



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**



DEANE SOARES SALGADO

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE
MICRONIZADO EM CONCRETO PARA APLICAÇÃO EM PISOS
INTERTRAVADOS**

VOLTA REDONDA

2024

DEANE SOARES SALGADO

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE
MICRONIZADO EM CONCRETO PARA APLICAÇÃO EM PISOS
INTERTRAVADOS**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, na área de concentração de processamento e caracterização de materiais aplicados à construção civil e linha de pesquisa em materiais compósitos.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral

VOLTA REDONDA

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

S164e Salgado, Deane Soares

Estudo da utilização de polietileno de baixa densidade micronizado em concreto para aplicação em pisos intertravados. / Deane Soares Salgado. - Volta Redonda: UniFOA, 2024. 96 p. II

Orientador (a): Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro

Coorientador (a): Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2024

1. Materiais - dissertação. 2. Sustentabilidade. 3. PEBD. I. Montoro, Sérgio Roberto. II. Cabral, Ricardo de Freitas. III. Centro Universitário de Volta Redonda. IV. Título.

CDD – 620.1



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



DEANE SOARES SALGADO

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE MICRONIZADO EM
CONCRETO PARA APLICAÇÃO EM PISOS INTERTRAVADOS

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE
“MESTRE EM MATERIAIS”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE MESTRADO
PROFISSIONAL EM MATERIAIS

Roberto de Oliveira Magnago

Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Sérgio Roberto Montoro

Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro
Presidente / UniFOA

Cirlene Fourquet Bandeira

Prof.^a Dr.^a Cirlene Fourquet Bandeira
Examinador interno / UniFOA

Daniela Camargo Vernilli

Prof.^a Dr.^a Daniela Camargo Vernilli
Examinador externo / EEL/USP

Dezembro de 2024.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais, que mesmo não estando mais neste plano, sempre me deram forças para conseguir atravessar todos os obstáculos até aqui.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente à Deus que me deu forças para seguir nessa caminhada.

À minha família que sempre me incentivou e ficou ao meu lado nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro que não me deixou desistir e não mediu esforços para me ajudar sempre que precisei.

A todos, que de certa forma participaram dessa minha caminhada.

EPÍGRAFE

"Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim."

Chico Xavier.

SALGADO, D. S. **Estudo da utilização de polietileno de baixa densidade micronizado em concreto para aplicação em pisos intertravados.** 2024 Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2024.

RESUMO

A inter-relação entre o crescimento populacional e o desenvolvimento sustentável tem fomentado inúmeras pesquisas científicas em prol do reaproveitamento e da conscientização ambiental. O aumento no consumo ocorre de maneira proporcional à ampliação da população e a indústria do plástico aparece com destaque, proporcionando uma grande variedade de produtos para qualquer aplicabilidade. A abundância de plástico atualmente resulta numa geração cada vez maior de resíduos, cuja presença é prejudicial ao meio ambiente e conseqüentemente para a sociedade, caso este detrito não seja tratado de forma adequada. Assim, mediante o contexto de sustentabilidade ambiental, a justificativa do presente estudo busca por meios e/ou medidas minimizar o impacto de quaisquer resíduos no meio ambiente, uma realidade que não apenas visa atender as normas e leis regulamentadoras, mas também em contribuir de forma direta, a fim de obter maior economia para as organizações. Dentre as diversas maneiras de adequar-se a esta necessidade, o reaproveitamento de materiais se faz mais eficiente, pois além de agregar propriedades de todas as esferas possíveis (de acordo com o material reutilizado) de forma a melhorar as suas propriedades, faz com que estas instituições passem a dar um destino ecologicamente correto a estes resíduos. O presente estudo tem por objetivo principal a produção de pisos de concreto com PEBD micronizado, de forma a avaliar sua resistência, e as suas propriedades mecânicas e morfológicas, visando seu uso em pisos intertravados. Foram realizados ensaios de resistência a compressão axial, absorção de água, índice de vazios e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para isso foram confeccionados CDP's em traços de concreto sem adição de PEBD micronizado (referencial) e com adições de PEBD natural micronizado, sendo 10%, 20% e 30% em volume de substituição da areia; após 7, 14, 21 e 28 dias. O concreto com adição de 10% de PEBD teve o melhor desempenho quanto à sua resistência. Quando analisado os teores de absorção de água, todos ficaram abaixo do máximo permitido em norma. Pelas análises de MEV ficou constatado que quanto maior a quantidade de PEBD micronizado adicionado, a microestrutura ficou mais fragmentada e, conseqüentemente, mais porosa. E, a partir das análises pelo ImageJ, somente os valores da amostra de concreto contendo 10% de PEBD micronizado ficaram mais próximos dos esperados. Portanto, o uso de 10% de PEBD micronizado apresentou potencial para aplicações em concreto, oferecendo um equilíbrio entre resistência, absorção de água e leveza.

Palavras-chave: Reaproveitamento, sustentabilidade, PEBD, MEV, ImageJ.

SALGADO, D. S. **Study of the use of micronized low-density polyethylene in concrete for application in interlocking pavements.** 2024 Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2024.

ABSTRACT

The interrelationship between population growth and sustainable development has fostered numerous scientific studies in favor of reuse and environmental awareness. The increase in consumption occurs proportionally to the increase in population, and the plastics industry stands out, providing a wide variety of products for any application. The abundance of plastic currently results in an ever-increasing generation of waste, the presence of which is harmful to the environment and consequently to society, if this waste is not treated properly. Thus, within the context of environmental sustainability, the justification for this study seeks means and/or measures to minimize the impact of any waste on the environment, a reality that not only aims to comply with regulatory standards and laws, but also to contribute directly to achieving greater savings for organizations. Among the various ways to adapt to this need, the reuse of materials is more efficient, because in addition to adding properties from all possible spheres (according to the reused material) in order to improve its properties, it makes these institutions start to give an ecologically correct destination to this waste. The present study has as its main objective the production of concrete floors with micronized LDPE, in order to evaluate its resistance, and its mechanical and morphological properties, aiming at its use in interlocking floors. Tests of axial compression resistance, water absorption, void index and scanning electron microscopy (SEM) were carried out. For this purpose, CDPs were made in concrete mixes without addition of micronized LDPE (reference) and with additions of micronized natural LDPE, being 10%, 20% and 30% in volume of sand replacement; after 7, 14, 21 and 28 days. Concrete with the addition of 10% LDPE had the best performance in terms of strength. When water absorption levels were analyzed, all were below the maximum permitted by the standard. SEM analyses showed that the greater the amount of micronized LDPE added, the more fragmented the microstructure became and, consequently, more porous. And, based on the ImageJ analyses, only the values of the concrete sample containing 10% micronized LDPE were closer to the expected values. Therefore, the use of 10% micronized LDPE showed potential for applications in concrete, offering a balance between strength, water absorption and lightness.

Keywords: Recycling, sustainability, LDPE, SEM, ImageJ.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação de um polímero	23
Figura 2. Fluxograma resumido da classificação dos polímeros	24
Figura 3. Polímero natural	25
Figura 4. Polímero sintético	25
Figura 5. Estrutura de um polímero termoplástico ou linear	25
Figura 6. Estrutura de um polímero termorrígido.....	25
Figura 7. Diferentes tipos de cadeias poliméricas a) cadeia linear; b) cadeia ramificada; c) cadeia com ligações cruzadas e d) cadeia em rede (tridimensional) ..	28
Figura 8. Síntese do homopolímero do polietileno	33
Figura 9. Exemplos de aplicações de Polietileno de Baixa Densidade	33
Figura 10. Estrutura molecular do polietileno	34
Figura 11. Exemplo da aplicação de polietileno linear de baixa densidade.....	36
Figura 12. Exemplos de aplicações de PEUAPM ou UHMWPE.....	38
Figura 13. Estrutura do pavimento flexível	47
Figura 14. Funcionalidade do Intertravamento	47
Figura 15. Exemplos de peças de concreto do tipo I.....	48
Figura 16. Exemplos de peças de concreto do tipo II.....	49
Figura 17. Exemplos de peças de concreto do tipo III.....	49
Figura 18. Exemplos de peças de concreto do tipo IV	50
Figura 19. Fluxograma do Trabalho	51
Figura 20. Cimento Portland CPIII – 40RS.....	52
Figura 21. PEBD micronizado	54
Figura 22. Sika Concreto Forte.....	55
Figura 23. Molde dos corpos de prova	57
Figura 24. Corpos de prova cheios.....	59
Figura 25. Teste Slump para aferição da fluidez	60
Figura 26. Ensaio de resistência à compressão axial	61
Figura 27. Estufa de esterilização marca Odontobrás modelo 1.5	63
Figura 28. Microscópio eletrônico de varredura Hitachi MEV-TM 3000.....	64
Figura 29. Resultado do teste de compressão axial com 7 dias.....	67
Figura 30. Resultado do teste de compressão axial com 14 dias.....	68
Figura 31. Resultado do teste de compressão axial com 21 dias.....	70

Figura 32. Resultado do teste de compressão axial com 28 dias.....	71
Figura 33. Resultado do teste de absorção de água por imersão	73
Figura 34. Resultado do teste de índice de vazios	74
Figura 35. Imagens de MEV das amostras de concreto estudadas. Ampliação de 100x.....	77
Figura 36. Tratamento de imagem por meio do software ImageJ (método de <i>thresholding</i>) do MEV da amostra de concreto contendo 10% de PEBD micronizado com ampliação de 100x.....	80
Figura 37. Tratamento de imagem por meio do software ImageJ (método de <i>thresholding</i>) do MEV da amostra de concreto contendo 20% de PEBD micronizado com ampliação de 100x.....	81
Figura 38. Tratamento de imagem por meio do software ImageJ (método de <i>thresholding</i>) do MEV da amostra de concreto contendo 30% de PEBD micronizado com ampliação de 100x.....	82
Figura 39. Tratamento de imagem por meio do software ImageJ (método usando contraste) do MEV da amostra de concreto contendo 10% de PEBD micronizado com ampliação de 100x.....	83
Figura 40. Tratamento de imagem por meio do software ImageJ (método usando contraste) do MEV da amostra de concreto contendo 20% de PEBD micronizado com ampliação de 100x.....	84
Figura 41. Tratamento de imagem por meio do software ImageJ (método usando contraste) do MEV da amostra de concreto contendo 30% de PEBD micronizado com ampliação de 100x.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Algumas propriedades dos principais tipos de polietileno.....	30
Tabela 2. Tipos de areia	53
Tabela 3. Tipos de brita	53
Tabela 4. Análise do PEBD micronizado	54
Tabela 5. Série de peneiras utilizadas para ensaio de granulometria	56
Tabela 6. Quantidade de CDP's confeccionados.....	58
Tabela 7. Proporções para produção do concreto	58
Tabela 8. Distribuição granulométrica da areia.....	65
Tabela 9. Distribuição granulométrica da brita.....	66
Tabela 10. Resistência a compressão axial com 7 dias	66
Tabela 11. Resistência a compressão axial com 14 dias	68
Tabela 12. Resistência a compressão axial com 21 dias	69
Tabela 13. Resistência a compressão axial com 28 dias	71
Tabela 14. Absorção de água por imersão	72
Tabela 15. Índice de vazios	73
Tabela 16. Resultados da quantificação das regiões escuras (pretas) das amostras de concreto contendo PEBD micronizado.....	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Estrutura de alguns polímeros	26
Quadro 2. Estrutura de alguns polímeros	26
Quadro 3. Classificação dos tipos de polietileno	30
Quadro 4. Composição dos Cimentos Portland comuns e compostos	43
Quadro 5. Composição dos Cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos	43
Quadro 6. Composição dos Cimentos Portland de alta resistência inicial	44
Quadro 7. Composição dos Cimentos Portland resistentes aos sulfatos	44
Quadro 8. Classificação do Cimento Portland	45
Quadro 9. Comparação geral entre todas imagens de MEV das amostras de concreto que tiveram adições de PEBD micronizado	76

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Relação água cimento.....	59
Equação 2. Tensão de ruptura.....	61
Equação 3. Absorção de água.....	62
Equação 4. Índice de vazios.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Área da seção
Aag	Absorção de água
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMB	Anuário Mineral Brasileiro
ANM	Agência Nacional de Mineração
ASTM	American Society for Testing and Materials
CDP	Corpo de Prova
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Cimento Portland
F	Força aplicada
Fck	Tensão de ruptura
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
IV	Índices de Vazios
LDPE	Polietileno de Baixa Densidade
LLDPE	Polietileno Linear de Baixa Densidade
MeMat	Mestrado Profissional em Materiais
MEV	Microscópio de Varredura Eletrônica
Mi	Massa imersa
Ms	Massa do corpo de prova seco em estufa
Msat	Massa do corpo de prova saturado
NBR	Norma Brasileira
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PELBD	Polietileno Linear de Baixa Densidade
PEUAPM	Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular
PEUBD	Polietileno de Ultra Baixa Densidade
PVA	Poli Acetato de Vinila

PVC	Poli Cloreto de Vinila
UHMWPE	Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular
ULDPE	Polietileno de Ultra Baixa Densidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.2.1 Objetivo geral	20
1.2.2 Objetivos específicos	21
1.3 JUSTIFICATIVA.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 POLÍMEROS.....	23
2.1.1 Polietileno.....	29
2.1.1.1 Polietileno de Baixa Densidade (PEBD).....	31
2.1.1.2 Polietileno de Alta Densidade (PEAD ou HDPE).....	34
2.1.1.3 Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD OU LLDPE)	35
2.1.1.4 Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM OU UHMWPE)	36
2.2 RESÍDUOS.....	38
2.2.1 Reciclagem.....	41
2.3 CONCRETO.....	42
2.3.1 Cimento.....	43
2.3.2 Água	45
2.3.3 Areia.....	45
2.3.4 Brita	46
2.4 PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA.....	46
2.4.1 Blocos Intertravados de Concreto	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 MATERIAIS.....	52
3.1.1 Cimento Portland CPIII.....	52
3.1.2 Areia.....	52
3.1.3 Brita	53
3.1.4 Água	53
3.1.5 Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)	53
3.1.6 Aditivo.....	54
3.2 MÉTODOS.....	55
3.2.1 Granulometria.....	55

3.2.2	Corpos de Prova	56
3.2.3	Mistura do Concreto	59
3.2.4	Ensaio Mecânicos	61
3.2.4.1	Compressão Axial	61
3.2.5	Ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios	62
3.2.6	Análise MEV	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1	GRANULOMETRIA DA AREIA.....	65
4.2	GRANULOMETRIA DA BRITA.....	65
4.3	CARACTERIZAÇÕES DOS CDP's.....	66
4.3.1	Compressão Axial	66
4.3.2	Absorção de Água por Imersão e Índice de Vazios.....	72
4.3.3	Resultados das imagens de MEV	75
5	CONCLUSÃO	86
6	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	88
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O mundo todo ultimamente tem uma grande preocupação com o meio ambiente, devido ao grande acúmulo de resíduos sólidos urbanos, como os plásticos, que causam grandes problemas. O aumento da população, paralelo com o crescimento da cidade contribui com os problemas ambientais, relacionado à utilização de recursos naturais, o que levou a crescente preocupação no que concerne a este tema.

A sociedade moderna se depara com muitos problemas socioambientais, os quais não se devem prorrogar a solução. Os resíduos gerados ainda são um grande desafio a ser solucionado, como a sua destinação final, neste caso de resíduos sólidos como o polietileno de baixa densidade (PEBD) (RODRIGUES, 2010).

Observa-se que houve um grande progresso no desenvolvimento de estudos com o propósito de se reaproveitar os resíduos plásticos, haja vista que sua degradação demora décadas, como os resíduos de PEBD, que é um termoplástico à base de petróleo, produzido em 1933, é muito comum sua utilização em diversas aplicações (COSTA *et al.* 2016; SPINACI; VALIM; DI PAOLI, 2016; LIGOWSKY; SANTOS; FUJIWARA, 2015).

As empresas retiram os recursos do meio ambiente e essa matéria prima é transformada em bens de consumo. Alguns processos industriais, considerando a quantidade de matéria prima que necessita para sua a produção, causam um desgaste do ambiente, levando a diversos impactos que se tornam irreversíveis (MEC – SECRETARIA DE EDUCAÇÃO, 2024).

O Brasil é um dos países que possui matérias primas de forma abundante, assim, os minerais são de grande relevância para a economia e são indispensáveis para a manutenção do nível de vida e o avanço das sociedades modernas em que vivemos. Pode-se citar como exemplo a extração do mineral “areia”, que são encontrados nas várzeas e leitos de rios (CNM, 2024).

A extração desse mineral em grandes quantidades contribui para o alargamento excessivo das margens do rio, afetando a vegetação local,

comprometendo a própria sobrevivência do rio. No Brasil, o desenvolvimento econômico é baseado na expansão do capital e do lucro e, lamentavelmente, está associado à falta de políticas de planejamento ambiental. Assim sendo, ocorrem inúmeros impactos ambientais, intensificando o desequilíbrio ecológico ambiental.

Nos últimos anos, um dos setores que vem crescendo de forma considerável é o da construção civil, acompanhados pela utilização de diversos agregados, que de acordo com os dados do Anuário Mineral Brasileiro/AMB da Agência Nacional de Mineração/ANM (2022), inserem-se entre os grandes produtores do setor mineral brasileiro, na qual tratam-se de elementos granulares sem volume e formas definidas, de dimensões e propriedades que são utilizadas, como a “areia”, que é utilizada na construção civil como um agregado para o concreto, argamassa, blocos e pavimentação.

Nessa perspectiva, com o desenvolvimento das tecnologias, a reciclagem ou reutilização de resíduos, uma série de avanços, desafios e oportunidades impulsionam e são de grande relevância por se tornar possível a utilização dessa matéria prima como alternativa, visando diminuir os custos, além de preservar o meio ambiente, promovendo a utilização sustentável dos materiais e ampliando o ciclo de vida dos produtos. (SOUZA, 2023).

Para tanto, acredita-se que a reciclagem de resíduos plásticos para a fabricação de pisos intertravados, será de grande importância, visto que contribuirá para a preservação ambiental e redução do consumo de areia.

Diante do exposto pretende-se mensurar e analisar a possibilidade de incorporar resíduos de polietileno na fabricação de pisos intertravados em conformidade com as Normas da ABNT e da Ciência dos Materiais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral foi avaliar a viabilidade técnica de utilização dos *pavers* com incorporação de polietileno de baixa densidade, para uso em pisos intertravados. Para isso foram utilizadas partículas micronizadas de polietileno e avaliou-se, de forma experimental, a incorporação desses resíduos ao produzir os *pavers* por meio de

ensaios de resistência mecânica à compressão e absorção de água. Para isso serão feitas substituições de 10%, 20% e 30% em volume no percentual da areia.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar e analisar a viabilidade de se utilizar polietileno de baixa densidade; visando implementar tecnologias e projetos na fabricação de *pavers*, reduzindo o consumo de areia, que é muito utilizada na construção civil;
- Verificar os principais coeficientes que podem influenciar nas respostas variáveis na fabricação de *pavers* em relação à resistência, absorção de água e índice de vazios;
- Demonstrar a possibilidade de se utilizar resíduos de plástico, amenizando o impacto ambiental.

1.3 JUSTIFICATIVA

Esse estudo se justifica devido ao aumento no consumo que ocorre de maneira proporcional à ampliação da população, haja vista que a indústria do plástico se destaca, proporcionando uma grande variedade de produtos para qualquer aplicabilidade. Apesar do plástico ter conquistado aos poucos seu espaço como material de grande importância para a sociedade, atualmente seu descarte é um problema para o mundo e principalmente para o Brasil.

O excesso de utilização de plástico, gera maior quantidade de resíduos, cuja presença é prejudicial ao meio ambiente e conseqüentemente para a sociedade, caso este resíduo não seja tratado de forma adequada. Os resíduos de modo geral, se não tiverem a destinação correta, causam danos ao meio ambiente. Dentre os diversos resíduos que contribuem com a poluição ambiental estão os plásticos. É muito grande a quantidade desses resíduos gerados, tendo em vista o crescimento da população (VALENTINO, 2017).

Geralmente esses resíduos são descartados de forma incorreta e em locais inapropriados, sua decomposição demora décadas, têm efeitos nocivos e adversos, contribuindo com a contaminação do meio ambiente, gerando assim, danos à saúde humana e de animais, além da poluição visual.

Assim, mediante ao contexto de sustentabilidade ambiental e para atender e para atender a ODS 12 (IPEA, 2019), torna-se necessário buscar meios e/ou medidas que visem minimizar o impacto desses resíduos no meio ambiente. Para isso, as organizações devem atender as condutas exigidas pelas normas e leis regulamentadoras.

Dentre as diversas maneiras de adequar-se a esta necessidade, reaproveitar materiais é uma maneira eficiente. Assim, é possível agregar propriedades de todas as esferas possíveis, de acordo com o material a ser reutilizado, melhorando suas propriedades. Dessa maneira, estas instituições passam a dar um destino ecologicamente correto a estes resíduos.

Nesse entendimento, é necessário conscientizar as empresas poluidoras sobre a importância de um desenvolvimento sustentável, que não prejudique as futuras gerações, para que se obtenha progresso respeitando o meio ambiente. Partindo-se desse princípio, reciclar polietileno de baixa densidade e utilizar na fabricação de *pavers*, seja de grande relevância, tendo em vista que por meio desse experimento, será demonstrada a possibilidade de reduzir o consumo de areia que é utilizada na construção civil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

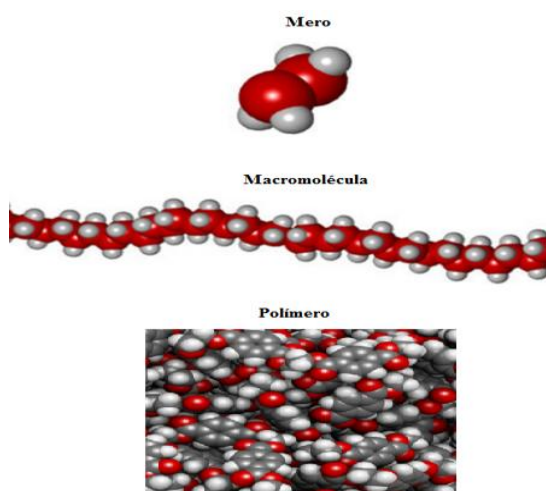
2.1 POLÍMEROS

A palavra polímero tem origem do grego poli, muitos e mero, unidade de repetição, trata-se de uma classe abrangente de substâncias, que podem ser de ocorrência natural ou sintética, são macromoléculas menores, chamadas de monômeros. São compostas por unidades de repetição que são ligadas por ligações covalentes. Um polímero é produzido pelo monômero, que é uma molécula com uma unidade de repetição (JARVIS, 2022; HUANG, 2021; CARVALHO, 2022).

Berzelius em 1832 criou a expressão polímero para conceituar compostos de pesos moleculares múltiplos, ou peso molecular, esse conceito não é mais utilizado, assim, polímeros são considerados as moléculas relativamente grandes de pesos moleculares da ordem de 10^3 a 10^6 . A estrutura dos polímeros é encontrada em repetidas unidades químicas simples classificadas como meros (MANO; MENDES, 2004).

Os polímeros são macromoléculas que se originam de ligações intramoleculares entre uma grande quantidade de pequenas moléculas, monômeros, englobando um conjunto de grandes moléculas constituídas de várias unidades químicas unidas por ligações covalentes. A Figura 1, ilustra a representação de um polímero (HUANG, 2021).

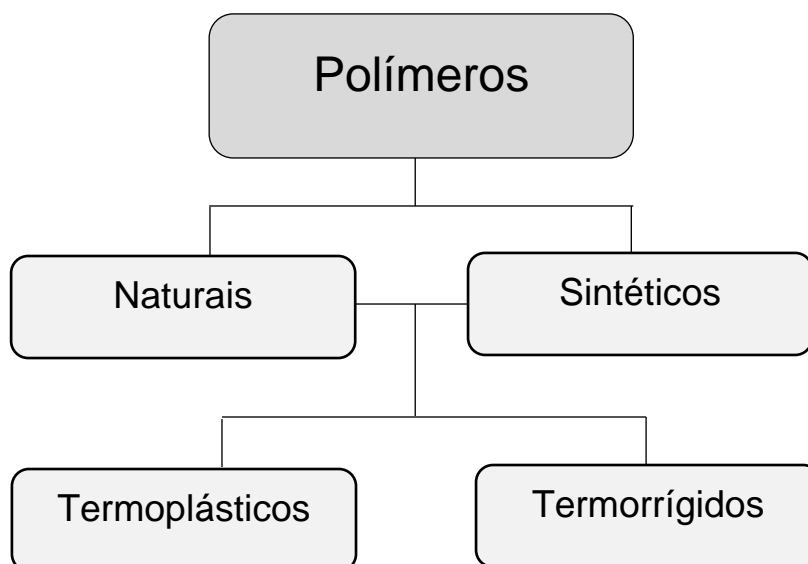
Figura 1: Representação de um polímero



Fonte: Adaptado de Padilha, 1997.

Os polímeros podem ser classificados como naturais ou sintéticos, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2: Fluxograma resumido da classificação dos Polímeros



Fonte: Elaborado pela Autora, 2024.

Polímeros naturais: são aqueles que podem ser retirados da natureza. A Figura 3 ilustra alguns exemplos de polímeros naturais. Já os sintéticos, Figura 4, de acordo com Mulinari (2009), são os polímeros mais utilizados em relação a solubilidade em compósitos poliméricos. Polímeros são classificados como termoplásticos ou termorrígidos. Sua escolha como matriz polimérica depende das propriedades físicas, mecânicas e térmicas demandadas para uma determinada aplicação, bem como no processo de fabricação escolhido e/ou do custo associado.

Figura 3: Polímero natural



Fonte: InfoEscola, 2024.

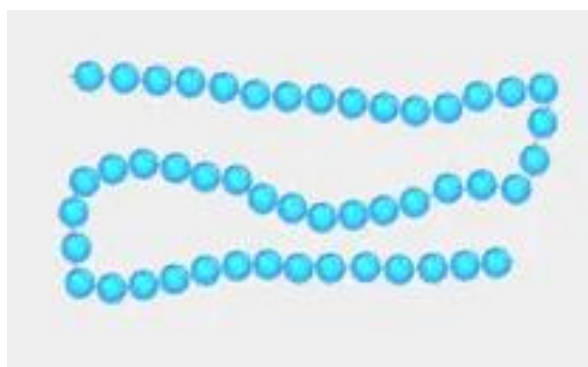
Figura 4: Polímero sintético



Fonte: Engenharia 360, 2024.

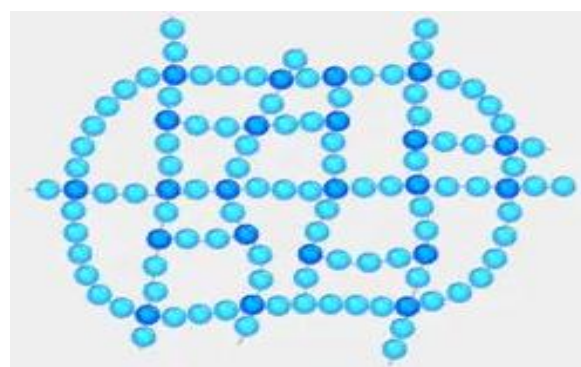
Os polímeros termoplásticos ou linear, demonstrados na Figura 5, são os que possuem uma ligação fraca de forma a possibilitar que o seu rompimento ocorra facilmente mediante aplicação de energia. Quando aquecidos, suas ligações se rompem facilmente e permite a movimentação das cadeias poliméricas. Já os polímeros termorrígidos, Figura 6, ao contrário dos termoplásticos, são mais rígidos e infusíveis, tendo em vista que quando aquecidos adquirem estrutura reticulada e com ligações cruzadas (CAMPBELL, 2006).

Figura 5: Estrutura de um polímero termoplástico ou linear.



Fonte: Toda Matéria, 2024.

Figura 6: Estrutura de um polímero termorrígido

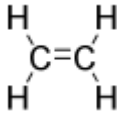
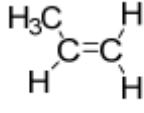
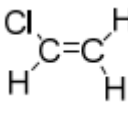
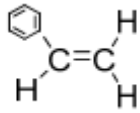
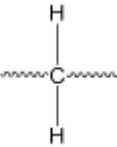
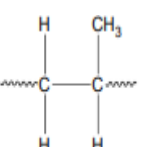
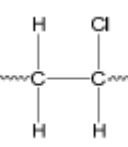
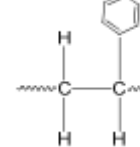


Fonte: Toda Matéria, 2024.

Canevarolo (2010) corrobora com Mulinari (2009), e demonstra a complexidade dos polímeros que se dá através de um conjunto de átomos que se repetem de forma sistêmica para formar a macromolécula que se dá em consequência da repetição de unidades obtidas através das reações químicas entre monômeros. Os Quadros 1 e 2

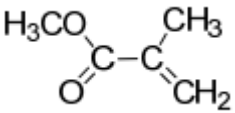
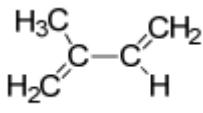
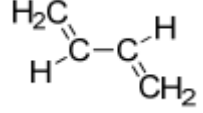
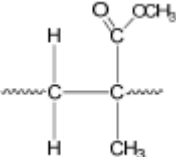
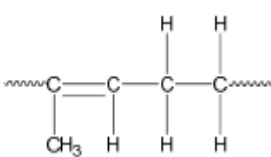
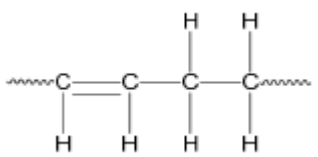
apresentam alguns exemplos mais comuns dos polímeros com monômero de origem e sua estrutura (unidades repetitivas).

Quadro 1: Estrutura de Alguns Polímeros

Polímero	Polietileno	Polipropileno	Poli (cloreto de vinilo)	Poliestireno
Monômero				
Estrutura				

Fonte: Adaptado de Canevarolo, 2010.

Quadro 2: Estrutura de Alguns Polímeros

Polímero	Poli (metacrilato de metilo)	Poliisopreno (borracha natural)	Polibutadieno (borracha artificial)
Monômero			
Estrutura			

Fonte: Adaptado de Canevarolo, 2010.

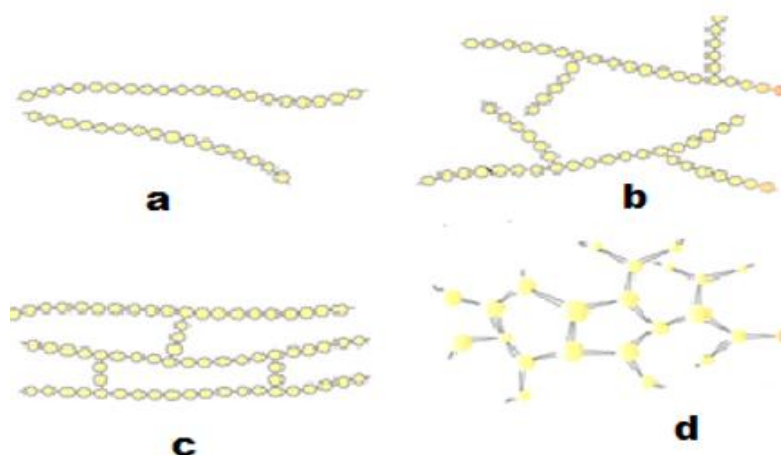
De acordo com a sua origem, os polímeros recebem classificações diferentes como: o grau de cristalinidade, a estrutura química, as características tecnológicas, o comportamento mecânico, tipo de aplicação, dentre outros. Clarival (2005), afirma que conforme o grupo funcional que os meros na cadeia polimérica pertencem, os polímeros podem ser classificados em:

- a) **Poliiolefinas:** são os polímeros adquiridos pelo processo de polimerização radicalizada das olefinas, que são materiais poliméricos obtidos a partir dos hidrocarbonetos não-saturados. Possuem pouca polaridade, devido à falta de um grupo funcional, resultando em uma baixa adesividade, tem-se como exemplos o polipropileno e o polietileno;
- b) **Poliésteres:** são os polímeros que têm a forma de fibras sintéticas, são adquiridos por meio de uma reação de condensação entre um poliálcool e um ácido policarboxílico. São demasiadamente cristalinos, possuem propriedades como resistência abrasiva e mecânica, dureza, baixa absorção de umidade e baixo custo, são o poli, tereftalato de etileno, o Policarbonato e o poli, butileno tereftalato;
- c) **Poliésteres poli, óxido de etileno:** são polímeros sintéticos, de grande utilização comercial e poli, óxido de fenileno, que é um poliéster saturado;
- d) **Poliâmidas:** são polímeros sintéticos termoplásticos, adquiridos por meio da reação de dimerização de aminas alifáticas. Os náilons são exemplos de poliâmidas, têm boa resistência à água, boa flexibilidade, boa adesividade, boa resistência à abrasão, mas possuem baixa resistência térmica e química;
- e) **Polímeros celulósicos:** sua estrutura celular deriva de polímeros naturais, como o nitrato de celulose e o acetato de celulose, seu processamento é realizado por moldagem por injeção e a vácuo, são muito utilizados em isolantes e brinquedos;
- f) **Polímeros acrílicos:** são obtidos a partir do monômero ácido acrílico, possuem elevada dureza, fragilidade e resistência ao intemperismo, tem-se como exemplos o poli, (metacrilato de metila) e o poli, acrilonitrila;
- g) **Polímeros vinílicos:** são polímeros sintetizados com base no monômero vinílico, como o poli (acetato de vinila) (PVA) e poli (cloreto de vinila) (PVC) é um dos polímeros mais utilizados, por ter uma ampla diversidade em propriedades e propriedades obtidas com a utilização de estabilizantes, lubrificantes, plastificantes, dentre outros;

- h) **Poliuretano:** é um polímero adquirido a partir da reação de um di-isocianato aromático com um composto rico em hidroxílicos, dando origem a um produto sólido, com textura de espuma, podendo ser rígido ou flexível. Possui vantagens, como isolamento térmico ou acústico, leveza e impermeabilidade;
- i) **Resinas formaldeídicas:** Trata-se de materiais sintéticos, são adquiridos pela reação do fenol e formol. No ensaio de tração, esses materiais evidenciam elevado módulo de elasticidade e baixa elongação na ruptura, como exemplos são os plásticos fenólicos: a resina fenolformol e a resina uréias formol.

Segundo Fernandes e Lona (2004), a cadeia de um polímero é linear quando não possui ramificações, a sequência de meros é contínua, uma cadeia ramificada tem cadeias laterais ligadas à cadeia principal, devido a essa ramificação os polímeros possuem um menor grau de cristalinidade. A cadeia conhecida como reticulada, a estrutura polimérica é tridimensional, com as cadeias unidas por ligações covalentes ou quando possuem muitas ligações cruzadas de acordo com a Figura 7.

Figura 7: Diferentes tipos de cadeias poliméricas: a) cadeia linear; b) cadeia ramificada; c) cadeia com ligações cruzadas e d) cadeia em rede (tridimensional)



Fonte: CALLISTER, 2016.

As características tecnológicas dos diferentes processos de fabricação dos polímeros são a base para classificá-los em polímeros termoplásticos e termorrígidos (MANO; MENDES, 2004).

- a) **Termoplásticos:** necessitam de calor para se tornarem moldáveis, ao serem resfriados, adquirem a forma geométrica na qual foram moldados. Esse material se torna flexível pelo enfraquecimento das forças intermoleculares, provocadas pelo aquecimento. A vantagem desse material é a possibilidade de repetição do ciclo de aquecimento e resfriamento, tornando possível sua reciclagem;
- b) **Termorrígidos:** são plásticos que, após o processo de cura, providos ou não de aquecimento, não podem ser reamolecidos por outro aquecimento, devido à formação de ligações cruzadas, logo, não podem ser reciclados.

Quanto ao comportamento mecânico, de acordo com Canevarolo (2010), os polímeros podem dar origem aos plásticos, que são materiais que em algum estágio, durante a sua fabricação, adquirem condição plástica a fim de serem moldados; às fibras poliméricas que são termoplásticos orientados longitudinalmente, sendo que uma dimensão predomina sobre as demais. A razão de aspecto, isto é, o quociente entre o comprimento e o diâmetro da fibra, geralmente é maior ou igual a cem e aos elastômeros ou borrachas: São materiais poliméricos amorfos, de origem natural ou sintética, que exibem elasticidade em longas faixas de deformação, à temperatura ambiente.

2.1.1 Polietileno

O Polietileno (PE) é um polímero amplamente utilizado e comercializado atualmente no mundo inteiro, pois apresenta suas propriedades e características estruturais, cristalinas, flexíveis e com excelente resistência química, oriundo da sua natureza parafínica, de seu peso molecular e de sua estrutura. (COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003).

Mano (2004) afirma que quimicamente, trata-se do polímero existente mais simples, conforme demonstrado no quadro 1, no qual é demonstrado sua estrutura, junto com os principais polímeros. Também apresenta o mais baixo custo. Quando submetido a uma elevação em sua pressão e/ou temperatura é capaz de amolecer-se e fluir-se, porém se solidifica quando retirado deste processo. Por essa razão o polietileno é reciclável.

Existem diferentes classes e tipos de polietileno, que são classificados conforme a presença de ramificações na cadeia polimérica e de acordo com sua densidade. A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) normatizou essa classificação, através da ASTM 4976:2006, conforme é ilustrado no Quadro 3.

Quadro 3 - Classificação dos tipos de polietileno

Tipos	Siglas
I Polietileno de Baixa Densidade	PEBD ou LDPE
II Polietileno Linear de Baixa Densidade	PELBD ou LLDPE
III Polietileno de Alta Densidade	PEAD ou HDPE
IV Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular	PEUAPM ou UHMWPE
V Polietileno de Ultra Baixa Densidade	PEUBD ou ULDPE

Fonte: Adaptado de ASTM 4976:2006.

A Tabela 1 mostra as algumas propriedades dos principais polietilenos atualmente comercializados.

Tabela 1 - Algumas Propriedades dos Principais tipos de Polietileno

Tipo	PEBD	PELBD	PEAD	PEUAPM
Massa Específica (g/cm ³)	0,915 - 0,935	0,910 - 0,925	0,941 - 0,967	0,93
Temperatura de Fusão (°C)	106 - 112	125	130 - 133	132
Cristalinidade (%)	40 - 60	50 - 70	60 - 90	40 - 50
Tensão de Ruptura (Mpa)	6,9 - 17,2	14 - 21	18 - 30	20 - 41
Alongamento até a ruptura (%)	100 - 700	200 - 1200	100 - 1000	300
Resistência ao Impacto Izod (J/m)	0,67 - 21		27 - 160	Não quebra
Dureza (Shore D)	45 - 60	41 - 53	60 - 70	64
Resistência Química	Boa	Boa	Boa	Excepcional

Fonte: Adaptado de COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003.

É um polímero parcialmente flexível, suas propriedades se destacam pela quantidade relativa das fases amorfa e cristalina. As ínfimas unidades cristalinas, lamelas, são planares e constituem de cadeias perpendiculares ao plano da cadeia

principal e dobradas em zig-zag, para cada 5 a 15nm, os defeitos são poucos frequentes. Os polietilenos são inertes em relação à maioria dos produtos químicos comuns, tendo em vista à sua natureza parafínica, sua estrutura parcialmente cristalina e seu alto peso molecular. Em temperaturas abaixo de 60 °C, são parcialmente solúveis em todos os solventes (NEVES, 1999).

Dois fenômenos podem ser observados nos polietilenos que são a interação com os solventes e com agentes tensoativos, o primeiro, o polietileno sofre inchamento, sua dissolução é parcial, surgimento de cor ou, com o passar do tempo, completa degradação do material; o segundo fenômeno, resulta a redução da resistência mecânica do material por efeito de tenso-fissuramento superficial (NEVES, 1999).

Em situações normais, os polímeros etilênicos não são tóxicos, pode ser usado em contato com produtos alimentícios e farmacêuticos, apesar disso, alguns aditivos podem ser agressivos. Antigamente, o polietileno era classificado pela densidade e pelo tipo de processo usado em sua fabricação. Nos dias de hoje, são descritos como polietilenos ramificados e polietilenos lineares (MARTINS, 1999).

Tendo em vista a globalização, o mercado brasileiro de polietileno obteve novo perfil no desempenho e produtividade, a indústria de transformação desse produto em volume e qualidade, gera maior oferta e tipos. Vale destacar que as poliolefinas representam em torno de 60% da demanda mundial de termoplásticos, sendo que os polietilenos ficam em um patamar dos 40%. No Brasil, as poliolefinas representam cerca de 65%, sendo que 43% correspondem aos polietilenos (RETO, 2000).

De acordo com as condições reacionais e do sistema catalítico utilizado na polimerização, é possível produzir cinco tipos diferentes de polietileno tais como: Polietileno de baixa densidade (PEBD); Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE); Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou LLDPE); Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM ou UHMWPE) e Polietileno de ultrabaixa densidade (PEUBD ou ULDPE) (RETO, 2000).

2.1.1.1 Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)

É um polímero parcialmente cristalino (variações entre 40 e 60%), com estrutura ramificada, produzido através do processo de polimerização de radicais

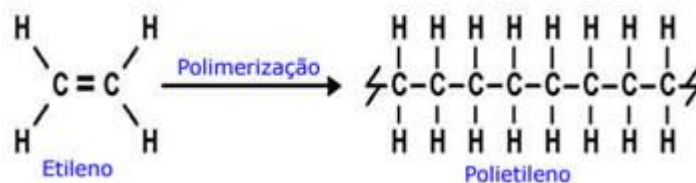
livres, com massa específica na casa dos 0,915 e 0,935 g/cm³ e temperatura de fusão na faixa de 106 à 112 °C. Suas principais propriedades são: boa resistência química, processabilidade e estabilidade térmica, elevada resistência a impactos, translucidez e transparência, alta tenacidade e flexibilidade, grande viscosidade, além de apresentar boa propriedade elétrica. (COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003; BARBOSA *et al.*; 2017).

É obtido por meio do processo de polimerização via radical livre à alta pressão e temperatura, é um polímero parcialmente cristalino, sua densidade varia de 0,91 a 0,93 g/cm³, massa molar de 20.000 a 45.000 g/mol e com ponto de fusão de 100 a 120° C. O processo de produção de PEBD usa pressões entre 1000 e 3000 atmosferas e temperaturas entre 100 e 300 °C. Diversos iniciadores, peróxidos orgânicos, têm sido usados, entretanto o oxigênio é o principal. (COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003; BRASKEM, 2009).

A reação é extremamente exotérmica, dessa forma, uma das principais dificuldades do processo é remover o excesso de calor do meio reacional. Essa natureza altamente exotérmica da reação a altas pressões leva a uma vasta quantidade de ramificações de cadeia, que possuem uma relação relevante com as propriedades do polímero. Há pouco tempo, não se tinha outro meio comercial para sintetizar PE altamente ramificado com eficácia. Nos dias de hoje já se tem evidências de que ramificações longas podem ser produzidas por catalisadores metalocênicos (HADJICHRISTIDIS; MENDELSON, 2000).

As condições de reação do processo formam um grande número de ramificações no polímero alterando a simetria da cadeia principal. As ramificações volumosas podem agrupar-se de forma ordenada e compacta. A presença de ramificações na cadeia limita em um certo grau, as forças atrativas entre as cadeias do polímero e leva a uma estrutura menos compacta, com isso, diminui sua densidade e resistência mecânica do polietileno (COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003; GUIMARÃES, 2006). A Figura 8 mostra a síntese da polimerização eteno com suas ligações molecular.

Figura 8: Síntese do homopolímero do polietileno



Fonte: Brasil Escola, 2024.

Na maioria das vezes essas ramificações são tão longas quanto à cadeia principal do polímero, de modo geral, engloba algumas dezenas ou centenas de átomos de carbono. Essa espécie de ramificação tem um efeito realçado sobre a viscosidade do polímero em solução; que pode ser identificada ao comparar a viscosidade de um polietileno ramificado e a de um polímero linear de mesmo peso molecular. A presença dessas ramificações determina o grau de cristalização, as temperaturas de transição e afeta parâmetros cristalográficos tais como tamanho dos cristalitos (PEREIRA; MANO; DIAS, 1997).

Outro mecanismo apontado para a formação de ramificações curtas no polietileno de baixa densidade, produzido via radicais livres, é a transferência de cadeia intramolecular. Essas ramificações curtas são especialmente n-butila, entretanto, grupos etila e n-hexila, em proporções menores, formados também pela transferência de cadeia intramolecular. Quanto à estrutura cristalina, o PEBD, ao ser comparado ao polietileno linear, apresenta cristalitos menores, menor cristalinidade e maior desordem cristalina, uma vez que as ramificações longas não podem ser bem acomodadas na rede cristalina (PEREIRA; MANO; DIAS, 1997).

Algumas aplicações do PEBD: sacolas de todo tipo, filmes plásticos, garrafas térmicas, frascos de cosméticos e medicamentos, mangueiras, entre outros, como ilustra a Figura 9.

Figura 9: Exemplos de aplicações de Polietileno de Baixa Densidade



Fonte: Engenharia 360, 2024.

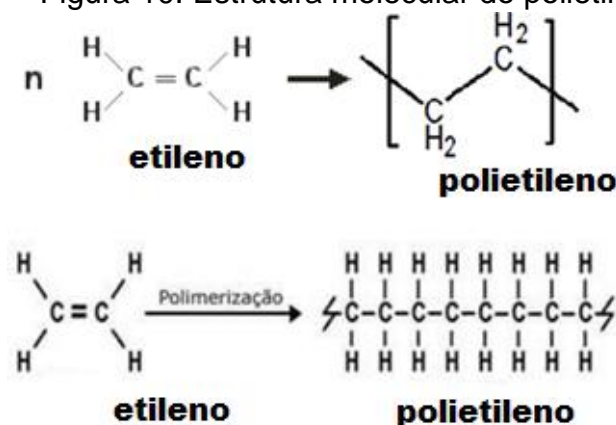
2.1.1.2 Polietileno de Alta Densidade (PEAD ou HDPE)

Os Polietilenos de Alta Densidade (PEAD ou HDPE) são altamente cristalinos (60 à 90%) e lineares, possuem poucas ramificações e elevada resistência à tração, sendo compactos e regulares. São mais densos, ou seja, sua densidade se apresenta na faixa de 0,941 à 0,967 g/cm³ e sua temperatura de fusão está em torno de 130 à 133°C. Tem boa resistência química e é aplicado na fabricação de embalagens de alimentos, tubulações, brinquedos, materiais hospitalares, engradados de bebidas, entre outros (GUIMARÃES, 2006; COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003; WIEBECK; HARADA, 2005).

Os autores afirmam ainda que o PEAD tem excelentes propriedades, baixo custo, além de grande variabilidade e versatilidade de aplicações. Apesar de tornarem-se quebradiços, de acordo com sub condições severas, como elevadas pressões e velocidades de deformações, bem como, baixas temperaturas, estão entre os polímeros mais vendidos no mundo (GUIMARÃES, 2006; COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003; WIEBECK; HARADA, 2005).

É representado pela cadeia (CH₂-CH₂)_n, figura 10, denota baixo custo, é usado a nível mundial. É inerte quimicamente é obtido pela polimerização do etileno, pode ser produzido por reações de polimerização diferentes, como por radicais livres, aniônica, por coordenação de íons ou polimerização catiônica. As resinas de polietileno de alta densidade possuem massas específicas na faixa de 0,94-0,97 g/cm³. Por possuir um nível muito baixo de ramificação, o PEAD é por chamado às vezes de polietileno linear (PEACOCK, 2000).

Figura 10: Estrutura molecular do polietileno



O PEAD possui como características específicas como durabilidade, impermeabilidade, resistência à corrosão e ductilidade, faz parte da lista dos plásticos mais resistentes e utilizados em mercados. Para Peacock (2000), devido a sua flexibilidade, é menos vulnerável a danos causados por oscilações extremas, como vibração e choques.

Possui extraordinária resistência à água sem prender o oxigênio ou o gás carbônico. Com a reciclagem desse material. São produzidos diversos utensílios, como embalagens plásticas, brinquedos, sacolas e outros. Para isso, esses produtos são selecionados e posteriormente são limpos, moídos, secos e triturados (MANO, 2004).

2.1.1.3 Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD OU LLDPE)

É um termoplástico com ramificações de comprimentos constantes, distribuição de pesos moleculares estreitos e propriedades intermediárias entre o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD ou LDPE) e o Polietileno de Alta Densidade (PEAD ou HDPE). Sua densidade é na faixa de 0,910 à 0,925 g/cm³, temperatura de fusão de 125 °C e cristalinidade com variação entre 50 e 70%.

É polimerizado em baixa pressão, tem boa resistência ao rasgo e à tração. Trata-se de um material econômico, com boa resistência química e alta eficiência em selagem a quente, o que possibilita grande utilização na produção de embalagens e/ou filmes. Possui maior brilho e rigidez e menor permeabilidade a gases, quando comparado ao Polietileno de Baixa Densidade. A Figura 11 apresenta um exemplo da aplicação de Polietileno Linear de Baixa Densidade (PEBD ou LDPE) (COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003; BARBOSA *et al.*, 2017).

Figura 11: Exemplo da aplicação de Polietileno Linear de Baixa Densidade



Fonte: Agroclique, 2019.

Trata-se de um novo tipo de polietileno que evidencia propriedades mecânicas muito superiores ao polietileno de baixa densidade (PEBD), e muito utilizado em filmes para embalagens. Apesar disso, as propriedades reológicas dos PELBD criam sérios problemas com referência ao processamento. A resistência destas resinas no estado fundido é baixa, assim, leva a uma instabilidade dimensional da pré-forma que está sendo soprada ou do filme tubular que está sendo extrusado para a aquisição de filmes (GARCIA; SANTÓPOULOS; ALVES, 1995; ABRAHAM; GEORGE; FRANCIS, 1996).

Em contrapartida, o PELBD denota uma baixa sensibilidade ao cisalhamento, isto é, a viscosidade do PELBD diminui paulatinamente à medida em que se aumenta a taxa de cisalhamento. A alta viscosidade do PELBD, provoca um aumento dos níveis de pressão no cabeçote da extrusora, bem como a elevação das cargas dos motores requerendo que a resina seja aquecida a temperaturas mais elevadas o que facilita o processamento. Esses inconvenientes podem ser contornados no processamento do PELBD é a mistura com outros polímeros, entre estes o PEBD (GARCIA; SANTÓPOULOS; ALVES, 1995; ABRAHAM; GEORGE; FRANCIS, 1996).

2.1.1.4 Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM ou UHMWPE)

É um polímero semicristalino, possui poucas ramificações, com uma quantidade de insaturações em torno de zero, com densidade média, aproximadamente de $0,930 \text{ g/cm}^3$, é de cor branca e opaca, sua temperatura varia

entre -100°C e -125°C e uma temperatura de fusão de 135°C , com uma cristalinidade em torno de 45 % em geral (WIEBECK; HARADA, 2005).

Sua massa molar é cerca de 10 vezes maior que as resinas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Essa massa molar extremamente alta concede ao polímero diversas propriedades relevantes como: alta resistência ao desgaste por abrasão, alta resistência ao impacto, além de baixíssimo coeficiente de atrito que torna o material auto-lubrificante (COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003).

As características de um PEUAPM são únicas, assim, os divergem dos polietilenos descritos anteriormente. Trata-se de um produto qualificado, é de alto valor e desempenho, por apresentar boa resistência a corrosão, elevada resistência ao impacto, a fadiga e a abrasão, além de possuir baixo coeficiente de atrito. (COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003; FARIAS, 2002; WIEBECK; HARADA, 2005).

Pelo fato de apresentar um baixo índice de fluidez, aproximadamente zero, e viscosidade extremamente alta, os mesmos autores firmam que o processamento desse polietileno é impossível se feito utilizando os métodos convencionais, ou seja, só pode ser feito por meio de compressão por termoprensagem e/ou extrusão por pistão.

O PEUAPM é empregado na fabricação de roscas e estrelas nas áreas de envasamento, buchas, calhas, bicas, pista de patinação, entre outros. A Figura 12 apresenta alguns exemplos de aplicação de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM ou UHMWPE).

Figura 12: Exemplos de aplicações de PEUAPM ou UHMWPE



Fonte: Plástico.com.br, 2023.

2.2 RESÍDUOS

Os resíduos são restos das atividades humanas ou industriais, são considerados inservíveis e se apresentam no estado sólido, semi sólido ou líquido. Tecnicamente, resíduos sólidos são os materiais descartados, os quais podem ser reciclados e parcialmente utilizados. Assim, recebem uma destinação ou tratamento correto trazendo benefícios à saúde, economia e ao meio ambiente (PEREIRA; TOCCHETTO, 2019).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 10.004 de 31 de maio de 2004, define resíduos sólidos como:

“Resíduos sólidos: Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (NBR 10.004).”

A classificação dos resíduos sólidos envolve sua identificação ou a atividade de origem, sua constituição e características e analisar se causam impactos à saúde e ao meio ambiente (NBR 10004:2004).

- a) **Resíduos Classe I, perigosos:** apresentam periculosidade devido suas propriedades físicas, químicas ou infecto contagiosas, podem causar riscos à saúde pública, provocando doenças, mortalidade; ao meio ambiente ao ser gerenciado de maneira inadequada. São caracterizados de acordo com as inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- b) **Resíduos Classe II, não perigosos:** São os resíduos produzidos em restaurantes como restos de alimentos, madeira, materiais têxteis, resíduos de minerais não metálicos, areia de fundição, bagaço de cana, sucatas de metais ferrosos, sucata de metais não ferrosos, resíduos de papel e papelão, resíduos de plástico polimerizado, borracha dentre outros materiais não perigosos.

Nos países industrializados as pessoas produzem diariamente uma quantidade de lixo muito grande devido a busca de comodidade, o que contribui para a destruição do Meio Ambiente, prejudicando seres vivos, devido à infiltração que ocorre em aterros sanitários, prejudicando águas subterrâneas, rios, lagos, dentre outros (SASSE, 2002).

O desenvolvimento o bem-estar e o conforto humano, criado a partir da Revolução Industrial, contribuiu com um aumento considerável de material descartado, aumentando a quantidade de resíduos gerados e não utilizados pelo homem. Devido ao desejo de consumo, ocorre o desperdício dos recursos naturais, prejudicando o meio ambiente, e como resultado tem-se um planeta em desequilíbrio ambiental (DAMÁSIO; SAMPAIO, 2003; FORNACIARI, 2008).

O desequilíbrio ambiental, está relacionado a grande densidade populacional urbana que ao utilizar produtos descartáveis, gera resíduos de maneira preocupante com características variadas, muitas vezes com potenciais causadores de impactos ao meio ambiente (HADDAD, 2006).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, tratada na Lei número 12305 de 02 de agosto de 2010, tem como finalidade encaminhar diretrizes relativas à gestão

integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. É uma lei de grande relevância em relação à política pública que pode proporcionar (BRASIL, 2010).

O gerenciamento inadequado dos resíduos sólidos pode gerar problemas, de saúde pública, de impacto ambiental, de aspectos sociais e de ordemeconômica. Quanto à saúde pública, o lixo ao ser mal acondicionado, causam poluição ambiental, o que é um risco para a segurança da sociedade. Por meio das aves, os insetos nocivos, os ratos e os microrganismos sugem doenças como: dengue, febre amarela, disenterias, febre tifóide, cólera, leptospirose, dentre outras (SISINNO; OLIVEIRA , 2000).

De acordo com a Agenda 21 (ONU, 1992), morrem por ano aproximadamente 5,2 milhões de pessoas, incluindo 4 milhões de crianças devido a doenças relacionadas às condições precárias de saneamento.

Em relação ao impacto ambiental, segundo a resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986, impacto ambiental é:

“Qualquer alteração nas propriedades físicas, químicas e biológicas do ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetem a saúde, a segurança e o bem estar da população, as atividades ambientais e econômicas, a biota, as condições estéticas e sanitárias do ambiente e a qualidade dos recursos naturais (BRASIL, 1986).”

O descarte inadequado do lixo pode gerar contaminação do ar pela poeira, pelo gás metano e pelas queimadas em áreas de grande acúmulo de lixo. Contamina também o solo por substâncias químicas que ao são acumuladas em vegetais, principalmente quando o índice de metais pesados for muito superior ao tolerável. A água, superficiais e subterrâneas também é contaminada com a disposição inadequada do lixo diretamente no solo, dessa forma compromete seu uso devido a contaminação das fontes (PEREIRA NETO; LELIS, 1999).

Quanto aos aspectos sociais, o lixo potencializa a existência do homem em níveis degradantes. Nas favelas, o lixo é depositado de forma irregular, eles convivem com o lixo em vielas e terrenos, pois a coleta não é regular. Apesar do o lixo não ser o responsável pelas desigualdades sociais que levam a pobreza, é responsável pelo surgimento de incontáveis favelas, que são criadas por pessoas atraídas pela catação

dos materiais recicláveis (PEREIRA NETO; LELIS, 1999).

Com referência à ordem economia, durante muito tempo, no Brasil, quase todas administrações públicas optaram pelo lixão por ser uma alternativa simples e barata para descartar o lixo. Com o passar do tempo, observou-se que o custo para dispor o lixo era muito alto considerando-se a contaminação de mananciais e do solo, aumento considerável de animais sinantrópicos, as pessoas se aproximavam das dependências do lixão em condições péssimas de vida, além de altas multas para os municípios, de acordo com a legislação ambiental vigente (PEREIRA NETO; LELIS, 1999).

2.2.1 Reciclagem

Sabe-se que um dos grandes problemas ambientais a nível mundial que a população enfrenta, é o crescimento gradativo da produção de resíduos relacionado ao aumento das taxas de consumo. Esse crescimento acompanha a acelerada expansão urbana, porém, não acontece o mesmo com a infraestrutura sanitária (POLAZ; TEIXEIRA, 2009).

Esse aumento se deu a partir da Revolução Industrial, haja vista que antes lixo era composto basicamente por matéria orgânica, como restos de alimentos, com o desenvolvimento, posteriormente, passou a ser composto por todo tipo de material que a população rejeita. Por meio desta revolução o lixo foi expandido nas cidades da mesma forma que as cidades cresciam, tornando um risco à saúde, ao meio ambiente e aos cofres públicos (DMITRIJEVAS, 2010).

Vale destacar que a Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, para tanto, o Brasil deve priorizar a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, conforme o estabelecido na referida lei seguindo esta ordem: “não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”. (SIMONETTO; BORENSTEIN, 2006).

Nesse entendimento, a Construção Civil em seus processos construtivos, gera uma enorme quantidade de resíduos em consequência do alto índice de materiais desperdiçados. Outras atividades econômicas, como a indústria e o comércio,

também produzem quantidades elevadas de resíduos, pode-se citar como exemplo a produção de polímeros, que causa preocupação, devido ao impacto causado ao meio ambiente. O artigo 3º da referida lei, exige responsabilidade e consciência quanto ao tratamento e cuidados da sociedade com o destino destes materiais (BRASIL, 2010).

A reciclagem nos últimos anos tem sido alvo de muita atenção, estudos têm sido desenvolvidos com a finalidade de evitar danos ao meio ambiente. No processo de industrialização do plástico, é indispensável valorizar a reciclagem dos resíduos dos polímeros, posto que o processo de decomposição natural é longo e crítico ao equilíbrio ecológico (WIEBECK; HARADA, 2005).

Reciclagem é todo o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, visando transformar em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes (BRASIL, 2010).

Nessa perspectiva, a reciclagem e o reaproveitamento são caminhos promissores para o futuro. Baseando-se nessa premissa decidiu-se reciclar polietileno de baixa densidade (PEBD), para ser utilizado na construção civil visando reduzir o consumo de areia na fabricação de pisos intertravados.

2.3 CONCRETO

O Concreto é um composto com características que dependem da proporção, propriedades e interação de seus componentes. A escolha e adequação dos materiais do concreto tem papel fundamental na composição de um concreto de alta performance (NEVILLE, 2016).

Os componentes do concreto são, de forma geral: cimento, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (brita ou pedra). Podendo também ser adicionado aditivos químicos para aumentar suas propriedades (BASTOS, 2014; ABNT NBR 12655, 2015).

2.3.1 Cimento

O cimento é um composto químico seco, moído e fino, pulverulento, que ao ser misturado à água, se hidrata e, apresenta uma nova forma, endurece, mesmo que sejam submetidos novamente à ação da água não se desagregam mais, permanecem sólidos (ABNT NBR 12655,2015).

O Cimento Portland, segundo Mehta e Monteiro (2014), trata-se de um aglomerado hidráulico, composto basicamente de silicatos de cálcio hidráulicos, frequentemente com uma ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto adicional.

Os Quadros 4, 5, 6 e 7 apresentam com base na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), sua composição:

Quadro 4 - Composição dos Cimentos Portland comuns e compostos

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100		-		NBR 5732
	CP I-S	99-95		1-5		
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002.

Quadro 5 - Composição dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002.

Quadro 6 - Composição do cimento Portland de alta resistência inicial

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)		Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Material carbonático	
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	0-5	NBR 5733

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002.

Quadro 7: Composição Cimentos Portland Resistentes aos Sulfatos

Os *cimentos portland resistentes aos sulfatos* são aqueles — como o próprio nome diz — que têm a propriedade de oferecer resistência aos meios agressivos sulfatados, tais como os encontrados nas redes de esgotos de águas servidas ou industriais, na água do mar e em alguns tipos de solos. De acordo com a norma NBR 5737, quaisquer um dos cinco tipos básicos (**CP I**, **CP II**, **CP III**, **CP IV** e **CP V-ARI**) podem ser considerados resistentes aos sulfatos, desde que obedecem a pelo menos uma das seguintes condições:

- teor de aluminato tricálcico (C_3A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de, no máximo, 8% e 5% em massa, respectivamente.
- cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa.
- cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa.
- cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002.

O Quadro 8, demonstra toda subdivisão dos Cimento Portland, de acordo com o Tipo de Cimento, suas Adições, Siglas e Normas:

Quadro 8: Classificação do Cimento Portland.

Tipo de Cimento	Adições	Sigla	Norma
Cimento Portland Comum	Escória, pozolana ou fíler (até 5%)	CP I-S 32 CP I-S 40	5732
Cimento Portland Composto	Escória (6-34%)	CP II-E 32 CP II-E 40	11578
	Pozolana (6-14%)	CP II-Z 32	
	Fíler (6-10%)	CP II-F 32 CP II-F 40	
Cimento Portland de Alto-Forno	Escória (35-70%)	CP III 32 CP III 40	5735
Cimento Portland Pozolânico	Pozolana (15-50%)	CP IV 32	5736
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	Materiais carbonáticos (até 5%)	CP V-ARI	5733
Cimento Portland Resistente aos Sulfatos	Estes cimentos são designados pela sigla RS. Ex.: CP III-40 RS, CP V-ARI RS		5737

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002.

2.3.2 Água

A água é essencial para a hidratação do cimento, quando adicionada, reage quimicamente transformando-o em um ligante. A quantidade de água utilizada deve ser ideal, já que se colocada em menor quantidade tal reação não ocorre corretamente diminuindo sua resistência final, e se colocada em abundância, também reduzirá a resistência do concreto, isto porque a água excedente gera vazios na estrutura. (QUEIROZ, 2012).

2.3.3 Areia

Segundo Mehta e Monteiro (2014), os fragmentos menores que 4,8 mm são chamados de agregados miúdos. Os agregados miúdos utilizados no concreto, são geralmente as areias naturais, que são retiradas dos leitos dos rios.

As areias com partículas lisas e arredondadas são as que apresentam melhor características, pois exigem uma quantidade reduzida de água de amassamento. (BASTOS, 2014).

2.3.4 Brita

A escolha deste agregado graúdo é muito importante para a qualidade do concreto. A NBR 6118 recomenda que a dimensão máxima da brita seja menor que 1/4 da menor distância entre as faces da fôrma e para lajes que seja 1/3 de sua espessura.

2.4 PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA

Os pavimentos intertravados tiveram sua origem nos pavimentos revestidos com pedras, executados na Mesopotâmia a cerca de 5.000 anos a.C. e muito utilizados pelos romanos desde 2.000 a.C. Este tipo de pavimento evoluiu, primeiramente, para o uso de pedras talhadas, como os paralelepípedos. As dificuldades da produção artesanal dessas pedras e a falta de conforto de rolamento estimularam o desenvolvimento das peças de concreto pré-fabricadas (ABCP, 2010).

Após a Segunda Guerra Mundial, a produção desses blocos passou a ser feita em fábricas maiores e em grande escala na Alemanha. Com um grande impulso que ocorreu na década de 70, foi possível chegar ao Brasil (ABCP, 2010).

Pavimento é a estrutura construída em cima da terraplenagem, tem como destino a distribuição e suporte aos esforços oriundos do tráfego. A finalidade consiste em melhorar a segurança, o conforto e a resistência ao desgaste. De acordo com a função da via, a estrutura do pavimento pode variar em relação aos materiais utilizados e sua espessura (BALBO, 2015).

O pavimento é composto por camadas sobrepostas de materiais diferentes, compactados a partir do subleito, apropriada para atender operacionalmente e estruturalmente o tráfego, de maneira durável e ao menor custo possível, levando em conta o serviço de manutenção e reabilitação obrigatórias (BALBO, 2015).

Caracteriza-se a estrutura do pavimento intertravado através do revestimento em blocos, com alta durabilidade e resistência, assentados sobre uma camada de

areia, a base, a sub-base e o subleito. A Figura 13 mostra a estrutura de uma pavimentação.

Figura 13: Estrutura do pavimento flexível



Fonte: ABCP, 2010.

Intertravamento é a resistência atingida pelos blocos ao se deslocarem de forma individual, no que se refere a seus vizinhos. Para alcançar esse objetivo é fundamental utilizar-se de contenção lateral que trava o bloco impossibilitando o deslocamento lateral na camada de rolamento e a areia de selagem que é a junta, com a finalidade de transferir os esforços entre os blocos de concreto, para que aguentem as cargas solicitantes. Deste modo, é fundamental o intertravamento para assegurar um bom desempenho e durabilidade do pavimento (ABCP, 2010).

A Figura 14 demonstra a funcionalidade do intertravamento.

Figura 14: Funcionalidade do Intertravamento



Fonte: ABCP, 2010.

2.4.1 Blocos Intertravados de Concreto

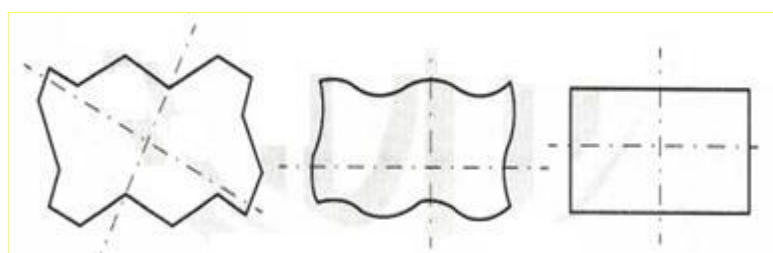
Gradativamente os blocos vem conquistando espaço no mercado, tendo em vista as vantagens que oferece, cita-se como exemplo a facilidade de assentamento, a agilidade na liberação para o tráfego, o fácil acesso às redes subterrâneas além da praticidade de manutenção (AMADEI, 2011)

Vale destacar sua permeabilidade que auxilia na drenagem urbana. O bloco intertravado de concreto é durável, sua superfície é regular e antiderrapante, proporciona conforto ao usuário; por ter uma coloração mais clara, o consumo de iluminação pública é menor; absorve menos energia, minimizando o efeito de calor. É fácil de ser instalado, em caso de necessidade de manutenção, as peças são reaproveitadas.

A fabricação dos pavers de concreto pode ser de diversos formatos e cores contribuindo para uma estética variada ao fazer combinações. A classificação desses blocos pode ser feita de quatro tipos diferentes conforme NBR 9781/2013:

Tipo I - Pavers com forma aproximada a retangular, sua relação de comprimento/largura seja igual a dois, que seus quatro lados se encaixem podendo ser assentadas em espinha de peixe ou em fileiras, conforme demonstrado na Figura 15.

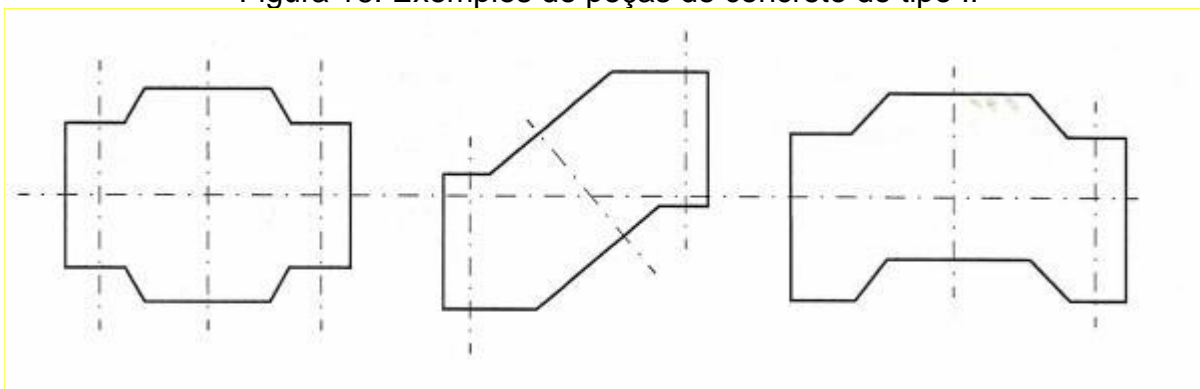
Figura 15: Exemplos de peças de concreto do tipo I



Fonte: NBR 9781:2013.

Tipo II - Pavers de formato único, Figura 16, diferente do formato Tipo I e que só podem ser assentadas em fileiras.

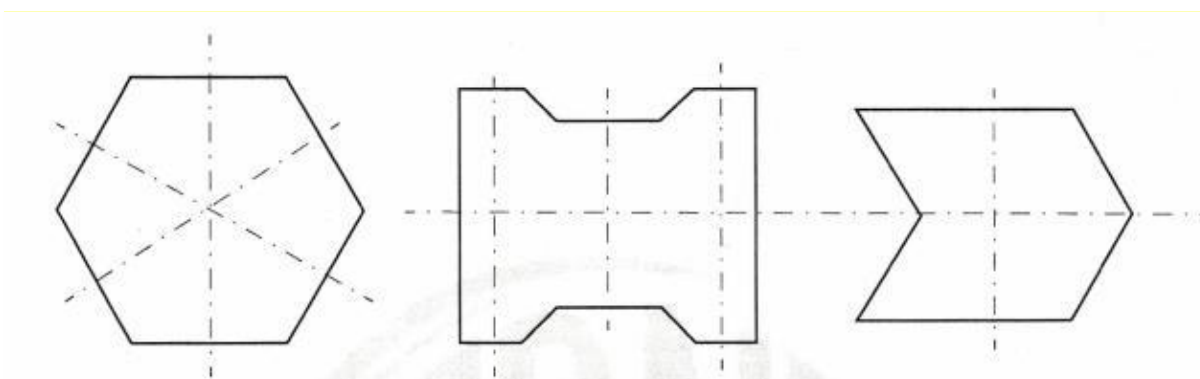
Figura 16: Exemplos de peças de concreto do tipo II



Fonte: NBR 9781:2013.

Tipo III - Pavers de formatos geométricos específicos, como trapézios, hexágonos, triédros etc, de acordo com a Figura 17, e com peso maior do que 4kg.

Figura 17: Exemplos de peças de concreto do TIPO III



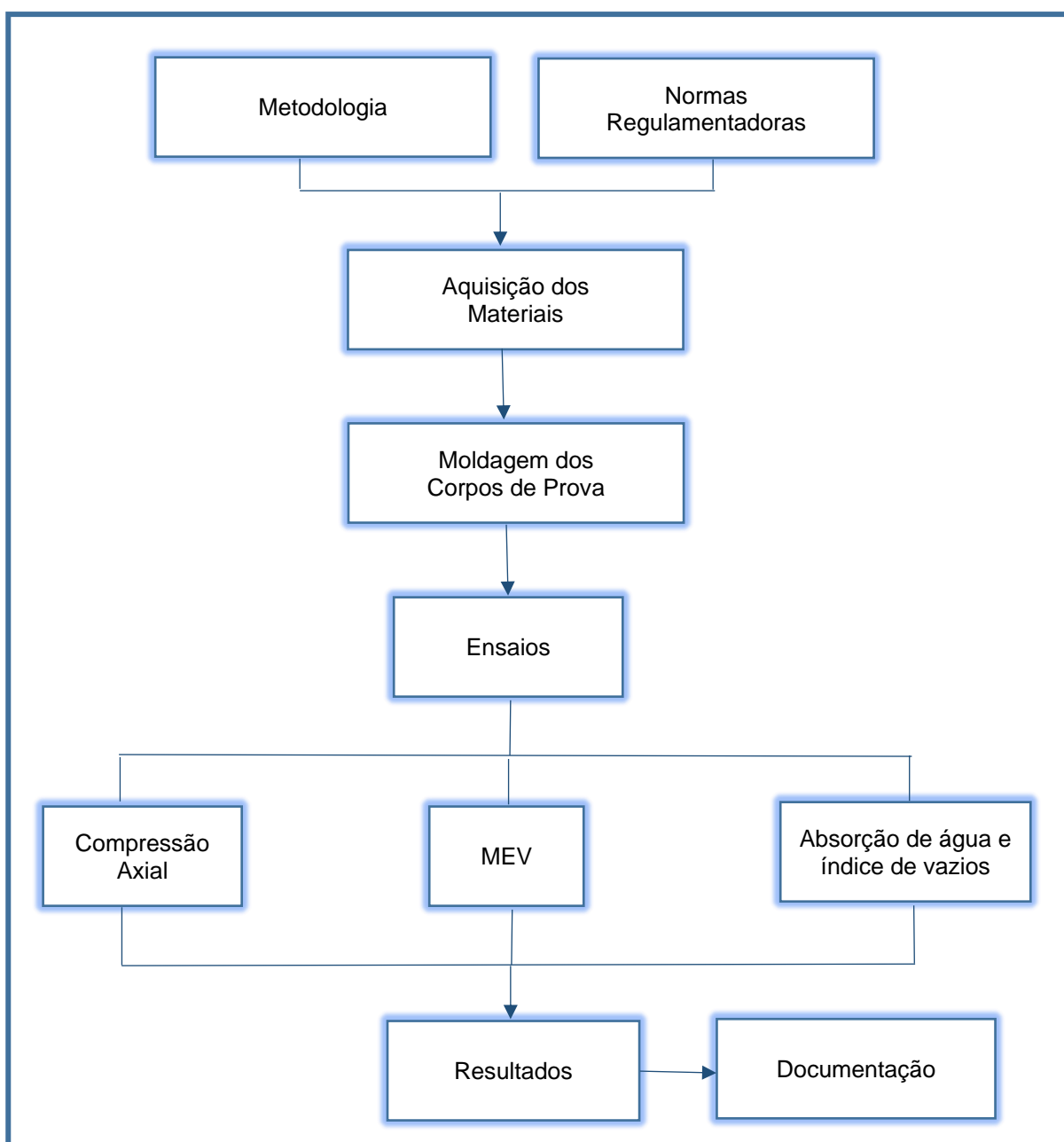
Fonte: NBR 9781:2013.

Tipo IV - Pavers de tamanhos variados, ou uma única peça com juntas falsas, que em seu assentamento empregue um ou mais padrões (Figura 18).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar o presente estudo foram selecionados os seguintes materiais: cimento, areia, brita, água, aditivo Viamix Rápido CL, PEBD micronizado, com a finalidade de analisar a viabilidade do concreto com substituição da areia por PEBD micronizado, de forma a avaliar seu desempenho e suas propriedades mecânicas e morfológicas. A Figura 19 mostra o fluxograma deste estudo.

Figura 19: Fluxograma do Trabalho



Fonte: Elaborado pela Autora, 2024.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento Portland CPIII

O Cimento Portland CPIII-40 RS utilizado para essa pesquisa é da marca CSN, Figura 20, foi adquirido pela autora no município de Barra do Piraí/RJ.

Figura 20: Cimento Portland CPIII – 40 RS



Fonte: Autora, 2024.

3.1.2 Areia

Foi utilizado neste trabalho a areia média, adquirida pela autora no município de Barra do Piraí/RJ.

Conforme demonstra na Tabela 2, a norma NBR 7225/93, que regulamenta materiais de pedra e agregados naturais, divide a areia em três categorias.

Tabela 2 – Tipos de Areia

Tipo de Areia	Tamanho (mm)
Areia Grossa	entre 2 e 1,2
Areia Média	entre 1,2 e 0,42
Areia Fina	entre 0,42 e 0,075

Fonte: NBR 7225, 1993.

3.1.3 Brita

A Brita utilizada foi a Brita tipo 1, também adquirida pela autora no município de Barra do Piraí/RJ. A Tabela 3 mostra as categorias da brita, conforme a norma NBR 7225/93.

Tabela 3 – Tipos de Brita

Tipo de Brita	Tamanho (mm)
1	entre 4,8 e 12,5
2	entre 12,5 e 25
3	entre 25 e 50
4	entre 50 e 76
5	entre 76 e 100

Fonte: NBR 7225, 1993.

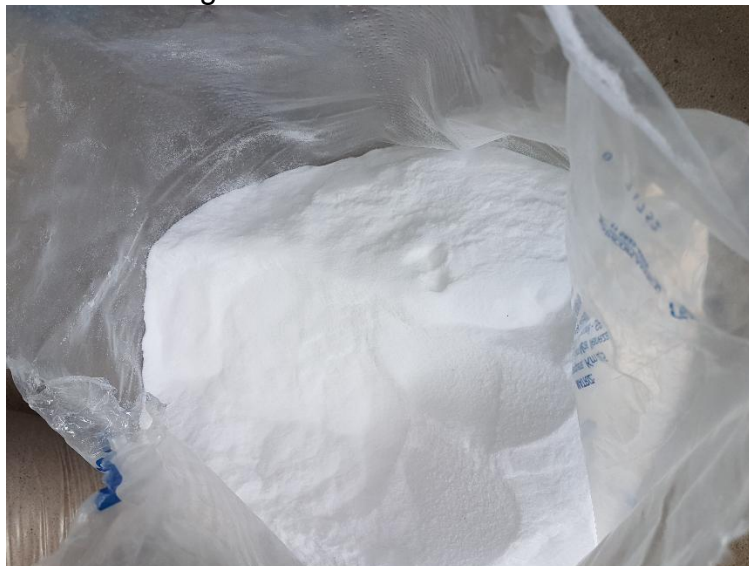
3.1.4 Água

A água utilizada neste estudo foi a de abastecimento do UniFoa.

3.1.5 Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)

O PEBD utilizado, foi o ICOMET LL 20-300 natural, Figura 21, o qual foi adquirido na empresa A. Schulman Plásticos do Brasil Ltda, localizada na cidade de Sumaré/SP. As especificações deste produto estão apresentadas na Tabela 4.

Figura 21: PEBD micronizado



Fonte: Autora, 2020.

Tabela 4 – Análise do PEBD micronizado
Análise do Lote 63915

Propriedades De Controle	Norma	Condição	Limites		Unidade	Resultados
			Mínimo	Máximo		
Índice de Fluidez	ITL 05	190°C / 2,16 Kg	17,00	23,00	g/10min	18,93
Massa Específica	ITL 36	23°C	0,920	0,932	g/cm ³	0,928

Fonte: Controle de Qualidade da A. Schulman, 2018.

3.1.6 Aditivo

De acordo com a Sika (2020), Sika® Concreto Forte, Figura 22, é um aditivo líquido plastificante e/ou redutor de água de pega normal para concreto, que permite trabalhar diversos tipos de concreto. É compatível com a maioria dos cimentos, não tendo nenhuma restrição quanto ao tipo de cimento.

Figura 22: Sika Concreto Forte



Fonte: Sika, 2020.

A utilização do Sika® Concreto Forte promove as seguintes propriedades ao concreto: aumento da trabalhabilidade, melhora o acabamento superficial, reduz a retração e a fissuração, melhora a homogeneidade, aumenta a impermeabilidade e aumenta a resistência final (Sika®, 2020).

Geralmente o Sika® Concreto Forte é utilizado em concreto convencional e armado, pisos, fundações, paredes, pilares, lajes e vigas (Sika®, 2020).

Trata-se de um produto à base de sais sulfonados e carboidratos em meio aquoso. Atende aos requisitos da ABNT (NBR-11768). E sua dosagem recomendada é de 1 litro para cada saco de cimento 50Kg (Sika®, 2020).

3.2 MÉTODOS

Este trabalho caracteriza a utilização de PEBD micronizado no concreto, com adição do produto em percentagens de volume (dosagens) diferentes.

3.2.1 Granulometria

Para realizar a análise granulométrica das matérias primas, foi utilizado o agitador de peneiras eletromecânico de bancada, fabricante Solotest, que possui

capacidade para até 8 peneiras Ø 8X2”, alimentação 110/220 V - 50/60 Hz. Utilizou-se ainda o conjunto de peneiras sucessivas de acordo com a NBR NM248 de 2003, demonstrado na Tabela 5. Esta análise foi realizada no Laboratório de Engenharia Civil do UniFOA.

As peneiras foram encaixadas formando um único conjunto de peneiras, a abertura de malha em ordem crescente da base para o topo (fundo - 600 µm; 600 µm - 2,00 mm; 2,00 mm - topo). As aberturas das peneiras são relacionadas ao número de malhas (mesh) que representa o número de aberturas de uma mesma dimensão contida num comprimento de 25,4 milímetros ou 1 polegada. O material retido na tela da peneira é denominado *oversize* e o passante, *undersize*.

Tabela 5 – Série de peneiras utilizadas para ensaio de granulometria

SÉRIE DE PENEIRAS	
Série Normal	Série Intermediária
75 mm	-
--	63 mm
37,5 mm	50 mm
--	-
--	31,5 mm
19 mm	25 mm
-	-
9,5 mm	12,5 mm
-	-
4,75 mm	6,3 mm
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 µm	-
300 µm	--
150 µm	-

Fonte: NBR NM 248 de julho de 2003

3.2.2 Corpos de Prova

Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com a NBR 5738/16, cujo molde cilíndrico deve ter a altura igual ao dobro do diâmetro, neste caso o molde utilizado tinha 100mm de diâmetro e 200mm de altura. Conforme norma, a medida

diâmetral tem tolerância de 1% e a altura de 2%. A Figura 23 mostra o molde cilíndrico utilizado na moldagem.

Foi utilizado óleo mineral fino, para que o material não aderisse ao molde.

Figura 23: Molde dos Corpos de Prova



Fonte: Autora, 2024.

Para atender aos ensaios efetuados neste trabalho, levando em consideração as receitas de substituição do agregado miúdo pelo PEBD micronizado, de 10%, 20% e 30%, além do referencial de 0%; foram confeccionados 88 CDP's cilíndricos, conforme apresentados na Tabela 6.

Utilizou-se a relação 1:2:2, cimento, areia e brita, conforme mostrado na Tabela 7, temos as quantidades utilizadas para a confecção dos CDP's. Na Figura 24, podem ser observados os CDP's com as misturas de concreto.

Tabela 6 – Quantidade de CDP's confeccionados

Tipo de CDP's	Ensaio	Qtd. CDP's	Datas de Rompimento	Nº receitas	Qtd. Total
Cilíndrico	Compressão Axial	5	4 (7, 14, 21 e 28 dias)	4	80 CDP's
Amostras	MEV	3	1 (28 dias)	4	12 amostras
Cilíndrico	Absorção de água e índice de vazios	2	1 (28 dias)	4	08 CDP's

Fonte: Elaborado pela Autora, 2024.

Tabela 7 – Proporções para produção do concreto

Adição PEBD (%)	Cimento (L)	Areia (L)	PEBD (L)	Brita (L)	Água (L)	Aditivo (L)
Referência (0%)	8,0	16,0	0,0	16,0	4,00	0,2
10%	8,0	14,4	1,6	16,0	4,50	0,2
20%	8,0	12,8	3,2	16,0	4,75	0,2
30%	8,0	11,2	4,8	16,0	5,00	0,2

Fonte: Elaborado pela Autora, 2024.

Figura 24: Corpos de Prova cheios



Fonte: Autora, 2024.

3.2.3 Mistura do Concreto

O concreto foi misturado em uma betoneira marca Menegotti, modelo 150 litros. Misturou-se a areia, a brita e o PEBD por cinco minutos, com 70% da água de amassamento. Posteriormente foi adicionado o cimento à mistura e o restante da água através do copo volumétrico, em conformidade com a NBR 5738/2016.

Ao se adicionar os 30% restante da água é possível atingir a consistência de cascata fluída. A betoneira foi paralisada para fazer o Teste de Abatimento ou “*Slump Test*”- termo em inglês, Figura 25, para controle do fator “a/c”. O fator “a/c” influencia na resistência do concreto sendo calculado utilizando a equação (1):

$$a/c = \frac{\text{Volume de água}}{\text{Volume de cimento}} \quad (1)$$

Figura 25: Teste *Slump* para aferição da fluidez.



Fonte: Autora, 2024

O fator “a/c” deve ser controlado uma vez que quanto mais se adiciona água, menor será a resistência do concreto e neste caso poderia se aumentar a quantidade de cimento a ser adicionada tornando mais altos os custos de produção (LIMA, 2003).

O Teste *Slump* foi realizado visando atingir o valor de abatimento de 50mm (padrão $60\text{mm} \pm 10\text{mm}$), obtido após, no máximo, com três medições. Ao terminar o Teste *Slump*, com a Betoneira desativada, deu-se início ao enchimento dos moldes de conformação dos CDP's com o concreto obtido na batelada.

O preenchimento de cada molde cilíndrico com o compósito de concreto foi feito em duas etapas, sendo a 1ª até a metade do molde de 100mm (base) x 200mm (altura) e a 2ª com o preenchimento total, com compactação de cada CDP com a Barra de Ferro até transbordar. Foi utilizada uma colher de pedreiro para fazer o rasamento do topo do CDP para deixar sua superfície lisa.

3.2.4 Ensaio Mecânico

3.2.4.1 Compressão Axial

De acordo com a norma NBR 5739/2018, foram realizados ensaios de resistência mecânica à compressão. Após as amostras ao atingirem as idades de 7, 14, 21 e 28 dias, foram retiradas 5 unidades de cada proporção, para realização do ensaio mecânico à compressão axial. Tais ensaios foram realizados no Laboratório do UniFOA, na prensa EMIC – DL 10000, com capacidade de 100 kN, Figura 26.

Figura 26: Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Autora, 2024

Com base na força aplicada, a prensa calcula o resultado da tensão de ruptura em MPa, para isso faz necessário a inserção da área da seção do corpo de prova. Para se calcular a tensão de ruptura se utiliza a equação 2.

$$F_{ck} = \frac{F}{A} \times 10 \quad (2)$$

Onde:

F_{ck} = Tensão de ruptura (MPa)

F = Força aplicada (kN)

A = Área de seção (cm²)

3.2.5 Ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios

Nos ensaios realizados para a absorção de água e índice de vazios, inicialmente determinou-se a massa de cada amostra em uma balança de precisão, marca Bel modelo Welmy instalada no laboratório do UniFOA; em seguida foram colocados em uma estufa de esterilização marca Odontobrás modelo EL 1.5 instalada no laboratório do UniFOA, Figura 27, a uma temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por um período de 72 horas. Para esse ensaio foram separados dois corpos de prova de cada composição, com idade de 28 dias.

Após esse período de 72 horas, cada amostra foi pesada novamente.

Já o ensaio referente à absorção de água, conforme NBR 9778/2009, que se aplica ao concreto ou argamassa, a qual determina a absorção de água, índice de vazio e massa específica. A absorção de água por imersão é definida pela equação 3.

$$A_{ag} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

A_{ag} = Absorção de água (%)

M_{sat} = massa do corpo de prova saturado (kg)

M_s = massa do corpo de prova seco em estufa (kg)

O índice de vazios é definido pela equação 4:

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

I_v = índice de vazios (%)

M_{sat} = massa do corpo de prova saturado

M_s = massa do corpo de prova seco em estufa

M_i = massa imersa - é a massa do corpo de prova saturado imerso na água

Figura 27: Estufa de esterilização marca Odontobrás modelo EL 1.5



Fonte: Autora, 2024.

Posteriormente, foi iniciado o processo de saturação e os CDP's foram imersos em água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, por 72 horas.

Finalizado esse processo, realizou-se a pesagem das amostras saturadas para obtenção da massa imersa.

3.2.6 Análise MEV

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada na análise microestrutural das superfícies das amostras para verificar a adesão entre partículas e matriz.

Para obter as imagens foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura Hitachi MEV-TM 3000, por meio de elétrons retroespalhados com voltagem de aceleração de 15 kV, Figura 28. Os corpos de prova utilizados para esta análise foram

colocados em um porta-amostra metálico. O equipamento de MEV está instalado no Laboratório de Caracterização de Materiais do UniFOA.

Figura 28: Microscópio Eletrônico de Varredura Hitachi MEV–TM 3000



Fonte: Autora, 2024.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 GRANULOMETRIA DA AREIA

Para comprovar que a areia encontrava-se dentro dos parâmetros apresentados para esse estudo, realizou-se o teste de granulometria do material a ser utilizado.

A Tabela 8 mostra que a maior quantidade de material, 54,3% do total, ficou retido na peneira de 600 μm e conforme a NBR 7211/2022, foi utilizada a areia média.

Tabela 8 – Distribuição granulométrica da areia

Peneiras	% Retido	
	Retido	Acumulado
12,5mm	-	-
9,5mm	-	-
6,3mm	-	-
4,75mm	-	-
2,36mm	1,9	1,9
1,18mm	12,4	14,3
600 μm	54,3	68,6
300 μm	23,1	91,7
150 μm	7,2	98,9
75 μm	-	-
Fundo	1,1	100,0

Fonte: Autora, 2024

4.2 GRANULOMETRIA DA BRITA

Para comprovar que a brita encontrava-se dentro dos parâmetros apresentados para esse estudo, realizou-se o teste de granulometria do material a ser utilizado.

A Tabela 9 apresenta o resultado obtido e mostra que 90,8% do material está entre os limites determinados pela NBR 7225/1993, para a brita do tipo 1 (4,8 mm – 12,5 mm)

Tabela 9 – Distribuição granulométrica da brita

Peneiras	% Retido	
	Retido	Acumulado
25,0 mm	-	-
19,0 mm	9,1	9,1
12,5 mm	66,8	75,9
9,5 mm	21,5	97,4
6,3 mm	2,5	99,9
Fundo	0,1	100,0

Fonte: Autora, 2024

4.3 CARACTERIZAÇÕES DOS CDP's

4.3.1 Compressão axial

a) Resultados com 7 dias

A Tabela 10 apresenta os resultados da compressão axial realizados nos CDP's que foram desenformados após 7 dias.

Pode-se observar que para os CDP's com 7 dias, os que tinham 10% de PEBD tiveram um acréscimo na sua resistência à compressão, se comparado ao referencial. Já os CDP's que tinham 20% e 30%, tiveram um decréscimo em sua resistência a compressão.

Tabela 10 – Resistência a compressão axial com 7 dias

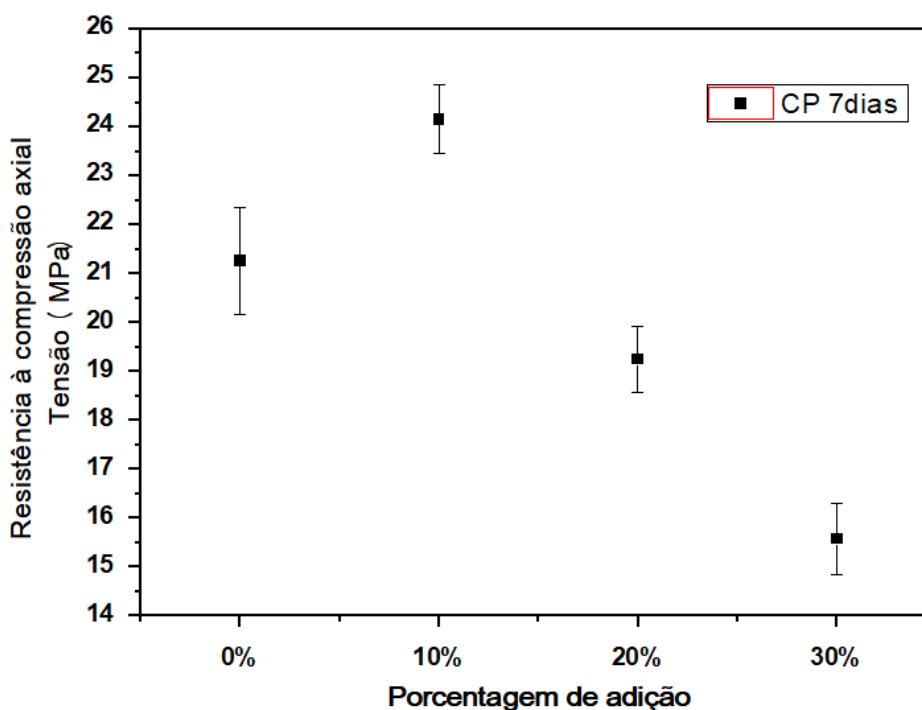
7 dias	CDP 1 (MPa)	CDP 2 (MPa)	CDP 3 (MPa)	CDP 4 (MPa)	CDP 5 (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0%	22,31	22,13	19,44	20,59	21,85	21,26	1,09
10%	25,33	24,41	23,18	24,11	23,79	24,16	0,71
20%	20,32	18,37	19,18	18,80	19,57	19,25	0,67
30%	16,38	15,36	14,28	15,74	16,12	15,58	0,73

Fonte: Autora, 2024

A Figura 29 apresenta o comparativo dos CDP's com 7 dias. Observa-se que o CDP's com 10% de adição de PEBD tiveram um aumento na resistência à compressão

de aproximadamente 14% em relação ao referencial. Já os CDP's com 20% tiveram uma queda aproximadamente de 10% e os CDP's com 30% tiveram uma queda de aproximadamente 27% em suas resistências à compressão.

Figura 29: Resultado do teste de compressão axial com 7 dias



Fonte: Autora, 2024.

b) Resultados com 14 dias

A Tabela 11 apresenta os resultados da compressão axial realizadas nos CDP's que foram desenformados após 14 dias.

Pode-se observar que para os CDP's com 14 dias, os que tinham 10% de PEBD tiveram sua resistência à compressão maior do que a do referencial. Já os CDP's que tinham 20% e 30%, tiveram um decréscimo em sua resistência à compressão.

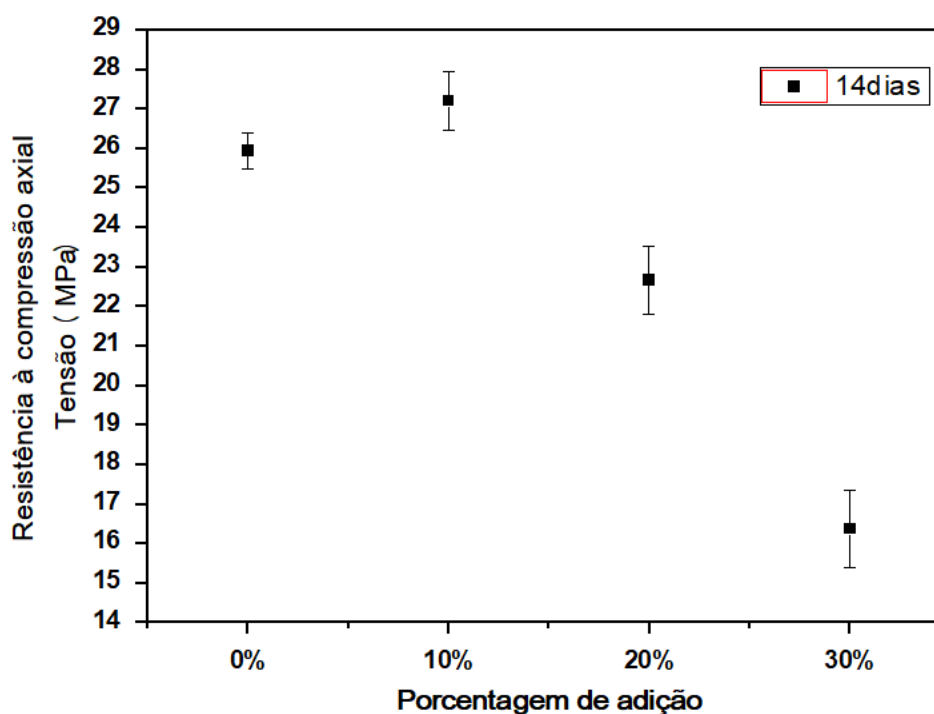
Tabela 11 – Resistência a compressão axial com 14 dias

14 dias	CDP 1 (MPa)	CDP 2 (MPa)	CDP 3 (MPa)	CDP 4 (MPa)	CDP 5 (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0%	26,13	26,41	26,32	25,74	25,15	25,95	0,46
10%	27,91	28,12	26,14	27,07	26,82	27,21	0,73
20%	23,88	21,65	23,44	22,36	21,98	22,66	0,86
30%	15,24	15,19	17,01	17,53	16,92	16,38	0,97

Fonte: Autora, 2024

A Figura 30 apresenta o comparativo dos CDP's com 14 dias. Pode-se observar, com base no gráfico, que os CDP's com 10% de substituição tiveram um acréscimo aproximado de 5% em sua resistência comparando com o referencial. Já os CDP's de 20%, tiveram uma queda aproximada de 13%, e os CDP's 30%, tiveram uma queda de 37%, em suas resistências a compressão em relação ao referencial.

Figura 30: Resultado do teste de compressão axial com 14 dias



Fonte: Autora, 2024.

c) Resultados com 21 dias

A Tabela 12 apresenta os resultados da compressão axial realizadas nos CDP's que foram desenformados após 21 dias.

Pode-se observar que para os CDP's com 21 dias, os que tinham 10% de PEBD tiveram um acréscimo na sua resistência à compressão, se comparado ao referencial. Já os CDP's que tinham 20% e 30%, tiveram um decréscimo em sua resistência a compressão, mostrando o mesmo comportamento apresentado para 7 e 14 dias.

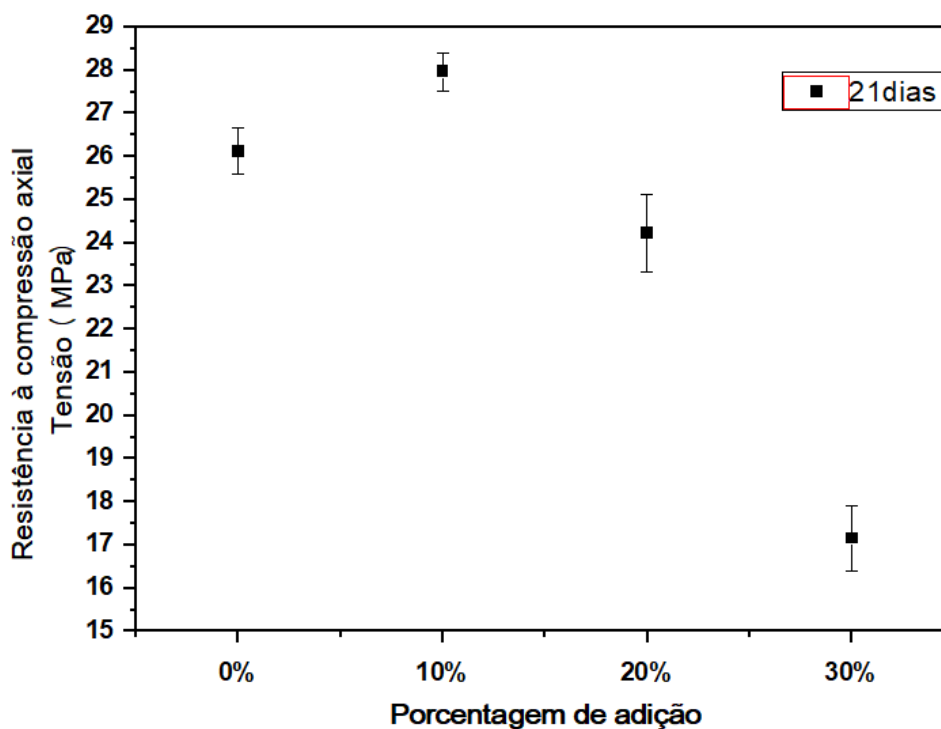
Tabela 12 – Resistência a compressão axial com 21 dias

21 dias	CDP 1 (MPa)	CDP 2 (MPa)	CDP 3 (MPa)	CDP 4 (MPa)	CDP 5 (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0%	26,48	26,62	25,11	26,31	26,15	26,13	0,54
10%	27,28	28,44	28,37	28,11	27,66	27,97	0,44
20%	24,22	23,17	25,87	23,73	24,18	24,23	0,90
30%	17,27	18,46	17,12	16,75	16,19	17,16	0,75

Fonte: Autora, 2024

A Figura 31 apresenta o comparativo dos CDP's com 21 dias. Nota-se que os CDP's com 10% de substituição tiveram um acréscimo de 7% na resistência em relação ao referencial. Enquanto os CDP's com 20% e 30% tiveram um decréscimo em suas resistência de 7% e 34%, respectivamente.

Figura 31: Resultado do teste de compressão axial com 21 dias



Fonte: Autora, 2024.

d) Resultados com 28 dias

A Tabela 13 apresenta os resultados da compressão axial realizadas nos CDP's que foram desenformados após 28 dias.

Pode-se observar que para os CDP's com 28 dias, os que tinham 10% de PEBD tiveram um acréscimo na sua resistência a compressão, se comparado ao referencial. Já os CDP's que tinham 20% e 30%, tiveram um decréscimo em sua resistência a compressão.

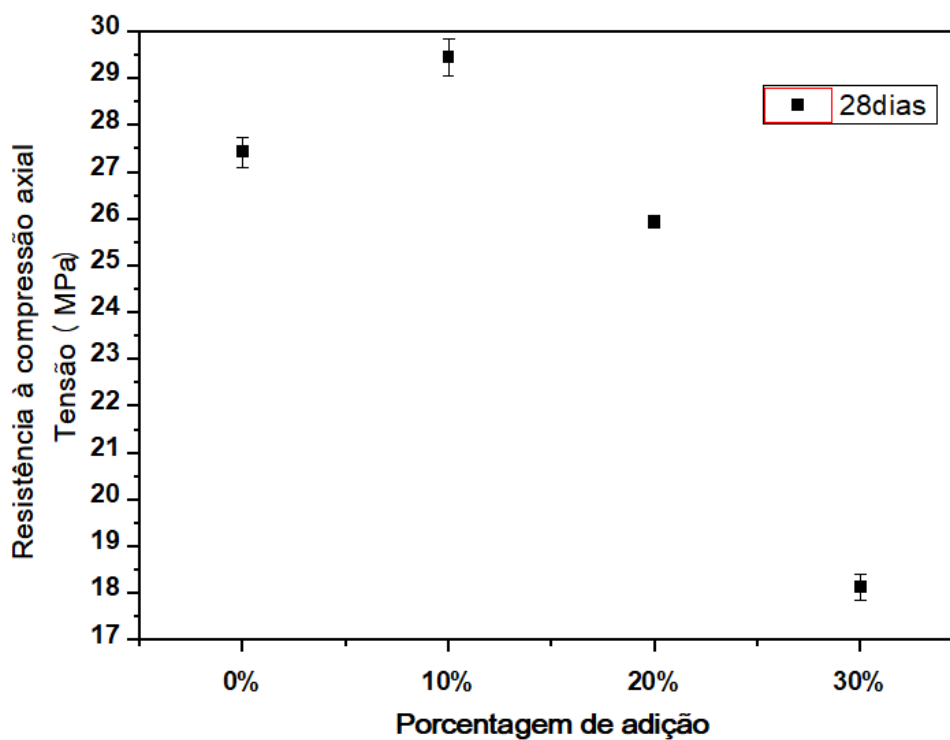
Tabela 13 – Resistência a compressão axial com 28 dias

28 dias	CDP 1 (MPa)	CDP 2 (MPa)	CDP 3 (MPa)	CDP 4 (MPa)	CDP 5 (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0%	27,89	27,68	26,95	27,37	27,24	27,43	0,33
10%	29,14	29,67	28,93	29,49	30,06	29,46	0,40
20%	25,81	26,02	25,94	26,13	25,78	25,94	0,13
30%	18,64	18,15	17,94	17,88	18,07	18,14	0,27

Fonte: Autora, 2024

Os CDP's com 10% de adição de PEBD, tiveram um acréscimo em sua resistência a compressão de 7% se comparados com o referencial. Os CDP's com 20% tiveram uma queda de 5% e os CPD's com 30% tiveram uma queda de 34% em suas resistências a compressão. A Figura 32 apresenta o comparativo dos CDP's com 28 dias.

Figura 32: Resultado do Teste de Compressão Axial com 28 dias



Fonte: Autora, 2024.

4.3.2 Absorção de Água por Imersão e Índice de Vazios

A Tabela 14 apresenta os resultados dos índices de absorção de água por imersão. Pode-se observar que todos os CDP's encontram-se dentro do limite estabelecido por Neville (2016), quando o autor relata que tais ensaios de absorção de água não podem ser definidos como medida de qualidade do concreto, contudo descreve que concretos de boa qualidade tem índice de absorção de água menor do que 10%.

Tabela 14 – Absorção de água por imersão

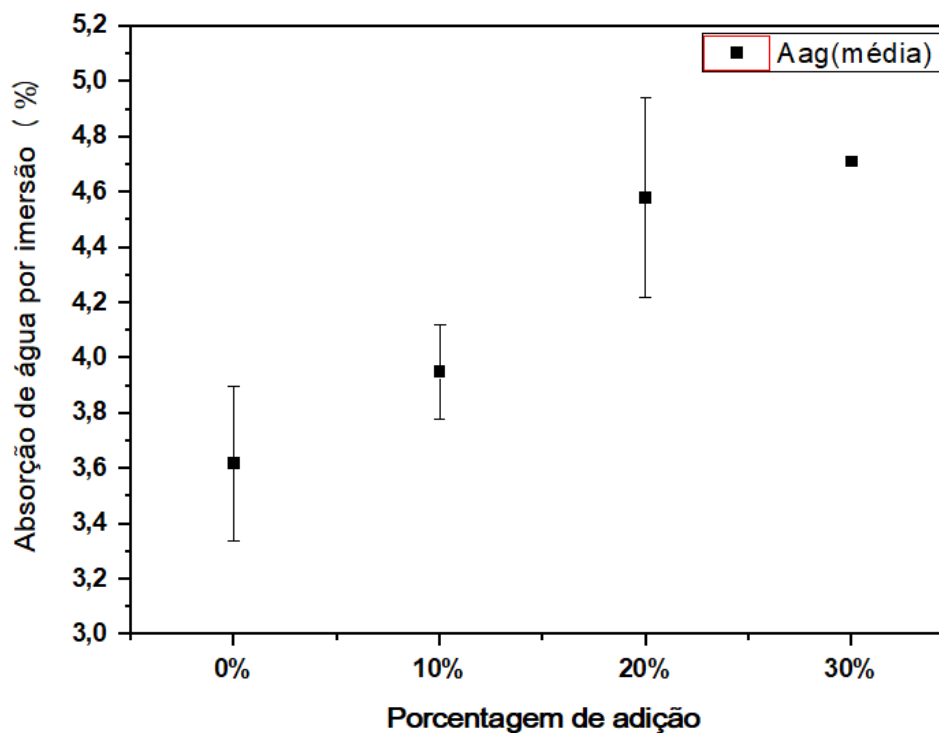
	CDP 1			CDP 2			A _{ag} Média (%)	Desvio Padrão
	M _s (kg)	M _{sat} (kg)	A _{ag} (%)	M _s (kg)	M _{sat} (kg)	A _{ag} (%)		
0%	3,290	3,400	3,34	3,330	3,460	3,90	3,62	0,28
10%	3,170	3,290	3,78	3,160	3,290	4,11	3,95	0,17
20%	3,080	3,210	4,22	3,040	3,190	4,93	4,58	0,36
30%	2,970	3,110	4,71	2,970	3,110	4,71	4,71	0,00

Fonte: Autora, 2024

Observa-se também, que conforme aumenta a quantidade de PEBD no concreto, mais leve ele fica e o teor de absorção de água aumenta.

A norma NBR 9781/2013, afirma que as peças de concreto para piso, não podem apresentar teor de absorção de água maior do que 6%. A Figura 33 apresenta os resultados desse teste.

Figura 33: Resultado do teste de absorção de água por imersão



Fonte: Autora, 2024.

Na Tabela 15, estão apresentados os resultados dos índices de vazios determinados. Percebe-se que quanto maior a quantidade de PEDB adicionada no concreto, o índice de vazios tendem a aumentar.

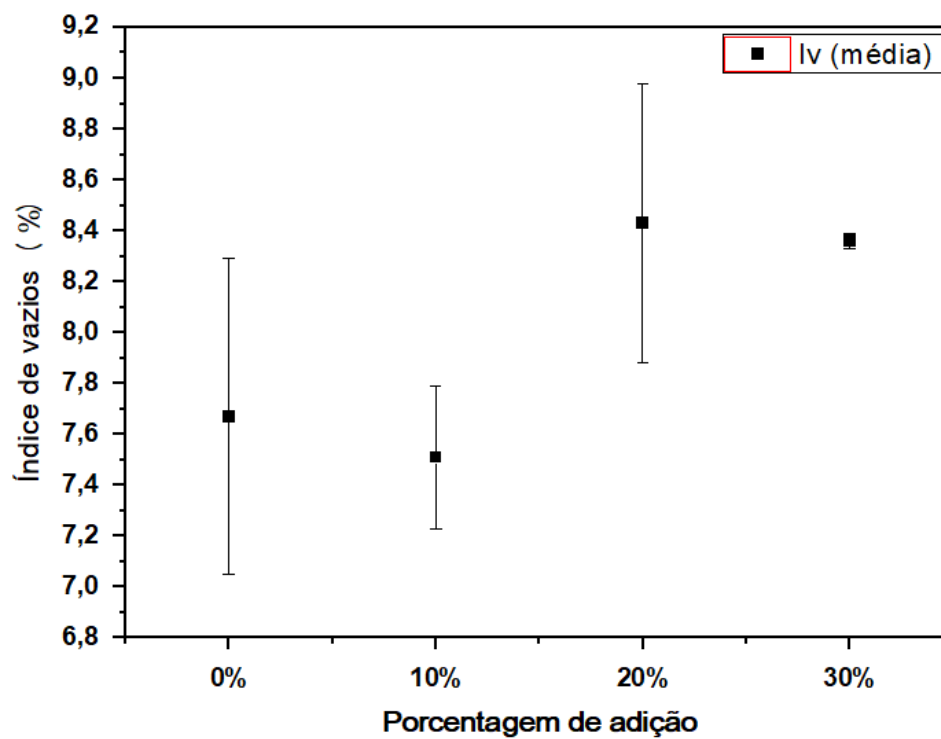
Tabela 15 – Índice de vazios

	CDP 1			I_v (%)	CDP 2			I_v (%)	Desvio Padrão	
	M_s (kg)	M_{sat} (kg)	M_i (kg)		M_s (kg)	M_{sat} (kg)	M_i (kg)			
0%	3,290	3,400	1,840	7,05	3,330	3,460	1,890	8,28	7,67	0,62
10%	3,170	3,290	1,630	7,23	3,160	3,290	1,620	7,78	7,51	0,28
20%	3,080	3,210	1,560	7,88	3,040	3,190	1,520	8,98	8,43	0,55
30%	2,970	3,110	1,440	8,38	2,970	3,110	1,430	8,33	8,36	0,03

Fonte: Autora, 2024

A figura 34, ilustra o resultado do teste de índice de vazios.

Figura 34: Resultado do teste de índice de vazios



Fonte: Autora, 2024.

4.3.3 Resultados das imagens de MEV

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) desempenha um papel crucial na análise de materiais de construção, particularmente em amostras de concreto. Essa técnica avançada permite uma avaliação detalhada da microestrutura e das características físicas e químicas do concreto, fornecendo informações indispensáveis para a compreensão do desempenho, durabilidade e falhas do material. O MEV oferece imagens de alta resolução que permitem a observação de detalhes da microestrutura do concreto em escalas micrométricas e nanométricas. Essa análise é essencial para identificar os componentes da matriz cimentícia, os produtos de hidratação, os poros e as interfaces entre os agregados e a pasta de cimento.

A Figura 35a, 35b, 35c e 35d apresenta as imagens de MEV que foram obtidas nas amostras dos concretos que foram estudados.

Figura 35(a) – Concreto 0% PEBD: A imagem revela uma microestrutura heterogênea e porosa, típica de materiais cimentícios. A presença de agregados, produtos de hidratação e microvazios destaca a complexidade interna do material. As interfaces entre partículas e os possíveis vazios sugerem regiões de fragilidade estrutural que podem comprometer a durabilidade e resistência mecânica do material.

Fazendo uma análise comparativa entre as demais imagens, pode ser observado um aumento das regiões mais escuras (pretas) que pode ser um indicativo da presença do PEBD micronizado nas diferentes proporções que foram adicionadas.

Figura 35(b) - Concreto 10% PEBD: observa-se uma estrutura fragmentada, com partículas de diferentes tamanhos e distribuição heterogênea. Em relação às regiões escuras (pretas), são pouco predominantes e parecem estar espalhadas em pequenas áreas, sugerindo a presença de porosidade localizada ou fases menos densas, como vazios ou materiais com menor interação com o feixe eletrônico, ou seja, pode ser mesmo o indicativo da presença do PEBD micronizado.

Figura 35(c) - Concreto 20% PEBD: a imagem apresenta maior heterogeneidade estrutural em comparação com a imagem 35 (b). Há partículas grandes (possivelmente agregados) e regiões mais finamente fragmentadas. Em relação às regiões escuras (pretas), pode-se notar um aumento significativo, que ocupam áreas maiores e mais conectadas. Isso pode ser um indicativo de porosidade

aumentada, vazios interconectados ou zonas de falhas/contaminantes com menor densidade eletrônica. Da mesma forma que foi interpretado na imagem 35 (b), pode ser mesmo o indicativo de uma maior presença do PEBD micronizado. Por fim, a imagem sugere uma estrutura mais porosa e menos densa, o que pode impactar negativamente a resistência mecânica e a durabilidade do material.

Figura 35(d) - Concreto 30% PEBD: a imagem apresenta maior heterogeneidade estrutural em comparação com a imagem 35 (c). A microestrutura da imagem 35 (d) se apresenta altamente heterogênea, com uma grande quantidade de fragmentos, fissuras e partículas de diferentes tamanhos. Em relação às regiões escuras (pretas), pode-se observar que são muito mais predominantes nesta imagem. Elas aparecem em grandes concentrações e áreas conectadas, sugerindo a presença de porosidade elevada ou até a formação de microfissuras interligadas. Essas regiões escuras podem ser resultado de áreas de descontinuidade estrutural ou devido à inclusão de materiais com baixa densidade ou contaminantes que, nesse caso, pode ser o indicativo da maior quantidade de PEBD micronizado.

O Quadro 9 apresenta uma comparação geral entre todas imagens de MEV das amostras de concreto que tiveram adições de PEBD micronizado.

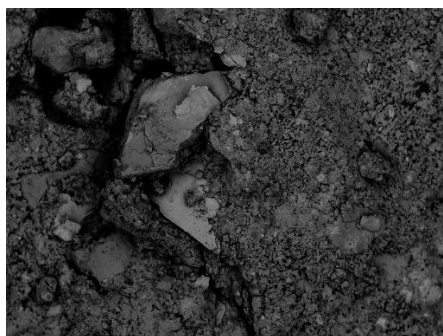
Quadro 9: Comparação geral entre todas imagens de MEV das amostras de concreto que tiveram adições de PEBD micronizado.

Aspectos	Imagem 35 (b) 10% PEBD	Imagem 35 (c) 20% PEBD	Imagem 35 (d) 30% PEBD
Regiões escuras	Escassas e pequenas	Mais numerosas e conectadas	Extensas e predominantes
Porosidade	Baixa	Moderada	Alta
Microestrutura	Compacta e densa	Fragmentada e heterogênea	Altamente fragmentada/porosa

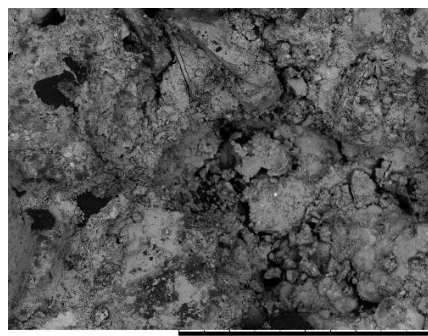
Fonte: Autora, 2024.

Por fim, as imagens demonstram uma progressão de degradação microestrutural, sendo a imagem 35 (d) a que apresenta a maior quantidade de regiões escuras (pretas), sugerindo maior descontinuidade estrutural que pode ser associada à maior presença de PEBD micronizado.

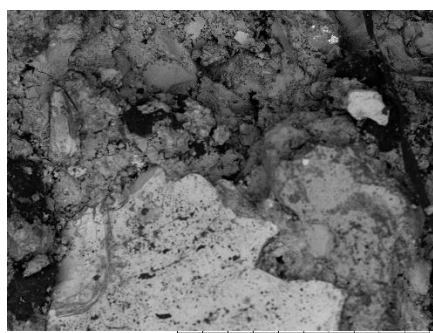
Figura 35: Imagens de MEV das amostras de concreto estudadas. Ampliação de 100x.



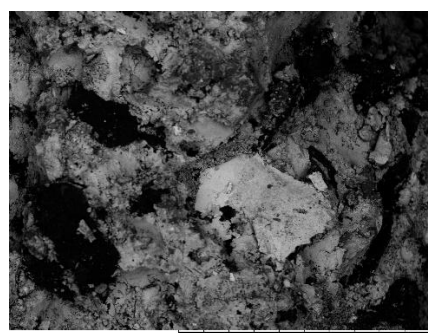
(a) Concreto 0% PEBD - ampliação 100x



(b) Concreto 10% PEBD - ampliação 100x



(c) Concreto 20% PEBD - ampliação 100x



(d) Concreto 30% PEBD - ampliação 100x

Fonte: Autora, 2024.

Avaliação quantitativa via Software ImageJ

Na tentativa de quantificar a presença de PEBD micronizado nas amostras de concreto, foi realizada a caracterização das amostras contendo 10%, 20% e 30% de PEBD micronizado utilizando-se o software ImageJ, a partir das imagens de MEV.

O ImageJ é um software de análise e processamento de imagens amplamente utilizado em áreas como ciências dos materiais, biologia e engenharia. Desenvolvido originalmente no National Institutes of Health (NIH), ele é uma ferramenta de código aberto que oferece uma plataforma flexível para manipulação e análise de imagens digitais, incluindo aquelas obtidas por microscopia óptica, eletrônica ou outras técnicas de caracterização de materiais.

Uma das aplicações de destaque do ImageJ está na quantificação de fases em microestruturas, que é fundamental para estudos de propriedades mecânicas, térmicas e químicas de materiais. O software permite a segmentação, medição e análise de diferentes fases presentes em uma imagem microestrutural. Através de ferramentas de processamento, como ajuste de brilho e contraste, aplicação de filtros e conversão de imagens para escala de cinza, é possível realçar os contornos e características das fases.

Além disso, o ImageJ suporta análises quantitativas detalhadas, como a segmentação de fases, onde são usados limiares (*thresholding*), o software permite separar as diferentes fases com base em contrastes ou tons de cinza. Isso facilita a identificação das áreas específicas de cada fase. Também é possível efetuar a medição de proporções volumétricas ou de área que, após a segmentação, é possível calcular as frações volumétricas ou percentuais de área de cada fase, permitindo uma análise precisa das proporções entre matrizes e partículas, por exemplo.

Na tentativa de quantificar as “regiões escuras (pretas)”, foram usadas duas formas de análises pelo ImageJ: usando limiares (*thresholding*) (Figuras 36, 37 e 38) e utilizando de contraste (com imagem duplicada, transformada em 8 bits, com aplicação de contraste para realçar particular escuras) (Figuras 39, 40 e 41) nas imagens de MEV.

A Tabela 16 apresenta os resultados das análises de quantificação das regiões escuras (pretas) das amostras contendo 10%, 20% e 30% de PEBD micronizado

utilizando-se o software ImageJ, a partir das imagens de MEV, a partir dos métodos de limiares (*thresholding*) e de contraste.

Como pode ser observado, somente o valores da amostra de concreto contendo 10% de PEBD micronizado ficaram mais próximos dos esperados. Entretanto, o aumento das áreas foi gradativo e pode ser mais uma constatação devido ao aumento da quantidade de PEBD micronizado nas amostras analisadas.

Vale ressaltar que o grau de precisão do ImageJ na análise de imagens depende diretamente da qualidade das imagens processadas, da configuração dos parâmetros de análise e da habilidade do usuário em ajustar as ferramentas oferecidas pelo software. Se a imagem de entrada tiver ruídos, baixa resolução ou problemas de iluminação, a precisão das análises será comprometida. Isso pode ser justificado pelo fato de que, nem o concreto e nem o PEBD não são materiais que conduzem elétrons. Uma alternativa seria metalizar as amostras.

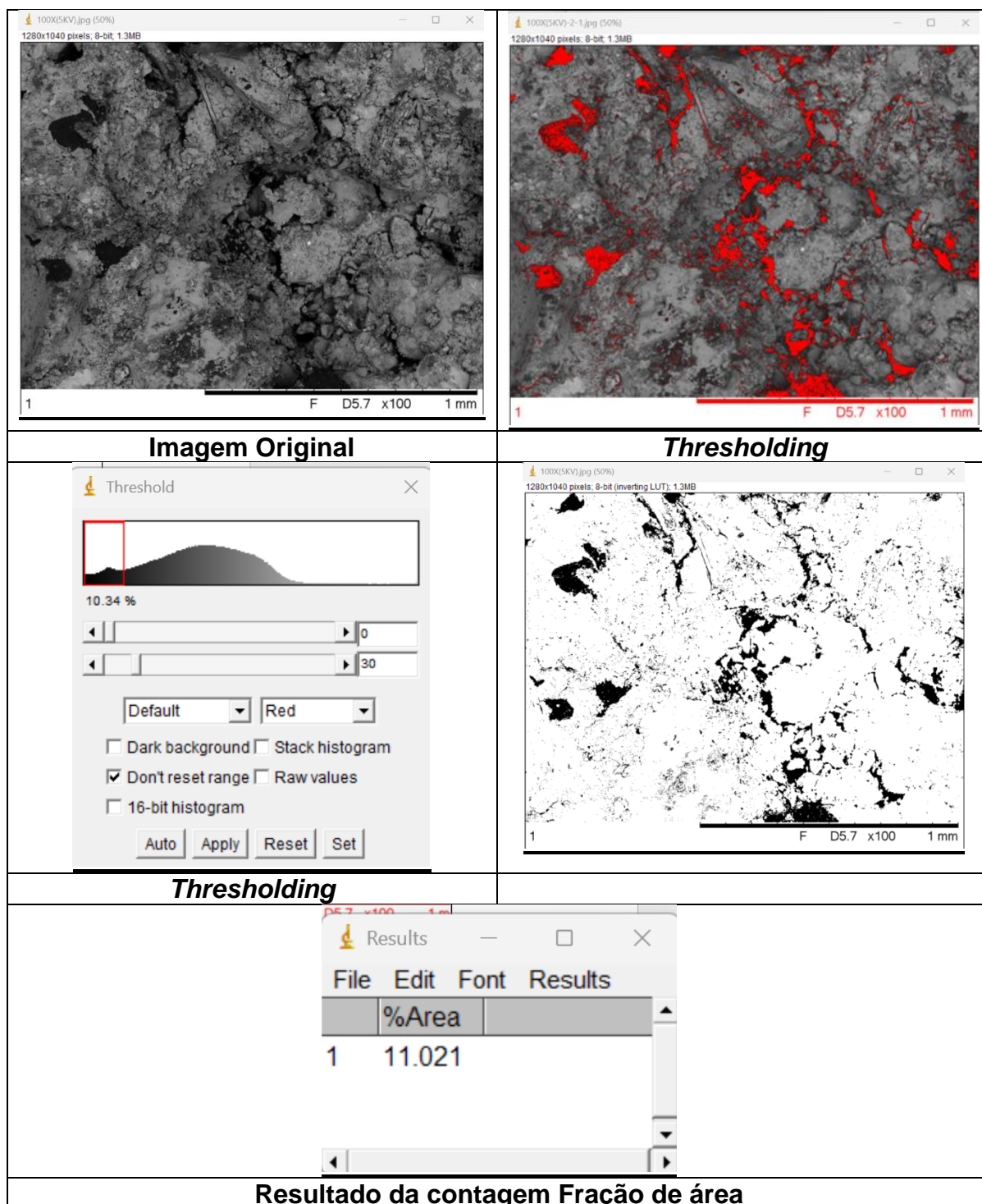
Em resumo, o ImageJ é uma ferramenta precisa e confiável, mas a precisão final está intrinsecamente ligada à qualidade das imagens e à expertise do usuário em configurar e interpretar os resultados das análises.

Tabela 16: Resultados da quantificação das regiões escuras (pretas) das amostras de concreto contendo PEBD micronizado

Métodos de quantificação das regiões escuras (pretas)	Área da amostra de concreto contendo 10% PEBD micronizado (%)	Área da amostra de concreto contendo 20% PEBD micronizado (%)	Área da amostra de concreto contendo 30% PEBD micronizado (%)
ImageJ com <i>thresholding</i>	11,02	13,98	22,04
ImageJ com contraste	9,69	14,29	19,54

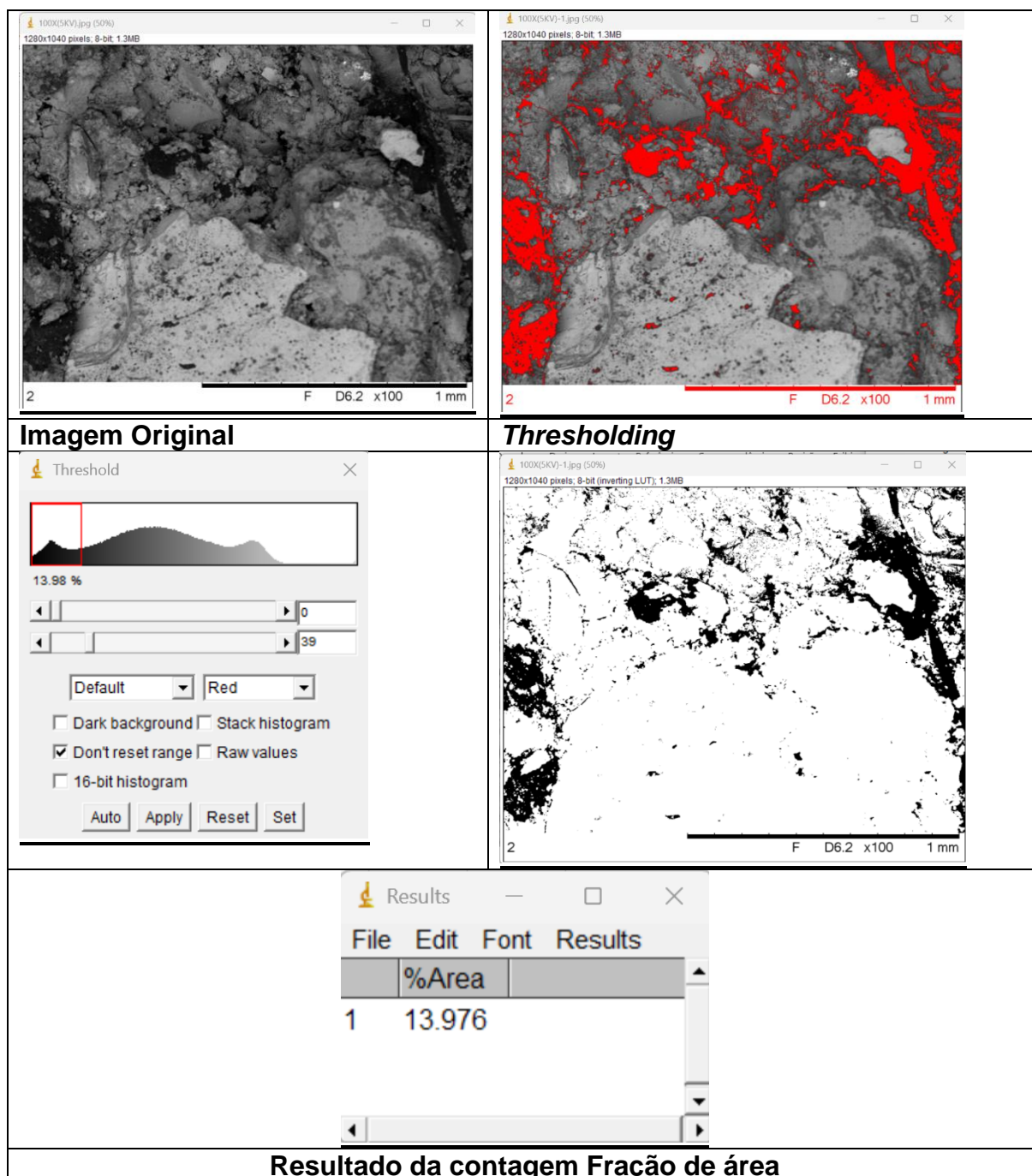
Fonte: Autora, 2024.

Figura 36: Tratamento de imagem por meio do software ImageJ (método de *thresholding*) do MEV da amostra de concreto contendo 10% de PEBD micronizado com ampliação de 100x.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 37: Tratamento de imagem por meio do software ImageJ (método de *thresholding*) do MEV da amostra de concreto contendo 20% de PEBD micronizado com ampliação de 100x.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 38: Tratamento de imagem por meio do software ImageJ (método de *thresholding*) do MEV da amostra de concreto contendo 30% de PEBD micronizado com ampliação de 100x.

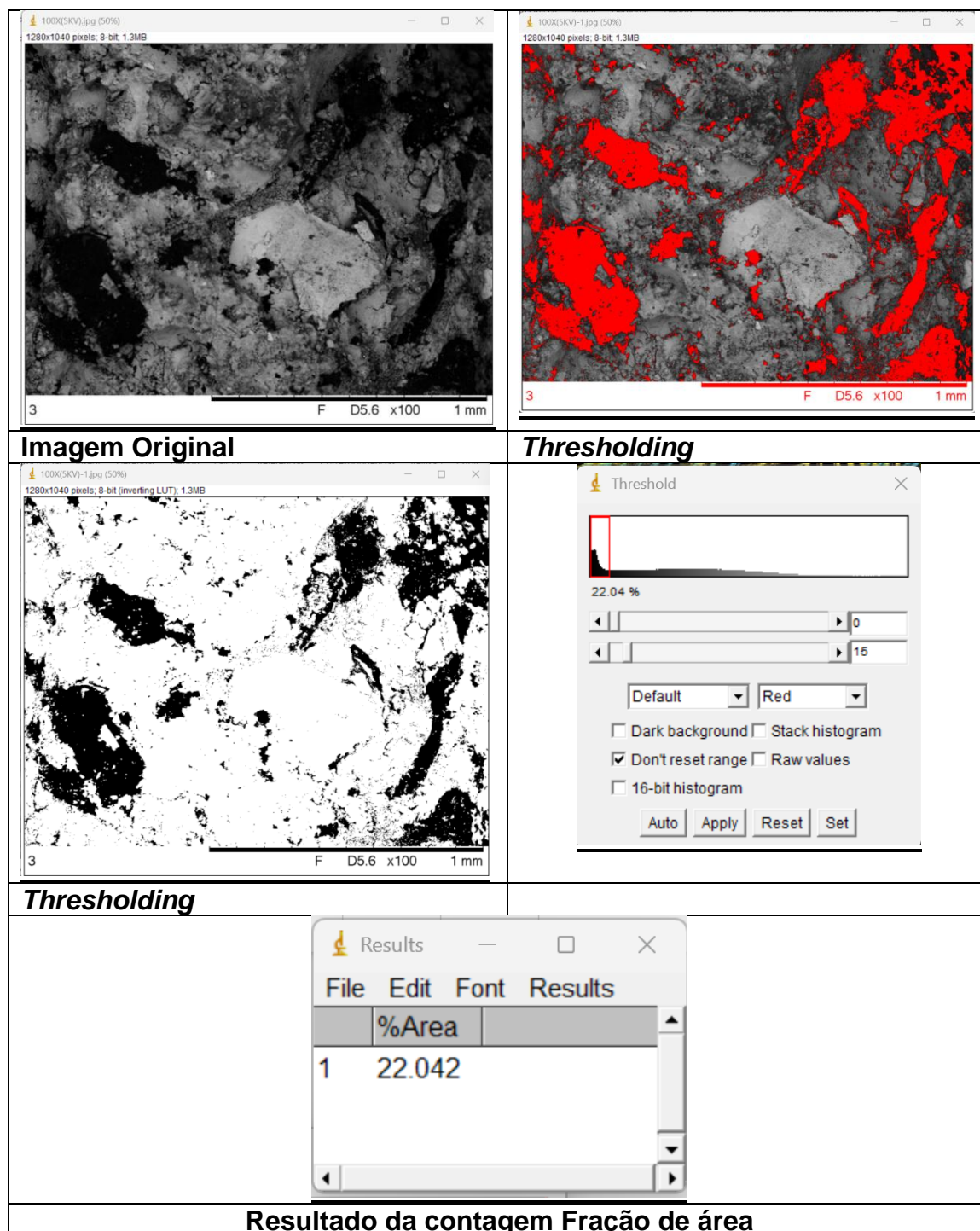
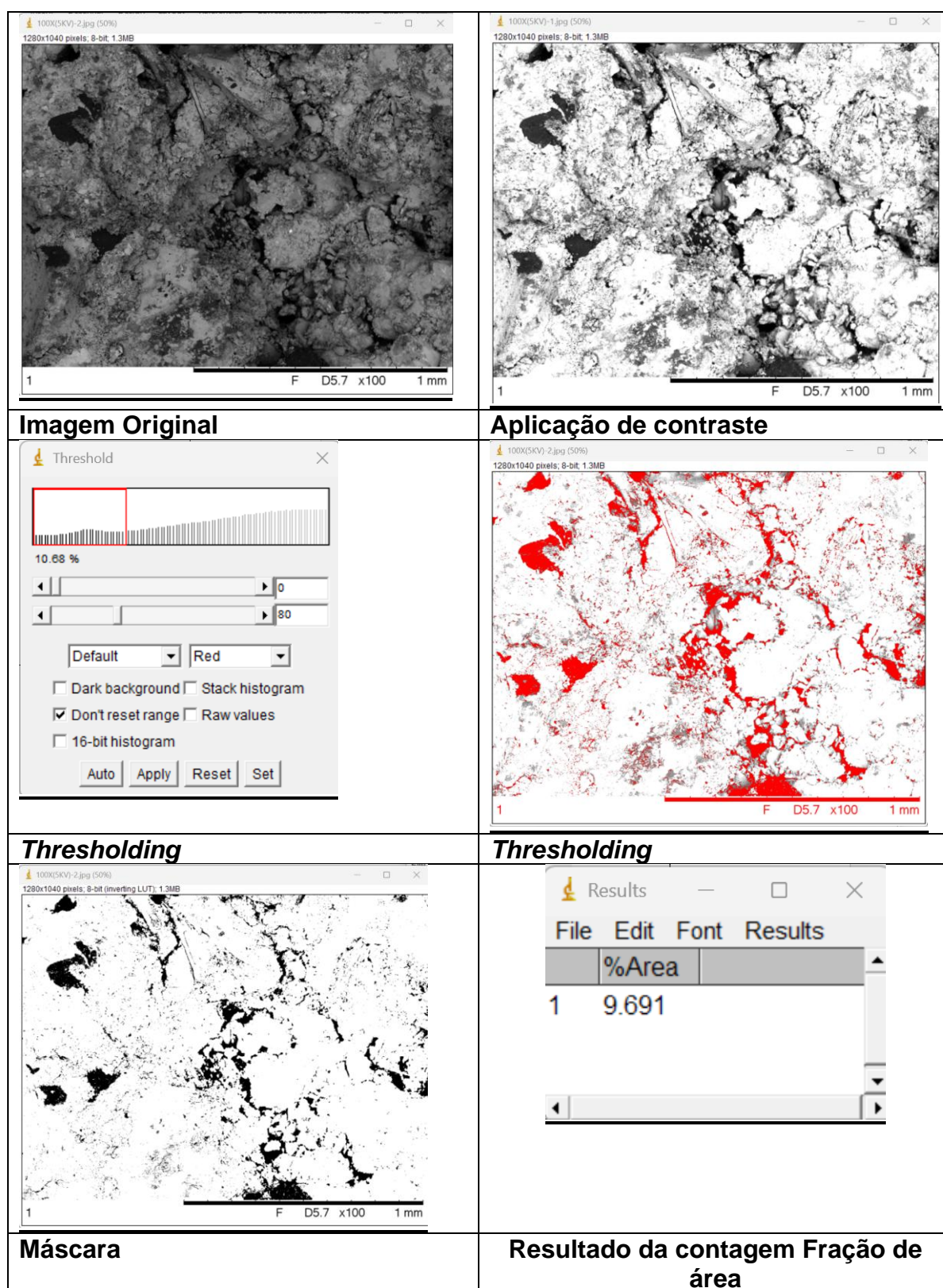
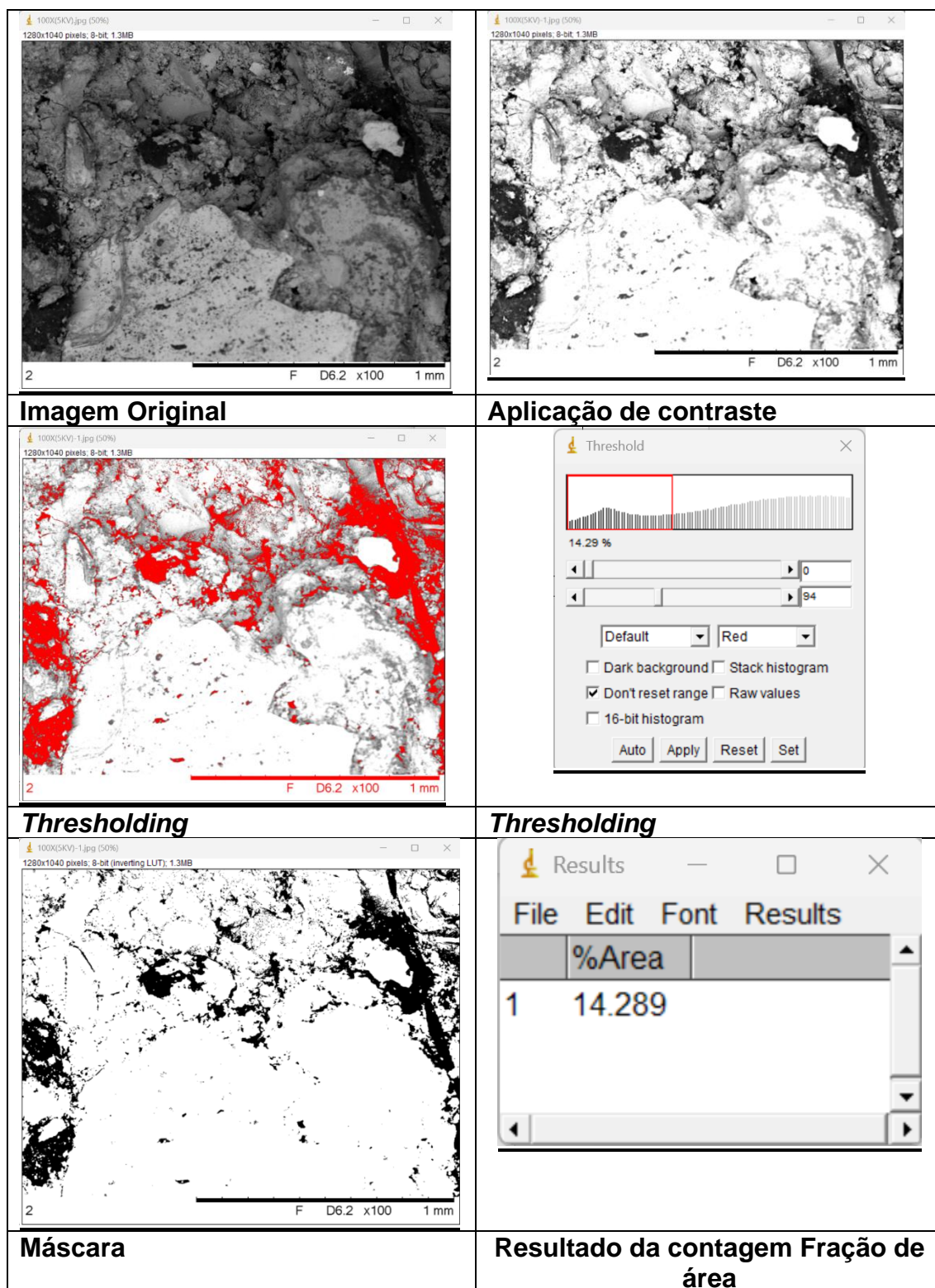


Figura 39: Tratamento de imagem por meio do software ImageJ (método usando contraste) do MEV da amostra de concreto contendo 10% de PEBD micronizado com ampliação de 100x.



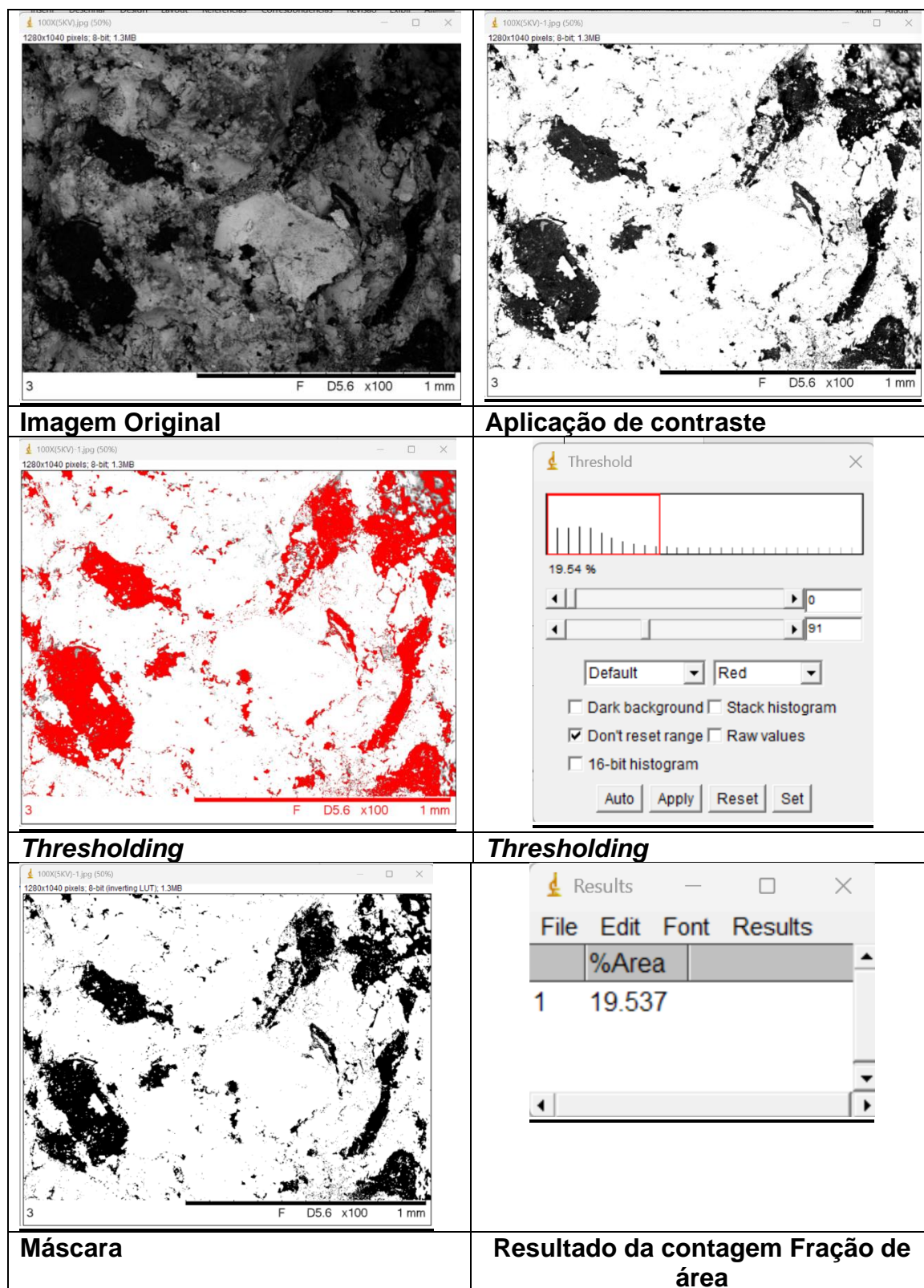
Fonte: Autora, 2024.

Figura 40: Tratamento de imagem por meio do software ImageJ (método usando contraste) do MEV da amostra de concreto contendo 20% de PEBD micronizado com ampliação de 100x.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 41: Tratamento de imagem por meio do software ImageJ (método usando contraste) do MEV da amostra de concreto contendo 30% de PEBD micronizado com ampliação de 100x.



Fonte: Autora, 2024.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, este trabalho permitiu avaliar o impacto da adição de polietileno de baixa densidade (PEBD) micronizado em concreto, revelando avanços e limitações significativas.

Em relação aos resultados de compressão axial, pode-se ressaltar o aumento de resistência nos CDP's com 10% de PEEDB em relação ao referencial. O resultado com 7 dias, mostrou um crescimento de 14%, chegando aos 28 dias com um aumento de 7% em sua resistência.

Já os CDP's com 20% e 30% de PEEDB tiveram uma queda em sua resistência se comparados com o referencial. Aos 28 dias, os CDP's com 20% de PEEDB tiveram uma redução de 13% em sua resistência e os CDP's com 30% uma queda de 37%.

Assim sendo, nem o CDP mais resistente atingiu o mínimo recomendado pela norma NBR 9781/2013, que é de 35 MPa para pisos.

No teste de absorção de água e índice de vazios, constatou-se que quanto maior a quantidade de PEEDB mais é o percentual de absorção de água. Contudo até os CDP's com 30% de adição de PEEDB, ficaram dentro do permitido pela norma NBR 9781/2013, que é de no máximo 6% de absorção de água. Neste teste também pode-se concluir que, quanto mais PEEDB, mais leve o produto fica e também aumenta o índice de vazios.

Em relação às análises de MEV, a amostra de concreto sem a adição do PEEDB micronizado, a imagem revelou uma microestrutura heterogênea e porosa, típica de materiais cimentícios. A presença de agregados, produtos de hidratação e microvazios destaca a complexidade interna do material. Já em relação às amostras de concreto com adições de PEEDB micronizado, ficou constatado que quanto maior a quantidade de PEEDB adicionado, a microestrutura ficou mais fragmentada e, conseqüentemente, mais porosa. E, a partir das análises pelo ImageJ, somente os valores da amostra de concreto contendo 10% de PEEDB micronizado ficaram mais próximos dos esperados. Entretanto, o aumento das áreas foi gradativo e pode ser mais uma constatação devido ao aumento da quantidade de PEEDB micronizado nas amostras analisadas.

Portanto, conclui-se que o uso de 10% de PEBD micronizado apresenta potencial para aplicações em concreto, oferecendo um equilíbrio entre resistência, absorção de água e leveza. No entanto, as formulações com teores mais elevados de PEBD mostram limitações significativas em termos de resistência mecânica e microestrutura, restringindo suas possibilidades de aplicação em contextos que demandam alta performance estrutural. Novas investigações são recomendadas para refinar o uso do PEBD, explorar combinações com outros aditivos e avaliar o desempenho em diferentes condições de aplicação.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e limitações identificados neste trabalho, algumas sugestões para pesquisas futuras incluem:

1. **Exploração de Diferentes Proporções e Métodos de Incorporação de PEBD:** Avaliar teores inferiores a 10% de PEBD micronizado para identificar uma proporção ainda mais otimizada que maximize o equilíbrio entre resistência mecânica e leveza. Testar também diferentes técnicas de dispersão e incorporação para melhorar a homogeneidade do compósito.
2. **Uso de Aditivos e Modificadores Químicos:** Investigar a combinação de PEBD com aditivos químicos, como superplastificantes ou agentes ligantes, que possam mitigar o aumento de porosidade e melhorar as propriedades mecânicas e durabilidade do material.
3. **Análise do Comportamento a Longo Prazo:** Estudar o desempenho do concreto com PEBD micronizado ao longo do tempo, considerando aspectos como resistência residual, retração, fluência e durabilidade em ambientes agressivos.
4. **Aplicações em Elementos Não Estruturais:** Examinar a viabilidade do uso de concreto com PEBD em aplicações onde a resistência estrutural não é crítica, como elementos decorativos, painéis de fechamento ou pisos de baixa solicitação mecânica.
5. **Estudo do Impacto Ambiental:** Realizar uma análise de ciclo de vida (ACV) para avaliar os benefícios ambientais do uso de PEBD reciclado em concreto, considerando a redução de resíduos plásticos e a economia de recursos naturais.

6. **Desempenho em Condições Extremas:** Investigar o comportamento do concreto com PEBD sob condições de carga cíclica, variações térmicas extremas, exposição a agentes químicos e ação de ciclos de gelo e degelo.
7. **Desenvolvimento de Novas Técnicas de Caracterização:** Empregar métodos avançados de caracterização microestrutural, como tomografia computadorizada por raios X, para analisar em detalhes a distribuição do PEBD e sua interação com a matriz cimentícia.
8. **Estudo da Compatibilidade com Outros Resíduos:** Avaliar a possibilidade de combinar o PEBD com outros resíduos industriais ou agrícolas, como cinzas de biomassa, escórias ou fibras, para criar materiais compósitos inovadores e sustentáveis.
9. **Escalabilidade e Análise Econômica:** Investigar os desafios de escalabilidade na produção de concreto com PEBD em larga escala, além de realizar uma análise econômica detalhada para determinar a viabilidade comercial da aplicação.
10. **Desempenho em Outras Normas e Aplicações Internacionais:** Comparar o desempenho do concreto com PEBD frente a requisitos normativos de outros países e investigar sua aplicabilidade em diferentes contextos construtivos globais.

Esses estudos podem ampliar a compreensão sobre o uso de PEBD em concreto e contribuir para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e eficientes.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAM, D.; GEORGE, K. E.; FRANCIS, D. J. J. **Appl. Polym. Sci.**, 62, p.59 (1996)

AMADEI, D. I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do Município de Juranda/PR.** 153p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Maringá. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Maringá, 2011.

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de CIMENTO PORTLAND. **“Guia básico de utilização do Cimento Portland.”** Boletim técnico 106, São Paulo, 2002.

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de CIMENTO PORTLAND. **Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público.** São Paulo, 2010. 36p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM248 Agregado - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, RJ, 2003.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 Projetos de estrutura de concreto.** Rio de Janeiro, RJ, 2023.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, RJ, 2022.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778 Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica .** Rio de Janeiro, 2009.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739 Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, RJ, 2018.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7225: Materiais de pedra agregados naturais.** Rio de Janeiro, RJ, 1993.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004. Resíduos sólidos-Classificação.** Rio de Janeiro, RJ, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland.** Rio de Janeiro, RJ, 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.655 Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015.

AGROCLIQUE, 2019. Disponível em: <<https://agroclique.com.br/produto/tubo-pelbd-para-irrigacao-16mm-pn30-bobina-500m/>>. Acesso em 27 out. 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D4976: Standard Specification for Polyethylene Plastics Molding and Extrusion Materials,** 2006.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **ANUÁRIO Mineral Brasileiro. Principais substâncias metálicas.** Brasília, DF, 2022

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

BARBOSA, L. A.; DREGER, A. A.; SCHNEIDER, E. L.; MORISSO, F. D. P.; SANTANA, R. M. C.: **Polietileno de baixa densidade - PEBD: mercado, produção, principais propriedades e aplicações,** v. 38, n. 17. P. 10, 2017.

BASTOS, P. S. S. **Notas de aula da disciplina Estruturas de Concreto 1.** Bauru/SP. Faculdade de Engenharia. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Estadual Paulista. 2014.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA N° 001,** de 23 de janeiro de 1986. Estabelece as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente. Disponível em < <http://www.dnit.gov.br/download/planejamento-e>

pesquisa/coordenacao-geral-de-meio-ambiente/licenciamento-ambiental/resolucao-conama-001-86.pdf>. Acesso em 20 dez. 2019.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Lei nº 12.305 de 2010.

BRASIL ESCOLA. **Polímeros de adição**. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/polimeros-adicao.htm>>. Acesso em 27 out. 2024.

BRASKEM. **Manuais de Tecnologia da Braskem - PE6**. Divulgação restrita, revisado em 2009.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: LCT, 2016.

CAMPBELL, F. C. **Manufacturing technology for aerospace e structural materials**. Elsevier Science Ltd, 2006.

CANEVAROLO Jr, S.V. **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3ª edição. São Paulo: Artliber Editora, 2010.

CARVALHO, A. F. DE. Abordagem do ensino de química por meio de uma sequência didática: polímeros. 2022. Disponível em < http://bia.ifpi.edu.br:8080/jspui/bitstream/123456789/1181/1/2018_tcc_afcarvalho.pdf> Acesso em 10 set. 2024.

CLARINVAL, A. M.; HALLEUX, J. **Classification of biodegradable polymers**. In: Smith, R. Biodegradable Polymers for Industrial Application. Cambridge: Woodhead Publishing, 2005.

CNM – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICIPIOS. **Estudo: Mineração e o impacto financeiro nos Municípios**. Disponível em < https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2023/Estudos_tecnicos/202311_ET_FIN_Mineracao_impacto_financeiro_Municipios.pdf?t=1705409830>. Acesso em 09 set. 2024.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; MARIA, L. C. S. de. Polietileno: Principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, n. 1, p. 1-13, 2003.

COSTA, H. M. RAMOS, V. V.; DEBOSSAM, P. P. S.; MÔNICA CALIXTO DE ANDRADE, M. C. A. DE. **Cinética de cristalização de resíduos de polietileno de alta densidade (PEAD) efeito da radiação uv.** Acta Scientiae et Technicae, v.3, n.2, 2016.

DAMÁSIO, M. L. L., SAMPAIO, A.C. As representações sociais do lixo: subsídios para a educação do consumidor. In: TALAMON, L. B., SAMPAIO, A. C.(Orgs.) **Educação Ambiental: da prática pedagógica à cidadania.** São Paulo: Escrituras, 2003.

DMITRIJEVAS, C. **Análise de Ecoeficiência de Técnicas para tratamento e disposição de resíduos sólidos urbanos.** Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

ENGENHARIA 360. **Descubra como o polivinil está revolucionando a construção civil.** Disponível em: < <https://engenharia360.com/fontes-urbanas-de-energias-nocivas/>>. Acesso em 27 out. 2024.

ENGENHARIA 360. **O que é e para que serve o Polietileno de Baixa Densidade?** Disponível em: <<https://engenharia360.com/polietileno-de-baixa-intensidade/>>. Acesso em 22 nov. 2024.

FARIAS, C. E. G. **A mineração e o meio ambiente no Brasil** –Relatório Preparado para Centro de Gestão e Estudos Estratégicos- CGEE - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. PNUD. Contrato 2002 /001604 outubro de 2002. 42 p.

FERNANDES. F. A. N. LONA, L. M. F. **Introdução à modelagem de Sistemas de Polimerização.** ISBN 85-98130-01-X.1a Edição. 2004.

FORNACIARI, C. V. **Avaliação das práticas de manejo de resíduos de serviço de saúde na Faculdade de Odontologia/UERJ.**116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2008.

GARCIA, E. E. C.; SANTÓPOULOS, C. I. G.; ALVES, R.M.V. 3º Congresso Brasileiro de Polímeros. **ABPol, Rio de Janeiro**, p.917 (1995).

GUIMARÃES, J. A. J. **Tecnologias de Polietileno e Melhorias no Processo Produtivo de PEBD/EVA.** Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Química) - Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2006.

HADDAD, C. M. C. **Resíduos de serviços de saúde de um hospital de médio porte do município de Araraquara**: subsídios para elaboração de um plano de gerenciamento. 134 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente). Centro Universitário de Araraquara. SP, 2006. Disponível em: <www.uniara.com.br/mestrado/.../dissertação/Catia_Haddad_2006.pdf>. Acesso em 20 de out. de 2019.

HADJICHRISTIDIS, N.; LOHSE, D. J.; MENDELSON, R.A. **Macromolecules**, v. 33, 7 p. 2424-2436. 2000.

HUANG, J.; KOGBARA, R. B.; HARIHARAN, N.; MASAD, E. A.; LITTLE, D. N. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, v. 305, n. September, p. 124685, 2021.

INFOESCOLA. **Látex**. Disponível em: < <https://www.infoescola.com/quimica/latex/>>. Acesso em 27 out 2024.

IPEA. **ODS 12. Consumo e Produção Sustentáveis. 2019**. Disponível em: < <https://www.ipea.gov.br/ods/ods12.html/>>. Acesso em 21 nov 2024.

JARVIS, P.; CARRA, I.; JAFARI, M.; JUDD, S. J. Ceramic vs polymeric membrane implementation for potable water treatment. *Water Research*, v. 215, n. March, p. 118269, 2022.

LIGOWSKI, E.; SANTOS, B. C. dos; FUJIWARA, S. T. Toshio. **Composite materials based on fibers from sugar cane and recycled polymers**. *Polímeros*, v. 25, n. 1, p. 70-75, 2015.

LIMA, F. B. **Produção e controle de qualidade do concreto**. Maceió, Brasil. Ed. Edufal. 2003.

MANO, E. B. MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**: 2a ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 2004.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos: Rosca Única, Extrusão e Matrizes, Injeção e Moldes**. São Paulo : Artiliber Editora, 2005.

MARTINS, G. A. S. - **Informações sobre Manuseio e Estocagem de Polietilenos e Polipropilenos.** Boletim Técnico nº14 – OPP Petroquímica S.A. Agosto, 1999.

MEC - SECRETARIA DE EDUCAÇÃO FUNDAMENTAL. **Parâmetros Curriculares Nacionais. Meio Ambiente.** Disponível em <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/meioambiente.pdf>>. Acesso em 09 set 2024.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MULINARI, D. R. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana de açúcar.** 2009. 116f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Materiais e Tecnologia - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - SP, 2009.

NEVES, C. J. A. **Resistência Química de PE's a Vários Reagentes Químicos.** Boletim Técnico nº13 – OPP Petroquímica S.A. 1999.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

ONU. **Agenda 21.** Rio de Janeiro: Conferência sobre o Ambiente e Desenvolvimento, 1992. Disponível em <http://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>. Acesso em 10 jan. 2024.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia, microestrutura, propriedades.** São Paulo: Hemus, 1997.

PEACOCK, A.J., **HANDBOOK OF POLYETHYLENE Structure, Properties and Applications**, ed. E.C. Company. 2000, Baytown, Texas. p. 1- 537.

PEREIRA NETO, J. T.; LELIS, M. P. N. **Variação da composição gravimétrica e potencial de reintegração ambiental dos resíduos sólidos urbanos por região fisiográfica estado de Minas Gerais.** Laboratório de Engenharia e Saneamento Ambiental, Universidade Federal de Viçosa, 1999. Disponível em <http://www.resol.com.br/textos3.asp?id=1400>. Acesso em 06 de dez. 2019.

PEREIRA, R. A.; MANO, E. B.; DIAS, M. L.; ACORDI, E. B. **Polymer Bulletin**, v. 38, p.707 (1997)

PEREIRA, L. C.; TOCCHETTO, M. R. L. **Resíduos**: É preciso inverter a pirâmide reduzir a geração”. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=residuos/index.php3.../residuos.htm>>. Acesso em 28 nov. 2019.

Plástico.com.br, 2023. Disponível em: < <https://www.plastico.com.br/o-que-e-polietileno-de-ultra-alto-peso-molecular-ou-uhmwpe/>>. Acesso em 28 nov. 2024.

POLAZ, C. N. M.; TEIXEIRA, B. A. N. Indicadores de sustentabilidade para gestão municipal de resíduos sólidos urbanos: um estudo para São Carlos (SP). **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**. v.14, n.3, p.411-420, jul/set 2009. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/esa/v14n3/v14n3a15.pdf>> Acesso em 02 out. 2019.

QUEIROZ, R. M. **Tubos de concreto com adição de resíduos de borracha de pneu**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2012.

RETO, M. A. S. **Revista Plástico Moderno**, p.22, agosto. 2000.

RODRIGUES, M. R. P; FERREIRA, O. P. Caracterização de compósitos produzidos com borracha de pneus inservíveis e resina poliuretana. **Revista Iberoamericana de Polímeros**. São Paulo. v. 11 n. 5. p. 274-283. 2010

SASSE, J. A. Deposição de Lixo na Alemanha: alternativas para um programa brasileiro de administração do lixo. Piracicaba. São Paulo. 2002. **Revista Impulso**. Vol.13, n.30, p. 1-159.

SIKA. **Concreto Forte**. Ficha técnica de produto, dez. 2020. Disponível em: <<https://bra.sika.com/pt/construcao/tecnologia-do-concreto/aditivos-para-concreto-e-argamassa/sika-concreto-forte.html>>. Acesso em 27 out 2024.

SIMONETTO, E. O; BORENSTEIN, D. **Gestão Operacional da Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos Urbanos**. *Gestão & Produção*, v. 13, n. 3, p. 449-461, set. – dez. 2006.

SISINNO, C. S.; OLIVEIRA, R. M. **Resíduos sólidos, ambiente e saúde**: Uma visão

multidisciplinar. Rio de Janeiro, 2000. Ed. Fiocruz.

SOUZA, G. F. Análise de tecnologia de reciclagem de resíduos na construção civil: Avanços, Desafios e Oportunidades. CONTECC – Congresso Técnico Científico da Engenharia e Agronomia, 2023. Disponível em <https://www.confea.org.br/midias/uploads-imce/CONTECC%202023/Civil/AN%C3%81LISE_DE_TECNOLOGIAS_DE_RECICLAGEM_DE_RES%C3%81DUOS_NA_CONSTRU%C3%87%C3%83O_CIVIL__AVAN%C3%87OS_DESAFIOS_E_OPORTUNIDADES.docx>. Acesso em 10 set 2024.

SPINACI, M; VALLIM, M. R.; DI PAOLI, M. A. Morfologia e propriedades de blenda de poliamida-6 com polietileno de alta densidade reciclado processada por injeção. Sínteses: **Revista Eletrônica do SIMTEC**, n. 2, p. 186-186, 2016

Toda Matéria. **Polímeros**. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/polimeros/>>. Acesso em: 27 out. 2024

VALENTINO. G; **Life Cycle Assessment of PET bottles: closed and open loop recycling in Denmark and Lombardy region**. 2017, 151 f. Scuola di Ingegneria civile ambientale e territoriale Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio. Disponível em <https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/136151/3/2017_10_Valentino.pdf>. Acesso em 17 de jan de 2020.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2005