	56,07
	3	56,92	47,08	54,04	46,77	46,66
	4	47,18	46,69	59,73	46,16	58,68
	5	52,54	36,89	60,77	52,10	56,44
	6	49,41	42,76	53,48	46,09	39,28
	7	53,91	52,02	67,19	43,96	51,58
	8	41,77	61,95	60,38	50,26	57,95

**Tabela 10** – Tabela com os valores da Resistência à compressão dos corpos de prova (MPa).  
(continuação)

<b>Idade</b>	<b>Corpo de Prova</b>	<b>Referência</b>	<b>1% Resíduo Seco</b>	<b>2% Resíduo Seco</b>	<b>1% Resíduo Lavado</b>	<b>2% Resíduo Lavado</b>
<b>7 dias</b>	9	48,87	41,30	63,56	48,36	52,47
	10	41,44	41,36	66,79	44,52	51,15
	Média	49,80	47,11	59,64	47,51	52,87
	Desvio Padrão	5,26	8,19	5,12	2,75	6,16
<b>14 dias</b>	1	63,22	68,36	61,90	56,63	60,42
	2	60,80	65,72	76,90	59,13	47,18
	3	50,30	64,80	77,82	40,17	58,27
	4	59,95	71,44	68,10	54,36	50,85
	5	56,72	64,51	74,39	56,59	55,25
	6	65,02	65,72	70,47	63,32	46,86
	7	50,67	75,08	68,67	50,60	65,26
	8	67,19	67,98	71,52	58,94	39,11
	9	56,50	66,40	74,96	49,45	47,02
	10	58,50	68,10	59,50	53,92	47,83
	Média	58,89	67,81	70,42	54,31	51,81
Desvio Padrão	5,60	3,28	6,10	6,45	7,85	
<b>28 dias</b>	1	63,64	58,11	48,33	52,68	56,01
	2	52,22	47,45	64,90	54,87	61,29
	3	56,47	59,37	53,94	60,00	60,13
	4	53,69	50,05	66,24	53,20	61,39
	5	66,53	45,35	68,45	53,29	47,01
	6	58,45	50,14	58,40	52,60	45,94
	7	59,35	49,50	89,11	58,02	52,24
	8	58,43	53,70	51,91	56,06	52,90
	9	58,72	46,85	55,35	59,85	47,33
	10	58,36	62,37	51,77	61,30	53,82
	Média	58,59	52,29	60,84	56,19	53,80
Desvio Padrão	4,19	5,83	12,04	3,36	5,88	

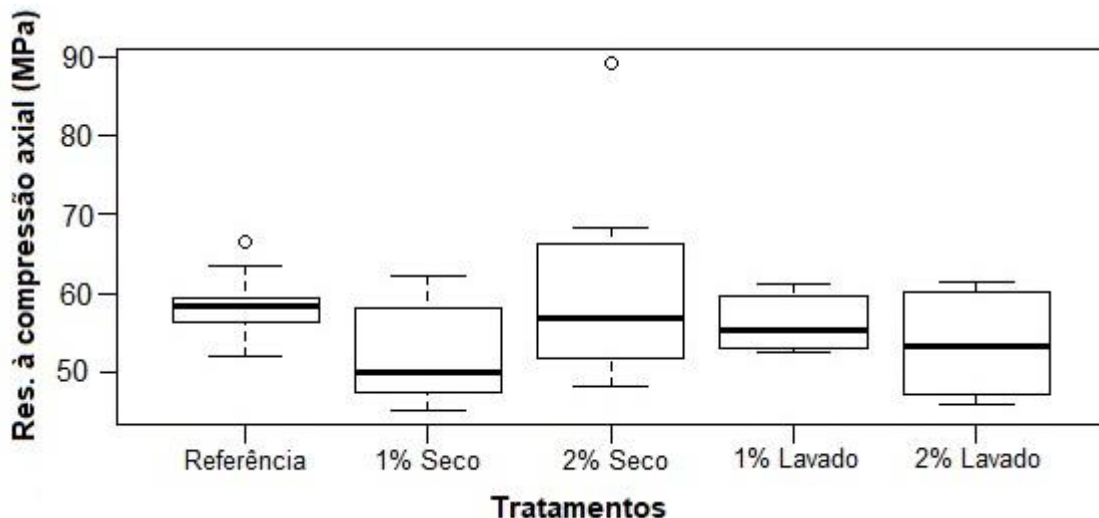
Com os dados apresentados na Tabela 10, verificou-se que a resistência à compressão das amostras com 7 dias de idade alcançaram valores superiores a 40 MPa. Este fato pode ser explicado devido ao emprego do Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV ARI), conferindo tal comportamento em intervalo de tempo reduzido. Aos 14 dias de idade, as amostras contendo resíduo seco na porcentagem

de 2% apresentaram resistência à compressão média igual a 70,42 MPa, sendo superior à média para a dosagem referência.

Já aos 28 dias de idade as resistências obtidas em todas as amostras foram maiores que 50 MPa, estando, desta forma, em conformidade com o limite mínimo de 35 MPa, estabelecido pela NBR 9781 (ABNT, 2013), para o tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha. Além disso, atendem aos requisitos da normativa citada para o tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de promover efeitos de abrasão acentuados. Destaca-se que a dosagem contendo 2% de resíduo seco, em substituição a areia, aos 28 dias de idade, demonstrou melhor desempenho, com valor médio de 60,84 MPa, excedendo a média das amostras referência, de 58,59 MPa.

Objetivando contribuir para a melhor visualização da distribuição dos resultados, foi elaborado o gráfico de Box Plot, como mostra a Figura 20.

**Figura 20** – Box Plot da Resistência à compressão dos pavimentos.



Na Figura 20 foi possível verificar, analisando a dispersão dos resultados, que há diferença na resistência à compressão em relação à porcentagem de resíduo de Terra Diatomácea, apresentando maior variabilidade nas amostras contendo 1% de resíduo seco.

Com o intuito de verificar a significância das variáveis estudadas na resistência à compressão foi empregada a Análise de Variância (ANOVA), sendo todas as decisões estatísticas consideradas ao nível de significância de 0,05. As Tabelas 11 e 12 apresentam os resultados desta análise.

**Tabela 11** – Resumo da Análise de Variância da Resistência à compressão.

<b>Grupo</b>	<b>Contagem</b>	<b>Soma</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>
Referência	10	585,86	58,59	17,598
1% Resíduo Seco	10	522,89	52,29	34,017
2% Resíduo Seco	10	608,39	60,84	145,014
1% Resíduo Lavado	10	561,87	56,19	11,298
2% Resíduo Lavado	10	538,05	53,80	34,627

**Tabela 12** – Resultados da Análise de Variância da Resistência à compressão.

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	481,457	4	120,364			
Dentro dos grupos	2182,994	45	48,511	2,481	0,057	2,579
Total	2664,451	49				

Na qual:

$SQ$  → soma de quadrados;

$gl$  → grau de liberdade;

$MQ$  → média quadrada;

$F$  → fator;

$valor - P$  → probabilidade de significância;

$F_{crítico}$  → fator crítico.

Com base nos resultados estatísticos da ANOVA (Tabelas 11 e 12) foi possível constatar que a substituição do agregado miúdo pelo resíduo de Terra Diatomácea, não influenciou na resistência à compressão dos blocos, visto que não existem diferenças entre as médias.

O comportamento encontrado nesta propriedade também foi identificado por Ahmadi et al. (2018) nos estudos sobre o uso de Terra Diatomácea *in natura* como substituto parcial do cimento em argamassas. Os autores concluíram que a incorporação de até 40% do mineral apresentou significativa resistência à compressão e aumento de 7,1% da resistência sobre o concreto referência.

Unal, Uygunoglu e Yildiz (2007) fabricaram blocos de concreto leves com adição de diatomita *in natura* com diferentes granulometrias e teores de cimento variados, sendo investigadas as propriedades físicas e mecânicas dos blocos. Os resultados indicaram evolução da resistência à compressão no período de 7 a 56 dias,



atestando que os materiais desenvolvidos podem ser empregados em edificações para atingir isolamento térmico e acústico, além de reduzir o peso da construção.

Kastis et al. (2006) afirmam que as diatomáceas são rochas com elevado teor de sílica amorfa natural, ocorrendo especialmente na forma de frústulas. Esta sílica ( $\text{SiO}_2$ ) é capaz de reagir com hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), produto da hidratação do cimento, originando hidratos de silicato de cálcio (CSH), responsáveis pela evolução da resistência. Kastis et al. (2006) constataram que a diatomita *in natura* é benéfica para a hidratação e evolução da resistência do cimento, pois, em seus estudos, a resistência à compressão da pasta cimentícia contendo o mineral foi superior à pasta de controle, fato este identificado também por Saidi e Hasan (2020).

### 6.2.2 Absorção de Água

O ensaio de absorção de água foi desenvolvido com três amostras dos pavimentos intertravados para os seguintes traços: referência, 1% seco, 2% seco, 1% lavado e 2% lavado de resíduo de Terra Diatomácea em substituição ao agregado miúdo, aos 28 dias de idade, em conformidade com a NBR 9781 (ABNT, 2013), de acordo com a metodologia descrita no item 2.6.2. Os resultados encontrados estão expressos na Tabela 13.

**Tabela 13** – Tabela com os valores do ensaio de Absorção de água nos pavimentos intertravados.

Traço	Amostra	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção de água (%)	Média	Desvio Padrão
Referência	1	2737,0	2749,6	0,46	0,56	0,09
	2	2663,6	2679,9	0,61		
	3	2681,4	2697,9	0,62		
1% Resíduo Seco	1	2617,4	2632,5	0,58	0,73	0,13
	2	2629,0	2649,4	0,78		
	3	2684,6	2706,7	0,82		
2% Resíduo Seco	1	2632,0	2655,0	0,87	0,75	0,10
	2	2652,0	2670,2	0,69		
	3	2643,0	2661,5	0,70		
1% Resíduo Lavado	1	2658,1	2679,9	0,82	0,77	0,06
	2	2682,4	2703,4	0,78		
	3	2645,0	2663,8	0,71		
2% Resíduo Lavado	1	2677,7	2704,4	1,00	0,78	0,39
	2	2678,0	2705,3	1,02		
	3	2683,9	2692,7	0,33		

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013) as peças de concreto necessitam apresentar absorção de água inferior ou igual a 6%. Diante dos resultados

demonstrados na Tabela 13 é possível observar que tanto a dosagem de referência, como as misturas com adição de resíduo de Terra Diatomácea, seco e lavado, evidenciaram valores satisfatórios de absorção de água, abaixo de 1%, estando, portanto, em conformidade com as determinações da ABNT NBR 9781:2013.

Os resultados indicaram um desempenho crescente linear de absorção, visto que o aumento do resíduo na matriz cimentícia elevou a porosidade dos blocos, em virtude da natureza porosa da Terra Diatomácea, fato este observado por Ahmadi et al. (2018), Degirmenci e Yilmaz (2009), Saidi e Hasan (2020), em suas pesquisas.

A análise de variância para os resultados deste ensaio estão apresentadas nas Tabelas 14 e 15, sendo adotado intervalo de confiança de 95%.

**Tabela 14** – Quadro resumo da Análise de Variância de Absorção de água.

<b>Grupo</b>	<b>Contagem</b>	<b>Soma</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>
Referência	3	1,69	0,563	0,008
1% Resíduo Seco	3	2,18	0,727	0,017
2% Resíduo Seco	3	2,26	0,753	0,010
1% Resíduo Lavado	3	2,31	0,770	0,003
2% Resíduo Lavado	3	2,35	0,783	0,154

**Tabela 15** – Resultados da Análise de Variância de Absorção de água.

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>GI</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	0,097	4	0,024			
Dentro dos grupos	0,384	10	0,038	0,629	0,653	3,478
Total	0,481	14				

Na qual:

*SQ* → soma de quadrados;

*gl* → grau de liberdade;

*MQ* → média quadrada;

*F* → fator;

*valor – P* → probabilidade de significância;

*Fcrítico* → fator crítico.

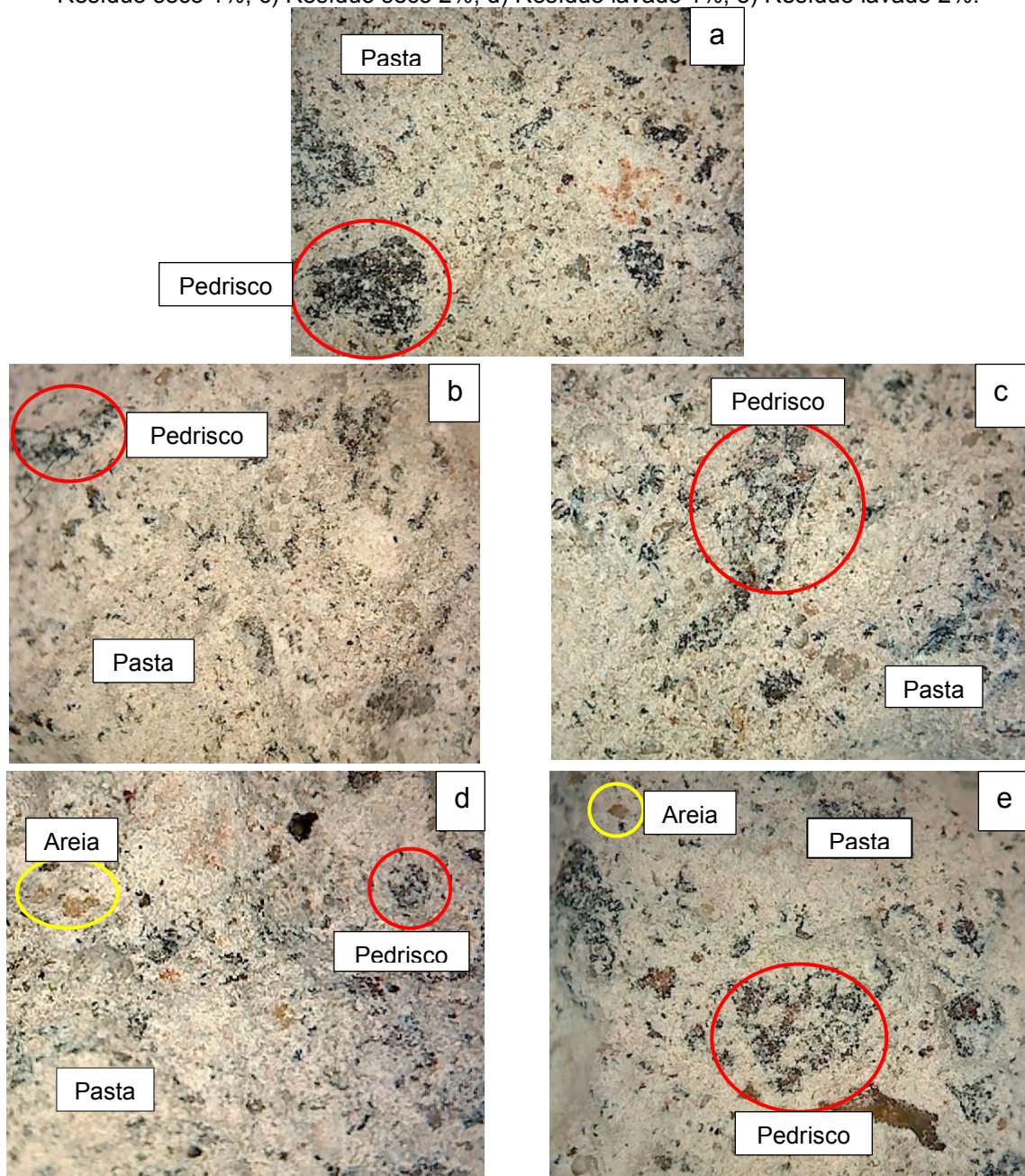
Com análise das tabelas supracitadas não foram identificadas diferenças significativas entre as porcentagens de absorção de água em nenhuma dosagem.

## 6.3 Microestrutura do Concreto

### 6.3.1 Microscopia Óptica-Digital

Para cada dosagem efetuada, procedeu-se análises microscópicas do concreto com idade de 28 dias. A Figura 21 demonstra os aspectos morfológicos das superfícies dos seguintes compostos cimentícios: referência, 1% resíduo seco, 2% resíduo seco, 1% resíduo lavado e 2% resíduo lavado.

**Figura 21** – Microscopia óptica-digital da amostras com ampliação de 50 vezes: a) Referência; b) Resíduo seco 1%; c) Resíduo seco 2%; d) Resíduo lavado 1%; e) Resíduo lavado 2%.



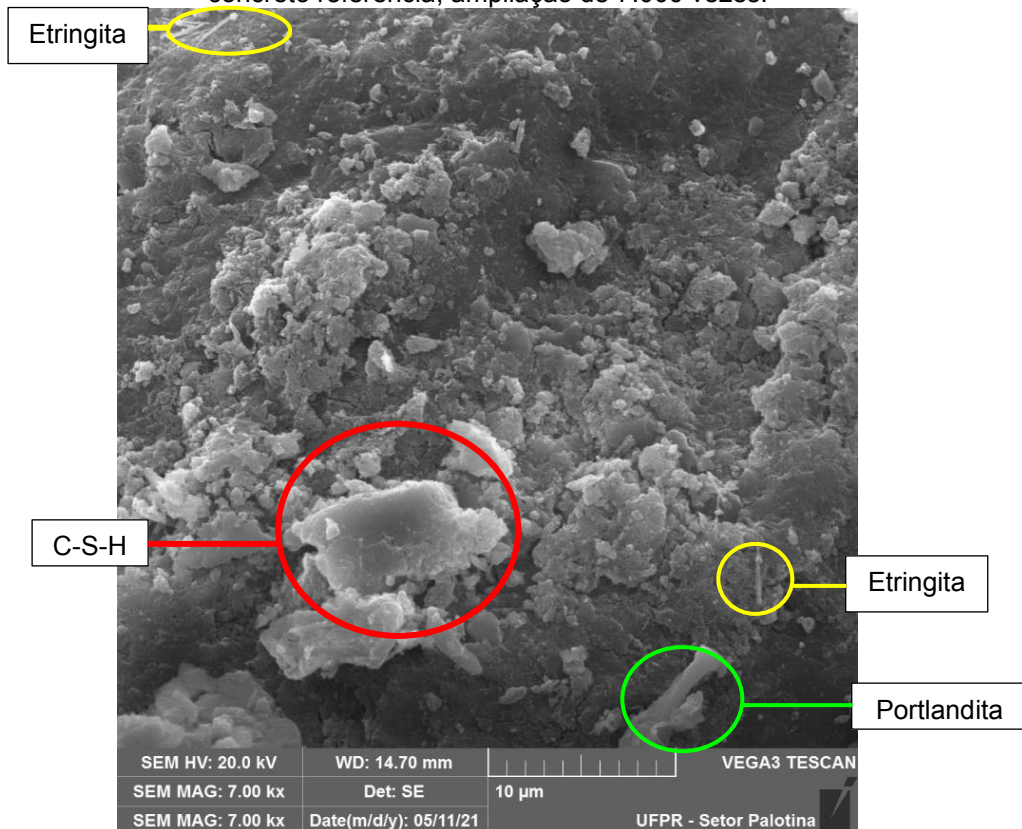
Analisando as imagens expostas na Figura 21 verificou-se uma adesividade satisfatória entre o cimento, agregados e resíduo de Terra Diatomácea. A amostra de referência apresentou características de um concreto tradicional, com uma estrutura homogênea e com interação adequada entre os materiais constituintes.

As microscopias possibilitaram constatar que o resíduo está aderido na composição do concreto, havendo uma solidarização adequada entre a mistura cimentícia e os outros componentes, não sendo observadas regiões com trincas ou poros nesta interface. Este fato pode ser justificado devido aos grãos possuírem características arredondadas e homogêneas, propiciando desta forma, uma melhor ligação entre o cimento e os agregados.

### 6.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

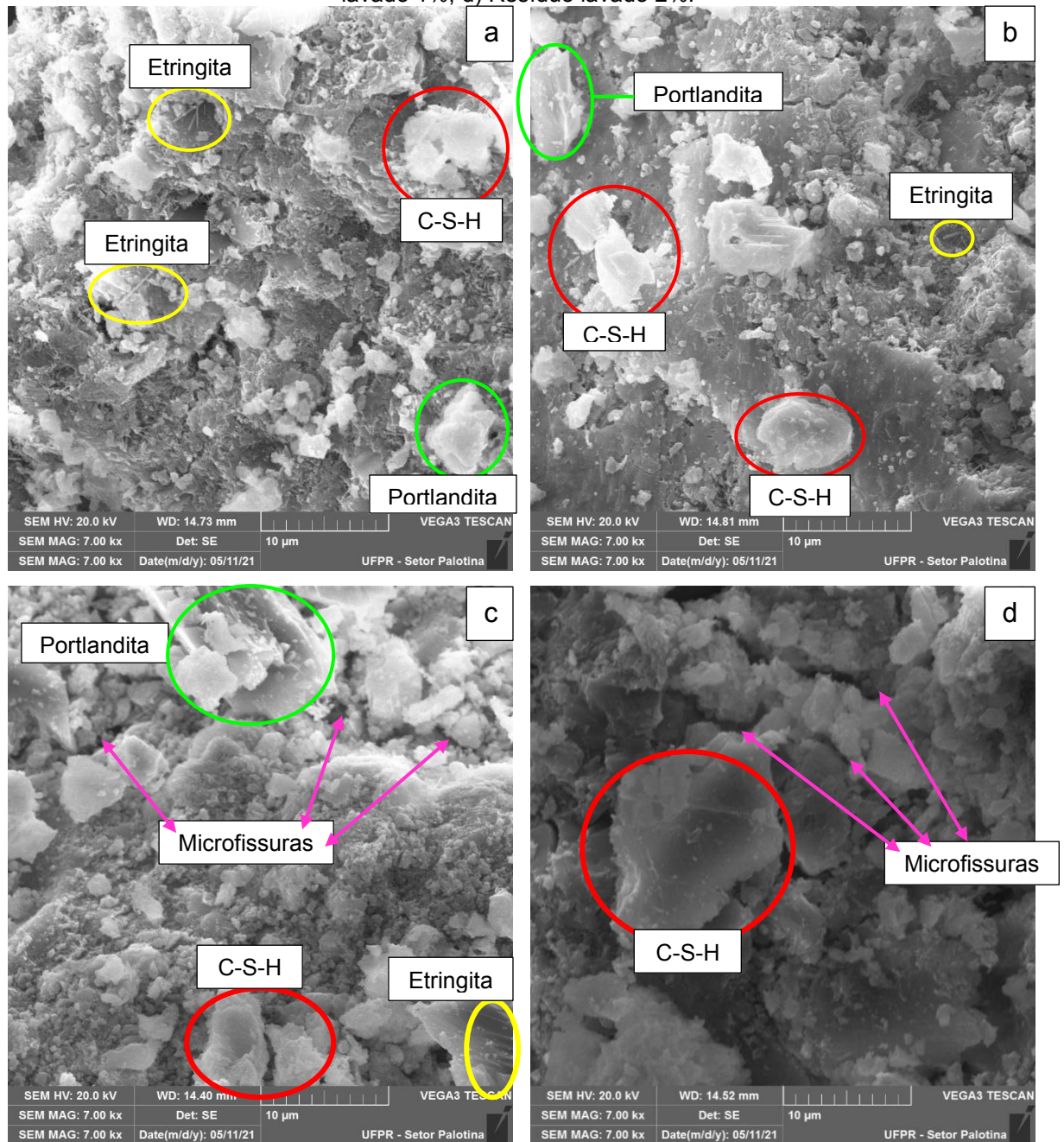
As Figuras 22 e 23 apresentam as micrografias do concreto referência e com adição de resíduo de Terra Diatomácea, seco e lavado, demonstrando as morfologias da matriz cimentícia, assim como a homogeneidade da microestrutura das amostras.

**Figura 22** – Imagem da superfície do concreto obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura do concreto referência, ampliação de 7.000 vezes.



Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica UFPR, Campus Palotina.

**Figura 23** – Imagem da superfície do concreto obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com ampliação de 7.000 vezes: a) Resíduo seco 1%; b) Resíduo seco 2%; c) Resíduo lavado 1%; d) Resíduo lavado 2%.



Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica UFPR, Campus Palotina.

O microscópio eletrônico de varredura permite analisar as quantidades e características das predominantes fases sólidas presentes na pasta de cimento hidratada<sup>9</sup>, sendo elas: silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que compõe de 50 a 60% do volume de sólidos, com aparência de estruturas fibrosas; hidróxido de cálcio

<sup>9</sup> A pasta de cimento hidratada pode ser definida como um composto de partículas, filmes, microcristais e elementos sólidos unidos por uma massa de característica porosa (PAULON; KIRCHHEIM, 2011).

(Ca(OH)<sub>2</sub>) (Portlandita), representam 20 a 25% do volume, formando grandes cristais com estrutura prismática hexagonal; etringita ou trissulfoaluminato de cálcio (C<sub>3</sub>A<sub>3</sub>CSH<sub>32</sub>), com formato de agulhas (MEHTA; MONTEIRO, 2008; REDA; SHRIVE; GILLOTT, 1999).

Na Figura 22 a microestrutura do concreto referência evidenciou C-S-H, portlandita e etringita, produtos de hidratação do cimento, demonstrando uma pasta compacta e homogênea. Já na Figura 23 (a) e (b) observa-se que as pastas apresentaram formação de etringita, identificada pela presença de agulhas finas e longas, cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), caracterizados por filamentos esponjosos e portlandita, com aspecto prismático.

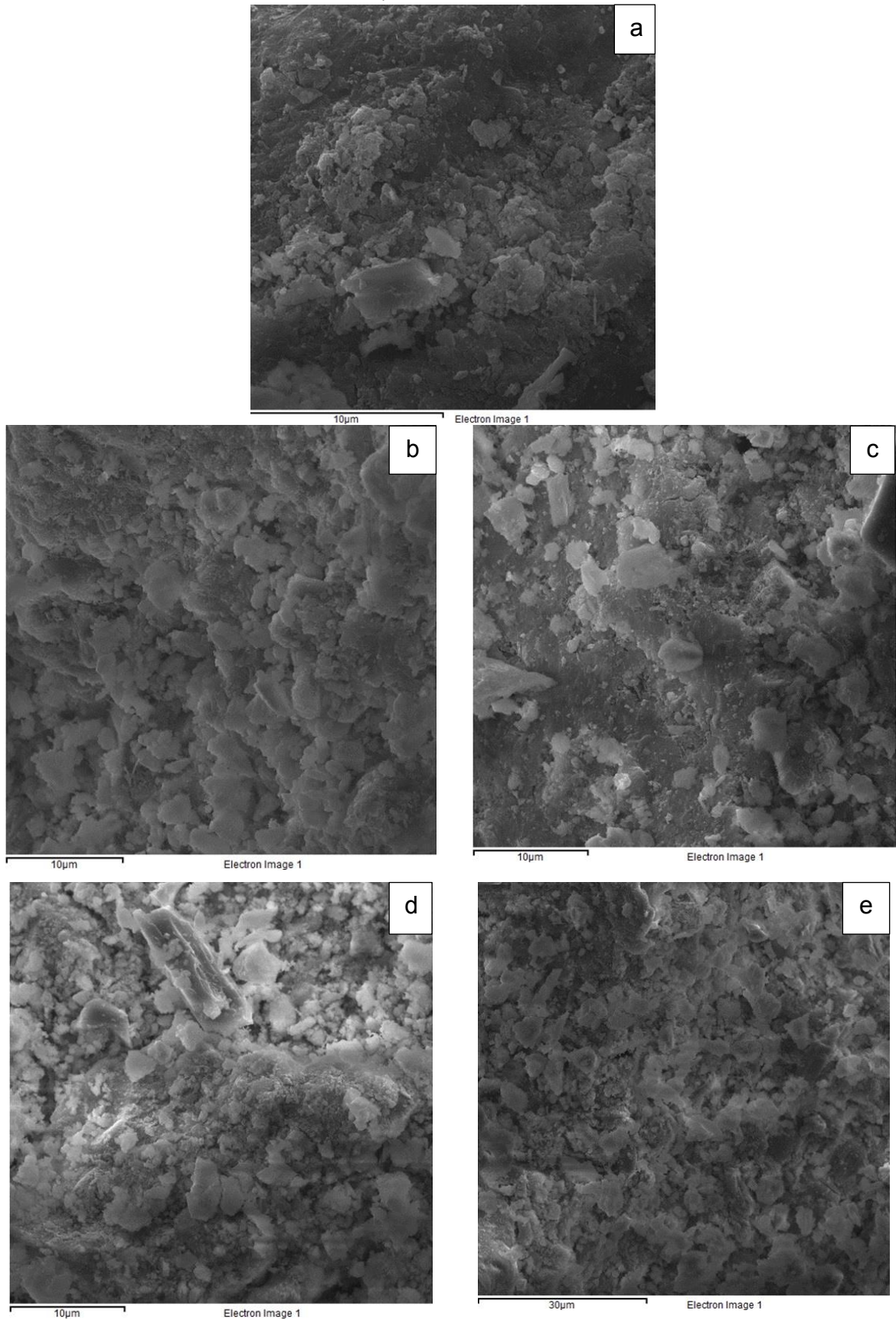
As diferenças entre as resistências do concreto referência e resíduo seco, nas proporções de 1% e 2%, se deve ao desenvolvimento de C-S-H adicional, derivado da reação da Terra Diatomácea com o hidróxido de cálcio produzido durante a hidratação do cimento, contribuindo diretamente para resistências elevadas, sendo este comportamento identificado nas pesquisas de Kastis et al. (2006), Saidi e Hasan (2020).

Na Figura 23 (c) e (d) observa-se a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), portlandita e etringita. É importante destacar que as amostras contendo resíduo lavado, com teor de 1% e 2%, demonstraram maior concentração de vazios, característicos de ar incorporado, quando comparadas as demais. Estes vazios se apresentam formato esférico, sendo decorrentes de baixas quantidades de ar que ficam aprisionadas na pasta de cimento ao longo da mistura dos materiais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Nas amostras contendo resíduo lavado (Figura 23 c e d) também foi identificada a ocorrência de microfissuras. Estas, aliadas ao volume de vazios, são responsáveis pela redução da resistência do concreto. Os vazios contribuem para a propagação das microfissuras, pois são áreas frágeis, não havendo ligação com outros compostos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

As análises de EDS do concreto referência e com adição de resíduo de Terra Diatomácea, seco e lavado, apresentada na Figura 24, demonstram a composição semiquantitativa dos elementos químicos preponderantes, com elevada proporção de oxigênio (O) e cálcio (Ca). Na Tabela 16 é possível verificar os valores das médias, com resultados de quatro pontos selecionados em cada amostra.

**Figura 24** – Imagens das superfícies do concreto utilizadas para obter a Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) em: (a) Referência; b) Resíduo seco 1%; c) Resíduo seco 2%; d) Resíduo lavado 1%; e) Resíduo lavado 2%.



Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica UFPR, Campus Palotina.

**Tabela 16** – Tabela contendo o resultado da análise EDS nas amostras referência, resíduo seco e lavado 1% e 2%. Média dos valores em % com desvio padrão (n = 4).

	Referência	1% Seco	2% Seco	1% Lavado	2% Lavado
<b>C</b>	7,98 ± 0,85	3,84 ± 0,69	4,29 ± 0,52	3,34 ± 0,94	2,98 ± 0,88
<b>O</b>	53,67 ± 3,14	56,13 ± 2,65	58,13 ± 4,14	56,58 ± 2,11	48,39 ± 4,25
<b>Na</b>	0,15 ± 0,10	0,37 ± 0,09	0,29 ± 0,16	0,41 ± 0,19	0,50 ± 0,26
<b>Mg</b>	0,69 ± 0,35	1,34 ± 0,25	0,76 ± 0,17	2,42 ± 2,84	0,99 ± 0,54
<b>Al</b>	0,93 ± 0,59	2,23 ± 0,17	1,58 ± 0,21	2,44 ± 0,37	2,12 ± 0,52
<b>Si</b>	22,51 ± 9,04	9,47 ± 0,73	6,72 ± 1,57	9,33 ± 1,51	8,14 ± 3,50
<b>S</b>	0,39 ± 0,19	0,66 ± 0,08	0,53 ± 0,07	0,47 ± 0,04	0,52 ± 0,25
<b>K</b>	0,20 ± 0,11	0,42 ± 0,10	0,24 ± 0,12	0,31 ± 0,23	0,39 ± 0,10
<b>Ca</b>	11,03 ± 8,20	20,89 ± 2,52	24,37 ± 4,47	20,52 ± 2,47	31,22 ± 8,43
<b>Fe</b>	0,51 ± 0,30	1,90 ± 0,73	0,93 ± 0,15	1,72 ± 0,46	4,50 ± 1,22
<b>Ti</b>	-	0,19 ± 0,05	0,08 ± 0,02	0,13 ± 0,01	0,14 ± 0,06

Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica UFPR, Campus Palotina.

Com os dados da Tabela 16 verifica-se o clínquer em processo de hidratação com a presença dos elementos: ferro (Fe), alumínio (Al), silício (Si), cálcio (Ca), carbono (C), específicos para desenvolvimento dos óxidos, matéria-prima para fabricação do clínquer, além de magnésio (Mg), enxofre (S), potássio (K), sódio (Na) e titânio (Ti), identificados em porções menores, correspondendo a impurezas existentes na origem geológica dos minérios.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) o principal componente do clínquer é o silicato tricálcio ( $C_3S$ ), constituído por íons de cálcio e oxigênio, justificando a alta proporção destes elementos nas amostras.

#### 6.4 Utilização da água de lavagem do resíduo

Visando a destinação ambientalmente correta da água de lavagem do resíduo de Terra Diatomácea, este tópico destaca uma estratégia para a gestão eficiente da água residual como fertilizante orgânico na agricultura, objetivando o manejo eficiente e o desenvolvimento sustentável.

De acordo com a caracterização do resíduo realizada por Castanha et al. (2020), observou-se intensa concentração de matéria orgânica, benéfica para os solos. A aplicação se resume no lançamento da água em solos agricultáveis, sendo



esta prática caracterizada como possibilidade de disposição exequível, visto que inexistem danos ao solo receptor.

Em diversas pesquisas o resíduo de Terra Diatomácea e efluentes da indústria cervejeira foram empregados como fertilizantes de solo agricultáveis em culturas como: acelga, erva-sal e sorgo<sup>10</sup> (MABASA; JONES; LAING, 2021); trigo (TESFAHUN et al., 2021); tomate e beringela (AKPONIKPE et al., 2011).

Dessalew et al. (2017) analisaram o uso de resíduo de Terra Diatomácea como corretivo de solo e fertilizante. As propriedades físico-químicas evidenciaram mínima concentração de metais tóxicos, indicando o uso seguro como fertilizante. Os resultados demonstraram concentrações elevadas de nutrientes, fundamentais para o desenvolvimento das culturas, teff<sup>11</sup> e trigo, duplicando o rendimento dos grãos quando comparado com fertilizantes inorgânicos, além de propiciar aumento de 50% da produtividade sobre o esterco gerado no local.

Taylor et al. (2018) submeteram efluente de cervejaria ao tratamento em digestor anaeróbio e sistema de lodo ativado. Posteriormente, utilizaram-no como fonte de nutrientes para irrigação de culturas, como o repolho. Os autores identificaram que as plantas irrigadas com o efluente apresentaram crescimento expressivamente maior do que aquelas regadas somente com água.

A aplicação de águas residuais é uma alternativa praticável que utiliza nutrientes como nitrogênio e fósforo, diminuindo a necessidade de fertilizantes. Esta prática não apenas pode minimizar as despesas da produção agrícola, como também auxiliar na redução dos impactos ambientais causados pela agricultura (MABASA; JONES; LAING, 2021). Além dos benefícios citados, o uso de águas residuais industriais é capaz de moderar o uso de água doce para irrigação, preservando os recursos hídricos existentes (ALMUKTAR; ABED; SCHOLZ, 2018).

---

<sup>10</sup> Sorgo (*Sorghum Bicolor L.*) se trata de uma gramínea cultivada em diversas regiões do mundo, tem origem africana e pertence à família Poaceae (FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2009).

<sup>11</sup> Teff (*Eragrostis Tef*) é um cereal tropical da família de Poaceae. O grão não possui casca e apresenta formato oval (BELAY et al., 2009).

## 7 CONCLUSÃO

O levantamento bibliográfico acerca da extração desenfreada de agregados naturais e a intensa geração de resíduos de Terra Diatomácea salientou o esgotamento dos recursos naturais disponíveis no planeta, além dos impactos ambientais negativos acarretados pela disposição incorreta dos resíduos. A reutilização destes subprodutos, em substituição parcial aos agregados miúdos, em matrizes cimentícias se configuram como soluções propícias para a redução dos danos ambientais.

Com base nos valores encontrados no ensaio de resistência à compressão axial dos blocos de concreto, com idade de 28 dias, constatou-se que as resistências médias obtidas em todas as dosagens foram superiores à 50 MPa, estando em conformidade com o limite mínimo de 35 MPa, estabelecido pela ABNT NBR 9781:2013, para o tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha. Os resultados também atenderam aos requisitos da normativa para o tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de promover efeitos de abrasão acentuados.

As amostras de concreto contendo resíduo seco nas proporções de 1% e 2%, evidenciaram maior resistência à compressão que as demais dosagens, devido a reação da sílica amorfa natural, presente nas frústulas da Terra diatomácea, com o hidróxido de sódio produzido durante a hidratação do cimento, contribuindo diretamente para o aumento desta propriedade, fato este constatado nas pesquisas de Kastis et al. (2006), Saidi e Hasan (2020).

De acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013) as peças de concreto necessitam apresentar absorção de água igual ou inferior a 6%. Identificou-se que as composições do concreto referência e com adição de resíduo de Terra Diatomácea, seco e lavado, aos 28 dias de idade, demonstraram absorção de água satisfatória, abaixo de 1%, em concordância com a normativa.

Por meio das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura foi possível visualizar concretos com estruturas homogêneas e com interação adequada entre os materiais constituintes, havendo a presença de produtos de hidratação do cimento como silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e etringita ( $\text{C}_3\text{A}_3\text{CSH}_{32}$ ).

Com base nos dados obtidos, é possível concluir que a inserção do resíduo do filtro de cervejaria em pavimentos intertravados consiste em estratégia praticável para reduzir o consumo de agregados naturais e os impactos ambientais decorrentes da disposição incorreta, uma vez que a substituição do agregado miúdo pelo resíduo proporciona uma destinação adequada a um rejeito que usualmente não seria mais utilizado.

## 8 REFERÊNCIAS

ABRÃO, P. C. R. A.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. Evaluation of Portland pozzolan blended cements containing Diatomaceous Earth. **Cerâmica**, v.65, p.75-86, 2019.

AHMADI, Z.; ESMAEILI, J.; KASAEI, J.; HAJIALIOGHLI, R. Properties of sustainable cement mortars containing high volume of raw diatomite. **Journal of Sustainable Materials and Technologies**, v.16, p.47-53, 2018.

AKPONIKPE, P. B. I.; WIMA, K.; YACOUBA, H.; MERMOUD, A. Reuse of domestic wastewater treated in macrophyte ponds to irrigate tomato and eggplant in semi-arid West-Africa: Benefits and risks. **Journal Agricultural Water Management**, v.98, p.834-840, 2011.

ALMUKTAR, S. A. A. A. N.; ABED, S. N.; SCHOLZ, M. Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: a review. **Journal of Environmental Science and Pollution Research**, v.25, p.47-53, 2018.

ALTOÉ, S. P. S.; SALES, A.; MARTINS, C. H. Resíduos de pneus e da queima do bagaço da cana-de-açúcar na fabricação de blocos de concreto para pavimentação. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v.12, n.3, p.608-637, 2019.

ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. C.; BARBOSA, L. A. G. Propriedades no estado fresco e endurecido do concreto autoadensável modificado com agregados leves e reciclados. **IBRACON**, v.11, p.76-94, 2018.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22ed. Washington, DC: American Public Health Association. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CERVEJA. **Dados do Setor**. 2021. Disponível em: <[http://www.cervbrasil.org.br/novo\\_site/dados-do-setor/](http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/dados-do-setor/)>. Acesso em: 25 mai. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual do Pavimento Intertravado**: Passeio Público. São Paulo, 2010. 36 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

- \_\_\_\_\_. **NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9781**. Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11768-1**. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15895**. Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15953**. Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução. Rio de Janeiro, 2011.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16697**. Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- \_\_\_\_\_. **NBR ISO 3310-1**. Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 2010.
- \_\_\_\_\_. **NBR ISO 3310-2**. Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Parte 2: Peneiras de ensaio de chapa metálica perfurada. Rio de Janeiro, 2010.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 26**. Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 27**. Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 30**. Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 45**. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 46**. Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52.** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53.** Agregado graúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248.** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BEISER, V. **The world in a grain:** The story of sand and how it transformed civilization. New York, United States: Riverhead Books, 2018.

BELAY, G.; ZEMEDE, A.; ASSEFA, K.; METAFERIA, G.; TEFERA, H. Seed size effect on grain weight and agronomic performance of tef [*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter]. **African Journal of Agricultural Research**, v.4, p.836-839, 2009.

BERTOLINO, L. C.; PALERMO, N.; BERTOLINO, A. V. F. A. Geologia. In: LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. **Manual de agregados para construção civil**. 2.Ed. CETEM/MCTI, Rio de Janeiro. p. 451-465, 2012.

BORGES, V. F. S. **Remoção de íons metálicos de efluentes utilizando bentonitas e diatomita tratadas com microemulsões**. 2018.105 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal- RN, 2018.

BRASIL. Lei nº12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 02 ago. 2010.

BRASIL. Ministério Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Anuário da cerveja 2020**. Brasília, DF, 2021. 24p.

CARVALHO, R. A.; MORAES, A. C. Z.; MIZASSE, B. R.; NETO, M. F. Utilização de resíduos de corpos de prova de concreto para fabricação de pavimentação intertravada. **InterScientia**, v.6, p.12-29, 2018.

CASTANHA, A. P. J. **Uso de Wetlands construídos na remoção de 17 $\alpha$ -Metiltestosterona de águas na piscicultura**. Toledo: Unioeste, 2019.

CASTANHA, A. P. J.; ALBERTON, M. B.; BUFFON, D. S. O.; LINDINO, C. A. Investigação de Wetlands construídos empregando resíduo de filtro de cervejaria na retenção do hormônio 17 $\alpha$ -Metiltestosterona. **Gaia Scientia**, v.14(1), p.43-62, 2020.

COSTA, A. V.; GUIMIERI, A. G.; BRANDÃO, P. R. G. Piso intertravado produzido com rejeito de *sinter feed*. **IBRACON**, v.7, p.228-259, 2014.

DEGIRMENCI, N.; YILMAZ, A. Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars. **Journal of Construction and Building Materials**, v.23, p.284-288, 2009.

DESSALEW, G.; BEYENE, A.; NEBIYU, A.; RUELLE, M. L. Use of industrial diatomite wastes from beer production to improve soil fertility and cereal yields. **Journal of Cleaner Production**, v.157, p.22-29, 2017.

FABRO, F.; GAVA, G. P.; GRIGOLI, H. B.; MENEGHETTI, L. C. Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. **IBRACON**, v.4, p.191-212, 2011.

FERNANDES, I. **Blocos e Paviers** – Produção e Controle de Qualidade. São Paulo: ABCP, 2012. 182p.

FERNANDEZ, L. P.; MIKOWSKI, P. C. B.; MACIOSKI, G.; NAGALLI, A.; FREIRE, F. B. Avaliação da incorporação do lodo de Estação de Tratamento de Água em peças de concreto intertravado. **Matéria**, v.23, 2018.

FERNÁNDEZ, M. A.; BELLOTTI, N. Silica-based bioactive solids obtained from modified diatomaceous earth to be used as antimicrobial filler material. **Journal of Materials Letters**, v.194, p.130-134, 2017.

FILHO, J. A. P.; PIRES, G. W. M. O.; REZENDE, L. V. S.; SANTANA, J. C. C. Resistência a compressão e absorção de água de peças de piso intertravado manufaturadas com resíduo de PET. **Holos**, v.1, p.1-21, 2019.

FILLAUDEAU, L.; BLANPAIN-AVET, P.; DAUFIN, G. Water, wastewater and waste management in brewing industries. **Journal of Cleaner Production**, v.14, p.463-471, 2006.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J. L. **Manual da cultura do sorgo**. Jaboticabal: Funep, 2009. 202p.

FRANÇA, S. C. A.; LUZ, A. B.; INFORÇATI, P. F. Diatomita. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações**. 2.Ed. CETEM/MCT, Rio de Janeiro. p. 451-465, 2008.

FRASER, M. W.; SHORT, J.; KENDRICK, G.; MCLEAN, D.; KEESING, J.; BYRNE, M.; CALEY, M. J.; CLARKE, D.; DAVIS, A. R.; ERFTEMEIJER, P. L. A.; FIELD, S.; GUSTIN-CRAIG, S.; HUISMAN, J.; KEOUGH, M.; LAVERY, P. S.; MASINI, R.; MCMAHON, K.; MENGERSEN, K.; RASHEED, M.; STATTON, J.; STODDART, J.; WU, P. Effects of dredging on critical ecological processes for marine invertebrates, seagrasses and macroalgae, and the potential for management with environmental windows using Western Australia as a case study. **Ecological Indicators**, v.78, p.229-242, 2017.

GALÁN-ARBOLEDAS, R. J.; COTES-PALOMINO, M. T.; BUENO, S.; MARTÍNEZ-GARCÍA, C. Evaluation of spent diatomite incorporation in clay based materials for lightweight bricks processing. **Journal of Construction and Building Materials**, v.144, p.327-337, 2017.

GIRSKAS, G.; NAGROCKIENĖ, D.; SKRIPKIŪNAS, G. Analysis of durability testing of concrete landscaping units. **Construction and Building Materials**, v.137, p.513-519, 2017.

GOULART, M. R.; SILVEIRA, C. B.; CAMPOS, M. L.; ALMEIDA, J. A.; MANFREDI-COIMBRA, S.; OLIVEIRA, A. F. Metodologias para reutilização do resíduo de terra diatomácea, proveniente da filtração e clarificação da cerveja. **Química Nova**, v.34, n.4, p.625-629, 2011.

HELENE, P. R. L.; TERIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Brasília: Pini, 1992. 348p.

ILIESCU, M.; FARAGO, M.; POPA, M.; CRISTEA, M. Reuse of residual kieselguhr from beer filtration as a fertilizer. **Journal of Environmental Protection and Ecology**, v.10, p.156-162, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Economia Mineral**. Brasília, 2020. 19 p.

ITAMBÉ. **Cimento Portland de Alta Resistência Inicial**. 2021. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/produtos/cp-v-ari/>> Acesso em: 15 março 2021.



JIANG, C.; GUO, W.; CHEN, H.; ZHU, Y.; JIN, C. Effect of filler type and content on mechanical properties and microstructure of sand concrete made with superfine waste sand. **Journal of Construction and Building Materials**, v.192, p.442-449, 2018.

JIANG, J.; ZHOU, W.; GAO, Y.; WANG, L.; WANG, F.; CHU, H.; XU, G.; VANDEVYVERE, B.; SIERENS, Z.; LI, J. Feasibility of manufacturing ultra-high performance cement-based composites (UHPCs) with recycled sand: A preliminary study. **Waste Management**, v.83, p.104-112, 2019.

KASTIS, D.; KAKALI, G.; TSIVILIS, S.; STAMATAKIS, M. G. Properties and hydration of blended cements with calcareous diatomite. **Journal of Cement and Concrete Research**, v.36, p.1821-1826, 2006.

LETELIER, V.; TARELA, E.; MUÑOZ, P.; MORICONI, G. Assessment of the mechanical properties of a concrete made by reusing both: brewery spent diatomite and recycled aggregates. **Journal of Construction and Building Materials**, v.114, p.492-498, 2016.

LI, J.; ZHANG, W.; LI, C.; MONTEIRO, P. J. M. Green concrete containing diatomaceous earth and limestone: Workability, mechanical properties, and life-cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v.223, p.672-679, 2019.

LIU, J.; SHAO, P.; WANG, S. The influence of diatomite on the strength and microstructure of Portland Cement. **MATEC Web Conf.**, v.67, 2016.

LIU, Y.; ZHUGE, Y.; CHOW, C. W. K.; KEEGAN, A.; LI, D.; PHAM, P. N.; HUANG, J.; SIDDIQUE, R. Utilization of drinking water treatment sludge in concrete paving blocks: Microstructural analysis, durability and leaching properties. **Journal of Environmental Management**, v.262, 2020.

MABASA, N. C.; JONES, C. L. W.; LAING, M. The use of treated brewery effluent for salt tolerant crop irrigation. **Journal of Agricultural Water Management**, v.245, 2021.

MACEDO, A. R. S.; SILVA, A. S.; LUZ, D. S.; FERREIRA, R. L. S.; LOURENÇO, C. S.; GOMES, U. U. Study of the effect of diatomite on physico-mechanical properties of concrete. **Cerâmica**, v.66, p.50-55, 2020.

MARVILA, M. T.; ALEXANDRE, J.; AZEVEDO, A. R. G.; ZANELATO, E. B. Evaluation of the use of marble waste in hydrated lime cement mortar based. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v.21, p.1250-1261, 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Readily implementable techniques can cut annual CO<sub>2</sub> emissions from the production of concrete by over 20%. **Environmental Research Letters**, v.11, 2016.

MORADI, S.; MOSELEY, D.; HRACH, F.; GUPTA, A. Electrostatic beneficiation of diatomaceous earth. **International Journal of Mineral Processing**, v.169, p.142-161, 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

OLIVEIRA, I. R., STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas: Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico**. São Paulo, Fazendo Arte Editorial, 2000. 224 p.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A. P. **Nanoestrutura e Microestrutura do concreto endurecido**. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011.

PENTEADO, C. S. G.; CARVALHO, E. V.; LINTZ, R. C. C. Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v.112, p.514-520, 2016.

PEREIRA, D. F.; ZIMMER, G. V.; SILVA, J. D.; CUSTÓDIO, R. R. Reaproveitamento da areia de desmoldagem como substituto parcial da areia em artefatos de concreto. **Mix Sustentável**, v.4, n.1, p.66-72, 2018.

QUIROGA, P. N.; FOWLER, D. W. **The effects of the aggregates characteristics on the performance of Portland Cement concrete**. Austin: International Center for Aggregates Research of The University of Texas, 2003.

RAVERDY, M.; BRIVOT, F.; PAILLIERE, A. M.; DRON, R. Appréciation de l'activité puozzolanique des constituants secundaries. In: Congrès International de la Chimie des Ciments, 7., 1980, Paris. **Anais [...]**. Paris, 1980.

REDA, M. M.; SHRIVE, N. G.; GILLOTT, J. E. Microstructural investigation of innovative UHPC. **Journal of Cement and Concrete Research**, v.29, p.323-329, 1999.

RODRÍGUEZ, C.; MIÑANO, I.; AGUILAR, M. A.; ORTEGA, J. M.; PARRA, C.; SÁNCHEZ, I. Properties of concrete paving blocks and hollow tiles with recycled aggregate from construction and demolition wastes. **Materials**, v.10, 2017.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, A. M. Physico-mechanical and durability characteristics of concrete paving blocks incorporating cement kiln dust. **Journal of Construction and Building Materials**, v.157, p.300-312, 2017.

SAIDI, T.; HASAN, M. The effect of partial replacement of cement with diatomaceous earth (DE) on the compressive strength and absorption of mortar. **Journal of King Saud University**, 2020.

SAMPAIO, Z. L. M.; SOUZA, P. A. B. F.; GOUVEIA, B. G. Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos. **IBRACON**, v.7, p.626-647, 2014.

SANTOS, A. G.; FERRARI, A. K. Influência do resíduo de PVC como agregado no concreto para peças de pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, v.19, n.3, p.39-51, 2019.

SANTOS, V. R. F. **Análise do desempenho de pisos táteis, intertravados, produzidos com agregados de resíduos de construção civil – RCC e fibras de aço**. Limeira: Universidade Estadual de Campinas, 2014.

SHARMA, R.; KHAN, R. A. Sustainable use of copper slag in self compacting concrete containing supplementary cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v.151, p.179-192, 2017.

SIKA. **Sika® Concreto Forte**. 2021. Disponível em: <<https://bra.sika.com/>> Acesso em: 10 abril 2021.

SILVA, P. L. B.; SOUZA, L. D. A.; PINHEIRO, V. S.; HARIMA, E.; LEITE, J. Y. P. Caracterização da diatomita de Rio do Fogo - RN - Brasil. **Holos**, v.3, p.52-62, 2009.

SOUZA, G. P.; FILGUEIRA, M.; ROSENTHAL, R.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de material compósito Diatomáceo Natural. **Cerâmica**, p. 40-43, 2003.

STATISTA. **Beer production worldwide from 1998 to 2019**. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/270275/worldwide-beer-production/>. Acesso em: 25 jul. 2021.

TAYLOR, R. P.; JONES, C. L. W.; LAING, M.; DAMES, J. The potential use of treated brewery effluent as a water and nutrient source in irrigated crop production. **Journal of Water Resources and Industry**, v.19, p.47-60, 2018.

TESFAHUN, W.; ZERFU, A.; SHUMUYE, M.; ABERA, G.; KIDANE, A.; ASTATKIE, T. Effects of brewery sludge on soil chemical properties, trace metal availability in soil and uptake by wheat crop, and bioaccumulation factor. **Heliyon**, v.7, 2021.

TIBIRIÇÁ, L. G. A cadeia produtiva mineral da areia em Goiás. **Ateliê Geográfico**, v.12, n.1, p.118-131, 2018.

TURK, J.; COTIČ, Z.; MLADENVIČ, A.; ŠAJNA, A. Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. **Waste Management**, v.45, p.194-205, 2015.

UNAL, O.; UYGUNOGLU, T.; YILDIZ, A. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. **Journal of Building and Environment**, v.42, p.584-590, 2007.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Global Resources Outlook 2019**: Natural resources for the future we want. Nairobi, 2019a. 162 p.

\_\_\_\_\_. **Sand and Sustainability**: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. Geneva, 2019b. 56 p.

\_\_\_\_\_. **Sand, rarer than one thinks**. Nairobi, 2014. 15 p.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States. United States: **U.S. Geological Survey Data Series 140**. 2013.

\_\_\_\_\_. Mineral Commodity Summaries 2020. United States: **U.S. Geological Survey Minerals Yearbook**. p.56-57, 2020.

\_\_\_\_\_. 2017 Minerals Yearbook, Diatomite. United States: **U.S. Geological Survey Minerals Yearbook**. p.22.1-22.5, 2017.

WANG, X.; CHIN, C. S.; XIA, J. Material characterization for sustainable concrete paving blocks. **Applied Sciences**, v.9, p.1197, 2019.

WEI, J.; GENCTURK, B. Degradation of natural fiber in cement composites containing Diatomaceous Earth. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.30, 2018.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de Cimento Portland**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE. **Impacts of sand mining on ecosystem structure, process e biodiversity in rivers**. Suíça, 2018. 165 p.

YUAN, P.; YANG, D.; LIN, Z.; HE, H.; WEN, X.; WANG, L.; DENG, F. Influences of pretreatment temperature on the surface silylation of diatomaceous amorphous silica with trimethylchlorosilane. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v.352, p.3762-3771, 2006.