

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**LUIS GABRIEL MORALES LIMA DE FREITAS**

**O USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA  
FABRICAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS REFORÇADOS COM UMA  
MALHA PET: UMA APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM DE MÁQUINA**

**Bagé  
2025**

**LUIS GABRIEL MORALES LIMA DE FREITAS**

**O USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA  
FABRICAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS REFORÇADOS COM UMA  
MALHA PET: UMA APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM DE MÁQUINA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Materiais

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Ferreira Galio

**Bagé  
2025**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

D278u De Freitas , Luis Gabriel Morales Lima  
O USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA  
FABRICAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS REFORÇADOS COM UMA MALHA  
PET: UMA APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM DE MÁQUINA / Luis Gabriel  
Morales Lima De Freitas .  
92 p.

Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,  
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, 2025.  
"Orientação: Alexandre Ferreira Galio ".

1. Sustentabilidade. 2. Data Science. 3. Pavimentação. 4.  
Economia Circular. 5. Concreto Reciclado. I. Título.

**LUIS GABRIEL MORALES LIMA DE FREITAS**

**O USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA  
FABRICAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS REFORÇADOS COM UMA  
MALHA PET: UMA APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM DE MÁQUINA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais

Dissertação defendida e aprovada em: 26 de março de 2025.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Alexandre Ferreira Galio  
Orientador (Unipampa)

---

Prof. Dr. César Antonio Oropesa Avellaneda (UFPel)

---

Prof. Dr. André Gündel  
(Unipampa)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Caroline Costa Moraes  
(Unipampa)



Assinado eletronicamente por **CAROLINE COSTA MORAES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/03/2025, às 16:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALEXANDRE FERREIRA GALIO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/03/2025, às 16:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ANDRE GUNDEL, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/03/2025, às 16:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **César Antonio Oropesa Avellaneda, Usuário Externo**, em 27/03/2025, às 10:35, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1694510** e o código CRC **212BBACA**.

## RESUMO

A construção civil está em constante crescimento mundial, todos os dias edificações são construídas, reformadas e demolidas. Este crescimento é acompanhado da geração de resíduo de construção e demolição (RCD), consumo de agregados naturais e cimento cada vez maior, acarretando em diversos problemas ambientais e sociais, como, o descarte irregular de resíduos, superlotação de aterros, extração ilegal de recursos naturais, emissão de CO<sub>2</sub>, entre outros, portanto, alternativas sustentáveis são de suma importância. O concreto reciclado apresenta-se como boa opção de aplicação do RCD, pois seus agregados podem ser parcialmente ou totalmente substituídos pelos resíduos. Diversos produtos são originados do concreto, como os blocos intertravados para pavimento, porém um desafio para estes produtos é a sua baixa resistência mecânica, no qual apresenta-se na maioria das vezes inferior aos produtos de concreto tradicional. Neste contexto, o presente estudo busca verificar a viabilidade da confecção de blocos intertravados com seus agregados miúdo e graúdo provenientes de RCD, para isto, utilizou-se a aprendizagem de máquina para definir o traço otimizado que consiga a maior resistência da mistura. Também se confeccionou uma malha, que tem o intuito de ajudar na resistência dos blocos, e conseqüentemente gerar mais uma alternativa de reciclagem para garrafas polietileno tereftalato (PET). Logo, três composições foram definidas, concreto reciclado puro (CRP), concreto reciclado com malha (CRM) e a concreto reciclado com malha e cinza (CRMP), está última terá a adição de cinzas volantes no lugar de 20% do cimento. Logo após a fabricação, a inspeção visual dos blocos apresenta bons resultados, sem fissuras ou cáries. Uma análise mais aprofundada foi realizada utilizando o MEV, onde identificou pequena fissuras na superfície, porém nenhuma cárie. Também foi realizada uma análise por fluorescência de raios X, o qual os RCD, juntamente com cimento Portland e cinzas volante, não apresentaram nenhum elemento químico prejudicial ao concreto reciclado. Por fim, os resultados dos ensaios mecânicos e físicos, determinaram que os blocos não estão dentro dos requisitos exigidos pela NBR 9781, no entanto, mudando a aplicabilidade dos blocos para alvenaria, os seus resultados ficam dentro dos especificados pelas normas internacionais ASTM C90-24 e ASTM 140/140M-24. Logo, a utilização de RCD como substituto dos agregados naturais do concreto é viável, tendo potencial para diversas outras pesquisas.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade; *Data Science*, Pavimentação, Economia Circular, Concreto Reciclado.

## **ABSTRACT**

*The construction industry is constantly growing worldwide. Every day, new buildings are constructed, renovated, and demolished. This growth is accompanied by the generation of construction and demolition waste (CDW), consumption of natural aggregates, and increasing cement, leading to several environmental and social problems, such as irregular waste disposal, overcrowding of landfills, illegal extraction of natural resources, CO<sub>2</sub> emissions, among others. Therefore, sustainable alternatives are of utmost importance. Recycled concrete is a good option for applying CDW, since its aggregates can be partially or totally replaced by waste. Several products originate from concrete, such as interlocking paving blocks. However, a challenge for these products is their low mechanical strength, which is often inferior to traditional concrete products. In this context, this study seeks to verify the feasibility of making interlocking blocks with their fine and coarse aggregates from CDW. For this, machine learning was used to define the optimized mix that achieves the greatest resistance of the mixture. A mesh was also created to improve the strength of the blocks and, consequently, create another recycling alternative for polyethylene terephthalate (PET) bottles. Three compositions were then defined: pure recycled concrete (PRC), recycled concrete with mesh (CRM), and recycled concrete with mesh and ash (CRMP). The latter will have fly ash added instead of 20% of the cement. Visual inspection of the blocks immediately after manufacture showed good results, with no cracks or cavities. A more in-depth analysis was performed using SEM which identified small cracks on the surface, but no cavities. An X-ray fluorescence analysis was also performed, which showed that the CDW, together with Portland cement and fly ash, did not present any chemical elements that would be harmful to the recycled concrete. Finally, the results of the mechanical and physical tests determined that the blocks do not meet the requirements set forth by NBR 9781. However, changing the applicability of the blocks to masonry, their results are within those specified by the international standards ASTM C90-24 and ASTM 140/140M-24. Therefore, the use of RCD as a substitute for natural aggregates in concrete is viable, with potential for several other research projects.*

**Keywords:** Sustainability; Data Science; Pavement; Recycling; Recycled Concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Lote de RCD.....	20
Figura 2 – Site da plataforma <i>Kaggle</i> .....	22
Figura 3 – Filme PET.....	25
Figura 4 – Procedimento de extração das amostras de RCD.....	25
Figura 5 – Moldes.....	28
Figura 6 – Divisão do lote.....	29
Figura 7 – Resíduos do lote.....	30
Figura 8 – Agregado miúdo e graúdo.....	31
Figura 9 – Blocos confeccionados.....	32
Figura 10 – Esquema do ensaio de compressão.....	33
Figura 11 – Ensaio de tração na flexão.....	34
Figura 12 – Amostras MEV.....	36
Figura 13 – Histogramas de distribuição das variáveis.....	37
Figura 14 – Matriz de correlação.....	38
Figura 15 – Variação do modelo <i>ExtraTreeRegressor</i> .....	40
Figura 16 – Importância das variáveis.....	40
Figura 17 – Imagem de topo da fratura realizada em MEV de uma amostra CRP destacando buracos e fissuras.....	43
Figura 18 – Imagem de topo da fratura realizada em MEV para amostra de CRMC destacando a região porosa.....	44
Figura 19 – Imagem de topo da fratura realizada em MEV para amostra de CRM na região da malha PET (região plana).....	45
Figura 20 – Imagem da superfície dos blocos CRMC, CRM e CRP fraturados após o ensaio de compressão.....	47
Figura 21 – Blocos CRM, CRP e CRMC fraturados após o ensaio de compressão.....	48
Figura 22 – Blocos no ensaio de tração na flexão após o rompimento.....	50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de blocos intertravados.....	17
Quadro 2 – Ensaio do bloco intertravados.....	18
Quadro 3 – Etapas de desenvolvimento.....	19
Quadro 4 – Principais características do aditivo plastificante.....	21

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados médio das análises da água distribuída.....	22
Tabela 2 – Informações do banco de dados.....	23
Tabela 3 – Quantidade mínima em Kg da amostra.....	26
Tabela 4 – Distribuição dos corpos de provas.....	27
Tabela 5 – Fator multiplicativo p.....	33
Tabela 6 – Resultados dos modelos de regressão.....	39
Tabela 7 – Acuracidade <i>ExtraTreeRegressor</i> .....	40
Tabela 8 – Traço otimizado.....	41
Tabela 9 – Dimensões da malha PET.....	41
Tabela 10 – Percentual dos elementos químicos.....	42
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão.....	46
Tabela 12 – Resultados do ensaio de tração na flexão à três pontos.....	50
Tabela 13 – Resultados do ensaio de absorção.....	51

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CRMC – Concreto Reciclado com Malha e Cinza

CRM – Concreto Reciclado com Malha

CRP – Concreto Reciclado Puro

CSV – *Comma-Separated Values*

NBR – Norma Brasileira

RCD – Resíduo de Construção e Demolição

SANS – *South African National Standards*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivo geral.....	15
1.2	Objetivos específicos.....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
2.1	Artigo.....	17
2.2	Bloco intertravado.....	17
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>19</b>
3.1	Materiais.....	20
3.1.1	RCD.....	20
3.1.2	Cimento.....	20
3.1.3	Cinzas volantes.....	21
3.1.4	Aditivo plastificante.....	21
3.1.5	Malha PET.....	21
3.1.6	Água.....	21
3.2	Método.....	22
3.2.1	Mineração de dados traço otimizado.....	22
3.2.2	Banco de dados traço otimizado.....	23
3.2.3	Programação em <i>Python</i> traço otimizado.....	23
3.2.4	Confecção Malha PET.....	24
3.2.5	Seleção e coleta do Resíduo de Construção e Demolição (RCD).....	25
3.2.6	Triagem das amostras.....	26
3.2.7	Fabricação dos corpos de prova.....	26
3.2.7.1	Confecção dos moldes.....	28
3.2.7.2	Coleta e classificação do RCD.....	29
3.2.7.3	Britagem e peneiramento.....	30
3.2.7.4	Confecção dos blocos.....	31
3.2.8	Caracterização por fluorescência de raios X.....	32
3.2.9	Ensaio de compressão.....	33
3.2.10	Ensaio de tração na flexão à três pontos.....	34
3.2.11	Ensaio de absorção de água.....	35
3.2.13	Caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	35
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>37</b>

4.1	Compilação do código do traço otimizado.....	37
4.1.1	Distribuição das variáveis do banco de dados.....	37
4.1.2	Correlações entre todas as variáveis do conjunto de dados.....	38
4.1.3	Desempenho do modelo <i>ExtraTreeRegressor</i> .....	39
4.1.4	Importância das variáveis na previsão da resistência.....	40
4.1.5	Determinação do traço otimizado.....	41
4.2	Compilação do código da malha PET.....	41
4.3	Fluorescência de raios X dos agregados.....	41
4.4	Análise microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	42
4.5	Resistência à compressão.....	45
4.6	Resistência à tração na flexão à três pontos.....	49
4.7	Absorção de água.....	51
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHO FUTURO.....	53
5.1	Conclusão.....	53
5.2	Recomendação para trabalho futuro.....	54
	REFERÊNCIAS.....	55
	APÊNDICE.....	62

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil está em constante crescimento em todo o planeta, edificações são construídas ou reformadas a todo momento, ocasionando em um grande volume de resíduos de construção e demolição (RCD) (ZHANG et al., 2023). Estima-se que nas próximas décadas este volume irá aumentar constantemente, países como a China e Estados Unidos, juntamente com os países da União Europeia, geram 3.300 milhões de toneladas ao ano (TANG et al., 2020). Consequentemente, diversos problemas socioambientais surgem, pois um grande número de RCD são descartados irregularmente, soluções sustentáveis surgem como alternativa (SAI TRIVEDI et al., 2023). A mineração urbana (reciclagem) apresenta-se como uma ótima opção para a gestão do RCD, já que seu objetivo principal é o manuseio de subprodutos, reutilizando e reciclando para novas aplicações (ZHANG et al., 2020).

A mineração urbana aplicada à construção civil, ajuda na transformação de diversos resíduos em novos produtos, como é o caso RCD (POULIKAKOS; KAKAR; PIAO, 2023) manuseado para tornar-se um agregado reciclado do concreto, que é o material mais consumido pela construção civil, é produzido através da mistura de areia, brita, cimento Portland e água (NIKOOKAR et al., 2023). Os Gregos e Romanos foram os primeiros a utilizar o concreto, quando uniram areia, rochas, partículas de tijolos e telhas, calcário e água (NEVILLE, 2015). O concreto que tem como agregados o RCD, é chamado de concreto reciclado (OUYANG et al., 2023). Porém, outros materiais podem substituir componentes do concreto, como é o caso da cinza volante é um substituto parcial do cimento Portland (MEENA; SINGH; SINGH, 2023). O concreto reciclado além de ser uma solução para o alto volume de RCD, também diminui a extração de agregados naturais, que por muitas vezes são extraídos de forma ilegal, acarretando problemas ambientais, como erosão do solo, remoção da vegetação, danos a biodiversidade, entre outros (MIA et al., 2024; OKUR; ERTURAÇ; NICOLL, 2023).

Porém, alguns problemas podem surgir em relação ao concreto reciclado, a sua baixa resistência mecânica é um dos principais, portanto, a definição do traço para este concreto é de suma importância. A tecnologia pode destacar-se como uma ferramenta para ajudar na definição traço otimizado, utilizando informações ou bancos de dados de diversos traços para definir as quantidades e misturas ideias para fabricar o concreto reciclado (MOHAMMADI GOLAFSHANI et al., 2024; WAKJIRA;

KUTTY; ALAM, 2024). Todos esses dados e informações precisam ser tratados e ajustados na busca dos melhores resultados, desta forma, o uso da linguagem de programação com a implementação da metodologia de aprendizagem de máquina, possibilita criar um modelo de regressão que define um traço otimizado teórico (AL MARTINI et al., 2023; PAL et al., 2023; PENG; UNLUER, 2023).

O concreto reciclado tem sua aplicabilidade em diversos produtos, destacando-se seu uso em blocos intertravados para pavimentação (BILIR et al., 2022). A fabricação deste tipo de material reciclado, gera uma economia circular, contribui para a sustentabilidade e diminui o impacto ambiental (PURCHASE et al., 2021). Os blocos sustentáveis, podem ser usados para calçadas, ruas, estacionamentos, alvenaria, entre outros. Outra vantagem é a redução do custo de fabricação, já que parte da sua matéria-prima é o RCD (FERRONATO et al., 2022). A resistência é um fator importante para os blocos sustentáveis, buscar soluções para garantir uma boa resistência é indispensável, desta forma, outros materiais podem ser adicionados na fabricação dos blocos, como o aditivo plastificante e malhas (FAYED et al., 2023; GHANEM et al., 2022).

O estudo busca fornecer informações e valores imediatos e práticos da viabilidade de utilizar resíduos de construção e demolição na fabricação de blocos intertravados sustentáveis. A proposta inclui melhorar as propriedades mecânicas do bloco através da adição de uma malha PET como reforço estrutural. Além disso, para determinar o traço otimizado do concreto, o estudo fará uso de técnicas de aprendizagem de máquina como ferramenta, buscando garantir o desempenho e a qualidade dos blocos.

## **1.1 Objetivo geral**

O presente estudo, tem como objetivo principal a reutilização de resíduos sólidos da construção, com adição de uma malha PET como forma de ajudar na resistência e ductilidade, utilizando aprendizagem de máquina como ferramenta para definição do traço otimizado viabilizando a fabricação de blocos intertravados sustentáveis para pavimentação.

## 1.2 Objetivos específicos

Dentro do objetivo geral estão contidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Confecção do código de programação em *Python* para o traço otimizado;
- ii. Confecção do código de programação em *Python* para a malha PET;
- iii. Definição do traço otimizado;
- iv. Fabricação da malha PET;
- v. Fabricação dos blocos intertravados;
- vi. Viabilidade dos blocos intertravados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo, são abordados os conceitos essenciais para o desenvolvimento do estudo, através da elaboração de uma revisão bibliográfica. O objetivo é obter resultados e respostas em relação à problemática identificada no trabalho.

### 2.1 Artigo

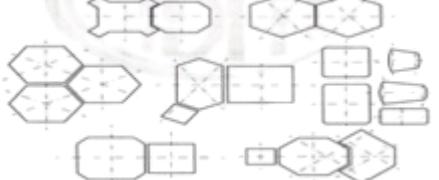
O artigo, presente no Apêndice A, é uma revisão bibliográfica relacionada a esse estudo e contém os temas pertinentes à base teórica desta dissertação de mestrado. Ele foi publicado na revista *Observatorio de La Economía Latinoamericana*, com o título de “*Use of data science in the development of concrete based on construction and demolition waste: a brazilian view*”.

### 2.2 Bloco intertravado

Os blocos intertravados são elementos pré-moldados de concreto amplamente aplicados em processos de pavimentação, intertravado mecanicamente sem a necessidade de argamassa ou concreto para a união. Esta ligação entre os blocos ocorre por atrito e compactação do material de assentamento. Sua fabricação se dá através da mistura de agregados graúdo, miúdo, cimento e água, podendo contar com o uso de aditivos e subprodutos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013; AWOYERA et al., 2021; SILVA et al., 2023). O bloco intertravado apresenta-se como uma ótima opção para emprego de subprodutos como o RCD, já que a exigência dos padrões de qualidade não são tão elevados e a concepção de mercado mais abrangente (ARUNACHALAM; HENDERSON, 2023; WANG; CHIN; XIA, 2023). Os blocos são divididos em quatro grupos, destacados no Quadro 1.

Quadro 1 – Tipos de blocos intertravados

Tipo	Descrição	Formato
<b>Tipo I</b>	Peças de concreto com formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois, que se arranjam entre si nos quatro lados e podem ser assentadas em fileiras ou em espinha de peixe.	
<b>Tipo II</b>	Peças de concreto com formato único, diferente do retangular que só podem ser assentadas em fileiras.	

<b>Tipo III</b>	Peças de concreto com formatos geométricos característicos, como trapézios, hexágonos, triédros etc., com pesos superiores a 4 kg.	
<b>Tipo IV</b>	Conjunto de peças de concreto de diferentes tamanhos, ou uma única peça com juntas falsas, que podem ser utilizadas com um ou mais padrões de assentamento.	

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013)

Já os principais ensaios realizados nos blocos intertravados estão representados no Quadro 2.

Quadro 2 – Ensaios do bloco intertravado

<b>Ensaio</b>	<b>Descrição</b>
<b>Resistência à compressão</b>	Resistência característica à compressão aos 28 dias deve ser de $\geq 35$ MPa para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.
	Resistência característica à compressão aos 28 dias deve ser de $\geq 50$ Mpa para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.
<b>Absorção de água</b>	A amostra de peças de concreto deve apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6 %, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7 %.
<b>Inspeção visual</b>	As peças de concreto constituintes do lote devem ser inspecionadas visualmente, objetivando a identificação de peças com defeitos que possam vir a prejudicar o assentamento, o desempenho estrutural ou a estética do pavimento.
<b>Resistência à tração na flexão</b>	Resistência característica à tração na flexão deve ser $\geq 2,2$ MPa para tráfego leve e $\geq 2,8$ MPa para tráfego pesado.

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010a, 2013, 2014; SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD, 2012).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é apresentado os materiais e a métodos de abordagem para o desenvolvimento do estudo, a fim de alcançar os objetivos pré-estabelecidos, exaltando seus pontos positivos e limitações.

Os experimentos serão realizados na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Bagé e Caçapava, Universidade da Região da Campanha (URCAMP), Campus Bagé e na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Campus Rio Grande. Todas as etapas possuem a orientação do professor Dr. Alexandre Ferreira Galio. Destaca-se como as principais, a revisão bibliográfica, desenvolvimento da proposta e experimentos, análise e discussão dos resultados e a publicação de artigos.

Na busca de obter os resultados, serão realizadas as seguintes etapas presente no Quadro 3, onde estão descritas, utilizando a metodologia PDCA, que tem como principal objetivo examinar a conformidade entre os processos de planejamento, execução, monitoramento e controle. Deste modo, orientando os processos pertencentes a esses grupos de forma efetiva.

Quadro 3 – Etapas de desenvolvimento

<b>Etapas</b>	<b>Ações</b>
<b>P - Planejamento</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Levantamento bibliográfico;</li> <li>2. Definição do local de coleta das amostras;</li> <li>3. Definição do produto que será fabricado.</li> </ol>
<b>D - Execução</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Coleta de dados e informações para elaboração de um banco de dados;</li> <li>2. Confeção do código em <i>python</i> para definir o traço otimizado;</li> <li>3. Confeção do código em <i>python</i> para definir as dimensões da malha PET;</li> <li>4. Seleção e coleta do RCD;</li> <li>5. Triagem das amostras;</li> <li>6. Fabricação dos corpos de provas.</li> </ol>
<b>C – Checagem</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Caracterização por fluorescência de raios X;</li> <li>2. Ensaio de resistência à compressão;</li> <li>3. Ensaio de resistência à flexão;</li> <li>4. Ensaio de absorção de água;</li> <li>5. Caracterização por microscopia eletrônica de varredura;</li> </ol>
<b>A – Ações Corretivas</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Em caso de resistência inferior a 35 MPa, alterar a aplicação do produto para bloco de construção.</li> </ol>

Fonte: Autor (2025).

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 RCD

Os resíduos de construções e demolições utilizados, foram gentilmente cedidos pela empresa JLdeFreitas Construção e Reforma. A seleção do lote foi regida de acordo com a NBR 15116 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a), tendo suas dimensões inferiores a 80 m<sup>3</sup>, ficando dentro do limite para materiais possuintes de mesma origem, além de todos os agregados serem de classe A. A Figura 1 destaca o lote selecionado.

Figura 1 – Lote de RCD



Fonte: Autor (2025).

#### 3.1.2 Cimento

O estudo fez o uso do cimento Portland de alta resistência inicial intitulado CP V-ARI da empresa Votoran. É composto de silicatos de cálcio, alumínio e ferro, sulfato de cálcio filler carbonático e polzolana. Tem um incremento acelerado de resistência em comparação ao cimento comum, tendo a resistência à compressão mínima nos primeiros 7 dias de idade de 34 MPa, no qual ajuda a compensar a perda de resistência gerada pelo RCD, evitando significativamente a redução da resistência geral do concreto. Também ajuda diminuir a variabilidade no desempenho do concreto, gerada pelo RCD, pois atinge rapidamente a resistência necessária para suportar cargas, permitindo um controle mais eficaz da qualidade do concreto (VOTORANTIM, 2024). Utilizou-se como base para a escolha a NBR 16697 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018).

### 3.1.3 Cinzas volantes

As cinzas volantes utilizadas foram coletadas das usinas termelétricas localizadas na Região da Campanha do Estado do Rio Grande do Sul (Brasil). A parte mineral do carvão que não é combustível gera uma poeira proveniente do gás de combustão, as partículas desta poeira são geralmente lisas e esféricas. Sua composição de fase inclui mulita, quartzo, calcita, magnetita, hematita e vidro amorfo (AHMAD et al., 2024; RATHNAYAKA et al., 2024).

### 3.1.4 Aditivo plastificante

Como forma de auxiliar na resistência do concreto reciclado, o estudo fez uso do aditivo plastificante concreto forte, da marca Sika®, que tem como objetivo fornecer maior trabalhabilidade, homogeneização, impermeabilidade e resistência, além de reduzir a retração e a fissuração. A escolha se deu tendo como base a NBR 11768-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019) e as indicações do fabricante (SIKA, 2024). O Quadro 4 destaca as principais características do produto.

Quadro 4 – Principais características do aditivo plastificante

<b>Base química</b>	Sais sulfonados e carboidratos em meio aquoso
<b>Composição química</b>	Dazomete (ISO), 2-bromo-2-nitropropano-1,3-diol e mistura de: 5-cloro-2-metil-4-isotiazolina-3-ona [N. CE 247-500-7] e 2-metil-4-isotiazolina-2-ona [N. CE 220-239-6] (3:1)
<b>Densidade</b>	1,06 ± 0,02 Kg/L
<b>Valor do pH</b>	6,0 ± 1,0

Fonte: Adaptado de (SIKA, 2024).

### 3.1.5 Malha PET

A fim de aumentar a resistência do bloco intertravado, adicionou-se uma malha proveniente de garrafas PET, atuando como um reforço adicional, distribuindo de maneira mais uniforme as tensões no concreto reciclado e minimizando o risco de fissuras e rupturas, além de evitar ferrugem (GHANEM et al., 2022).

### 3.1.6 Água

Será feito o uso da água fornecida pelo município de Bagé-RS para mistura do concreto reciclado, garantindo que a mesma atenda os padrões de potabilidade determinados pela NBR 15900-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). A utilização de água potável é fundamental para evitar a existência

de impurezas e substâncias que podem afetar a resistência e durabilidade do concreto reciclado. A Tabela 1 apresenta os valores das análises da água do município.

Tabela 1 – Resultados médio das análises da água distribuída

	Nº de coletas	Cor aparente	Turbidez	Cloro residual livre
<b>Janeiro</b>	96	3,1	0,41	0,93
<b>Fevereiro</b>	96	3,0	0,40	0,94
<b>Março</b>	96	2,7	0,31	0,91
<b>Abril</b>	96	2,5	0,35	1,16
<b>Maio</b>	96	2,5	0,33	1,13
<b>Junho</b>	96	2,3	0,27	1,19
<b>Julho</b>	96	2,2	0,25	1,01
<b>Agosto</b>	96	2,4	0,29	1,07
<b>Setembro</b>	96	2,0	0,22	1,05
<b>Outubro</b>	96	4,3	0,68	1,03
<b>Novembro</b>	96	2,4	0,29	1,01
<b>Dezembro</b>	96	2,1	0,24	1,11

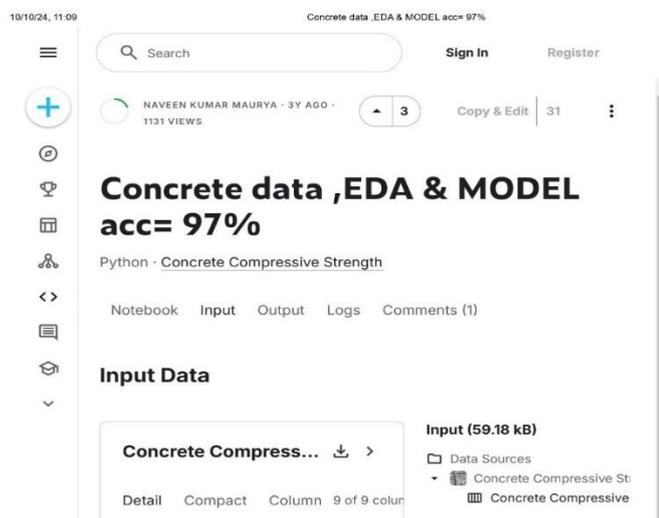
Fonte: (DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ESGOTOS DE BAGÉ, 2024)

## 3.2 Método

### 3.2.1 Mineração de dados traço otimizado

Para criar um código de programação que busca identificar o traço otimizado do concreto reciclado, foi necessário coletar dados e informações, viabilizando a obtenção de um banco de dados. Os dados foram coletados da plataforma *Kaggle®* (KAGGLE, 2024) e validados através de informações obtidas de artigos de periódicos, dissertações de mestrado e tese de doutorados. A Figura 2 ressalta a página da web de coleta dos dados.

Figura 2 – Site da plataforma *Kaggle®*



Fonte: (KAGGLE, 2024).

### 3.2.2 Banco de dados traço otimizado

O banco de dados obtido por meio da mineração de dados, tem o formato CSV, o que já facilita a compatibilidade com diversos *software* de análise de dados, favorecendo a manipulação dos dados usados em *scripts* em linguagens em *Python*. A estrutura do banco é formada por linhas e colunas, como uma planilha, contendo informações de composições do traço do concreto utilizando diversos materiais, com seus respectivos valores de resistência à compressão em MPa obtidos através de ensaios de rompimento dos corpos de prova em laboratórios. A Tabela 2 destaca as características e as variáveis presentes no banco de dados.

Tabela 2 – Informações do banco de dados

Características		
Número de linhas	1.030	
Número de colunas	8	
Variáveis	Unidade	Variáveis de entrada e saída
Cimento	Kg/m <sup>3</sup>	Entrada
Cinza volante	Kg/m <sup>3</sup>	Entrada
Água	Kg/m <sup>3</sup>	Entrada
Aditivo plastificante	Kg/m <sup>3</sup>	Entrada
Agregado graúdo	Kg/m <sup>3</sup>	Entrada
Agregado miúdo	Kg/m <sup>3</sup>	Entrada
Dia	1~365	Entrada
Resistência mecânica	MPa	Saida

Fonte: Autor (2025).

### 3.2.3 Programação em *Python* traço otimizado

Com os dados já definidos, foi elaborado o código de programação, que está descrito no Apêndice B, que usa a linguagem de programação em *Python*, aplicado dentro do ambiente do *Jupyter Notebook* (JUPYTER, 2024), que é uma aplicação para web interativa onde os usuários podem criar e compartilhar código executável, sendo amplamente empregado na ciência de dados, aprendizagem de máquina, estatística, pesquisas acadêmicas e educação. O código tem o objetivo de criar um modelo de regressão que prevê a resistência do concreto com base em diversas características

de misturas presente no banco de dados, obtendo como resultado final a definição do traço otimizado.

A regressão é uma técnica de aprendizagem de máquina no qual um modelo é treinado para prever valores numéricos a partir de variáveis de entrada, seu objetivo no código em questão, é identificar padrões nos dados de misturas e suas respectivas resistência do concreto (ANWAR et al., 2023; KHAMBRA; SHUKLA, 2023; SATHIPARAN; JEYANANTHAN; SUBRAMANIAM, 2024). Para a confecção do código utilizou-se o *ChatGPT*® (OPENAI, 2024) e trechos de códigos da plataforma *Kaggle*® (KAGGLE, 2024) , como ferramentas de auxílio no desenvolvimento do código. Portanto, como forma de elencar os principais passos da confecção do código do traço otimizado, o Apêndice C apresenta o fluxograma de suas etapas.

### 3.2.4 Confecção malha PET

O código em *Python* descrito no Apêndice D, foi elaborado com o objetivo de dimensionar a malha, determinando a quantidade de filmes PET no comprimento e largura da malha, o espaçamento entre eles e o comprimento total necessário de filme. O código utiliza conceitos de resistência dos materiais, no qual destaca-se no livro “resistência dos materiais” de Beer e Johnston (2008), fundamental na aplicação das fórmulas para definir a resistência à tração e área da seção transversal. Também fez uso da NBR 7481 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023), NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), NBR 7480 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), ISO 527-1 (INTERNATIONAL STANDARD, 2019), essenciais na determinação da metodologia, e por fim as plataformas *MatWeb* (MATWEB, 2024), *MakeitFrom.com* (MAKEITFROM.COM, 2024), *Material Properties* (MATERIAL PROPERTIES, 2024) e *Polymer Academy* (POLYMER ACADEMY, 2024), que auxiliaram na definição do valor médio de resistência à tração. A criação do código fez uso do *ChatGPT*® (OPENAI, 2024) como ferramentas para auxiliar no desenvolvimento. Logo, como maneira de destacar os principais passos da confecção do código de dimensão da malha pet, o Apêndice E apresenta o fluxograma de suas etapas.

Com as dimensões definidas através do código de programação, inicia-se a laminação das garrafas PET, para a produção do filme que irá compor a malha, como ilustra a Figura 3, as garrafas são cortadas ao meio e colocadas em um suporte de madeira e são puxados manualmente através de uma lâmina, os fios possuem

aproximadamente 5 mm de espessura. Após a laminação, a malha pode ser fabricada, seu formato será semelhante a uma malha de aço. A ligação dos filmes nas interseções, será através de uma amarra feita das sobras do filme PET, por fim ocorre a instalação na forma.

Figura 3 – Filme PET

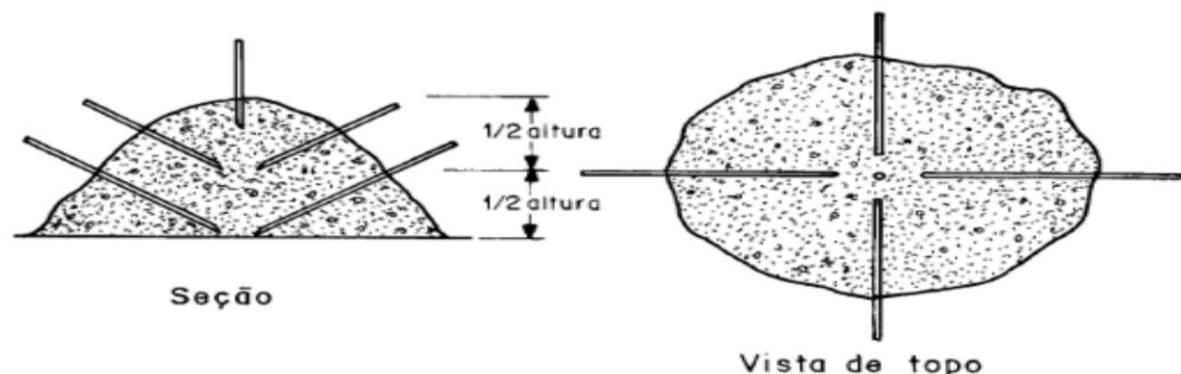


Fonte: Autor (2025).

### 3.2.5 Seleção e coleta do Resíduo de Construção e Demolição (RCD)

Realizou-se a seleção e coleta do RCD de acordo com a NBR 10007 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022), NBR 15116 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a), NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) e NBR 16915 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b). Toda coleta foi de forma manual, no qual o lote ficou dividido com uma fita em três partes iguais, a fim de extrair os resíduos de todo o lote uniformemente, retirados respectivamente do topo, no meio e na base do lote, como ilustrado na Figura 4. A quantidade retirada em cada amostra, seguiu os requisitos estabelecidos pela Tabela 3.

Figura 4 – Procedimento de extração das amostras de RCD



Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a).

Tabela 3 – Quantidade mínima em kg da amostra

Tam. nominal do agregado (mm)	Amostra de campo (kg)	Amostra de ensaio (kg)
< 4,8	40	1
> 4,8 < 9,5	40	5
> 9,5 < 19	40	10
> 19 < 37,5	75	25
> 37,5 < 75	150	50
> 75 < 125	225	70

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a)

### 3.2.6 Triagem das amostras

As amostras coletadas e selecionadas foram classificadas de acordo com os tipos de categorias e características (DODAMPEGAMA et al., 2024), visto que diversos materiais estão presentes no RCD, como, cerâmicas, plásticos, concreto, tijolos, telhas, gesso, metais, vidro, papelão, isopor, componentes eletrônicos, entre outros (SERRANTI; BONIFAZI, 2020). Apenas os resíduos de classe A estiveram selecionados, os demais tiveram como destino pontos de coleta. Estes resíduos de classe A, passaram por mais uma classificação, separados em rochas, argamassa, cerâmicas, cerâmicas polidas e concreto, e depositados separadamente em recipientes. Após a classificação, ocorreu o processo de britagem manual.

O resíduo resultante da britagem, passaram por um peneiramento, seguindo as diretrizes da NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005), NBR 15116 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a) e NBR NM ISO 3310-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010b), cujo os grão devem atravessar a malha com abertura de 75 mm e 12,5 mm, ficando retidos na malha com abertura 4,75 mm para o agregado graúdo. Já os grãos que passarem pela malha com abertura de 4,75 mm serão classificados como agregado miúdo.

### 3.2.7 Fabricação dos corpos de prova

Após todas as etapas anteriores, se deu a fabricação dos corpos de prova (amostras), que são blocos intertravados prismáticos de aproximadamente 200 milímetros de comprimento, 100 milímetros de largura e 80 milímetros de altura, para a realização dos ensaios de absorção de água, flexão e compressão. Para estes

ensaios foram fabricados de 45 corpos de provas, divididos em 3 composições, tipo de ensaio e tempo de cura, distribuídos de acordo com a Tabela 4. Serão fabricados de acordo com as seguintes etapas:

1. Fabricação dos moldes;
2. Identificação dos moldes de acordo com as composições, tempo de cura e ensaios;
3. Instalação da malha PET centralizada nos moldes (apenas na composição CRMC e CRM);
4. Coleta e triagem dos RCD de classe A;
5. Britagem e peneiramento do RCD, classificados em agregado miúdo e grosso;
6. Separação dos materiais de acordo com suas porcentagens pré-definidas e composições;
7. Mistura dos compostos através da betoneira, de acordo com suas porcentagens de quantidades pré-definidas pelo código de programação e composição;
8. Instalação da malha PET centralizada nos moldes (apenas na composição CRMC e CRM);
9. Deposição da mistura nos moldes;
10. Espera do tempo de cura conforme destacado na Tabela 4.

Tabela 4 – Distribuição dos corpos de provas

Composição		Ensaio de compressão		Ensaio de absorção de água		Ensaio de flexão		Total
		Nº de corpos de provas	Cura (dias)	Nº de corpos de provas	Cura (dias)	Nº de corpos de provas	Cura (dias)	
CRMC	✓ Agregados	3	7	3	28	3	28	15
	✓ Cimento	3	14					
	✓ Cinza	3	28					
CRM	✓ Aditivo	3	7	3	28	3	28	15
	✓ Malha PET	3	14					
	✓ Água	3	28					
CRP	✓ Agregados	3	7	3	28	3	28	15

✓ Cimento ✓ Aditivo ✓ Água	3	14				
	3	28				
<b>Total de corpos de provas por ensaio</b>	27	9	9	45		

Fonte: Autor (2025).

A definição da quantidade de amostras e o processo de fabricação dos corpos de prova será regido pelas NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), NBR 16886 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020), NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016), NBR 12142 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010a) e KS F4419 (KOREAN STANDARDS & CERTIFICATION, 2022) garantindo a conformidade dos corpos de prova com as especificações desejadas.

### 3.2.7.1 Confeção dos moldes

Utilizou-se como matéria-prima para moldes, sobras de madeiras de forro, cortadas conforme as dimensões dos blocos e fixadas através de pregos. Na sequência foram perfuradas com uma furadeira para a instalação da malha PET, no qual os filmes foram transpassados dentro das caixas conforme determinado pelo código de programação. Os filmes da malha foram obtidos através de uma laminação de garrafas PET, sendo necessário 7 garrafas PET de 2 litros para a confecção. A Figura 5 destaca os moldes com as malhas instaladas.

Figura 5 – Moldes



Fonte: Autor (2025).

### 3.2.7.2 Coleta e classificação do RCD

As etapas foram realizadas conforme pré-estabelecido. O primeiro passo foi a divisão do lote de RCD em 3 partes iguais, utilizou-se uma fita zebraada, no intuito de retirar os resíduos igualmente de todas as partes, como ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Divisão do lote



Fonte: Autor (2025).

Logo após, os procedimentos de coleta e triagem foram iniciados. Fez uso de uma pá e enxada para a coleta, retirando uma quantidade de resíduos igualmente das 3 partes do lote, como o RCD já foi previamente selecionado pela JLdeFreitas Construção e Reforma, não houve a necessidade de descartar resíduos de classe B, C e D. A Figura 7 destaca os resíduos coletados no lote.

Figura 7 – Resíduos do lote



Fonte: Autor (2025).

### 3.2.7.3 Britagem e peneiramento

Todo o processo foi realizado de forma manual, o RCD foi retirado e britado até uma dimensão próxima a 75 mm, então peneirado na peneira de 75 mm, 12,5 mm e 4,75 mm. Como já mencionado, os grãos que ultrapassaram a peneira de 4,75 mm são os agregados miúdos e os grãos que não ultrapassaram são o agregado graúdo, como representado na Figura 8.

Figura 8 – Agregado miúdo e graúdo

**Agregado Miúdo**



**Agregado Graúdo**



Fonte: Autor (2025).

#### **3.2.7.4 Confeção dos blocos**

Realizou-se a confecção de dois traços, fazendo o uso de uma betoneira de 120 litros, balde de metal de 10 litros, carrinho de mão, colher e fratacho. O primeiro traço, foi composto por agregado miúdo e graúdo, cimento, aditivo plastificante e água. Já o segundo possui a mesma composição, porém com a substituição de 20% do cimento por cinza volante. Foram adicionados na betoneira conforme estabelecido pelas porcentagens de cada componente, e depositados nas suas respectivas moldes. Na fabricação dos blocos, utilizou-se um total de 7 garrafas PET para a fabricação da malha e 96,72 Kg de agregado miúdo e graúdo. Os blocos foram confeccionados seguindo todas as etapas pré-estabelecidas, respeitando os requisitos exigidos pelas NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), NBR 16886 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS, 2020), NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016), NBR 12142 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010a) e KS F4419 (KOREAN STANDARDS & CERTIFICATION, 2022). A Figura 9 ilustra os blocos confeccionados.

Figura 9 – Blocos confeccionados



Fonte: Autor (2025).

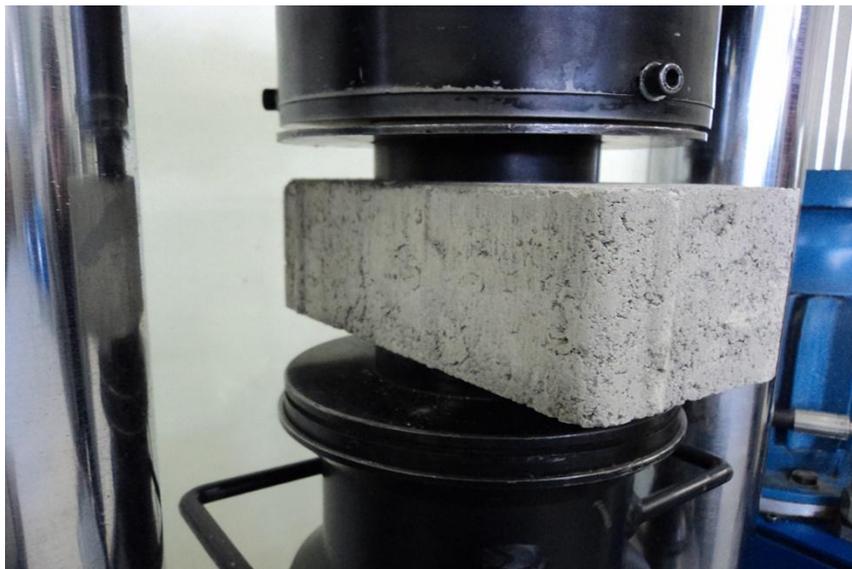
### 3.2.8 Caracterização por fluorescência de raios X

O estudo fez uso da técnica para identificar os elementos químicos presentes na mistura dos agregados miúdo e graúdo, cimento CPV-ARI e cinzas volantes. Foi submetido ao equipamento uma amostra de 50 gramas, dívida em três partes iguais. Os agregados miúdo e graúdos foram provenientes do peneiramento na malha com abertura de 0,475 mm, adequando-se aos requisitos de amostra do equipamento Bruker S1 Turbo SD. A caracterização foi realizada no Laboratório de Lavra e Tratamento de Minérios (LATRAM) da Universidade Federal do Pampa, campus Caçapava.

### 3.2.9 Ensaio de compressão

O ensaio avaliou a resistência à compressão dos corpos de provas, com o objetivo de verificar a capacidade dos mesmos em suportar cargas de no mínimo 35 MPa. O corpo de prova é depositado no equipamento de forma vertical, e recebe uma carga de maneira gradual e contínua mantendo a taxa de carregamento constante até a ruptura do corpo de prova, a Figura 10 representa a aplicação da carga e o posicionamento do corpo de prova.

Figura 10 – Esquema do ensaio de compressão



Fonte: (TESTECON ENGENHARIA, 2024).

Os resultados são apresentados em megapascal (MPa), dado pela Equação 1.

$$\text{Resistência à compressão} = \frac{F}{A} \times p \quad (1)$$

Onde a carga de ruptura (F) é dividida pela área de carregamento (A), multiplicando o resultado pelo fator p, que é a função da altura do corpo de prova, descrito na Tabela 5.

Tabela 5 – Fator multiplicativo p

<b>Espessura nominal do bloco em milímetros</b>	<b>p</b>
<b>60</b>	0,95
<b>80</b>	1,00
<b>100</b>	1,05

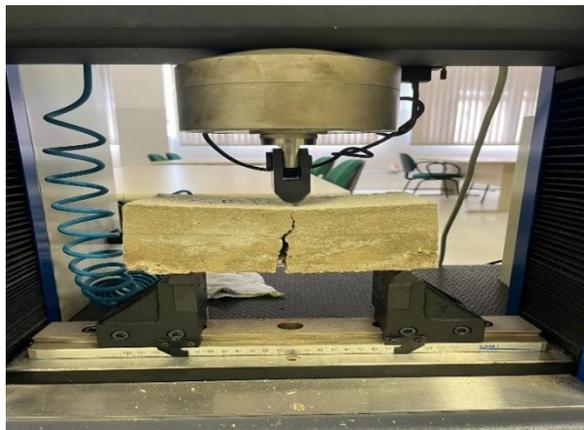
Fonte: Adaptado de (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Todo procedimento foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade da Região da Campanha, e seguirá as etapas destacadas pela NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

### 3.2.10 Ensaio de tração na flexão à três pontos

O ensaio aferiu a resistência à tração na flexão dos corpos de provas de acordo com a NBR 12142 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010a) e NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), a fim de definir sua capacidade estrutural e durabilidade, já que estão sujeitos a cargas variáveis e dinâmicas que provocam uma curvatura no bloco. Para o ensaio as amostras devem ficar imersas em água por 24 horas, após esse período serão depositadas de forma horizontal no equipamento, a carga é aplicada de forma contínua e uniforme no centro do corpo de prova até a ruptura, a tensão deve estar no intervalo 0,9 MPa/Min a 1,2 MPa/Min (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010a, 2014; KIM; KIM, 2022; KOREAN STANDARDS & CERTIFICATION, 2022). Todas as etapas foram realizadas no Laboratório 1112 da Universidade Federal do Pampa, campus Bagé. A Figura 11 ilustra o ensaio de flexão.

Figura 11 – Ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor (2025).

A resistência à tração na flexão é determinada de acordo com a Equação 2.

$$\text{Resistência à tração na flexão} = \frac{3F.L}{2B.D^2} \quad (2)$$

Onde F é a força máxima registrada no equipamento (N), L a distância entre os apoios (mm), B a largura do bloco (mm) e D a espessura do bloco (mm).

### 3.2.11 Ensaio de absorção de água

O ensaio tem como objetivo estabelecer a quantidade de água absorvida pelo corpo de prova, a fim de determinar e analisar a conservação e resistência do mesmo, visto que os blocos intertravados estarão expostos a umidades, chuvas e intempéries. Blocos intertravados que possuem alta absorção estão sujeitos a mais rachaduras e degradação. Todo o processo de preparação e ensaio será conduzido de acordo com a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Os corpos de provas foram escovados para a remoção de pó e partículas soltas, e logo após imergidos em um tanque com água potável por 24 horas, com o período de tempo finalizado, foram retirados do tanque e esperou-se que os corpos de provas estivessem saturados, porém com a superfície seca, então, iniciou-se o processo de pesagem, obtendo-se a massa saturada (m<sub>2</sub>). Com os corpos de provas pesados, os mesmos foram depositados em uma estufa com temperatura de 110 °C por 24 horas. Novamente os corpos de prova foram pesados a fim de obter a massa seca (m<sub>1</sub>).

O resultado da absorção em porcentagem é dado pela Equação 3.

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (3)$$

Onde A é o valor de absorção de cada corpo de prova (%), m<sub>1</sub> a massa do corpo de prova seco em gramas (g) e m<sub>2</sub> a massa do corpo de prova saturado em gramas (g). Todo o processo foi realizado no Laboratório 1104 da Universidade Federal do Pampa, campus Bagé.

### 3.2.12 Caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O estudo fez uso da técnica a fim de observar as características da microestrutura da superfície dos corpos de provas rompidos no ensaio de compressão de 28 dias. foram coletadas quatro amostras, uma de cada tipo de composição, preparadas de acordo com o especificado pelo equipamento. O equipamento utilizado

será do Centro de Microscopia Eletrônica do Sul (CEME-SUL) da Universidade Federal de Rio Grande. A Figura 12 ilustra as amostras.

Figura 12 – Amostras MEV



Fonte: Autor (2025).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

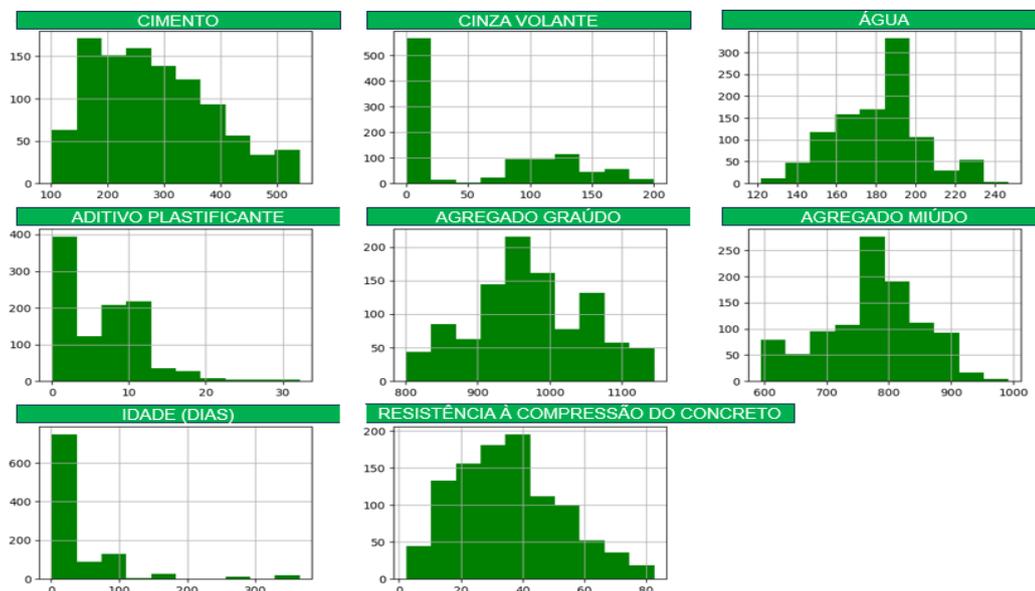
### 4.1 Compilação do código do traço otimizado

Após a execução do código, algumas informações foram geradas para compreender a influência de diferentes componentes na resistência do concreto. Além de ajudar a compreender o banco de dados e o código de programação.

#### 4.1.1 Distribuição das variáveis do banco de dados

Os histogramas destacados na Figura 13, apresentam a distribuição das quantidades dos componentes dentro do banco de dados. O eixo X representa a quantidade em kg/m<sup>3</sup> dos componentes, e o eixo Y representa a frequência de amostras que possuem estas quantidades. Componentes como o cimento, agregados finos, agregados graúdos, apresentam dados bem equilibrados entre a quantidade e frequência, estando presentes em todos os traços do banco de dados como esperado, já que são a base para a fabricação do concreto. Já a cinza volante e o aditivo plastificante, são componentes que podem ou não estar presentes no traço, portanto, suas quantidades utilizadas foram baixas, beirando a zero em muitas amostras. Por fim a idade (número de dias) destaca que a maior parte das amostras utilizou cinquenta dias como tempo de cura, em relação a resistência à compressão, a maioria das amostras obteve resultados aproximadamente entre 30 kg/m<sup>3</sup> e 45 kg/m<sup>3</sup>

Figura 13 – Histogramas de distribuição das variáveis

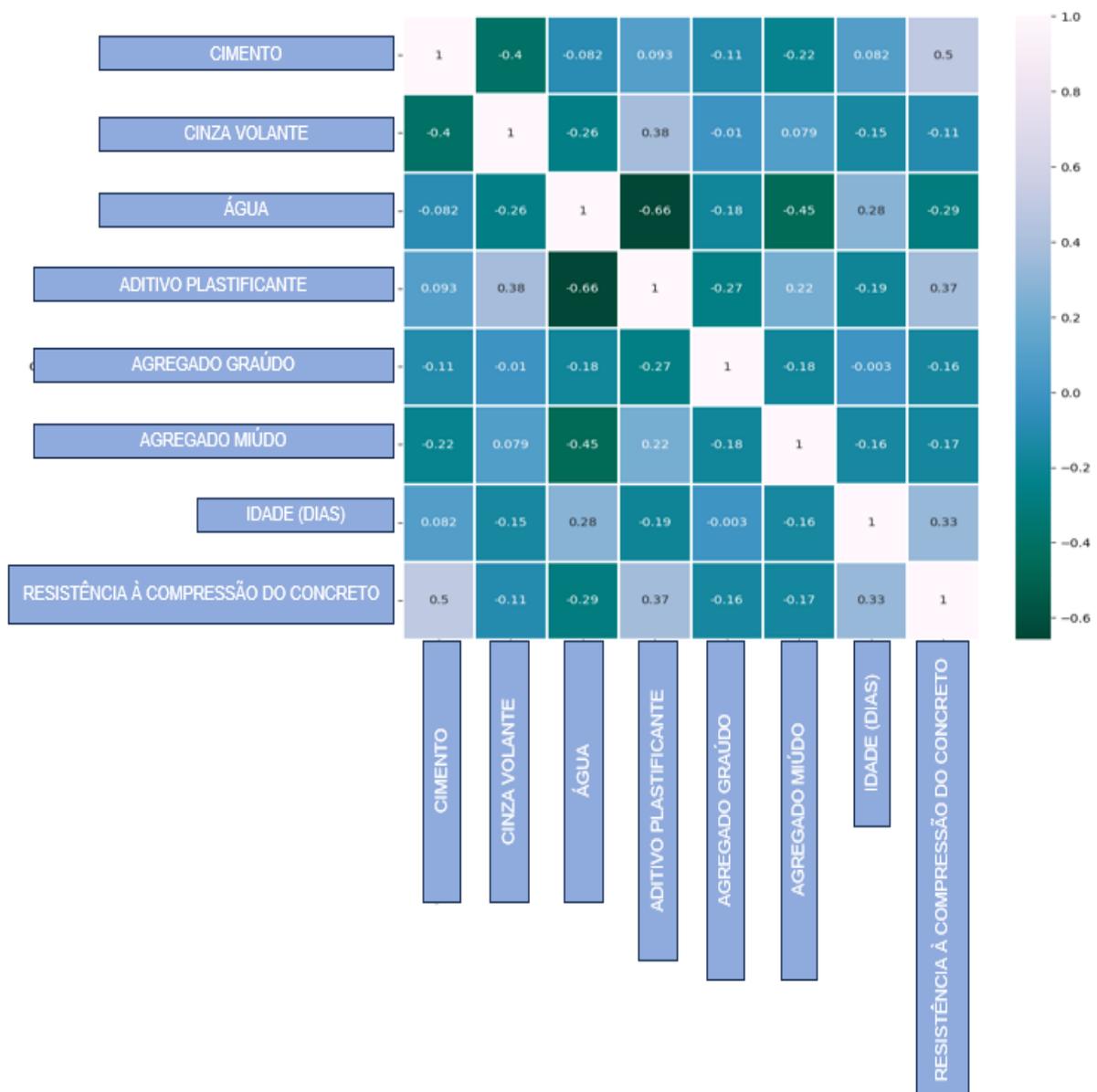


Fonte: Autor (2025).

#### 4.1.2 Correlações entre todas as variáveis do conjunto de dados

A matriz de correlação entre variáveis ilustrada na Figura 14, tem como objetivo apresentar a relação entre as variáveis do banco de dados, identificando o grau de associação entre duas variáveis, permitindo compreender quais variáveis possuem melhor relação. As variáveis, cimento, água, aditivo plastificante e a idade, possuem uma correlação significativa com a resistência, portanto, a resistência é impactada diretamente de acordo com os valores para mais ou para menos destas variáveis. Já as demais variáveis têm uma correlação menor, não impactando severamente na resistência do concreto.

Figura 14 – Matriz de correlação



#### 4.1.3 Desempenho do modelo *ExtratreesRegressor*

Com os modelos de regressão definidos, eles passaram por uma avaliação e loop de treinamentos, onde foram calculados a acurácia do treino (desempenho do modelo no conjunto de dados de treino) e a acurácia de teste (desempenho do modelo no conjunto de dados de teste). Os resultados, com suas pontuações de treino e teste são ilustrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados dos modelos de regressão

	<b>Modelo</b>	<b>Pontuação de Treino</b>	<b>Pontuação de Teste</b>
<b>0</b>	Regressão Linear	0.562615	0.60951
<b>1</b>	Regressão com Descida do Gradiente Estocástico	0.562231	0.609388
<b>2</b>	Lasso (Regressão Linear com Regularização L1)	0,52436	0.56644
<b>3</b>	Ridge (Regressão Linear com Regularização L2)	0.562611	0.609391
<b>4</b>	Regressor de Árvore de Decisão (max_features=1.0)	0.982537	0.885661
<b>5</b>	Regressor de Árvore de Decisão	0.995928	0.784243
<b>6</b>	Regressor de Árvore de Decisão (criterion='friedman_mse')	0.942592	0.884913
<b>7</b>	Regressor de Árvore de Decisão (estado_aleatório=151739619)	0.973692	0.875288
<b>8</b>	Regressor de Árvore de Decisão (profundidade_máxima=3, estado_aleatório)	0.796611	0.757711
<b>9</b>	Regressor dos k Vizinhos Mais Próximos	0.817211	0.677333
<b>10</b>	Regressor de Árvore Extra (estado_aleatório=471272921)	0.995928	0.902114

Fonte: Autor (2025).

Com base nos resultados, o modelo *ExtraTreeRegressor*, apresentou os melhores valores de acurácia no teste e treino. A Figura 15 destaca a variação do desempenho do modelo na alteração durante a divisão dos dados em treino e teste, durante alteração do parâmetro *Random\_state*. O gráfico tem no seu eixo X os valores usados para dividir os dados de teste e treino, e o eixo Y são os valores de acurácia em relação aos testes e treinos. Observa-se que o modelo, varia dentro de uma faixa de acurácia aproximada de 0,86 e 0,93, possuindo alguns picos para mais e para menos. Através deste gráfico é possível encontrar valores que maximizem a precisão do modelo.

Figura 15 – Variação do modelo *ExtraTreeRegressor*



Fonte: Autor (2025).

Logo, foi possível calcular o coeficiente de determinação  $R^2$ , valores perto de 1 indicam que o modelo está fazendo previsões precisas. A Tabela 7 apresenta o valor de acuracidade do modelo *ExtraTreeRegressor*, que é de 96 %.

Tabela 7 – Acuracidade *ExtraTreeRegressor*

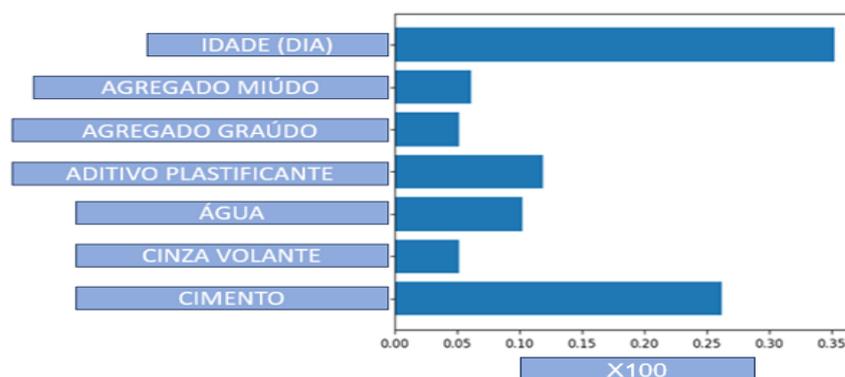
	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	PREVISÃO
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	1.000000	0.964736
PREVISÃO	0.964736	1.000000

Fonte: Autor (2025).

#### 4.1.4 Importância das variáveis na previsão da resistência

A Figura 16, apresenta o grau de importância das variáveis em relação à previsão da resistência à compressão utilizando o modelo *ExtraTreeRegressor*, permitindo identificar quais variáveis têm mais impacto e relevância na resistência do concreto.

Figura 16 – Importância das variáveis



Fonte: Autor (2025).

#### 4.1.5 Determinação do traço otimizado

Utilizando o modelo *ExtraTreeRegressor* para prever a resistência à compressão, o código gerou uma combinação otimizada das variáveis em relação à resistência, na busca de uma mistura que traga a maior resistência possível, ilustrada na Tabela 8, em porcentagens.

Tabela 8 – Traço otimizado

Componente	Percentual (%)
Cimento	17
Cinza volante	0
Água	7
Aditivo plastificante	1
Agregado graúdo	43
Agregado miúdo	33

Fonte: Autor (2025).

Os resultados do código determinam a não utilização de cinza volantes, porém para fins de verificar a viabilidade das cinzas substituindo o cimento em 20% no traço (BEHL et al., 2022; DAMODHARA REDDY et al., 2023; NEERAJA; UNNIKISHNAN; VARGHESE, 2023), com a presença da malha PET, foi definida a composição CRMC.

#### 4.2 Compilação do código da malha PET

Como resultado, o código apresenta uma lista de informações para a fabricação da malha PET. Essas informações fornecidas ajudam na definição da quantidade necessária de filmes PET, a espessura e a largura dos filmes, além de facilitar a distribuição dos filmes na fabricação da malha. A Tabela 9 destaca estas informações.

Tabela 9 – Dimensões da malha PET

<b>Espaçamento da malha</b>	20 mm
<b>Largura do filme</b>	5 mm
<b>Número de filmes ao longo do comprimento</b>	7
<b>Número de filmes ao longo da largura</b>	3
<b>Total de filmes</b>	10
<b>Comprimento total de filmes necessários</b>	1700 mm

Fonte: Autor (2025).

#### 4.3 Fluorescência de raios X dos agregados

Os resultados gerados após a amostra ter sido submetida ao equipamento são destacados na Tabela 10, onde observa-se o percentual dos principais elementos

químicos presente na amostra. Os elementos que obtiveram valores nulo, foram considerados adições minoritárias, ou seja, não sendo ponderados.

Tabela 10 – Percentual dos elementos químicos

Elemento	Parte 1	Parte 2	Parte 3	Erro da medida ( $\pm$ )
<b>MgO</b>	7,82	4,05	3,61	3,65
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	10,7	10,7	9,84	0,68
<b>SiO<sub>2</sub></b>	33,3	33,4	33,3	0,5
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,65	0,7	0,35	0,08
<b>S</b>	1,45	1,46	1,36	0,03
<b>Cl</b>	0,2	0,2	0,16	0,01
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1,37	1,36	1,36	0,02
<b>CaO</b>	30,2	30,7	31,0	0,06
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,35	0,35	0,36	0,01
<b>MnO</b>	0,04	0,04	0,05	0,01
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,39	2,42	2,46	0,02
<b>Co</b>	0,15	0,15	0,16	0,01
<b>Rh</b>	0,05	0,05	0,06	0

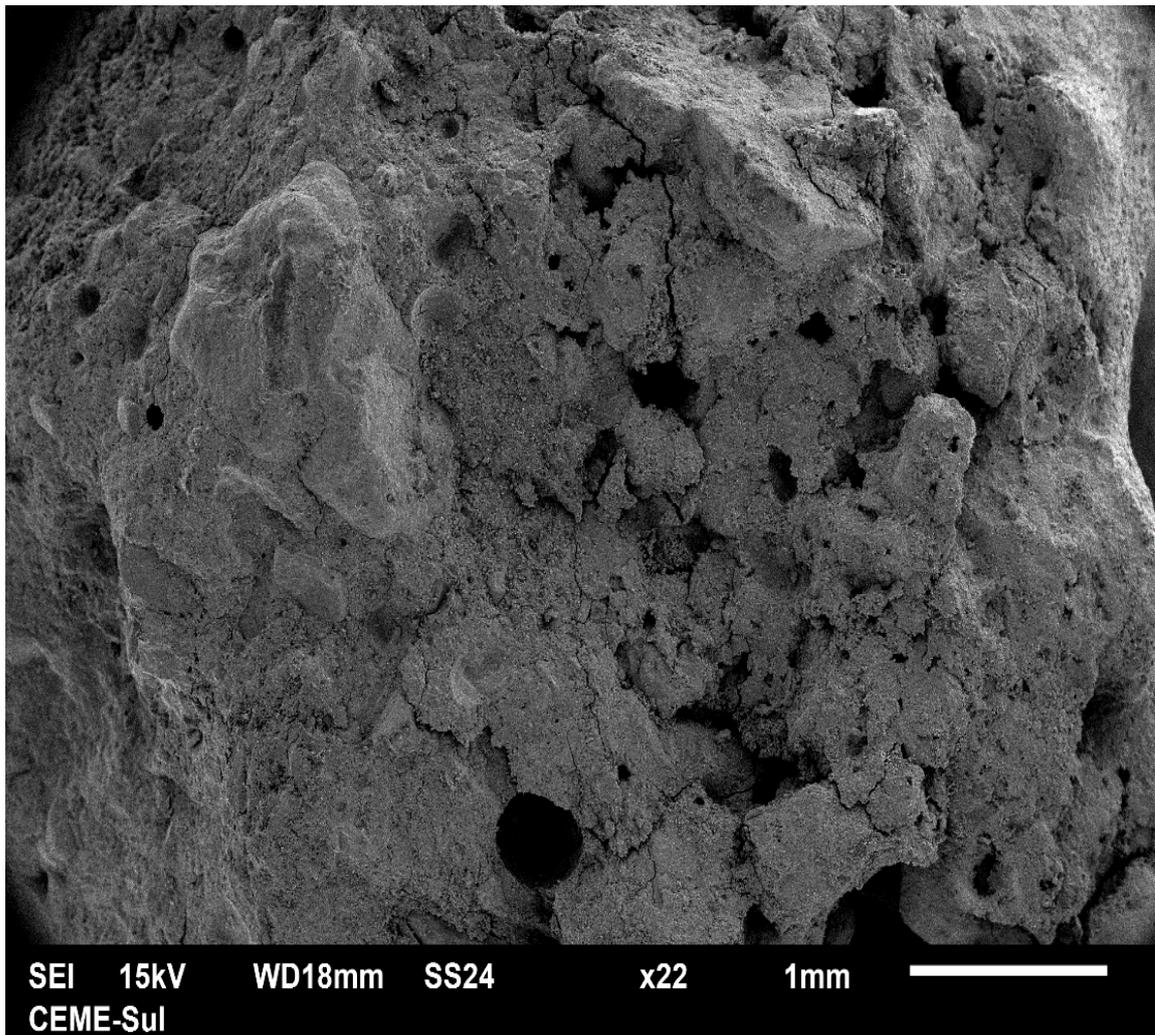
Fonte: Autor (2025).

Utilizando como base teóricas as NBR 16697 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015a), EN 197-1 (EUROPEAN STANDARD, 2011), Kosmatka e Wilson (2011) e Neville e Brooks (2013), é possível afirmar que a maioria dos elementos encontrados estão com percentuais aceitáveis. O MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são únicos com um valor um pouco acima, o que pode influenciar diretamente resistência mecânica e física, já que valores elevados de MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> podem causar expansão, fissuras, porosidade. Já CaO mesmo estando com uma percentagem aceitável caso não esteja hidratado pode influenciar na absorção de água.

#### 4.4 Análise microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As Figura 17, Figura 18 e Figura 19, destacam as imagens geradas através do MEV da superfície dos blocos com composição CRP, CRMC e CRM, respectivamente. O bloco CRP apresentou buracos, microfissuras, porosidade em algumas partes, como pode ser observado na Figura 17, o que pode indicar problemas no processo de mistura e deposição, como, tempo de mistura insuficiente e baixa compactação nos moldes. Um resultado semelhante ao encontrado no estudo de Nandal et al. (2022). Estas condições favorecem o aumento da absorção de água, menor resistência mecânica e aderência reduzida do material ligante (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016, 2021c).

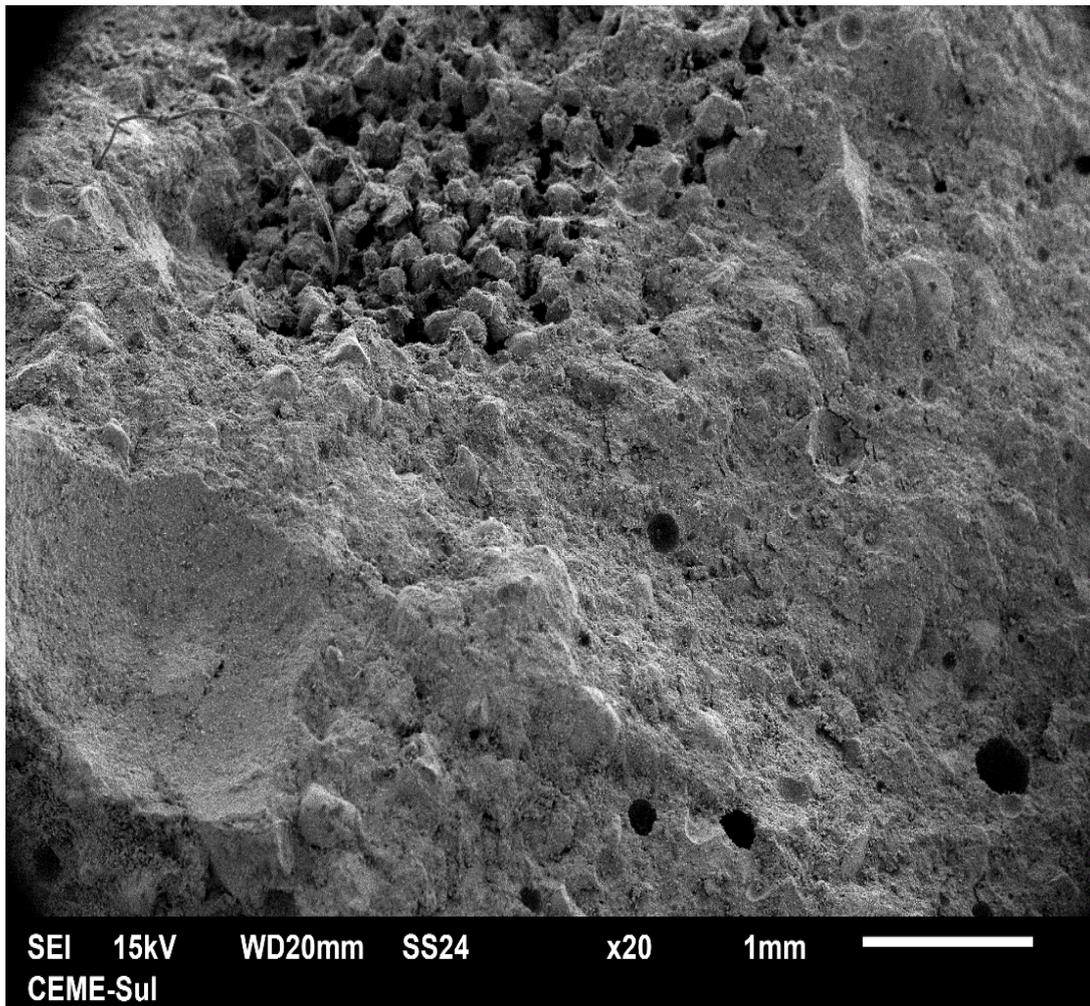
Figura 17 – Imagem de topo da fratura realizada em MEV de uma amostra CRP destacando buracos e fissuras



Fonte: Autor (2025).

A Figura 18, apresenta as imagens geradas através do MEV da superfície do bloco CRMC. A imagem mostra um grau de porosidade e irregularidade superficial, com estrutura heterogênea e falta de compactação, o que pode ocasionar alta absorção de água. Também apresenta partículas soltas, o que pode indicar baixa interação entre os agregados RCD, cimento e cinza volante, acarretando na diminuição da resistência mecânica, estudos anteriores como de Khankhaje et al. (2023) e Zhang et al. (2025), já tinham obtidos resultados parecidos, mesmo com alguns agregados do traço diferentes. No entanto, Ho e Huynh (2023), conseguiram resultados consideráveis ao definir o tempo de cura de no mínimo 120 dias.

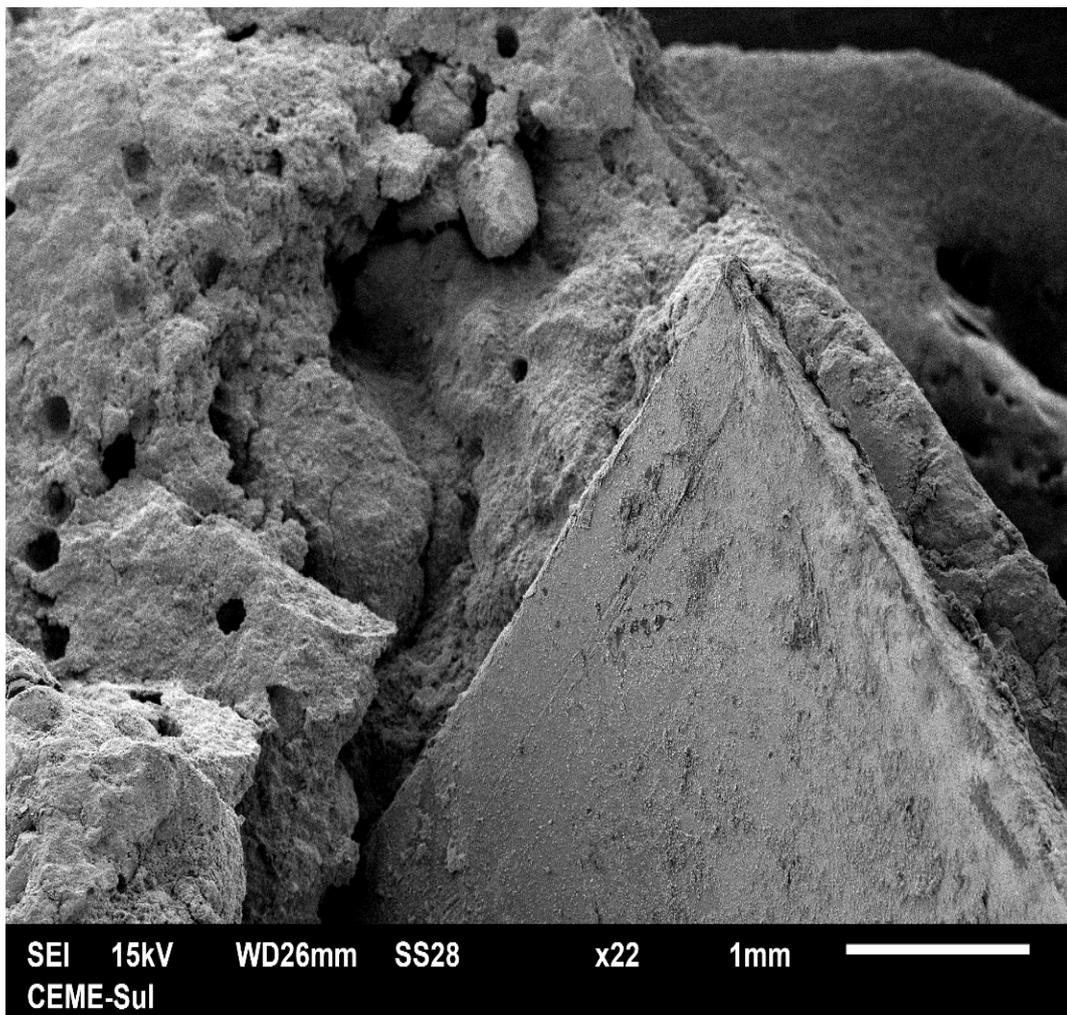
Figura 18 – Imagem de topo da fratura realizada em MEV para amostra de CRMC destacando a região porosa



Fonte: Autor (2025).

A Figura 19 destaca as imagens geradas através do MEV da superfície do bloco CRM, no intuito de apresentar a interação entre o concreto e a malha PET. Observa-se que o fio PET demonstrou boa ligação com o concreto, não gerando fissuras ou buracos relevantes nas suas extremidades. Essa boa ligação com o concreto ajuda na resistência mecânica, pois a aderência da malha ajuda a mantê-lo unido. Em alguns pontos expõe porosidade, o que era esperado já que sua composição é a mesma do CRP com o diferencial da adição da malha PET. O estudo de Revathi et al. (2023), obteve resultados positivos na resistência mecânica através da boa aderência entre PET em formato de fio com o concreto.

Figura 19 – Imagem de topo da fratura realizada em MEV para amostra de CRM na região da malha PET (região plana)



Fonte: Autor (2025).

#### 4.5 Resistência à compressão

Após submeter os blocos ao ensaio de compressão, obteve-se as resistências à compressão dos blocos em 7, 14 e 28 dias. A Tabela 11 e Figura 22 destacam os resultados dos ensaios. Os blocos CRM apresentam as maiores resistências, especialmente aos 28 dias de idade, o que demonstra melhora na resistência com o uso da malha PET, visto que os blocos CRP oriundos do mesmo traço, porém sem a instalação da malha, apresentou valores resistência menores em comparação ao bloco CRM, mesmo aos 28 dias. Já os blocos CRMC obtiveram os menores valores de resistência em comparação aos outros blocos. Outros estudos, como o de Mohammed e Karim (2023), Revathi et al. (2023) e Siddique, Khatib e Kaur (2008) que utilizaram o material PET, porém como substituto parcial de agregados, também

identificaram aumento na resistência à compressão. Já os blocos CRMC mesmo com a malha PET, obtiveram os valores mais baixos em relação a resistência, isto se dá pela substituição de 20% do cimento Portland por cinza volante, o que vai de encontro com os resultados encontrados por Khankhaje et al. (2023), no entanto, autores como Shehab, Eisa e Wahba (2016) e Kanthe, Deo e Murmu (2018), conseguiram aumentar a resistência, isto pode ter ocorrido, porque os mesmo utilizaram em seus estudos agregados naturais e não reciclados.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de resistência à compressão

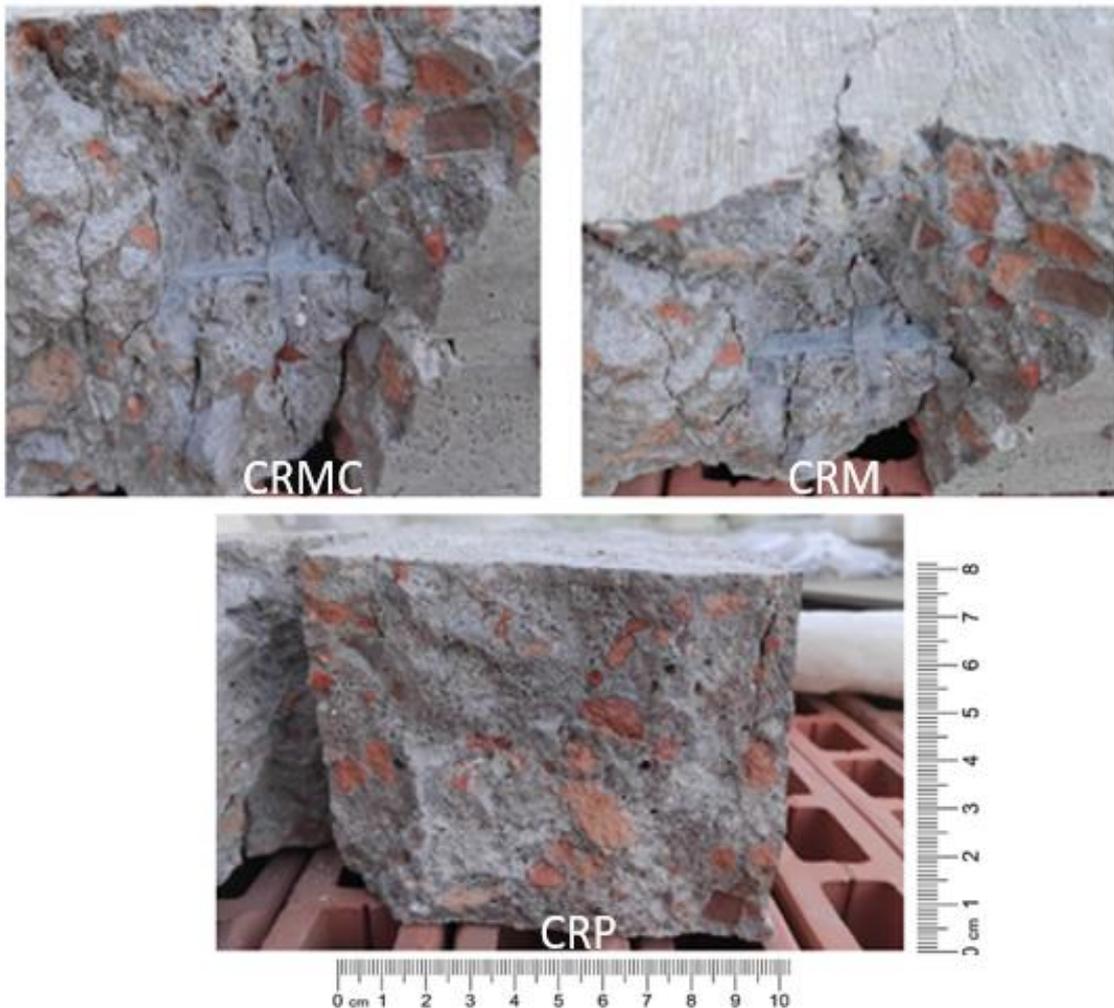
Idade (dias)	Composição		Medidas (mm)			Resistência			Média MPa		
			C	L	E	Ton	N	MPa			
7	1	CRM	200	100	86	7,78	77440	13,64	14,06		
	2	CRM	200	100	87	8,21	81922	14,43			
	3	CRM	200	100	90	7,97	80113	14,11			
	7	1	CRP	200	100	85	7,46	74072	13,05	13,57	
		2	CRP	200	100	85	8,49	84299	14,85		
		3	CRP	200	100	86	7,30	72662	12,80		
		7	1	CRMC	200	100	88	5,73	57316	10,10	10,35
			2	CRMC	200	100	88	5,38	53815	9,48	
			3	CRMC	200	100	87	6,52	65058	11,46	
14	1	CRM	200	100	88	9,05	90525	15,95	15,67		
	2	CRM	200	100	86	9,22	91774	16,17			
	3	CRM	200	100	90	8,41	84536	14,89			
	14	1	CRP	200	100	85	8,31	82512	14,54	14,28	
		2	CRP	200	100	85	8,71	86484	15,24		
		3	CRP	200	100	85	7,47	74171	13,07		
	14	1	CRMC	200	100	82	5,62	55389	9,76	10,24	
		2	CRMC	200	100	85	5,41	53717	9,46		
		3	CRMC	200	100	89	6,52	65378	11,52		
28	1	CRM	200	100	85	11,27	111902	19,72	17,44		
	2	CRM	200	100	86	9,41	93665	16,50			
	3	CRM	200	100	89	9,11	91349	16,09			
	28	1	CRP	200	100	85	9,59	95221	16,78	16,26	
		2	CRP	200	100	86	8,30	82616	14,55		
		3	CRP	200	100	85	9,97	98994	17,44		
	28	1	CRMC	200	100	83	7,08	69952	12,32	12,24	
		2	CRMC	200	100	81	6,39	62821	11,07		
		3	CRMC	200	100	89	7,55	75706	13,34		

Fonte: Autor (2025).

A Figura 20, apresenta mais algumas características dos blocos em relação a sua parte interior, observa-se que os blocos apresentam pouca porosidade e buracos, além de não possuírem nenhuma carie, isto demonstra boa aderência dos agregados entre si e com a malha. Diferente de resultados encontrado em por autores anteriores em seus trabalhos, Dawood, Al-Khazraji e Falih (2021), e Askar, Kamaki e Hassan

(2023), utilizaram o PET triturado ou em tiras como substituto parcial de um dos agregados, o que ocasiona caries, fissuras e heterogeneização em seus concretos.

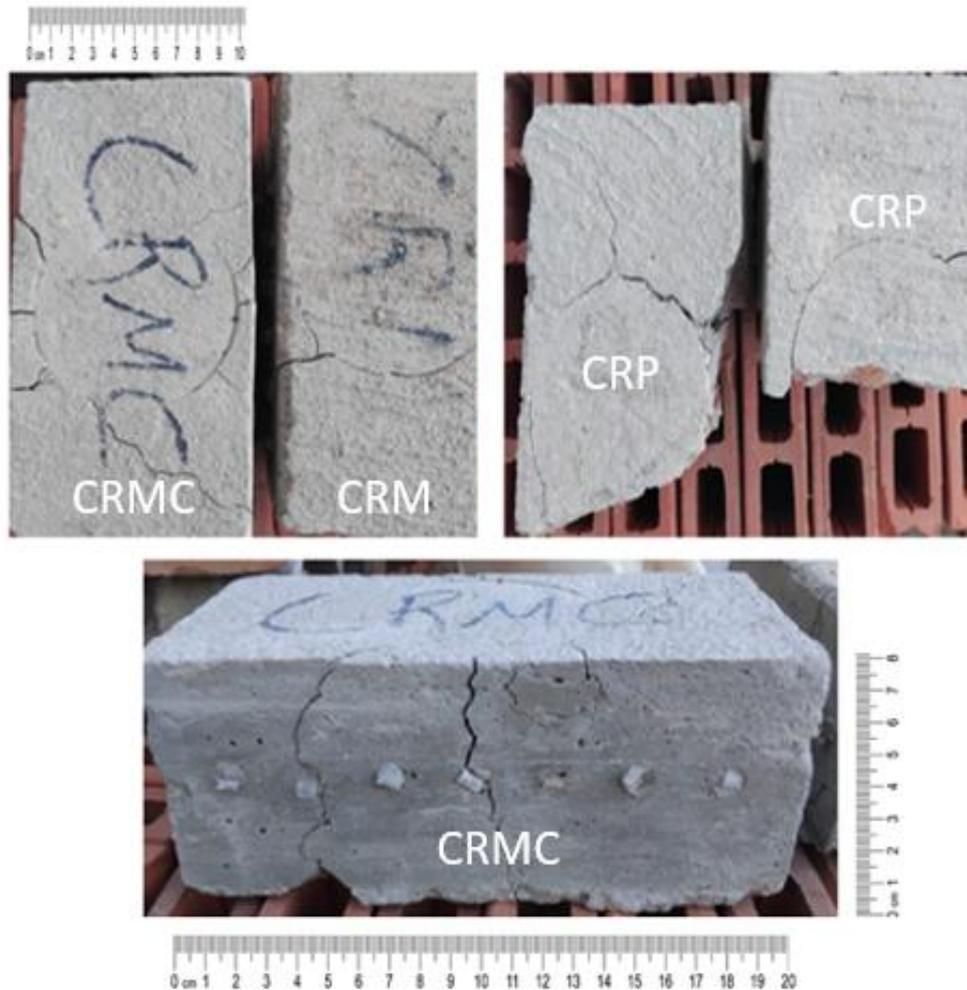
Figura 20 – Imagem da superfície dos blocos CRMC, CRM e CRP fraturados após o ensaio de compressão



Fonte: Autor (2025).

Outra característica identificada é que os blocos contendo a malha PET mantiveram sua forma original com apenas algumas fissuras, em contraste os blocos sem a presença da malha PET fragmentaram-se em diversos pedaços. Em vista disso, a malha PET além de auxiliar na resistência à compressão, ainda auxilia na conservação do bloco em seu estado original mesmo após sofrer grande força. A Figura 21 exemplifica estas informações.

Figura 21 – Blocos CRM, CRP e CRMC fraturados após o ensaio de compressão



Fonte: Autor (2025).

No entanto, mesmo após os 28 dias de tempo de cura, os blocos não alcançaram a resistência à compressão 35 MPa exigido pela NBR 9781. Diversos fatores podem ter influenciado para este resultado, como, a não uniformidade na espessura dos blocos, o que indica que os mesmos não foram compactados de forma eficaz nos moldes, motivado pela utilização de moldes com abertura na parte inferior, o que ocasionou no escape do concreto mole em alguns momentos. Pesquisas anteriores, como a de Day (1994) e Pan et al. (2021) salientam a importância do molde para a resistência mecânica do concreto.

A utilização de agregados 100% reciclado, também pode ter influenciado para a baixa resistência, principalmente pela relação água/cimento que é a proporção entre a massa da água e a massa do cimento. NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015b), determina 0,40 como a máxima relação

água/cimento para concreto com agregado normal para uma resistência acima de 35 MPa. Todavia, estudos como o de Katz (2003) e Rao, Jha e Misra (2007), descobriram que uma relação água/cimento acima de 0,6 pode aumentar equiparar a resistência do concreto reciclado com a do concreto convencional. Este estudo ao confeccionar o código de programação para definição do traço, optou por seguir os requisitos da NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015b). Os blocos ficaram fora do padrão de resistência à compressão exigidos pela NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), entretanto, os valores de resistência encontrados ficam dentro dos padrões exigidos pelas normas internacionais ASTM C90-24 (ASTM INTERNATIONAL, 2024a) e ASTM C140/140M-24 (ASTM INTERNATIONAL, 2024b) dos Estados Unidos, que tratam de blocos de concreto voltado para alvenaria. A ASTM C90-24 (ASTM INTERNATIONAL, 2024a) determina uma resistência à compressão mínima de 13,1 MPa para a média de 3 amostras, já para amostra individual o valor é de 11,0 MPa. Desta forma, os blocos CRM e CRP enquadram-se nos padrões de resistência à compressão das normas internacionais para o uso em alvenaria. Vale destacar que no Brasil não existe uma norma voltada para uso de blocos sólidos na alvenaria, apenas para blocos vazados.

#### **4.6 Resistência à tração na flexão à três pontos**

A Tabela 12 apresenta os resultados dos ensaios, como na resistência à compressão os blocos CRM obtiveram os melhores resultados e a composição CRMC os piores. Os ensaios seguiram os requisitos exigidos pelas NBR 12142 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010a) e NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). As normas brasileiras não definem um valor mínimo para a resistência à tração na flexão, apenas apresentam um cálculo empírico que relaciona a resistência à compressão com a resistência à tração na flexão, porém os resultados podem ter variações. Desta maneira optou-se por utilizar a norma internacional SANS 1058 (SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD, 2012) da África do Sul, que já define um valor de 2,2 MPa para tráfego leve e 2,8 MPa para tráfego pesado. Portanto as três composições de blocos valores acima do exigidos pela norma para tráfego pesado. O estudo de Junkes et al. (2024) também utilizou a SANS 1058 (SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD, 2012) e obteve resultados semelhantes, obtendo valores acima do exigidos em apenas 14 dias de tempo de cura.

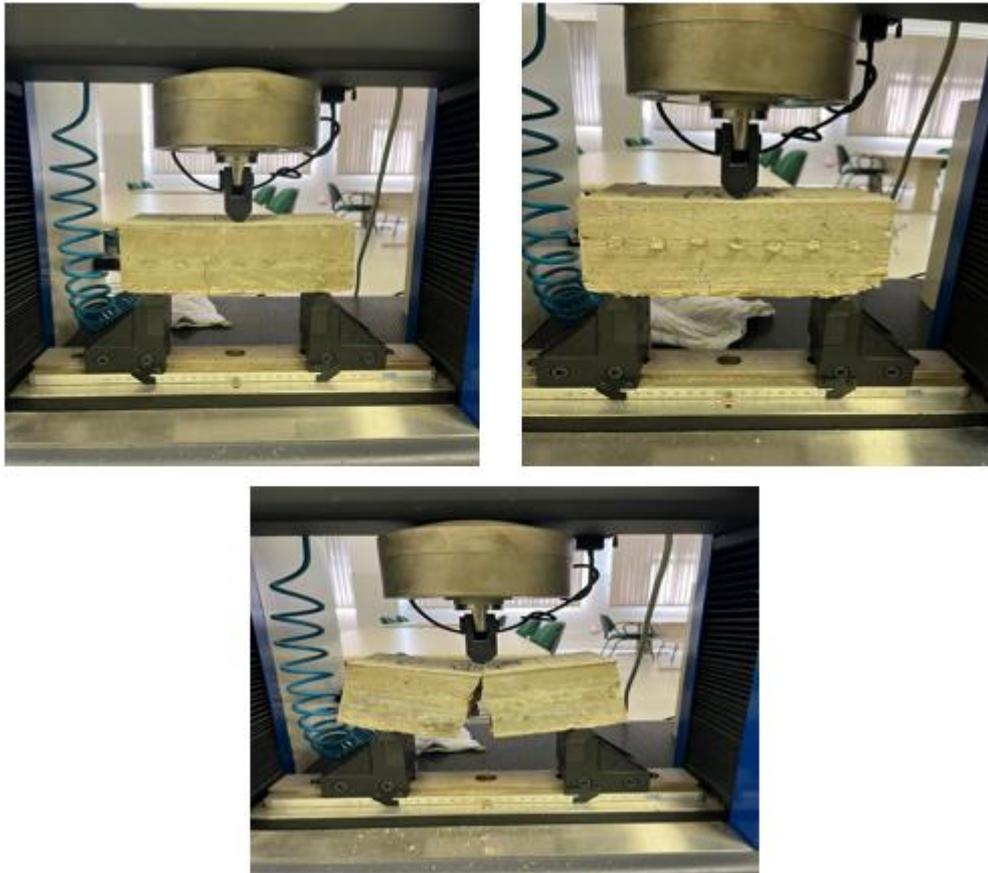
Tabela 12 – Resultados do ensaio de tração na flexão à três pontos

CP	Composição	Resistência Ensaada (Mpa)	Média MPa
1	CRM	4,87	5,21
2	CRM	5,59	
3	CRM	5,17	
1	CRP	3,39	4,16
2	CRP	4,52	
3	CRP	4,58	
1	CRMC	2,74	2,86
2	CRMC	2,65	
3	CRMC	3,20	

Fonte: Autor (2025).

Igualmente aos ensaios de compressão, os blocos contendo a malha não partiram, mantendo-se em suas formas originais mesmo após ensaio de tração na flexão, como pode-se observar na Figura 22.

Figura 22 – Blocos no ensaio de tração na flexão após o rompimento



Fonte: Autor (2025).

#### 4.7 Absorção de água

A tabela 13 descreve os resultados do ensaio de absorção, as composições CRM e CRP tiveram a média de absorção semelhante, já os blocos CRMC absorveram aproximadamente 1% de água a mais do que os demais. Isto indica que os 20% de cinza volante que substituíram o cimento Portland parcialmente, gerou uma maior absorção de água. Resultado semelhante ao encontrado na pesquisa de Uygunoglu et al. (2012) no qual a composição do traço que utilizou resíduos de concreto, quanto maior a porcentagem de cinza volante maior era a porcentagem de absorção, em 20% de cinza volante a pesquisa encontrou valores próximos de 10% de absorção de absorção de água para seus blocos.

De acordo com a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), os blocos não podem ter valores individuais de absorção maiores que 7%, portanto, os blocos ensaiados estão fora dos padrões exigidos pela norma. Ferriz-Papi e Thomas (2020), já tinham identificado em seu estudo o aumento da absorção na utilização do RCD, já que o mesmo deixa o concreto mais poroso. Seus resultados foram aproximadamente 10% de absorção, valor semelhante à dos blocos CRM e CRP. Já Bravo et al. (2015), conclui no seu estudo que o aumento da absorção está diretamente ligado à relação água/cimento. Outra opção para diminuir a porosidade, e conseqüentemente a absorção de água do concreto a base de RCD, é indicada pelo estudo de Al-Waked et al. (2022), que utilizou técnicas para tratar o RCD como, tratamento de carbonatação acelerada, tratamento de água de cal cíclica combinada com carbonatação acelerada, revestimento com pasta de cimento-sílica ativa, entre outros. Todos esses tratamentos obtiveram resultados positivos na melhora do impacto e absorção de água do RCD como agregado.

Tabela 13 – Resultados do ensaio de absorção

CP	Composição	Saturado (g)	Seco (g)	Absorção (%)	Média Absorção (%)
CP1	CRM	3634,1	3316,6	10	10,66
CP2	CRM	3619,6	3298,4	10	
CP3	CRM	3547,0	3167,5	12	
CP1	CRP	3451,6	3167,5	9	10,33
CP2	CRP	3435,4	3107,3	11	
CP3	CRP	3419,0	3084,3	11	
CP1	CRMC	3469,8	3136,7	11	11,33
CP2	CRMC	3433,6	3090,3	11	
CP3	CRMC	3387,6	3011,6	12	

Fonte: Autor (2025).

Mesmo fora do padrão de absorção de água exigido pela NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) para aplicação em pavimentação, os blocos, enquadram-se nos padrões exigidos por duas normas internacionais, a ASTM C90-24 (ASTM INTERNATIONAL, 2024a) e ASTM C140/140M-24 (ASTM INTERNATIONAL, 2024b) dos Estados Unidos, que determinam porcentagens inferiores a 17,14% de absorção média e 19,05 para absorção individual para concreto leve; 13,04% de absorção média e 14,78% absorção individual para concreto médio; e 10,4% de absorção média e 12% de absorção individual para concreto normal. Desta forma, os resultados dos ensaios de absorção indicam que os blocos se enquadram nos padrões de absorção de água das normas internacionais para o uso em alvenaria.

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHO FUTURO

### 5.1 Conclusão

A dissertação teve como objetivo a fabricação de blocos intertravados sustentáveis, provenientes do concreto reciclado que utilizou como agregado miúdo e gráudo 100% de RCD, cinza volante como substituto parcial do cimento Portland e malha PET como reforço estrutural. Foi feito o uso da linguagem de programação em *Python* para aprendizagem de máquina, como forma de definir o traço otimizado e as dimensões da malha.

A aprendizagem de máquina, apresentou-se como uma alternativa que facilita na definição do traço, diminuindo tempo e experimentos. O seu uso, facilita na definição do traço otimizado, através da utilização da aprendizagem de máquina para realizar a regressão e previsão da resistência à compressão do concreto.

Os blocos CRM apresentaram boa durabilidade após os ensaios, obtendo valores máximos de resistência à compressão de 19,79 MPa aos 28 dias de idade, valor superior ao encontrado nos blocos CRP, no qual obteve como valor máximo 17,44 MPa aos 28 dias de idade, o que indica que a malha PET aumento a resistência dos blocos onde foi instalada. Já os blocos CRMC, foram os que obtiveram os menores valores de resistência à compressão obtendo como valor máximo de resistência de 13,34 aos 28 dias de idade, o que vai de encontro com o traço definido pela programação em *Python*, que não previa a utilização da cinza volante. Esta diferença de valores de resistência entre os blocos também foi observada no ensaio de tração na flexão à três pontos, no qual, o bloco CRM obteve valores de 5,21 MPa, o bloco CRP obteve valores de 4,16 MPa e os blocos CRMC obteve valores de 2,86 MPa, reafirmando o aumento de resistência causado pela malha PET. Já o ensaio de absorção de água, apresentou valores próximos para os blocos CRM e CRP, sendo de 10,66% para o CRM e 10,33% para o CRP, valores diferentes dos 11,33% obtidos pelo CRMC.

Os resultados dos ensaios da resistência à compressão e absorção de água, indicaram que os blocos ficaram abaixo dos 35MPa determinado pela NBR 9781. Porém os valores encontrados ficam dentro dos exigidos pelas normas internacionais ASTM C90-24 e ASTM C140/140M-24 dos Estados Unidos, podendo assim, serem aplicados como blocos para alvenaria. A resistência à tração na flexão à três pontos ficaram dentro dos padrões internacionais exigidos pela norma SANS 1058 da África

do Sul, uma vez que as normas brasileiras não definem um valor mínimo este ensaio em blocos maciços.

Por fim, o estudo abre caminho para eventuais pesquisas, já que indicou a viabilidade sustentável de substituir 100% os agregados naturais do concreto, utilizando como ferramenta a aprendizagem de máquina para definir o traço otimizado, o que diminui o tempo e o número de experimentos. Outro ponto positivo, foi a fabricação da malha PET, que gerou um aumento na resistência dos blocos em que foi instalada, apresentando-se como uma alternativa sustentável para a utilização de garrafas PET.

## **5.2 Recomendação para trabalho futuro**

Uma das principais dificuldades do estudo foi o processo de preparo do RCD, onde o mesmo precisou ser coletado, separado, britado e peneirado, estas etapas foram demoradas e não otimizadas, já que foram realizadas de forma manual e artesanal.

Portanto, uma ideia de um trabalho futuro, é a fabricação de um equipamento automatizado com peças reutilizadas de baixo custo, que englobe todas as etapas de separação, britagem e peneiramento do RCD, e a misturado do concreto, otimizando assim a fabricação produtos provenientes do concreto reciclado nos canteiros de obras.

## REFERÊNCIAS

AHMAD, S. et al. Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review. **Results in Engineering**, v. 22, p. 102079, jun. 2024.

AL MARTINI, S. et al. Development and strength prediction of sustainable concrete having binary and ternary cementitious blends and incorporating recycled aggregates from demolished UAE buildings: Experimental and machine learning-based studies. **Construction and Building Materials**, v. 380, p. 131278, maio 2023.

AL-WAKED, Q. et al. Enhancing the aggregate impact value and water absorption of demolition waste coarse aggregates with various treatment methods. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01267, dez. 2022.

ANWAR, A. et al. Predicting the compressive strength of cellulose nanofibers reinforced concrete using regression machine learning models. **Cogent Engineering**, v. 10, n. 1, p. 2225278, 31 dez. 2023.

ARUNACHALAM, K. P.; HENDERSON, J. H. Experimental Study on Mechanical Strength of Vibro-Compacted Interlocking Concrete Blocks Using Image Processing and Microstructural Analysis. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, v. 47, n. 6, p. 3571–3589, dez. 2023.

ASKAR, M. K.; AL-KAMAKI, Y. S. S.; HASSAN, A. Utilizing Polyethylene Terephthalate PET in Concrete: A Review. **Polymers**, v. 15, n. 15, p. 3320, 7 ago. 2023.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681 - Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480 - Aço destinado a armadura para estruturas de concreto armado - Especificações**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto-Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142 - Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 3310-1: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010b.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653 - Materiais Pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1: Aditivos químicos para concreto**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16886 - Concreto - Amostragem de concreto fresco**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, RJASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16915: Agregados-Amostragem**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7212 - Concreto dosado em central - Preparo, fornecimento e controle**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7481 - Tela de aço soldada nervurada para armadura de concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C90-24a - Standard Specification for Dry-Cast Loadbearing Concrete Masonry Units**. West ConshohockenASTM INTERNATIONAL, 2024a.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C140/C140M-24a - Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units**. West ConshohockenASTM INTERNATIONAL, 2024b.

AWOYERA, P. O. et al. Water absorption, strength and microscale properties of interlocking concrete blocks made with plastic fibre and ceramic aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00677, dez. 2021.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. (ELWOOD R. **Resistência dos materiais**. 3. ed ed. Rio de Janeiro (RJ): Makron Books, 2008.

- BEHL, V. et al. Characterization of physico-chemical and functional properties of fly ash concrete mix. **Materials Today: Proceedings**, v. 50, p. 941–945, 2022.
- BILIR, T. et al. Influence of Different Types of Wastes on Mechanical and Durability Properties of Interlocking Concrete Block Paving (ICBP): A Review. **Sustainability**, v. 14, n. 7, p. 3733, 22 mar. 2022.
- BRAVO, M. et al. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 357–369, fev. 2015.
- DAMODHARA REDDY, B. et al. Strength and durability of concrete by partial replacement of cement by fly ash and fine aggregates by granite dust. **Materials Today: Proceedings**, p. S2214785323014979, abr. 2023.
- DAWOOD, A. O.; AL-KHAZRAJI, H.; FALIH, R. S. Physical and mechanical properties of concrete containing PET wastes as a partial replacement for fine aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, p. e00482, jun. 2021.
- DAY, R. The Effect of Mold Size and Mold Material on Compressive Strength Measurement Using Concrete Cylinders. **Cement, Concrete, and Aggregates**, v. 16, n. 2, p. 159–166, 1 dez. 1994.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ESGOTOS DE BAGÉ. **Qualidade da Água**. Disponível em: <[https://daeb.com.br/pagina/166\\_Qualidade-da-Agua.html](https://daeb.com.br/pagina/166_Qualidade-da-Agua.html)>. Acesso em: 19 nov. 2024.
- DODAMPEGAMA, S. et al. Revolutionizing construction and demolition waste sorting: Insights from artificial intelligence and robotic applications. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 202, p. 107375, mar. 2024.
- EUROPEAN STANDARD. **EN 197-1 - Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements**. BelgradoEUROPEAN STANDARD, 2011.
- FAYED, S. et al. Improving bond performance of ribbed steel bars embedded in recycled aggregate concrete using steel mesh fabric confinement. **Construction and Building Materials**, v. 369, p. 130452, mar. 2023.
- FERRIZ-PAPI, J. A.; THOMAS, S. Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in the Production of Concrete Blocks. **Journal of Construction Materials**, v. 2, n. 1, 25 out. 2020.
- FERRONATO, N. et al. Construction and demolition waste recycling in developing cities: management and cost analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 9, p. 24377–24397, 7 nov. 2022.
- GHANEM, H. et al. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Recycled Plastic Mesh. **Buildings**, v. 12, n. 12, p. 2085, 28 nov. 2022.
- HO, L. S.; HUYNH, T.-P. Long-term mechanical properties and durability of high-strength concrete containing high-volume local fly ash as a partial cement substitution. **Results in Engineering**, v. 18, p. 101113, jun. 2023.
- INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 527 - Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles**. GenebraPart 1: General principles, 2019.

JUNKES, V. H. et al. Environmentally friendly concrete block production: valorization of civil construction and chemical industry waste. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 12, p. 17788–17803, 4 jan. 2024.

JUPYTER, P. **Project Jupyter**. Califórnia, 2024. Disponível em: <<https://jupyter.org>>. Acesso em: 10 out. 2024

KAGGLE. **Concrete data, EDA & MODEL acc= 97%**. Disponível em: <<https://kaggle.com/code/navinmaurya/concrete-data-eda-model-acc-97>>. Acesso em: 10 out. 2024.

KANTHE, V. N.; DEO, S. V.; MURMU, M. Effect of fly ash and rice husk ash on strength and durability of binary and ternary blend cement mortar. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 19, n. 8, p. 963–970, dez. 2018.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 5, p. 703–711, maio 2003.

KHAMBRA, G.; SHUKLA, P. Novel machine learning applications on fly ash based concrete: An overview. **Materials Today: Proceedings**, v. 80, p. 3411–3417, 2023.

KHANKHAJE, E. et al. Properties of pervious concrete incorporating fly ash as partial replacement of cement: A review. **Developments in the Built Environment**, v. 14, p. 100130, abr. 2023.

KIM, J.; KIM, N. Recycling Waste Paver Blocks in the Manufacture of New Concrete Paver Blocks and Building Bricks. **Applied Sciences**, v. 12, n. 21, p. 10970, 29 out. 2022.

KOREAN STANDARDS & CERTIFICATION. **KS F 4419 - Interlocking concrete blocks for sidewalks**. EumseongKOREAN STANDARDS & CERTIFICATION, 2022.

KOSMATKA, S. H.; WILSON, M. L. **Design and control of concrete mixtures: the guide to applications, methods, and materials**. 15. Aufl ed. Skokie, Ill: Portland Cement Association, 2011.

MAKEITFROM.COM. **Polyethylene Terephthalate (PET, PETE)**. Disponível em: <<https://www.makeitfrom.com/material-properties/Polyethylene-Terephthalate-PET-PETE/>>. Acesso em: 3 nov. 2024.

MATERIAL PROPERTIES. **PET – Material Table – Applications – Price**. Disponível em: <<https://material-properties.org/pet-properties-application-price/>>. Acesso em: 3 nov. 2024.

MATWEB. **Overview of materials for Polyethylene Terephthalate (PET), Unreinforced**. Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=a696bdcdf6f41dd98f8eec3599eaa20&ckck=1>>. Acesso em: 3 nov. 2024.

MEENA, A.; SINGH, N.; SINGH, S. P. High-volume fly ash Self Consolidating Concrete with coal bottom ash and recycled concrete aggregates: Fresh, mechanical and microstructural properties. **Journal of Building Engineering**, v. 63, p. 105447, jan. 2023.

MIA, M. M. M. et al. **Environmental and Socio-economic Impacts of River Sand and Gravel Mining: A Review**. In Review, 19 set. 2024. Disponível em: <<https://www.researchsquare.com/article/rs-4942545/v1>>. Acesso em: 6 nov. 2024

MOHAMMADI GOLAFSHANI, E. et al. Sustainable mix design of recycled aggregate concrete using artificial intelligence. **Journal of Cleaner Production**, v. 442, p. 140994, fev. 2024.

MOHAMMED, A. A.; KARIM, S. H. Impact strength and mechanical properties of high strength concrete containing PET waste fiber. **Journal of Building Engineering**, v. 68, p. 106195, jun. 2023.

NANDAL, M. et al. Morphological and physical characterization of construction and demolition waste. **Materials Today: Proceedings**, p. S2214785322068481, nov. 2022.

NEERAJA, PG.; UNNIKRISHNAN, S.; VARGHESE, A. A comprehensive review of partial replacement of cement in concrete. **Materials Today: Proceedings**, p. S2214785323026925, maio 2023.

NEVILLE, A. M. **Concrete properties**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. [s.l.] Bookman, 2013.

NIKOOKAR, M. et al. Past, current, and future re-use of recycled non-potable water sources in concrete applications to reduce freshwater consumption- a review. **Cleaner Materials**, v. 9, p. 100203, set. 2023.

OKUR, H.; ERTURAÇ, M. K.; NICOLL, K. Geomorphic changes and socio-environmental impacts of recent sand mining in the Sakarya River, NW Turkey. **The Anthropocene Review**, p. 20530196231218480, 22 dez. 2023.

OPENAI. **ChatGPT**. São Francisco, 2024. Disponível em: <<https://chat.openai.com/>>. Acesso em: 22 out. 2024

OUYANG, K. et al. Influence of pre-treatment methods for recycled concrete aggregate on the performance of recycled concrete: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 188, p. 106717, jan. 2023.

PAL, A. et al. Machine learning models for predicting compressive strength of fiber-reinforced concrete containing waste rubber and recycled aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 423, p. 138673, out. 2023.

PAN, Y. et al. Effect of polymer and conventional molds on the aesthetical surface quality of concretes. **Construction and Building Materials**, v. 302, p. 124375, out. 2021.

PENG, Y.; UNLUER, C. Modeling the mechanical properties of recycled aggregate concrete using hybrid machine learning algorithms. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 190, p. 106812, mar. 2023.

POLYMER ACADEMY. **Polyethylene terephthalate (PET)**. Disponível em: <<https://polymeracademy.com/polyethylene-terephthalate-pet/>>. Acesso em: 3 nov. 2024.

POULIKAKOS, L. D.; KAKAR, M. R.; PIAO, Z. Urban mining for low-noise urban roads towards more sustainability in the urban environment. **Road Materials and Pavement Design**, v. 24, n. sup1, p. 309–320, 25 abr. 2023.

PURCHASE, C. K. et al. Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Lessons, Challenges, and Benefits. **Materials**, v. 15, n. 1, p. 76, 23 dez. 2021.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 1, p. 71–81, mar. 2007.

RATHNAYAKA, M. et al. Machine learning approaches to predict compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete: A comprehensive review. **Construction and Building Materials**, v. 419, p. 135519, mar. 2024.

REVATHI, S. et al. Behaviour of concrete with PET bottles as fibers & silica fume as partial replacement of cement. **Materials Today: Proceedings**, p. S2214785323016486, abr. 2023.

SAI TRIVEDI, S. et al. A comprehensive review towards sustainable approaches on the processing and treatment of construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 393, p. 132125, ago. 2023.

SATHIPARAN, N.; JEYANANTHAN, P.; SUBRAMANIAM, D. N. Surface response regression and machine learning techniques to predict the characteristics of pervious concrete using non-destructive measurement: Ultrasonic pulse velocity and electrical resistivity. **Measurement**, v. 225, p. 114006, fev. 2024.

SERRANTI, S.; BONIFAZI, G. Detection and classification of asbestos and other contaminants in C&DW by advanced technologies. Em: **Advances in Construction and Demolition Waste Recycling**. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 407–437.

SHEHAB, H. K.; EISA, A. S.; WAHBA, A. M. Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 560–565, nov. 2016.

SIDDIQUE, R.; KHATIB, J.; KAUR, I. Use of recycled plastic in concrete: A review. **Waste Management**, v. 28, n. 10, p. 1835–1852, 2008.

SIKA, B. **Sika® Concreto Forte: aditivo plastificante para concreto**. Disponível em: <<https://bra.sika.com/pt/construcao/tecnologia-do-concreto/aditivos-para-concreto-e-argamassa/sika-concreto-forte.html>>. Acesso em: 10 out. 2024.

SILVA, W. et al. Assessment of Interlocking Concrete Block Pavement with By-Products and Comparison with an Asphalt Pavement: A Review. **Applied Sciences**, v. 13, n. 10, p. 5846, 9 maio 2023.

SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD. **SANS 1058 - Concrete Paving Blocks**. Pretoria SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD, 2012.

TANG, Q. et al. The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103807, nov. 2020.

TESTECON ENGENHARIA. **Ensaios tecnológicos de Artefatos de Cimento: Ensaio Paver – Peça de concreto para pavimentação**. Disponível em: <<https://www.testecon.com.br/servicos/ensaios-tecnologicos/>>. Acesso em: 14 nov. 2024.

UYGUNOĞLU, T. et al. The effect of fly ash content and types of aggregates on the properties of pre-fabricated concrete interlocking blocks (PCIBs). **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 180–187, maio 2012.

VOTORANTIM. **Cimentos Especiais**. Disponível em: <<https://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/obras-especiais/>>. Acesso em: 14 nov. 2024.

WAKJIRA, T. G.; KUTTY, A. A.; ALAM, M. S. A novel framework for developing environmentally sustainable and cost-effective ultra-high-performance concrete (UHPC) using advanced machine learning and multi-objective optimization techniques. **Construction and Building Materials**, v. 416, p. 135114, fev. 2024.

WANG, X.; CHIN, C. S.; XIA, J. Study on the properties variation of recycled concrete paving block containing multiple waste materials. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, p. e01803, jul. 2023.

ZHANG, C. et al. Upgrading construction and demolition waste management from downcycling to recycling in the Netherlands. **Journal of Cleaner Production**, v. 266, p. 121718, set. 2020.

ZHANG, D. et al. Role of fly ash as fine aggregate replacement in the properties of concrete: A comprehensive study of rheological, mechanical, and microstructural properties. **Construction and Building Materials**, v. 458, p. 139599, jan. 2025.

ZHANG, K. et al. How construction and demolition waste management has addressed sustainable development goals: Exploring academic and industrial trends. **Journal of Environmental Management**, v. 345, p. 118823, nov. 2023.

## APÊNDICE A

### ARTIGO DE REVISÃO



REVISTA OBSERVATORIO DE LA ECONOMIA LATINOAMERICANA

ISSN: 1696-8352

#### **Use of data science in the development of concrete based on construction and demolition waste: a brazilian view**

#### **Uso da ciência de dados no desenvolvimento de concreto com base em resíduos de construção e demolição: uma visão brasileira**

#### **Uso de la ciencia de datos en el desarrollo del hormigón a partir de residuos de construcción y demolición: una mirada brasileña**

DOI: 10.55905/oe1v22n10-071

Receipt of originals: 08/23/2024

Acceptance for publication: 09/13/2024

#### **Luis Gabriel Morales Lima de Freitas**

Graduated in Production Engineering

Institution: Programa de Pós-graduação em Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pampa (PPCEM - UNIPAMPA)

Address: Bagé, Rio Grande do Sul, Brasil  
E-mail: luisfreitas.aluno@unipampa.edu.br

#### **Alexandre Ferreira Galio**

PhD in Mining, Metallurgical and Materials Engineering

Institution: Programa de Pós-graduação em Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pampa (PPCEM - UNIPAMPA)

Address: Bagé, Rio Grande do Sul, Brasil  
E-mail: alexandregalio@unipampa.edu.br

#### **ABSTRACT**

The growth in urbanization and construction activity has led to a growing increase in construction and demolition waste and the extraction of natural resources, energy, and CO<sub>2</sub>. The projection is that these figures will expand even more in the coming years, making it worrying for a sustainable balance in construction, especially in the manufacture of concrete, which is one of the most consumed materials globally. In this context, recycled concrete has emerged as a sustainable alternative to traditional concrete. Concepts such as urban mining combined with data mining and machine learning techniques are emerging as alternatives that serve as a basis for producing recycled concrete with the required qualities. Therefore, this study aims to map the existing research in the areas of materials and technology, focusing on the recycling and reuse of construction and demolition waste (CDW) and the manufacture of recycled concrete. Surveying this research will provide guidance for future research and encourage more sustainable standards in the construction sector.

**Keywords:** Construction, Sustainability, Machine Learning, Data Mining, Urban Mining, Recycled Concrete.

### RESUMO

O crescimento da urbanização e da atividade construtiva, acarreta no crescente aumento de resíduos de construção e demolição, extração de recursos naturais, energia e emissões de CO<sub>2</sub>. A projeção é que esses valores irão expandir ainda mais nos próximos anos, tornando-se preocupante para o equilíbrio sustentável na construção civil, principalmente na fabricação de concreto, um dos materiais mais consumidos globalmente. Diante deste contexto, o concreto reciclado surge como uma alternativa sustentável para substituir o concreto tradicional. Conceito como a mineração urbana, aliada a técnicas de data mining e machine learning, emergem como alternativas que servem de base para a produção do concreto reciclado dentro das qualidades exigidas. Portanto, este estudo tem como objetivo mapear pesquisas existentes nas áreas de materiais e tecnologia, voltadas para a reciclagem e reutilização do RCD e a fabricação do concreto reciclado. O levantamento dessas pesquisas, proporciona nortear novas pesquisas, além de incentivar padrões mais sustentáveis no setor da construção civil.

**Palavras-chave:** Construção Civil, Sustentabilidade, Aprendizagem de Máquina, Mineração de Dados, Mineração Urbana, Concreto Reciclado.

### RESUMEN

El crecimiento de la urbanización y la actividad constructora conlleva un aumento creciente de los residuos de construcción y demolición, de la extracción de recursos naturales, de la energía y de las emisiones de CO<sub>2</sub>. La proyección es que estos valores se expandan aún más en los próximos años, convirtiéndose en una preocupación por el equilibrio sustentable en la construcción civil, especialmente en la fabricación de concreto, uno de los materiales más consumidos a nivel global. Ante este contexto, el hormigón reciclado surge como una alternativa sostenible para sustituir el hormigón tradicional. Conceptos como la minería urbana, combinados con técnicas de minería de datos y aprendizaje automático, surgen como alternativas que sirven de base para la producción de hormigón reciclado con las calidades requeridas. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo mapear las investigaciones existentes en las áreas de materiales y tecnología, enfocadas en el reciclaje y reutilización de RCD y la fabricación de hormigón reciclado. El resultado de estas encuestas proporciona orientación para nuevas investigaciones, además de fomentar estándares más sostenibles en el sector de la construcción.

**Palabras clave:** Construcción Civil, Sostenibilidad, Aprendizaje Automático, Minería de Datos, Minería Urbana, Hormigón Reciclado.

## 1 INTRODUCTION

The increase in construction and renovation around the world results in the generation of a large amount of CDW and high consumption of energy, drinking water, and minerals (Li et al., 2023b), in addition to high rates of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from the cement industry (Rosa et al., 2022). With increasing urbanization and population growth, it is predicted that in the coming decades this amount of resource capture and generation of construction and demolition waste will grow even more, undermining sustainability in the construction industry (Nilimaa, 2023), mainly in the manufacture of concrete, as it is the most widely used material in construction (Sharma et al., 2023), and one of the most consumed substances globally (Suescum-Morales et al., 2021), considering that its basic raw material is composed of Portland cement, water, stone, and sand, thus forming a monolithic block (Neville, 2015).

The European Union is estimated to have generated 2,153 million tons of waste in 2020, 37.5% of which is construction and demolition waste (Eurostat, 2023). In comparison, the United States generated 500 million tons of CDW, while China produced a total of 3.3 billion tons (Tang et al., 2020a). The construction or building renovation sector also generates huge amounts of CDW, which are generated at all stages of a building's life cycle, whether it is housing or infrastructure. The indicators point that the production of CDW in Brazil in 2020, was approximately 106.6 million tons. Consequently, a number of social and environmental problems have arisen, such as the irregular disposal and illegal extraction of minerals (Abrecon, 2020).

Therefore, urban mining (recycling) has emerged as a sustainable alternative whose function is to handle products and materials that are already obsolete, transforming them into new resources, making it possible to transform CDW into raw material for the manufacture of concrete, with the advantage of reducing the number of resources extracted and reusing and disposing of CDW, generating sustainable development for concrete structures (Zhang et al., 2022). Another advantage of reuse is the reduction in the cost of concrete. When waste is converted into fine or coarse aggregates, it can replace

sand, cement and stone, giving rise to the development of recycled concrete technology (Nedeljković et al., 2021).

The manufacture of recycled concrete has a number of socio-economic and socio-environmental advantages, as its raw material is made up of waste that is discarded from the construction and demolition of buildings and structures, such as concrete, stone, bricks, ceramics, and mortar, among other common building materials (Ouyang et al., 2023). It has emerged as a sustainable alternative for handling CDW, thereby relieving the need for extraction and disposal (Wang et al., 2020), since cities are constantly growing, many old structures are replaced by new ones all the time, this leads to a greater amount of waste all over the planet (Rašković et al., 2020).

Therefore, knowing how to define the right amount of each aggregate and its particle size is of paramount importance for the quality of recycled concrete (Kul et al., 2023). A component that does not come from the CDW, such as pet bottles, can also be added (Awoyera; Adesina, 2020). Data science, through its techniques, data mining (CASTRO, 2016) and machine learning (Izbicki, 2020), appear as an alternative since there is no need for laboratory molding or testing, becoming easily accessible (Umar; Shafiq; Ahmad, 2021). In the last decade, these methods have been increasingly applied to explore, analyze, and transform databases (Wickham, 2019), planning, automating analytical models, and creating forecasts (Yin et al., 2022). Python has emerged as the main alternative for creating code snippets as it is the main programming language for data science, making it possible to visualize, manipulate, and analyze data statistically and graphically (Joshi; Tiwari, 2023).

To provide a basis for the development of scientific research, data and information from studies that have already been conducted should be used (Paul; Criado, 2020). This paper aims to conduct a bibliographical review of studies in the field of materials and technology, focusing on the manufacture of recycled concrete. This mapping of the available literature makes it possible to organize, integrate, and evaluate (Koller, 2014) what is being researched worldwide on this subject.

## 2 THEORETICAL FRAMEWORK

### 2.1 GENERATION OF CONSTRUCTION WASTE

Construction has been around since the dawn of civilization to the present day, constantly evolving and being essential for human development (Queiroz, 2019). One of these developments is the treatment of solid waste due to the current high levels of CDW production. The European Union (Eurostat, 2023), together with the United States, China and India (Tang et al., 2020b), are the main generators of CDW on the planet. Figure 1 highlights the countries that generated more than 18 million tons of CDW in 2020.

Figure 1 - Countries that generated more than 18 million tons of CDW in 2020

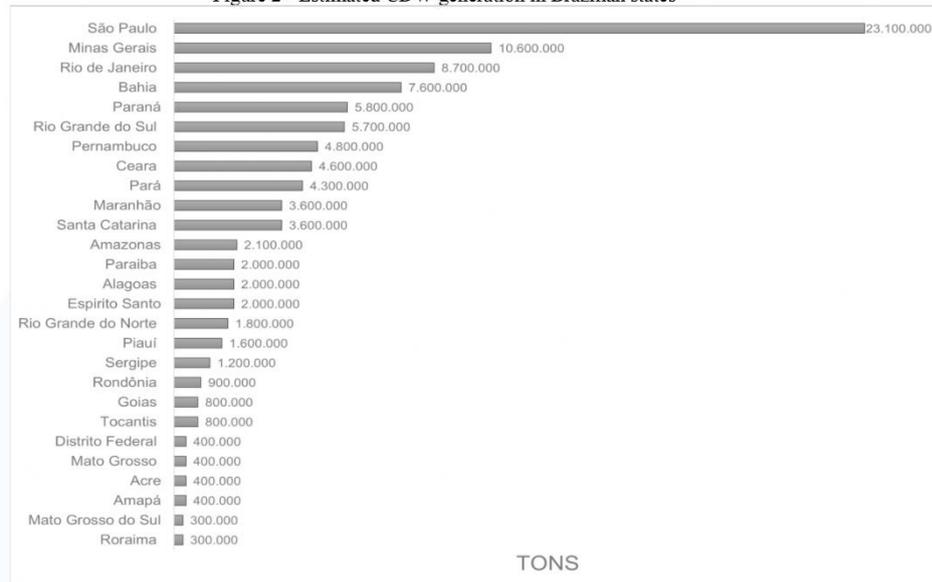


Source: (Bao; Lee; Lu, 2020); (Jain, 2021); (Wu et al., 2023); (Colorado; Muñoz; Neves Monteiro, 2022).

In Brazil, the production of CDW is also high, resulting in a median of 500 kg per capita, as various elements influence the generation of waste, such as high population density in various places, obsolete buildings that need to be restored, and masonry being the main form of construction in the country, among others. Figure 2 shows the generation of waste in different states of Brazil (Abrecon, 2020).



Figure 2 - Estimated CDW generation in Brazilian states



Source: (ABRECON, 2020).

With the data and information on the quantities produced worldwide, highlighting the main generating countries, there is a need to establish a management system for this waste (Colorado; Muñoz; Neves Monteiro, 2022), which will make construction sites more sustainable, prioritizing the reuse and control of CDW disposal (Ghaffar; Burman; Braimah, 2020).

## 2.2 SUSTAINABILITY ON CONSTRUCTION SITES

Sustainability is a system that aims to balance economic needs with environmental conservation (Ruggerio, 2021). In the construction industry, there is a high consumption of minerals such as sand, limestone, clay and stones, as well as gas emissions from cement production (Mohammadi Golafshani et al., 2023). Therefore, reducing this consumption is essential in order to have more sustainable buildings reducing social and environmental impacts (ISO, 2011). The main obstacle to achieving this sustainable balance is finding



the ideal point at which the sector's constant growth is accompanied by sustainability (Araújo; Pereira Carneiro; Palha, 2020).

On the construction site, "green" solutions are already present in Brazil. Conama Resolution 307, of July 5th, 2002 (BRASIL, 2002), emphasizes that construction sites must be aligned with the handling and management of produced waste, disposing it in the correct way, or possibly dispatching it of CDW recycling. Each country established its own guidelines for managing CDW, including collection, reporting, and recycling systems (Alsheyab, 2022). The composition of this construction and demolition (C &D) waste covers a wide variety of different materials, which are classified as A, B, C, D, and E waste, according to NBR 15114 (ABNT, 2004). Table 1 presents this classification.

Table 1 - Classification of construction waste

Class A	Reusable or recyclable waste as aggregates: Construction, demolition, renovation, and repair of paving and other infrastructure works, including earthworks; Construction, demolition, renovation, and repair of buildings: ceramic components (bricks, blocks, tiles, cladding panels, etc.), mortar, and concrete; Manufacturing and/or demolishing precast concrete parts (blocks, pipes, kerbs, etc.) produced at construction sites.
Class B	Recyclable waste for other uses, such as plastics, paper, cardboard, metals, glass, wood and others.
Class C	Waste for which no economically viable technologies or applications have been developed to enable recycling/recovery, such as gypsum products.
Class D	Hazardous waste from the construction process, such as paints, solvents, and oils, or contaminated waste from demolition, renovation, and repair of radiology clinics, industrial facilities, and others

Source: (ABNT, 2004).

Being able to establish a sustainable management plan on construction sites, which defines the most appropriate handling for CDW according to its characteristics and classification, is essential when searching for "green" solutions (Kabirifar et al., 2020), therefore, urban mining for construction provides this circular method, since its concepts are geared towards recycling and reuse (Kakkos et al., 2020).

### 2.2.1 Urban Mining in Civil Construction

Urban mining is the process of reacquiring value from post-consumer products, materials and energy in order to reuse them in the manufacture of new products (Xavier, 2021), thus eliminating the need for a high rate of extraction of natural resources, reducing the price of manufacturing and improving waste management (Xavier et al., 2021), thus being one of the procedures for the transition to the circular economy (Aldebei; Dombi, 2021). In the construction industry, the practice of urban mining remains symbolic, as reconciling reuse and recycling with project deadlines, recovery times, and skills becomes a challenge at construction sites (Arora et al., 2020).

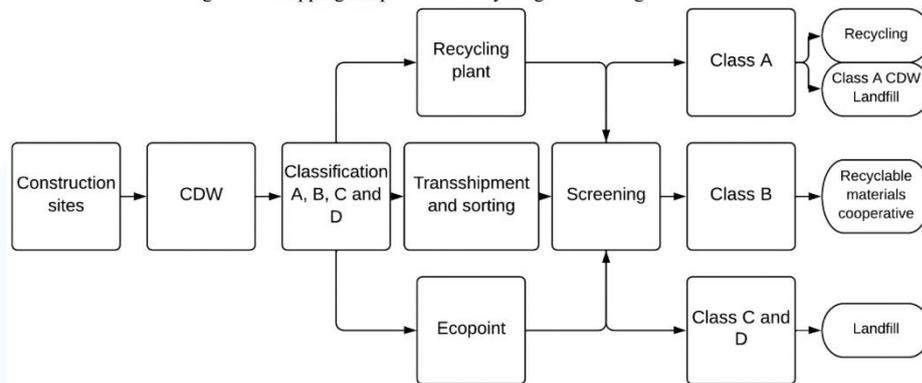
Although urban mining offers advantages in terms of environmental performance compared to CDW, some scenarios should be considered, such as evaluating recycling in relation to available resources and climate impacts, thus avoiding exchanging one problem for another (Mostert et al., 2020), therefore, an analysis using the life cycle assessment (LCA) technique is necessary to evaluate the environmental panoramas and potential consequences (Menegatti et al., 2022). Thus, CDW recycling and reusing becomes more reliable in relation to the environmental impacts it can cause, according to NBR ISO 14040 and NBR ISO 14044 (ABNT, 2014a); (ABNT, 2014b).

### 2.2.2 Recycling and Reuse of CDW

As mentioned above, the demand for reduction in the volume of CDW is always steady (Wouterszoon Jansen et al., 2020), the main alternatives are reuse and recycling (Kabirifar et al., 2020), these alternatives are not only beneficial for reduction, but also economically (Jain; Singhal; Pandey, 2020). In addition to the construction industry, which is the generator and consumer of waste (Zhang et al., 2022), other sectors, such as earthmoving and roads, also use CDW (OFFICE, 2021). However, care must be taken when characterizing the composition of the CDW, the most important components of which are concrete, mortar and red ceramics (De Andrade Salgado; De Andrade Silva, 2022), thus ensuring a high degree of CDW selection (Rheude; Bucher; Röder, 2022), it

is essential to separate the waste according to the classification of NBR 15114 (ABNT, 2004). Figure 3 shows the mapping of CDW recycling and reuse processes.

Figure 3 - Mapping the process of recycling and reusing CDW



Source: (Rosado; Pentecado, 2019).

Therefore, recycling and reusing CDW requires less energy than virgin raw materials and reduces displacement and related interference (Umar; Shafiq; Ahmad, 2021). However, this process can be carried out on construction sites (BAO; LU, 2021). This is an advantageous method, as it reduces transportation costs, the disposal of irregular waste and increases the proportion of building materials that are reused and recycled in the construction or renovation itself (Wang; Li; Yang, 2020).

There are several applications for CDW (Reis et al., 2021), such as the production of concrete, mortar, ceramics, etc. (Garg; Shrivastava, 2023); (Ibrahim et al., 2023), ecological concrete blocks (Abraham et al., 2022), geopolymer syntheses (Gu et al., 2023), geotechnical applications (Ok et al., 2020), landfill cover layers (Wu; Ren; Liu, 2024), and asphalt and roads (Pourkhorshidi et al., 2020). It can be seen that concrete is used in countless applications, as it is of fundamental importance to global construction (Belaïd, 2022), for being a versatile material and easy to manufacture (Ray et al., 2021). As a result, concrete made from recycled concrete becomes the main alternative for waste application, as it is the main consumer of natural raw materials in the construction

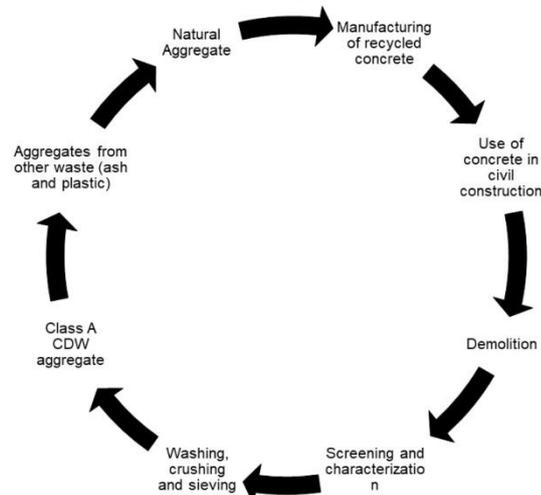
industry, is easy to manufacture, and can be produced on the construction site itself (Makul et al., 2021).

### 2.3 RECYCLED CONCRETE

Meeting the growing demand for concrete not only involves the massive extraction of gravel and sand but also the significant consumption of fossil resources in the production of cement (Adesina, 2020). In this sense, recycled concrete is seen as an important alternative for more sustainable and economic growth on construction sites (Xie et al., 2023), since the aggregates in traditional concrete are partly replaced by CDW (Yu et al., 2021), as well as being able to add aggregates that don't come from CDW, such as plastic from pet bottles, thus offering another recycling option (Patil; Waysal; Dholakiya, 2020), being applied as an additive or as a replacement material in the concrete mix (Guo et al., 2023) and fly ash, which is a by-product of coal-fired power plants (Ghanim et al., 2023) and are used as a partial substitute for cement (Khankhaje et al., 2023), playing a crucial role in achieving a more materially efficient society (Marsh; Velenturf; Bernal, 2022). Concrete recycling is defined as “an operation that reintegrates concrete waste back into the economy for its original purpose, thus avoiding disposal in landfills and warehouses” (Zhang et al., 2023). The circular process of recycled concrete is shown in Figure 4.



Figure 4 - Circular economy of recycled concrete



Source: (Colangelo et al., 2020); (Cantero et al., 2020); (ABNT, 2021); (Askar; Al-Kamaki; Hassan, 2023); (Kalinowska-Wichrowska; Pawluczuk; Bołtryk, 2020); (Bun et al., 2022).

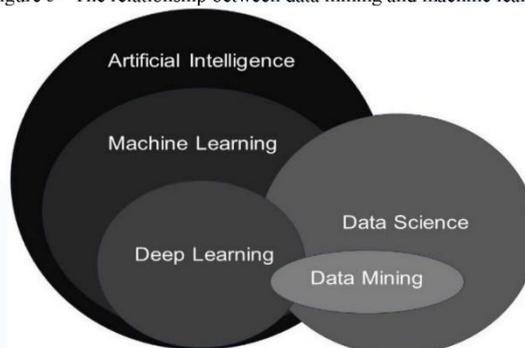
As well as being a product, recycled concrete can also be used as a raw material for other products (Zajac et al., 2023), such as building blocks (Zhao et al., 2020), curbs and paving blocks (Juan-Valdés et al., 2021). However, some care must be taken, especially with regard to the quality and strength of recycled concrete (Ma et al., 2022). In this way, data mining together with machine learning (Guzmán-Torres et al., 2021), are emerging as an option to define the ideal quantities of each aggregate and their particle sizes through database-based programming (Al Martini et al., 2023), thus providing the ideal recycled concrete mix according to quality and resistance (Dzięcioł; Sas, 2023), required by NBR 15116 and NBR 12655 (ABNT, 2021); (ABNT, 2022).

### 2.3.1 Data Mining and Machine Learning in the Manufacture of Recycled Concrete

Data science is the study of guidelines and methodologies for the analysis, transformation, validation and interpretation of data, seeking to generate meaning for sets of information (Igual; Seguí, 2017);(Escovedo, 2020); (Filatro, 2020). On the other hand,

data mining and machine learning are specific techniques within data science and are applied to the process of cleansing, preparing, and analyzing data (Brown, 2014) and the creation of autonomous learning systems or the improvement of performance according to the data entered (Janiesch; Zschech; Heinrich, 2021). Consequently, one complements the other, and all the data that will be used by machine learning need to be collected, cleansed, and analyzed before the system is developed (Sud; Erdogmus; Kadry, 2020); (Nosratabadi et al., 2020). To show the link between the different procedures mentioned above, Figure 5 connects the different disciplines related to machine learning and data mining (Kulin et al., 2021). Using the two procedures together, it is possible to form an autonomous prediction system to define the ideal mix according to the required mechanical parameters and the particle size of the recycled concrete aggregate, thus reducing the number of analyses and experiments (Ahmad et al., 2021);(QI et al., 2023).

Figure 5 - The relationship between data mining and machine learning



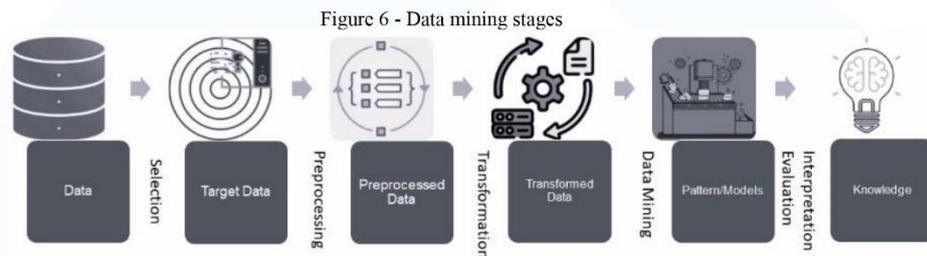
Source: (Kulin et al., 2021); (Ye; Ma, 2023).

### 2.3.2 Data Mining and Machine Learning in the Development of a Recycled Concrete Prediction Model

The first step in developing an autonomous system for predicting recycled concrete is to use data mining to obtain useful information and collect it from a set of databases (Goldschmidt, 2015), extracting patterns through statistical analysis in order to

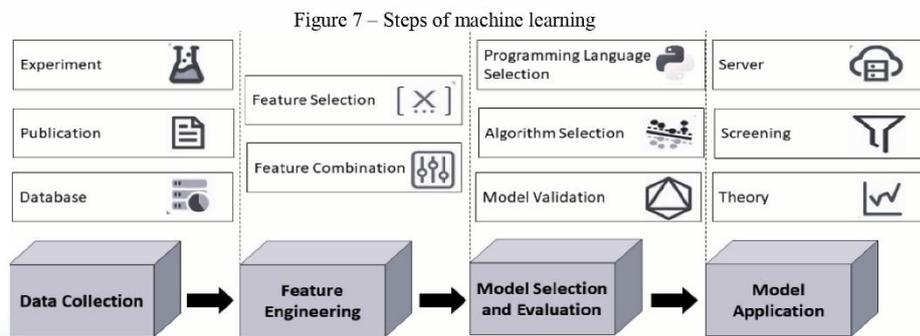


create a model in relation to the mechanical parameters and grain size of the concrete aggregates (Zounemat-Kermani et al., 2020), from data obtained from public and private domain repositories, such as previous studies and online platforms, such as Kaggle, which focuses on data science (Twyman; Murić; Zheng, 2023). Figure 6 summarizes the data mining stages.



Source: (Yang et al., 2020); (Mamasidiqova Ismigul Abdulatif Qizi, 2023).

After processing the data, a standard is set for recycled concrete aggregates, making it possible to draw up a table with the most relevant data and information (Yağci, 2022), enabling the creation of a predictive model through machine learning (LI et al., 2023a), which will use a programming language as a tool for implementing the algorithms, python being the main option currently used for this purpose (Shanmugarajeshwari; Ilayaraja, 2023), and methods (Peng; Unluer, 2023), such as evolutionary algorithms, artificial neural networks, support vector machines and decision trees (Endzhievskaya et al., 2023), which, when applied, have the function of training and evaluating this autonomous support model, so that it defines the ideal quantities of recycled concrete aggregates, according to the mechanical parameters (Yuan et al., 2022) and its grain size (Saiz Martínez et al., 2023). Figure 7 shows the steps involved in machine learning.



Source: (Xu et al., 2023); (Upadhyaya et al., 2023).

### 3 RESEARCH METHODOLOGY

In conducting research, it is essential to gather information from renowned databases and international journals in the relevant thematic areas (Ocaña-Fernández; Fuster-Guillén, 2021). The present study conducted a comprehensive and selective search to gather the most relevant information, providing an understanding of the current landscape of C&D waste management. Google Scholar was used as a research tool to find data repositories such as Elsevier, Wiley, and MDPI, which were the main sources of investigation for the study (Nyathi et al., 2022), as they are prestigious and globally indexed databases, containing a large number of reliable and high-quality journals (Patalas-Maliszewska; Łosyk, 2024). The process of searching, investigating, and collecting was carried out by applying the following research methods:

**Systematic literature review:** databases and journals were identified, analyzed and interpreted carefully, certifying the quality and relevance of the information collected (Quin et al., 2024);

**Bibliometric analysis:** trends and patterns in the present literature were detected, considering number of citations, co-authorship network and keywords, pointing out the most relevant researchers and research (Lim; Kumar, 2024);

Analysis of secondary data: creation of an empirical database according to secondary data, such as that from governmental and non-governmental organizations (Kelly; Martin-Peters; Farber, 2024).

Using these methods collaboratively, it provided a comprehensive and reliable investigation to understand the current CDW scenario across the globe, generating a database and concrete information.

#### 4 CONCLUSIONS

The construction industry faces several challenges in terms of waste and CO<sub>2</sub> generation, and there is a clear need to adopt a more sustainable behavior. Recycled concrete has emerged as a promising alternative to mitigate these effects, providing a solution to the constantly growing number of CDW and reducing dependence on finite natural resources. Incorporating engineering and data science knowledge generates an interdisciplinary approach that highlights the potential for innovation in sustainable solutions in the construction industry. Techniques such as data mining and machine learning, combined with the Python programming language, reinforce this innovation and assist and optimize the manufacture of recycled concrete, which symbolizes a relevant stage in enabling sustainable development, stimulating innovation regarding the treatment and handling of CDW, and establishing socio-economic and environmental benefits. Therefore, a literature review is necessary to provide a theoretical basis for future research. Integrating and evaluating the existing research has guided this focus.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank the Brazilian Federal Agency for Support and Evaluation of Graduate Education (CAPES) - Fund Code 001 and the Foundation for Research Support of Rio Grande do Sul State (Fapergs TO 21/2551-0000518-1).

## REFERENCES

- ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 15114: Solid construction waste – Recycling areas – Guidelines for design, implementation and operation.** Rio de Janeiro, RJASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004.
- ABNT, A. B. D. N. T. **NBR ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and structure.** Rio de Janeiro, RJASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014a.
- ABNT, A. B. D. N. T. **NBR ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment — Requirements and guidelines.** Rio de Janeiro, RJASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014b.
- ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 15116: Recycled aggregates for use in Portland cement mortars and concretes – Requirements and test methods.** Rio de Janeiro, RJASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021.
- ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 12655: Portland cement concrete — Preparation, control, receipt and acceptance — Procedure.** Rio de Janeiro, RJASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022.
- ABRAHAM, J. J. et al. An experimental study on concrete block using construction demolition waste and life cycle cost analysis. **Materials Today: Proceedings**, v. 60, p. 1320–1324, 2022.
- ABRECON, A. B. P. A. R. D. R. D. C. C. E. D. **Sector Survey 2020.** São Paulo, SP: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO, 2020. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/categoria-de-documentos/pesquisa>>.
- ADESINA, A. Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. **Environmental Challenges**, v. 1, p. 100004, dez. 2020.
- AHMAD, W. et al. Application of Advanced Machine Learning Approaches to Predict the Compressive Strength of Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials. **Materials**, v. 14, n. 19, p. 5762, 2 out. 2021.
- AL MARTINI, S. et al. Development and strength prediction of sustainable concrete having binary and ternary cementitious blends and incorporating recycled aggregates from demolished UAE buildings: Experimental and machine learning-based studies. **Construction and Building Materials**, v. 380, p. 131278, maio 2023.
- ALDEBEI, F.; DOMBI, M. Mining the Built Environment: Telling the Story of Urban Mining. **Buildings**, v. 11, n. 9, p. 388, 1 set. 2021.
- ALSHEYAB, M. A. T. Recycling of construction and demolition waste and its impact on climate change and sustainable development. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. 3, p. 2129–2138, mar. 2022.

ARAÚJO, A. G.; PEREIRA CARNEIRO, A. M.; PALHA, R. P. Sustainable construction management: A systematic review of the literature with meta-analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120350, maio 2020.

ARORA, M. et al. Buildings and the circular economy: Estimating urban mining, recovery and reuse potential of building components. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 154, p. 104581, mar. 2020.

ASKAR, M. K.; AL-KAMAKI, Y. S. S.; HASSAN, A. Utilizing Polyethylene Terephthalate PET in Concrete: A Review. **Polymers**, v. 15, n. 15, p. 3320, 7 ago. 2023.

AWOYERA, P. O.; ADESINA, A. Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, p. e00330, jun. 2020.

BAO, Z.; LEE, W. M. W.; LU, W. Implementing on-site construction waste recycling in Hong Kong: Barriers and facilitators. **Science of The Total Environment**, v. 747, p. 141091, dez. 2020.

BAO, Z.; LU, W. A decision-support framework for planning construction waste recycling: A case study of Shenzhen, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 309, p. 127449, ago. 2021.

BELAÏD, F. How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges? **Resources, Conservation & Recycling Advances**, v. 15, p. 200084, nov. 2022.

BRASIL. 307. Resolution Conama 307. . 2002, Sec. 1, p. 95–96.

BROWN, M. S. **Data mining for dummies: learn to: understand key data mining concepts and best practices; create a data model and test its validity; interpret results and communicate your findings; make a business cases for investing in data mining**. Hoboken, NJ: Wiley, 2014.

BUN, P. et al. Concrete made of 100% recycled materials - Feasibility study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, p. 106199, maio 2022.

CANTERO, B. et al. Mechanical behaviour of structural concrete with ground recycled concrete cement and mixed recycled aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 122913, dez. 2020.

CASTRO, L. N. **Introduction to data mining: basic concepts, algorithms and applications**. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2016.

COLANGELO, F. et al. Comparative LCA of concrete with recycled aggregates: a circular economy mindset in Europe. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 9, p. 1790–1804, set. 2020.

COLORADO, H. A.; MUÑOZ, A.; NEVES MONTEIRO, S. Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Case Study of Colombia. **Sustainability**, v. 14, n. 12, p. 7225, 13 jun. 2022.

DE ANDRADE SALGADO, F.; DE ANDRADE SILVA, F. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 52, p. 104452, jul. 2022.

DZIEŃCIOŁ, J.; SAS, W. Perspective on the Application of Machine Learning Algorithms for Flow Parameter Estimation in Recycled Concrete Aggregate. **Materials**, v. 16, n. 4, p. 1500, 10 fev. 2023.

ENDZHEVSKAYA, I. G. et al. Machine learning methods in assessing the effect of mixture composition on the physical and mechanical characteristics of road concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 76, p. 107248, out. 2023.

ESCOVEDO, T. **Introduction to Data Science: Machine Learning algorithms and analysis methods**. [s.l.] Casa do Código, 2020.

EUROSTAT, S. E. **Waste statistics, 2020. Luxembourg: Publications Office of the European Union**. Luxemburgo: [s.n.]. Disponível em: <[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics#Total\\_waste\\_generation](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation)>. Acesso em: 15 abr. 2024.

FILATRO, A. C. **Data Science in Education: in-person, distance learning and corporate**. 1. ed. São Paulo, SP: SaraivaUni, 2020.

GARG, N.; SHRIVASTAVA, S. A review on utilization of recycled concrete aggregates (RCA) and ceramic fines in mortar application. **Materials Today: Proceedings**, v. 73, p. 64–73, 2023.

GHAFFAR, S. H.; BURMAN, M.; BRAIMAH, N. Pathways to circular construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118710, jan. 2020.

GHANIM, A. A. J. et al. Experimental investigation of industrial wastes in concrete: Mechanical and microstructural evaluation of pumice powder and Fly Ash in concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, p. e01999, jul. 2023.

GOLDSCHMIDT, R. **Data mining: concepts, techniques, algorithms, guidelines and applications**. [s.l.] Elsevier, 2015.

GU, F. et al. Synthesis of geopolymer using alkaline activation of building-related construction and demolition wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 420, p. 138335, set. 2023.

GUO, Y.-C. et al. A review on the influence of recycled plastic aggregate on the engineering properties of concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 79, p. 107787, nov. 2023.

GUZMÁN-TORRES, J. A. et al. Data Science and Machine Learning Technique for Predicting Electrical Resistivity in Recycled Concrete with Nopal as Addition. **Advanced Engineering Forum**, v. 40, p. 43–62, 27 abr. 2021.

IBRAHIM, M. et al. An overview of factors influencing the properties of concrete incorporating construction and demolition wastes. **Construction and Building Materials**, v. 367, p. 130307, fev. 2023.

IGUAL, L.; SEGUÍ, S. **Introduction to Data Science: A Python Approach to Concepts, Techniques and Applications**. 1st ed. 2017 ed. Cham: Springer International Publishing: Imprint: Springer, 2017.

ISO, I. **ISO 21929-1: sustainability in building construction—Sustainability indicators—Part 1: Framework for the development of indicators for buildings**. Switzerland INTERNATIONAL STANDARD, 2011.

IZBICKI, R. **Machine Learning: A Statistical Approach**. [s.l.] Rafael Izbicki, 2020.

JAIN, M. S. A mini review on generation, handling, and initiatives to tackle construction and demolition waste in India. **Environmental Technology & Innovation**, v. 22, p. 101490, maio 2021.

JAIN, S.; SINGHAL, S.; PANDEY, S. Environmental life cycle assessment of construction and demolition waste recycling: A case of urban India. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, p. 104642, abr. 2020.

JANIESCH, C.; ZSCHECH, P.; HEINRICH, K. Machine learning and deep learning. **Electronic Markets**, v. 31, n. 3, p. 685–695, set. 2021.

JOSHI, A.; TIWARI, H. An Overview of Python Libraries for Data Science. **Journal of Engineering Technology and Applied Physics**, v. 5, n. 2, p. 85–90, 15 set. 2023.

JUAN-VALDÉS, A. et al. Recycled Precast Concrete Kerbs and Paving Blocks, a Technically Viable Option for Footways. **Materials**, v. 14, n. 22, p. 7007, 19 nov. 2021.

KABIRIFAR, K. et al. Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121265, ago. 2020.

KAKKOS, E. et al. Towards Urban Mining—Estimating the Potential Environmental Benefits by Applying an Alternative Construction Practice. A Case Study from Switzerland. **Sustainability**, v. 12, n. 12, p. 5041, 19 jun. 2020.

KALINOWSKA-WICHROWSKA, K.; PAWLUCZUK, E.; BÓLTRYK, M. Waste-free technology for recycling concrete rubble. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117407, fev. 2020.

KELLY, M. M.; MARTIN-PETERS, T.; FARBER, J. S. Secondary Data Analysis: Using existing data to answer new questions. **Journal of Pediatric Health Care**, p. S0891524524000531, mar. 2024.

KHANKHAJE, E. et al. Properties of pervious concrete incorporating fly ash as partial replacement of cement: A review. **Developments in the Built Environment**, v. 14, p. 100130, abr. 2023.

KOLLER, S. H. **Scientific production manual**. Porto Alegre: Penso, 2014.

KUL, A. et al. Characterization and life cycle assessment of geopolymer mortars with masonry units and recycled concrete aggregates assorted from construction and demolition waste. **Journal of Building Engineering**, v. 78, p. 107546, nov. 2023.

KULIN, M. et al. A Survey on Machine Learning-Based Performance Improvement of Wireless Networks: PHY, MAC and Network Layer. **Electronics**, v. 10, n. 3, p. 318, 29 jan. 2021.

LI, D. et al. Machine Learning-Based Method for Predicting Compressive Strength of Concrete. **Processes**, v. 11, n. 2, p. 390, 27 jan. 2023a.

LI, P. et al. Hydration of Portland cement with seawater toward concrete sustainability: Phase evolution and thermodynamic modelling. **Cement and Concrete Composites**, v. 138, p. 105007, abr. 2023b.

LIM, W. M.; KUMAR, S. Guidelines for interpreting the results of bibliometric analysis: A sensemaking approach. **Global Business and Organizational Excellence**, v. 43, n. 2, p. 17–26, jan. 2024.

MA, M. et al. Factors affecting the price of recycled concrete: A critical review. **Journal of Building Engineering**, v. 46, p. 103743, abr. 2022.

MAKUL, N. et al. Design Strategy for Recycled Aggregate Concrete: A Review of Status and Future Perspectives. **Crystals**, v. 11, n. 6, p. 695, 17 jun. 2021.

MAMASIDIQOVA ISMIGUL ABDULATIF QIZI, H. O. DATA MINING  
TEKNOLOGIYALARI METODLARI VA BOSQICHLARI HAMDA DATA  
SCIENCE JARAYONLAR. 24 mar. 2023.

MARSH, A. T. M.; VELENTURF, A. P. M.; BERNAL, S. A. Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration. **Journal of Cleaner Production**, v. 362, p. 132486, ago. 2022.

MENEGATTI, L. C. et al. Environmental Performance of Deconstructable Concrete Beams Made with Recycled Aggregates. **Sustainability**, v. 14, n. 18, p. 11457, 13 set. 2022.

MOHAMMADI GOLAFSHANI, E. et al. Modeling the chloride migration of recycled aggregate concrete using ensemble learners for sustainable building construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 407, p. 136968, jun. 2023.

MOSTERT, C. et al. Urban Mining for Sustainable Cities: Environmental Assessment of Recycled Concrete. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 588, n. 5, p. 052021, 1 nov. 2020.

- NEDELJKOVIĆ, M. et al. Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. **Journal of Building Engineering**, v. 38, p. 102196, jun. 2021.
- NEVILLE, A. M. **Concrete properties**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- NILIMAA, J. Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. **Developments in the Built Environment**, v. 15, p. 100177, out. 2023.
- NOSRATABADI, S. et al. Data Science in Economics: Comprehensive Review of Advanced Machine Learning and Deep Learning Methods. **Mathematics**, v. 8, n. 10, p. 1799, 16 out. 2020.
- NYATHI, N. A. et al. Ecosystem Services in Southern Africa: Current and Emerging Trends—A Bibliometric Review. **Diversity**, v. 14, n. 5, p. 359, 2022.
- OCAÑA-FERNÁNDEZ, Y.; FUSTER-GUILLÉN, D. The bibliographical review as a research methodology. **Revista Tempos e Espaços em Educação**, v. 14, n. 33, p. e15614, 2021.
- OFFICE, F. S. **Recovery of recycled building materials by area in Germany in 2018 (Verwertung von Recycling Baustoffen nach Bereich in Deutschland im Jahr 2018)**. Alemanha: [s.n.]. Disponível em: <<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/743227/umfrage/verwertung-von-recycling-baustoffen-nach-bereich-in-deutschland/>>. Acesso em: 15 abr. 2024.
- OK, B. et al. Geotechnical properties of recycled construction and demolition materials for filling applications. **Transportation Geotechnics**, v. 24, p. 100380, set. 2020.
- OUYANG, K. et al. Influence of pre-treatment methods for recycled concrete aggregate on the performance of recycled concrete: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 188, p. 106717, jan. 2023.
- PATALAS-MALISZEWSKA, J.; ŁOSYK, H. Changes in Sustainable Development in Manufacturing in Cases of Unexpected Occurrences—A Systematic Review. **Sustainability**, v. 16, n. 2, p. 717, 14 jan. 2024.
- PATIL, Y. D.; WAYSAL, S. M.; DHOLAKIYA, B. Z. Feasibility of PET Resin as a Cement Substitute for Sustainable Construction. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 829, n. 1, p. 012005, 1 abr. 2020.
- PAUL, J.; CRIADO, A. R. The art of writing literature review: What do we know and what do we need to know? **International Business Review**, v. 29, n. 4, p. 101717, ago. 2020.
- PENG, Y.; UNLUER, C. Modeling the mechanical properties of recycled aggregate concrete using hybrid machine learning algorithms. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 190, p. 106812, mar. 2023.

POURKHORSHIDI, S. et al. Using Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Unbound Layers of Pavements. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 9386, 11 nov. 2020.

QI, L. et al. Simulation-Based Analysis of Micro-Damage to Recycled Concrete-Containing Brick Coarse Aggregates. **Buildings**, v. 13, n. 9, p. 2297, 9 set. 2023.

QUEIROZ, R. C. **Introduction to Civil Engineering: notions about the history, importance, main areas, duties and responsibilities of the profession**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2019.

QUIN, F. et al. A/B testing: A systematic literature review. **Journal of Systems and Software**, v. 211, p. 112011, maio 2024.

RAŠKOVIĆ, M. et al. Clean construction and demolition waste material cycles through optimised pre-demolition waste audit documentation: A review on building material assessment tools. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 38, n. 9, p. 923–941, set. 2020.

RAY, S. et al. Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 102567, nov. 2021.

REIS, G. S. D. et al. Current Applications of Recycled Aggregates from Construction and Demolition: A Review. **Materials**, v. 14, n. 7, p. 1700, 30 mar. 2021.

RHEUDE, F.; BUCHER, A.; RÖDER, H. Residential demolition and waste management - An ecobalancing case study. **Cleaner Waste Systems**, v. 3, p. 100056, dez. 2022.

ROSA, L. et al. Carbon dioxide mineralization in recycled concrete aggregates can contribute immediately to carbon-neutrality. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 184, p. 106436, set. 2022.

ROSADO, L. P.; PENTEADO, C. S. G. Avaliação do ciclo de vida do Sistema Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil da Região Metropolitana de Campinas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 71–82, fev. 2019.

RUGGERIO, C. A. Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. **Science of The Total Environment**, v. 786, p. 147481, set. 2021.

SAIZ MARTÍNEZ, P. et al. Characterization of Three Types of Recycled Aggregates from Different Construction and Demolition Waste: An Experimental Study for Waste Management. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 4, p. 3709, 19 fev. 2023.

SHANMUGARAJESHWARI, V.; ILAYARAJA, M. IoT-Based Prediction of Chronic Kidney Disease Using Python and R Based on Machine and Deep Learning Algorithms. **Next Generation of Internet of Things**, Lecture Notes in Networks and Systems. v. 445, p. 59–69, 2023.



SHARMA, N. et al. Machine learning algorithms for evaluating concrete strength using marble powder. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1110, n. 1, p. 012058, 1 fev. 2023.

SUD, K.; ERDOGMUS, P.; KADRY, S. (EDS.). **Introduction to data science and machine learning**. 1. ed. London, United Kingdom: IntechOpen, 2020.

SUESCUM-MORALES, D. et al. A Novel Artificial Neural Network to Predict Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete. **Applied Sciences**, v. 11, n. 22, p. 11077, 22 nov. 2021.

TANG, Q. et al. The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103807, nov. 2020a.

TANG, Z. et al. Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials. **Resources, Conservation & Recycling: X**, v. 6, p. 100036, maio 2020b.

TWYMAN, M.; MURIĆ, G.; ZHENG, W. Positioning in a collaboration network and performance in competitions: a case study of Kaggle. **Journal of Computer-Mediated Communication**, v. 28, n. 4, p. zmad024, 12 jun. 2023.

UMAR, U. A.; SHAFIQ, N.; AHMAD, F. A. A case study on the effective implementation of the reuse and recycling of construction & demolition waste management practices in Malaysia. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 1, p. 283–291, mar. 2021.

UPADHYA, A. et al. Modelling and prediction of binder content using latest intelligent machine learning algorithms in carbon fiber reinforced asphalt concrete. **Alexandria Engineering Journal**, v. 65, p. 131–149, fev. 2023.

WANG, J. et al. Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117366, fev. 2020.

WANG, Z.; LI, H.; YANG, X. Vision-based robotic system for on-site construction and demolition waste sorting and recycling. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101769, nov. 2020.

WICKHAM, H. **R for Data Science: import, arrange, transform, visualize and model data**. 1. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2019.

WOUTERSZON JANSEN, B. et al. A circular economy life cycle costing model (CE-LCC) for building components. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, p. 104857, out. 2020.

WU, H. et al. Investigation of the social and economic impacts of cross-regional mobility of construction and demolition waste in Australia. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 190, p. 106814, mar. 2023.

WU, Y.; REN, J.; LIU, J. Field Investigation of Water Infiltration into a Three-Layer Capillary Barrier Landfill Cover System Using Local Soils and Construction Waste. **Buildings**, v. 14, n. 1, p. 139, 5 jan. 2024.

XAVIER, L. H. **Urban mining: concepts and analysis of the potential of electronic waste**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Cetem - Centro De Tecnologia Mineral, 2021.

XAVIER, L. H. et al. Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. **Resources Policy**, v. 74, p. 101467, dez. 2021.

XIE, W. et al. RACBase: A cloud-based database of recycled aggregate concrete durability. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, p. e02004, jul. 2023.

XU, P. et al. Small data machine learning in materials science. **npj Computational Materials**, v. 9, n. 1, p. 42, 25 mar. 2023.

YAĞCI, M. Educational data mining: prediction of students' academic performance using machine learning algorithms. **Smart Learning Environments**, v. 9, n. 1, p. 11, dez. 2022.

YANG, A. et al. Review on the Application of Machine Learning Algorithms in the Sequence Data Mining of DNA. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 8, p. 1032, 4 set. 2020.

YE, F. Y.; MA, F.-C. An essay on the differences and linkages between data science and information science. **Data and Information Management**, v. 7, n. 1, p. 100032, mar. 2023.

YIN, X. et al. Compressive strength prediction of sprayed concrete lining in tunnel engineering using hybrid machine learning techniques. **Underground Space**, v. 7, n. 5, p. 928–943, out. 2022.

YU, Y. et al. Towards Circular Economy through Industrial Symbiosis in the Dutch construction industry: A case of recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 293, p. 126083, abr. 2021.

YUAN, X. et al. Machine Learning Prediction Models to Evaluate the Strength of Recycled Aggregate Concrete. **Materials**, v. 15, n. 8, p. 2823, 12 abr. 2022.

ZAJAC, M. et al. Supplementary cementitious materials based on recycled concrete paste. **Journal of Cleaner Production**, v. 387, p. 135743, fev. 2023.

ZHANG, C. et al. An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. **Science of The Total Environment**, v. 803, p. 149892, jan. 2022.

ZHANG, C. et al. Life cycle assessment of material footprint in recycling: A case of concrete recycling. **Waste Management**, v. 155, p. 311–319, jan. 2023.



ZHAO, Z. et al. Use of recycled concrete aggregates from precast block for the production of new building blocks: An industrial scale study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 157, p. 104786, jun. 2020.

ZOUNEMAT-KERMANI, M. et al. Ensemble data mining modeling in corrosion of concrete sewer: A comparative study of network-based (MLPNN & RBFNN) and tree-based (RF, CHAID, & CART) models. **Advanced Engineering Informatics**, v. 43, p. 101030, jan. 2020.

## APÊNDICE B

### CÓDIGO DO TRAÇO OTIMIZADO

```

]: import numpy as np
import pandas as pd

import os
for dirname, _, filenames in os.walk('/kaggle/input'):
    for filename in filenames:
        print(os.path.join(dirname, filename))

import pandas as pd
import numpy as np
import seaborn as sns
from sklearn.model_selection import train_test_split
import matplotlib.pyplot as plt
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')
from sklearn.linear_model import SGDRegressor, GammaRegressor, Lasso, GammaRegressor, ElasticNet, Ridge
from sklearn.linear_model import RANSACRegressor, HuberRegressor, BayesianRidge, LinearRegression
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor, BaggingRegressor, AdaBoostRegressor, GradientBoostingRegressor, ExtraTreesRegressor
from sklearn.svm import SVR
from sklearn.tree import DecisionTreeRegressor
from sklearn.neighbors import KNeighborsRegressor
from sklearn.pipeline import Pipeline # Streaming pipelines
from sklearn.model_selection import learning_curve, validation_curve, GridSearchCV # Model evaluation
from sklearn.preprocessing import StandardScaler

path = r"C:\Users\55539\OneDrive\Desktop\Gabriel\Bancos de dados\Resistência à compressão do concreto.csv"

data = pd.read_csv(path)

data = data.drop(columns=['Blast Furnace Slag (component 2)(kg in a m³ mixture)'])

print(data.columns)
data.head()

data.columns

data.info()

data.describe()

data.isnull().sum()

col=data.columns.tolist()
col

data.hist(figsize=(15,10),color='green')
plt.show()

i=1
plt.figure(figsize = (15,20))
for col in data.columns:
    plt.subplot(4,3,i)

```

```

sns.boxplot(x = data[col], data = data)
i+=1

i=1
plt.figure(figsize = (18,18))
for col in data.columns:
    plt.subplot(4,3,i)
    sns.scatterplot(data=data,x='Concrete compressive strength(MPa, megapascals)',y=col)
    i+=1

plt.figure(figsize=(10,10))
sns.heatmap(data.corr(),linewidths=1,cmap='PuBuGn_r',annot=True)

correlation=data.corr()['Concrete compressive strength(MPa, megapascals)'].sort_values()

correlation.plot(kind='barh',color='green')

X=data.drop(columns='Concrete compressive strength(MPa, megapascals)')
Y=data[['Concrete compressive strength(MPa, megapascals)']]

sc=StandardScaler()
X_scaled=sc.fit_transform(X)
X_scaled=pd.DataFrame(X_scaled,columns=X.columns)

x_train,x_test,y_train,y_test=train_test_split(X_scaled,Y,test_size=.30,random_state=0)

lr=LinearRegression()
sgd=SGDRegressor()
lasso=Lasso()
ridge=Ridge()
rf=RandomForestRegressor()
dt=DecisionTreeRegressor()
gboost=GradientBoostingRegressor()
bagging=BaggingRegressor()
adaboost=AdaBoostRegressor()
knn=KNeighborsRegressor()
etr=ExtraTreesRegressor()
gamma=GammaRegressor()

algo=[lr,sgd,lasso,ridge,rf,dt,gboost,bagging,adaboost,knn,etr]

model=[]
accuracy_test=[]
accuracy_train=[]
for i in range(len(algo)):
    algo[i].fit(x_train,y_train)
    accuracy_train.append(algo[i].score(x_train,y_train))
    accuracy_test.append(algo[i].score(x_test,y_test))
    model.append(algo[i])

mod=pd.DataFrame([model,accuracy_train,accuracy_test]).T
mod.columns=['model','score_train','score_test']
mod

etr1=ExtraTreesRegressor()

rs=[]
score=[]
for i in range(1,200,1):
    x_train,x_test,y_train,y_test=train_test_split(X_scaled,Y,test_size=.30,random_state=i)

```

```

etr1.fit(x_train,y_train)
score.append(etr1.score(x_test,y_test))
rs.append(i)

plt.figure(figsize=(20,6))
plt.plot(rs,score)

for i in range(len(score)):
    print(rs[i],score[i])

x_train,x_test,y_train,y_test=train_test_split(X_scaled,Y,test_size=.30,random_state=77)
etr2=ExtraTreesRegressor()

etr2.fit(x_train,y_train)
etr2.score(x_train,y_train)

etr2.score(x_test,y_test)

y_test_pred=etr2.predict(x_test)

y_test1=y_test.copy()
y_test1['pred']=y_test_pred

y_test1.corr()

from sklearn.metrics import mean_squared_error,r2_score

mean_squared_error(y_test1['Concrete compressive strength(MPa, megapascals)'],y_test1['pred'])

rsme=np.sqrt(mean_squared_error(y_test1['Concrete compressive strength(MPa, megapascals)'],y_test1['pred']))
rsme

r2_score(y_test1['Concrete compressive strength(MPa, megapascals)'],y_test1['pred'])

plt.barh(X.columns,etr2.feature_importances_)

import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.ensemble import ExtraTreesRegressor

cement_range = np.linspace(100, 600, 10)
fly_ash_range = np.linspace(0, 200, 10)
water_range = np.linspace(120, 250, 10)
superplasticizer_range = np.linspace(0, 30, 10)
coarse_aggregate_range = np.linspace(800, 1150, 10)
fine_aggregate_range = np.linspace(600, 1000, 10)
age_range = [28, 56, 90]

combinations = []
for cement in cement_range:
    for fly_ash in fly_ash_range:
        for water in water_range:
            for superplasticizer in superplasticizer_range:
                for coarse_aggregate in coarse_aggregate_range:
                    for fine_aggregate in fine_aggregate_range:

```

```
        for age in age_range:
            combinations.append([
                cement,
                fly_ash,
                water,
                superplasticizer,
                coarse_aggregate,
                fine_aggregate,
                age
            ])

combinations_df = pd.DataFrame(combinations, columns=[
    'Cement (component 1)(kg in a m^3 mixture)',
    'Fly Ash (component 3)(kg in a m^3 mixture)',
    'Water (component 4)(kg in a m^3 mixture)',
    'Superplasticizer (component 5)(kg in a m^3 mixture)',
    'Coarse Aggregate (component 6)(kg in a m^3 mixture)',
    'Fine Aggregate (component 7)(kg in a m^3 mixture)',
    'Age (day)'
])

combinations_scaled = sc.transform(combinations_df)

predictions = etr2.predict(combinations_scaled)

combinations_df['Predicted Compressive Strength'] = predictions

optimal_combination = combinations_df.loc[combinations_df['Predicted Compressive Strength'].idxmax()]

print("A combinação ideal para maximizar a resistência à compressão do concreto é:")
print(optimal_combination)

optimal_combination_quantities = optimal_combination.drop(['Predicted Compressive Strength', 'Age (day)'])

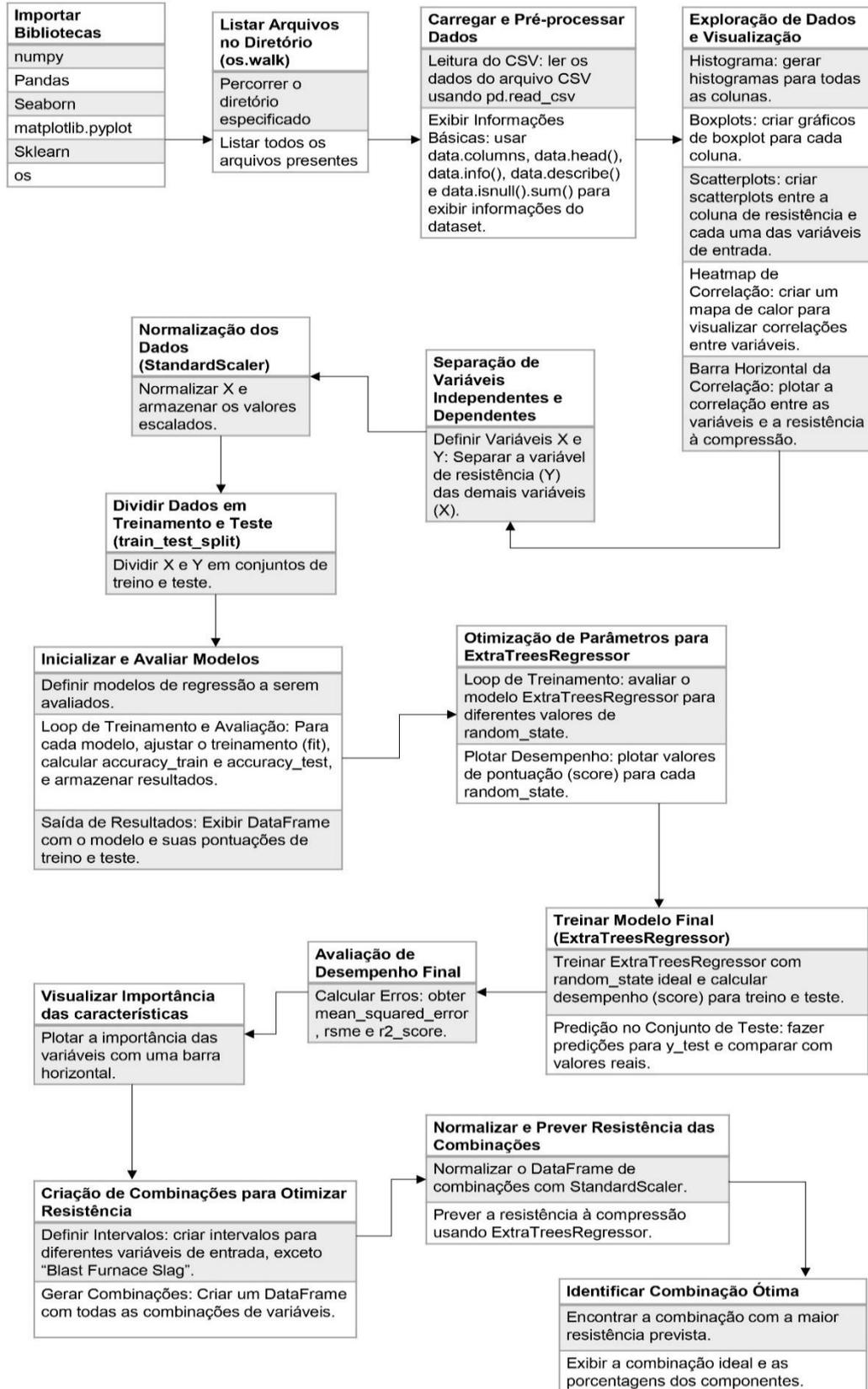
total_quantity = optimal_combination_quantities.sum()

optimal_combination_percentages = (optimal_combination_quantities / total_quantity) * 100

print("As porcentagens dos componentes da combinação ideal são:")
print(optimal_combination_percentages)
```

## APÊNDICE C

### FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DO TRAÇO OTIMIZADO



## APÊNDICE D

### CÓDIGO DA DIMENSIONAMENTO DA MALHA

```

import math

# Definições das dimensões do bloco (em centímetros)
largura_bloco_cm = 10 # Largura
comprimento_bloco_cm = 20 # Comprimento
espessura_bloco_cm = 8 # Espessura

# Conversão para metros
largura_bloco = largura_bloco_cm / 100 # metros
comprimento_bloco = comprimento_bloco_cm / 100 # metros
espessura_bloco = espessura_bloco_cm / 100 # metros

# Propriedades do material PET (valores hipotéticos, devem ser substituídos por dados reais)
# Resistência à tração (Pa)
resistencia_tracao_PET = 50e6 # 50 MPa

# Fator de segurança
fator_seguranca = 1.0

# Carga total aplicada no bloco (N)
carga_total = 700 # newtons

# Definição do espaçamento da malha (em centímetros)
espacamento_malha_cm = 2 # cm
espacamento_malha = espacamento_malha_cm / 100 # metros

# Largura e espessura do filme (em milímetros)
largura_filme_mm = 5 # Largura do filme em mm
espessura_filme_mm = 0.5 # Espessura do filme em mm

# Conversão para metros
largura_filme = largura_filme_mm / 1000 # metros
espessura_filme = espessura_filme_mm / 1000 # metros

# Cálculo do número de filmes ao longo do comprimento e da largura, considerando largura e espessura do filme e espaçamento
espacamento_efetivo_comprimento = espacamento_malha_cm + (largura_filme_mm / 10)
num_filmes_comprimento = math.floor((comprimento_bloco_cm - largura_filme_mm) / espacamento_efetivo_comprimento) + 1

espacamento_efetivo_largura = espacamento_malha_cm + (largura_filme_mm / 10)
num_filmes_largura = math.floor((largura_bloco_cm - largura_filme_mm) / espacamento_efetivo_largura) + 1

# Total de filmes
total_filmes = num_filmes_comprimento + num_filmes_largura

# Carga por filmes (considerando que a carga é distribuída igualmente entre todos os fios)
carga_por_filme = carga_total / total_filmes

# Cálculo da área de seção transversal necessária para cada fio (A = carga / (resistência / fator de segurança))
area_seccao_filme = carga_por_filme / (resistencia_tracao_PET / fator_seguranca)

# Verificação de área suficiente com base na espessura e largura definidas
area_real_filme = largura_filme * espessura_filme
if area_real_filme < area_seccao_filme:
    print("A área do filme não é suficiente para suportar a carga com o fator de segurança especificado.")
else:
    print("A área do filme é adequada para suportar a carga.")

# Cálculo do comprimento total de fio necessário

comprimento_total_filmes_comprimento = num_filmes_comprimento * comprimento_bloco
comprimento_total_filmes_largura = num_filmes_largura * largura_bloco
comprimento_total_filmes = comprimento_total_filmes_comprimento + comprimento_total_filmes_largura

# Exibindo os resultados
print(f"Dimensões do Bloco: {largura_bloco_cm} cm (Largura) x {comprimento_bloco_cm} cm (Comprimento) x {espessura_bloco_cm} cm (Espessura)")
print(f"Espaçamento da Malha: {espacamento_malha_cm} cm")
print(f"Largura do Filme: {largura_filme_mm} mm")
print(f"Espessura do Filme: {espessura_filme_mm} mm")
print(f"Número de Filmes ao Longo do Comprimento: {num_filmes_comprimento}")
print(f"Número de Filmes ao Longo da Largura: {num_filmes_largura}")
print(f"Total de Filmes: {total_filmes}")
print(f"Carga Total por Bloco: {carga_total} N")
print(f"Carga por Filme: {carga_por_filme:.2f} N")
print(f"Área de Seção Transversal Necessária por Filme: {area_seccao_filme:.6f} m²")
print(f"Área Real do Filme: {area_real_filme:.6f} m²")
print(f"Comprimento Total de Filme Necessário: {comprimento_total_filmes:.2f} metros")

# Distribuição clara da malha
print(f"Distribuição da Malha: {num_filmes_comprimento} linhas ao longo do comprimento e {num_filmes_largura} linhas ao longo da largura.")

```

## APÊNDICE E

### FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DA MALHA

