

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

Christiano Rodrigues Valadares Meireles

**DESEMPENHO DE CONCRETO COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE
CATALISADOR DE PETRÓLEO E ADIÇÃO DE FIBRA DE POLIPROPILENO**

Belo Horizonte

2024

Christiano Rodrigues Valadares Meireles

**DESEMPENHO DE CONCRETO COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE
CATALISADOR DE PETRÓLEO E ADIÇÃO DE FIBRA DE POLIPROPILENO**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marys Lene Braga Almeida

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Carmen Couto Ribeiro

Belo Horizonte

2024

M514d

Meireles, Christiano Rodrigues Valadares.

Desempenho de concreto com a incorporação de resíduo de catalisador de petróleo e adição de fibra de polipropileno [recurso eletrônico] / Christiano Rodrigues Valadares Meireles. – 2024.

1 recurso online (111 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Marys Lene Braga Almeida.

Coorientadora: Maria Carmen Couto Ribeiro.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndice: f. 111.

Bibliografia: f. 100-110.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses.
3. Fibras de polipropileno - Teses. 4. Catalisadores de petróleo - Teses.
5. Sustentabilidade - Teses. 6. Concreto - Teses. I. Almeida, Marys Lene Braga. II. Ribeiro, Carmen Couto, 1953-. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 691(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE Mestrado em Construção Civil



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO CHRISTIANO RODRIGUES VALADARES MEIRELES

Realizou-se no dia 29 de agosto de 2024 às 14:00 horas, na sala 3401-Bloco I da Escola de Engenharia, a defesa de dissertação intitulada DESEMPENHO DE CONCRETO COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE CATALISADOR DE PETRÓLEO E ADIÇÃO DE FIBRA DE POLIPROPILENO, apresentada por CHRISTIANO RODRIGUES VALADARES MEIRELES, número de registro 2022663661, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Construção Civil na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, à seguinte Comissão Examinadora: Prof^ª. Marys Lene Braga Almeida (Orientadora), Prof^ª. Maria Carmen Couto Ribeiro (Coorientadora), Prof^ª. Andréia Bicalho Henriques e Prof^ª. Jacqueline Maria Flor.

A Comissão considerou a dissertação:

() Aprovada

() Reprovada

Finalizados os trabalhos, foi lavrada a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada eletronicamente pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 29 de agosto de 2024.

Prof^ª. Dr^ª. Marys Lene Braga Almeida (Orientadora) – DEMC/UFMG

Prof^ª. Dr^ª. Maria Carmen Couto Ribeiro (Coorientadora) – DEMC/UFMG

Prof^ª. Dr^ª. Andréia Bicalho Henriques – DEMIN/UFMG

Prof^ª. Dr^ª. Jacqueline Maria Flor – DEES/UFMG

Prof. Dr. Eduardo Chahud
Coordenador do Mestrado
em Construção Civil da E.E.UFMG

Dedico este trabalho aos meus pais, Glória e Márcio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e aos meus pais, Glória Rodrigues Valadares Meireles e Márcio Valadares Meireles, pelo carinho, apoio nos momentos difíceis, conselhos valiosos e exemplo.

À minha orientadora, Professora Marys Lene Braga Almeida, pelo conhecimento compartilhado, competência, paciência, didática, dedicação e confiança depositada no meu trabalho.

À Professora Carmen Couto Ribeiro pela coorientação, conhecimento e contribuições essenciais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Ao Professor Crysthian Purcino Bernardes Azevedo da Adonai Engenharia pelas oportunidades, compreensão, confiança, conhecimento e amizade em todos esses anos.

Ao Ricardo Antonio Barbosa pela grande ajuda, conhecimento, e amizade.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais de Construção da UFMG, em especial ao Prof. Dr. Eduardo Chahud, coordenador do Curso de Mestrado em Construção Civil e à Camila Souza, secretária do Curso de Mestrado em Construção Civil.

Ao Célio Monteiro da Sika por fornecer o aditivo superplastificante utilizado neste trabalho.

Ao Hugo de Moura Ronner da Maccaferri do Brasil por fornecer as fibras de polipropileno utilizadas neste trabalho.

À Consultare Labcon por ter cedido o laboratório, os equipamentos e pelo suporte na execução dos ensaios deste trabalho.

À Universidade Federal de Minas Gerais por ceder o espaço físico e permitir o uso dos equipamentos necessários à realização da pesquisa.

Aos colegas da Adonai Engenharia pelo incentivo.

Aos meus amigos que me incentivaram e apoiaram em diversos momentos durante esta jornada.

E a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

A utilização de resíduos industriais incorporados à matriz do concreto de cimento Portland vem sendo cada vez mais frequente e acarreta menor consumo de matérias-primas, redução do impacto ambiental, otimização dos custos e pode melhorar as propriedades intrínsecas dos materiais. O resíduo de catalisador de petróleo (REC) é um material resultante do processo de craqueamento catalítico por leito fluidizado em refinarias de petróleo e possui granulometria fina, elevada área superficial específica e tamanho de partículas variando entre 0,04 μm e 36 μm . O fato de o REC possuir uma proporção de 54% de sílica evidencia potencial de pozolanicidade. A adição das fibras de polipropileno (PP) na matriz do concreto vem sendo investigada como forma de melhorar o comportamento de resistência aos esforços de tração e controle de fissuração. Este trabalho estudou a influência sinérgica desses dois materiais quando utilizados na matriz do concreto. Foram produzidas amostras de concreto com as seguintes dosagens em relação à massa total de cimento Portland: dosagem R, com 10% de substituição de REC, dosagem P, com adição de 1% de fibras de polipropileno, e dosagem RP, com 10% de substituição de REC mais adição de 1% de fibras de polipropileno. A relação água/cimento utilizada foi de 0,55 e a porcentagem de aditivo superplastificante foi de 1% em relação à massa do aglomerante. Nos ensaios de resistência à compressão axial, foram observados aumentos da ordem de 4,09% (36,83 MPa) a 23,37% (43,65 MPa) em relação à amostra de controle. Nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, tanto os concretos com adição de fibras quanto os com substituição de cimento pelo REC apresentaram resultados superiores aos do controle, com aumentos da ordem de 9,45% (3,24 MPa) a 13,51% (3,36 MPa). Ambas as amostras com substituição parcial do REC e com adição de PP apresentaram grau de porosidade e índice de vazios maiores que os da referência. Os resultados da massa específica real de todas as amostras ficaram próximos, o que demonstra que, excluindo-se os vazios, as matrizes dos materiais são similares. A dosagem de controle obteve a maior média para o módulo de elasticidade dinâmico, de 33,06GPa. Os concretos das dosagens R, P e RP tiveram resultados de 31,27GPa, 32,25GPa e 32,27GPa, respectivamente. A incorporação de resíduo de catalisador de petróleo no concreto, associada à adição de fibra de polipropileno, apresenta viabilidade técnica, ambiental e econômica, ao reduzir custos, promover a economia circular e mitigar impactos ambientais. Essa

abordagem contribui para a redução de emissões de CO₂, ao mesmo tempo em que favorece o reaproveitamento de resíduos industriais e a diminuição do consumo de recursos naturais, promovendo a sustentabilidade.

Palavras-chave: Concreto verde. Resíduo de catalisador de petróleo. Fibras de polipropileno. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The use of industrial waste incorporated into the Portland cement concrete matrix is becoming increasingly common and results in lower consumption of raw materials, reduced environmental impact, cost optimization and can improve the intrinsic properties of the materials. Petroleum catalyst residue (REC) is a material resulting from the fluidized bed catalytic cracking process in oil refineries and has fine granulometry, a high specific surface area and particles ranging in size from 0.04 μm to 36 μm . The fact that the REC has a proportion of 54% silica shows its potential for pozzolanicity. The addition of polypropylene (PP) fibers to the concrete matrix has been investigated as a way of improving its resistance to tensile stress and cracking control. This work studied the synergistic influence of these two materials when used in the concrete matrix. Concrete samples were produced with the following dosages in relation to the total mass of Portland cement: dosage R, with 10% replacement of REC, dosage P, with the addition of 1% polypropylene fibers, and dosage RP, with 10% REC replacement plus the addition of 1% polypropylene fibers. The water/cement ratio used was 0.55 and the percentage of superplasticizing additive was 1% in relation to the mass of the binder. The axial compressive strength tests showed increases of between 4.09% (36.83 MPa) and 23.37% (43.65 MPa) compared to the control sample. In the diametral compressive tensile strength tests, both the concretes with added fibers and those with cement replaced by REC showed higher results than the control, with increases in the order of 9.45% (3.24 MPa) to 13.51% (3.36 MPa). Both samples with partial replacement of REC and with the addition of PP had a higher degree of porosity and void index than the reference. The results of the actual specific mass of all the samples were very close, which shows that, excluding the voids, the materials' matrices are similar. The control dosage obtained the highest average dynamic modulus of elasticity of 33.06GPa. The R, P and RP concretes had results of 31.27GPa, 32.25GPa and 32.27GPa, respectively. The incorporation of oil catalyst waste into concrete, combined with the addition of polypropylene fiber, is technically, environmentally and economically viable, as it reduces costs, promotes a circular economy and mitigates environmental impacts. This approach contributes to the reduction of CO₂ emissions, while at the same time favoring the reuse of industrial waste and reducing the consumption of natural resources, promoting sustainability.

Keywords: Green concrete. Petroleum catalyst residue. Polypropylene fibers.

Portland cement. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama simplificado das porcentagens de emissão de CO ₂ equivalente durante o processo de manufatura do cimento Portland	18
Figura 2: Classificação para os compósitos	24
Figura 3: Esquema de unidade de craqueamento catalítico fluidizado	28
Figura 4: Morfologia do resíduo de catalisador de petróleo obtido na BP Oil España	31
Figura 5: Estrutura da unidade de repetição do polipropileno	40
Figura 6: Influência das fibras curtas e longas sobre a microfissuração e macrofissuração..	41
Figura 7: Microfibras de polipropileno fibriladas	42
Figura 8: Microfibras de polipropileno monofilamentares	42
Figura 9: Curvas tensão-deformação das amostras de concreto com fibras de polipropileno e 0,1% de surfactante em MPa	44
Figura 10: Resistência à compressão (MPa), resistência inicial à fissuração (MPa) e resistência elástica (GPa) para diferentes tipos de fibras no UHPC.....	49
Figura 11: Imagem fotográfica do resíduo de catalisador de petróleo	54
Figura 12: Fluxograma da fase experimental	57
Figura 13: Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.....	61
Figura 14: Granulometria por difração a laser	62
Figura 15: Mistura dos materiais na betoneira	64
Figura 16: Execução do ensaio de abatimento de tronco de cone	65
Figura 17: Amostras em sistema aquoso com hidróxido de cálcio	66
Figura 18: Ensaio de resistência à compressão axial.....	67
Figura 19: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	68
Figura 20: Ensaio de determinação de módulo de elasticidade	69
Figura 21: Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica.	70
Figura 22: Curva granulométrica agregado miúdo	73
Figura 23: Curva granulométrica agregado graúdo.....	75
Figura 24: Distribuição granulométrica do REC	76
Figura 25: Morfologia das partículas do resíduo de catalisador de petróleo.....	78
Figura 26: Morfologia das fibras de polipropileno.....	79
Figura 27: Ensaio de tronco de cone para os concretos no estado fresco nas dosagens C, R, P e RP.....	81
Figura 28: Grumos formados em torno dos grãos de brita	82
Figura 29: Resistência à compressão axial.....	83
Figura 30: Resistência à tração por compressão diametral.....	86
Figura 31: Corpo de prova da dosagem RP após o ensaio de tração por compressão diametral.....	87
Figura 32: Módulo de elasticidade	89
Figura 33: Absorção de água e índice de vazios.....	92
Figura 34: Massa específica seca, saturada e real	93
Figura 35: Amostra da microestrutura do concreto da dosagem C.....	94
Figura 36: Amostra da microestrutura do concreto da dosagem R.....	94
Figura 37: Amostra da microestrutura do concreto da dosagem P.....	95
Figura 38: Amostra da microestrutura do concreto da dosagem RP	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos químicos dos materiais pozolânicos	26
Tabela 2 - Requisitos físicos dos materiais pozolânicos	26
Tabela 3- Composição química básica do Catalisador de Equilíbrio, segundo a Fábrica Carioca de Catalisadores S.A.	29
Tabela 4 - Massa específica real de REC encontradas em literatura	30
Tabela 5 – Propriedades típicas das fibras	39
Tabela 6 – Características do cimento.....	52
Tabela 7 – Características físicas e mecânicas das fibras de polipropileno	54
Tabela 8 - Propriedades do aditivo superplastificante Viscocrete 5800 FTN.....	55
Tabela 9 – Ensaio de caracterização	58
Tabela 10 – Quantidade de material em massa, para moldagem de seis corpos de prova cilíndricos 5 x 10 cm conforme NBR 5752:2014.....	59
Tabela 11 – Dosagem de materiais para 1m ³ de concreto e relação de a/c igual a 0,55.....	63
Tabela 12 – Características físicas do agregado miúdo.....	72
Tabela 13 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo	72
Tabela 14 – Características físicas do agregado graúdo	74
Tabela 15 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.	74
Tabela 16 – Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova em MPa.....	76
Tabela 17 – Resistência à compressão axial mínima para material pozolânico	77
Tabela 18 – Abatimento do tronco de cone das amostras	79
Tabela 19 –Ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova em MPa.....	83
Tabela 20 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	85
Tabela 21 – Módulo de elasticidade dinâmico e módulo de elasticidade estático estimado .	88
Tabela 22 – Ensaio de absorção de água.....	90
Tabela 23 – Ensaio de índice de vazios.....	90
Tabela 24 – Ensaio de massa específica real.....	91

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARI - Alta Resistência Inicial
ASTM – American Society for Testing Materials
CDE - Centro Design Empresa
COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CP – Corpo de Prova
CRF – Concreto Reforçado com Fibras
DMEA - Dimetilaminoetanol
ECAT - Catalisador de equilíbrio
EPCAT - Catalisador precipitador eletrostático
Fc – Resistência à compressão axial
FCC - Fluid Catalytic Cracking
FCR3 - Fluid Catalytic Cracking Catalyst Residue
GPa – Gigapascal
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MCS – Materiais Cimentícios Suplementares
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa - Megapascal
NBR – Norma Brasileira
PE – Polietileno
PETROBRAS - Petróleo Brasileiro S. A.
PP – Polipropileno
PVA - Álcool polivinílico
REC – Resíduo do Catalisador do Petróleo
REGAP - Refinaria Gabriel Passos
UEMG – Universidade do Estado de Minas Gerais
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais
UHPC - Concretos de Ultra Alta Performance
USEPA - Agência Norte-Americana de Proteção ao Meio Ambiente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVO	20
2.1 Objetivo geral	20
2.1 Objetivos específicos	20
3 REVISÃO DA LITERATURA	22
3.1 Concreto e sustentabilidade	22
3.1.1 Materiais compósitos	23
3.1.2 Substituições minerais ao cimento Portland	24
3.2 Resíduo de catalisador de petróleo em matrizes cimentícias	27
3.2.1 Craqueamento catalítico	27
3.2.2 Concreto com resíduo de catalisador de petróleo	29
3.3 Fibras em matrizes cimentícias	38
3.3.1 Fibras de polipropileno	40
3.3.2 Concreto reforçado com fibras de polipropileno	42
4 MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1 Materiais utilizados	52
4.1.1 Cimento Portland	52
4.1.2 Agregado miúdo	53
4.1.3 Agregado graúdo	53
4.1.4 Resíduo de catalisador de petróleo	53

4.1.5 Fibras de polipropileno	54
4.1.6 Água	55
4.1.7 Aditivo superplastificante	55
4.2 Métodos	55
4.2.1 Caracterização dos materiais	58
4.2.1.1 Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (ABNT NBR 5752:2014)	58
4.2.1.2 Granulometria do resíduo do catalisador de petróleo por difração a laser	61
4.2.2 Produção das amostras/dosagens de concreto	62
4.2.3 Consistência do concreto no estado fresco	64
4.2.4 Moldagem e cura	65
4.2.5 Ensaio do concreto no estado endurecido	66
4.2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	71
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
5.1 Caracterização dos materiais	72
5.1.1 Agregado miúdo	72
5.1.2 Agregado graúdo	74
5.1.3 Resíduo de catalisador de petróleo	75
5.1.4 Fibras de polipropileno	78
5.2 Consistência do concreto no estado fresco	79
5.3 Ensaio com o concreto no estado endurecido	82

5.3.1 Resistência à compressão axial	82
5.3.2 Resistência à tração por compressão diametral	84
5.3.3 Módulo de elasticidade dinâmico	87
5.3.4 Absorção de água, índice de vazios e massa específica real	89
5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura	93
7 CONCLUSÃO	96
8 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
APÊNDICE A – Exigências físicas, mecânicas e químicas- InterCement.....	111

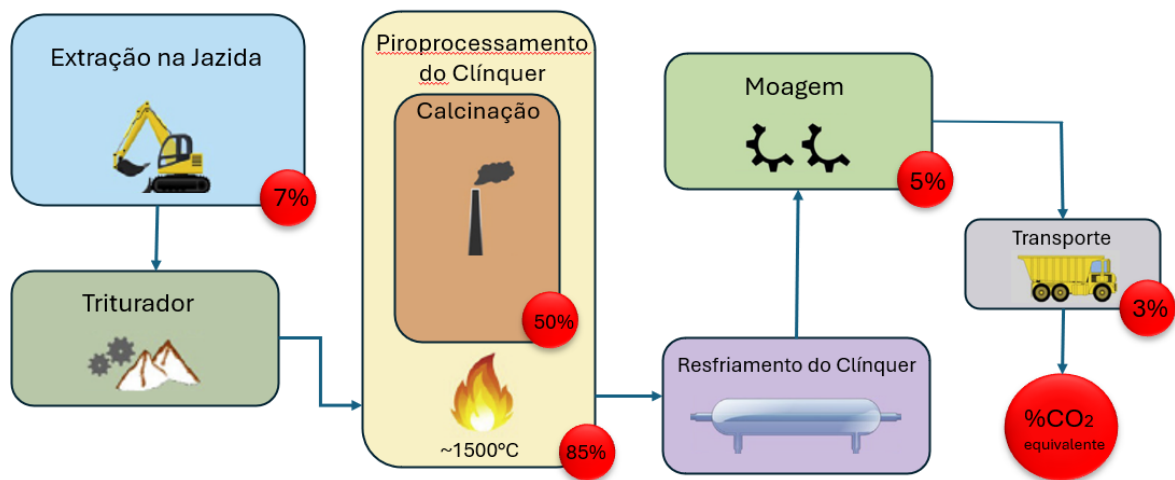
1 INTRODUÇÃO

Na construção civil, os resíduos industriais e outros materiais alternativos têm sido cada vez mais incorporados ao concreto, seja como adição, seja na substituição parcial do cimento Portland. Esse processo objetiva a diminuição dos custos econômicos e possibilidades de melhorias nas propriedades dos materiais compósitos, como resistência mecânica e durabilidade.

Da perspectiva ambiental, a incorporação de resíduos urbano-industriais ao concreto diminui o impacto ambiental da sua produção, principalmente pela redução na emissão do CO₂ na atmosfera, já que esses podem ser incorporados ao concreto ou substituir, parcial ou totalmente, as matérias-primas, como os agregados ou materiais cimentícios. Da perspectiva econômica, essa substituição ou a incorporação resultam em consideráveis economias, pelo fato de diminuírem os gastos necessários para o descarte dos resíduos e reduzirem o volume de materiais brutos necessários para a produção do concreto. Do ponto de vista técnico, a adição de resíduos urbano-industriais oferece oportunidades de melhorias consideráveis nas propriedades macroscópicas e microscópicas do concreto. (Chen *et al.*, 2022).

Aproximadamente 900 kg de CO₂ equivalente (quantidade proporcional de CO₂ dos gases de efeito estufa) são liberados por tonelada de cimento produzido e somente a calcinação do clínquer é responsável por 50% dessas emissões. Dessa forma, estima-se que a indústria do cimento é responsável por 5% a 7% das emissões de CO₂ antropogênicas no ar. Na Figura 1, apresenta-se um esquema simplificado das etapas da manufatura do cimento Portland e as porcentagens de emissão de CO₂ correspondentes a cada fase (Madalena *et al.*, 2018).

Figura 1: Diagrama simplificado das porcentagens de emissão de CO₂ equivalente durante o processo de manufatura do cimento Portland



Fonte: O autor, adaptado de Madalena *et al.* (2018)

Na literatura, existem estudos que visam à substituição parcial do cimento Portland por materiais alternativos. O resíduo de catalisador de petróleo (REC) é um material resultante do processo de craqueamento catalítico por leito fluidizado em unidades de refino de petróleo e pode ser incorporado à matriz cimentícia, seja como material pozolânico, seja como *filler*, podendo contribuir para minimização de impactos ambientais

O concreto tem a característica de ser altamente resistente à compressão, porém 10 vezes menos resistente à tração. Além disso, ele também é um material de característica frágil, ou seja, não permite a transferência das tensões após a fissuração. Como forma de evitar falhas por fissuração e melhorar as características mecânicas, é possível adicionar fibras na matriz do concreto. Assim, foi criado o concreto reforçado com fibras (CRF), que vem a ser um material cimentício composto, com reforço disperso na forma de fibras, que podem ser de aço, polímeros, vidro, carbono e polipropileno (Blazy *et al.*, 2021).

As fibras de polipropileno são quimicamente resistentes a ácidos e álcalis, além de poderem ser utilizadas com classes diferentes de cimento. A utilização de fibras contribui na prevenção de microfissuras na estrutura do concreto, dessa forma

diminuindo o índice de permeabilidade e aumentando as suas propriedades de durabilidade e resistência (Lafiti *et al.*, 2022).

O trabalho proposto visa investigar a incorporação do resíduo de catalisador de petróleo como substituinte parcial do cimento, juntamente com a adição das fibras de polipropileno (PP) ao concreto, e avaliar as suas características de resistência à compressão e à tração, durabilidade e performance para três dosagens diferentes em relação à amostra de controle.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é investigar a viabilidade do uso do resíduo de catalisador de petróleo como um coproduto substituinte parcial do cimento, com a adição da fibra de polipropileno ao concreto, visando à obtenção de um material com viabilidades técnicas, econômicas e ambientais.

2.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos desta pesquisa, podem ser listados:

- Realizar uma revisão sistemática da literatura quanto à utilização do REC como substituinte parcial do cimento e à adição das fibras de polipropileno concreto;
- Caracterizar o REC, por meio de granulometria por difração a laser e microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Caracterizar as PP, por meio do MEV;
- Avaliar o índice da atividade pozolânica do resíduo, conforme estabelecido na ABNT NBR 5752:2014 - determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias;
- Produzir corpos de prova nas seguintes dosagens: amostra de controle, 10% de substituição de REC em relação à massa de cimento Portland; 1% de adição de PP em relação à massa de cimento; 10% de substituição de REC mais 1% de adição de PP;
- Avaliar as propriedades mecânicas dos corpos de prova produzidos, por meio de ensaio de resistência à compressão, conforme norma ABNT NBR 5739:2018, e ensaio de resistência à tração por compressão diametral, conforme norma ABNT NBR 7222:2011;
- Caracterizar os concretos produzidos por microscopia eletrônica de varredura;
- Verificar o módulo de elasticidade e deformação do concreto pelo método das frequências de vibração, conforme ABNT NBR 8522-2:2021;

- Investigar as propriedades de durabilidade dos corpos de prova de concreto, por meio dos seguintes ensaios: determinação de absorção de água e índice de vazios, conforme ABNT NBR 9778:2009.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A produção de concretos mais sustentáveis se dá cada vez mais por meio da introdução de novos materiais em sua composição. A finalidade desta revisão de literatura é prover um estudo do resíduo de catalisador de petróleo e a sua utilização como substituição parcial do cimento, bem como das fibras de polipropileno aplicadas como adição ao concreto.

3.1 Concreto e sustentabilidade

Segundo Madalena (2018), o cimento Portland é um dos materiais manufaturados mais produzidos no mundo. Mais de três bilhões de toneladas foram produzidos em 2012, com estimativas de crescimento de 3,7 a 4,4 bilhões de toneladas por volta de 2050. A difusão no uso do concreto levou ao desenvolvimento de uma ampla gama de cimentos, muitos destes contendo adições minerais e pozolanas, que melhoraram características do material, como a permeabilidade, a porosidade capilar, a redução no calor de hidratação, a resistência a sulfatos e o aumento na resistência mecânica nas primeiras idades (Fajardo, 2015).

Uma das alternativas para se reduzirem as emissões de gases de efeito estufa mais viáveis economicamente é a de se utilizarem materiais cimentícios suplementares (MCS) na produção do concreto. A grande maioria dos MCS é de resíduos agroindustriais, e o seu uso na produção do concreto pode vir a proporcionar benefícios tanto econômicos como ambientais. Entre estes benefícios, podemos citar a preservação dos recursos naturais, a reutilização de produtos derivados e melhoras nas propriedades do concreto e a redução no uso de matéria-prima bruta. Adicionalmente, a substituição do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares foi identificada pelo *United Nations Environmental Program Sustainable Building and Climate Initiative* como o método mais prático para reduzir as emissões de gás carbônico da cadeia de produção do concreto (Memon, *et al.* 2021).

Devido ao fato de que cada vez mais destaque é colocado no desenvolvimento sustentável e na redução das emissões de dióxido de carbono, um dos resultados desejados é a extensão da vida útil da estrutura, de forma que uma maior durabilidade

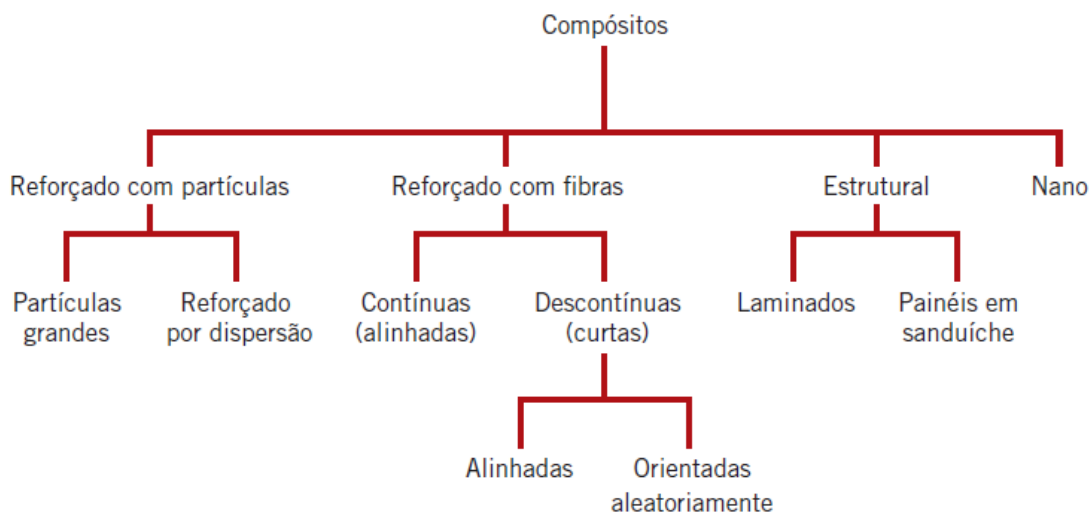
do concreto se torna um dos requerimentos prioritários. Portanto, a fim de atingir esse objetivo, é necessário procurar reduzir o número e o tamanho das fissuras, poros, permeabilidade por água, ingresso de substâncias químicas e promover aumento da proteção contra a corrosão (Blazy et al., 2021).

3.1.1 *Materiais compósitos*

Os materiais compósitos advêm do conceito de combinar materiais diferentes durante a fabricação, obtendo-se, assim, uma mistura de propriedades que não podem ser atendidas isoladamente com um determinado material. Esse material multifásico possui uma proporção considerável das propriedades de cada uma das suas fases constituintes, resultando em uma combinação ótima de propriedades. Dessa forma, as melhores características são atingidas pelas combinações diversas entre as propriedades, obtidas por meio das proporções entre os seus componentes.

Nesse contexto, os materiais compósitos são fabricados artificialmente, podendo as suas fases constituintes serem quimicamente diferentes e divididas por uma interface diferenciada. Os materiais compósitos multifásicos podem ser constituídos por duas ou mais fases, sendo a principal denominada *matriz*, que é contínua e envolve as outras fases, denominadas *fases dispersas*. Assim, é possível classificar os materiais compósitos em quatro categorias principais, que são os compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras, compósitos estruturais e nanocompósitos, conforme se vê, a seguir, na Figura 2 (Callister Jr., 2016).

Figura 2: Classificação para os compósitos



Fonte: (Callister Jr., página 584, 2016)

No presente trabalho, o compósito estudado será constituído da matriz ligante (cimento e resíduo do catalisador de petróleo), reforçado com partículas grandes (areia e cascalho como fases dispersas) e com fibras descontínuas orientadas aleatoriamente (fibras de polipropileno).

3.1.2 Substituições minerais ao cimento Portland

Substituições minerais são produtos predominantemente silicosos, finamente moídos, de origem mineral, com propriedades cimentícias, e que podem ser adicionados aos cimentos, argamassas e concretos, em proporções que variam de 20% a 70% do material cimentício total, com o propósito de alterar as suas características originais e proporcionar um desempenho diferenciado. Nos últimos anos, estão sendo cada vez mais utilizados subprodutos industriais e agrícolas, devido aos seus aspectos tanto ambientais quanto socioeconômicos (Mehta, 2014; NBR 11172:1990).

Notadamente, usinas termoelétricas e altos-fornos metalúrgicos são os principais fornecedores desses subprodutos, que geram enorme impacto ambiental quando lançados em aterros sanitários ou diretamente na natureza. Entretanto, esses materiais, quando aproveitados simplesmente como agregados, ou quando incorporados ao concreto como substituição parcial do cimento (na fabricação do insumo ou diretamente na betoneira), geram enorme economia e redução do impacto

ambiental na cadeia de produção do concreto (principalmente na redução da energia gasta na produção do clínquer Portland). O uso desses materiais garante, pois, a redução do custo global, na medida em que são mais baratos que o cimento Portland. O que impulsionou a incorporação dessas adições foi o incremento no preço da energia, devido à crise do petróleo ocorrida nos anos 1970, visto que o processo de queima representa quase metade dos custos de produção do cimento (Neville, 2016).

Assim como do ponto de vista econômico, tecnicamente as adições minerais reativas atribuem ao cimento características diferenciadas que podem ser: maior resistência a agentes agressivos, redução na porosidade capilar, redução no calor de hidratação e aumento na resistência mecânica (Andrade, 2019).

Mehta e Monteiro (2014) classificaram as adições minerais de acordo com as suas características pozolânicas e/ou cimentantes. Ainda segundo Mehta e Monteiro (2014), são a composição mineralógica e a característica da partícula, e não a composição química ou origem do material, que condicionam o efeito dessa adição no comportamento do concreto ou argamassa. Esses materiais ainda podem ser classificados como *materiais naturais* (processados com a finalidade única de produzir pozolana) ou *materiais de subproduto* (subprodutos industriais que podem ou não exigir algum processamento antes de serem usados como adição mineral).

A utilização do resíduo de catalisador de petróleo vem sendo progressivamente estudada como substituição em matrizes cimentícias. Existem quantidades significativas de SiO_2 e Al_2O_3 , 50% e 40%, respectivamente, semelhantes às de muitas pozolanas, como cinzas volantes e Metacaulin, que já são utilizadas como adições em argamassa e concreto de cimento Portland (Pacewska *et al.*, 2002).

Materiais pozolânicos são substâncias silicosas ou silicoaluminosas, que não possuem característica cimentante isoladamente, mas quando finamente divididas, reagem com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) na presença de água e temperatura ambiente, formando compostos de características cimentantes. Esses compostos, quando misturados aos concretos e argamassas, podem vir a produzir um material de custo reduzido e características superiores aos produtos desprovidos da adição (Cunha, 2012; Mehta, 2014; NBR 12653:2014).

A NBR 12653 (2014) classifica os materiais pozolânicos em três classes (N, C e E) e estabelece exigências físico-químicas para que possam ser utilizados em concretos e argamassas. A classe N abrange as pozolanas naturais vulcânicas ou sedimentares e as artificiais, como subprodutos de processos industriais. A classe C é composta pelas cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em termoelétricas. A classe E é composta por todas as demais pozolanas que não se enquadrem nas classes N e C. É importante frisar que todas as pozolanas devem obedecer aos requisitos da norma NBR 12653 (Andrade, 2019).

Podem-se visualizar os requisitos químicos dos materiais pozolânicos na Tabela 1.

Tabela 1 - Requisitos químicos dos materiais pozolânicos

Propriedade	Classe de Material Pozolânico		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO ₃	≤ 4	≤ 5	≤ 5
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5

Fonte: NBR 12653, 2014

Os requisitos físicos dos materiais pozolânicos, de acordo com a ABNT NBR 12653:2014, podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Requisitos físicos dos materiais pozolânicos

Propriedade	Classe de Material Pozolânico			Método de Ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45µm	< 20%	< 20%	< 20%	ABNT NBR 15894-3
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	ABNT NBR 5751

Fonte: NBR 12653, 2014

3.2 Resíduo de catalisador de petróleo em matrizes cimentícias

3.2.1 Craqueamento catalítico

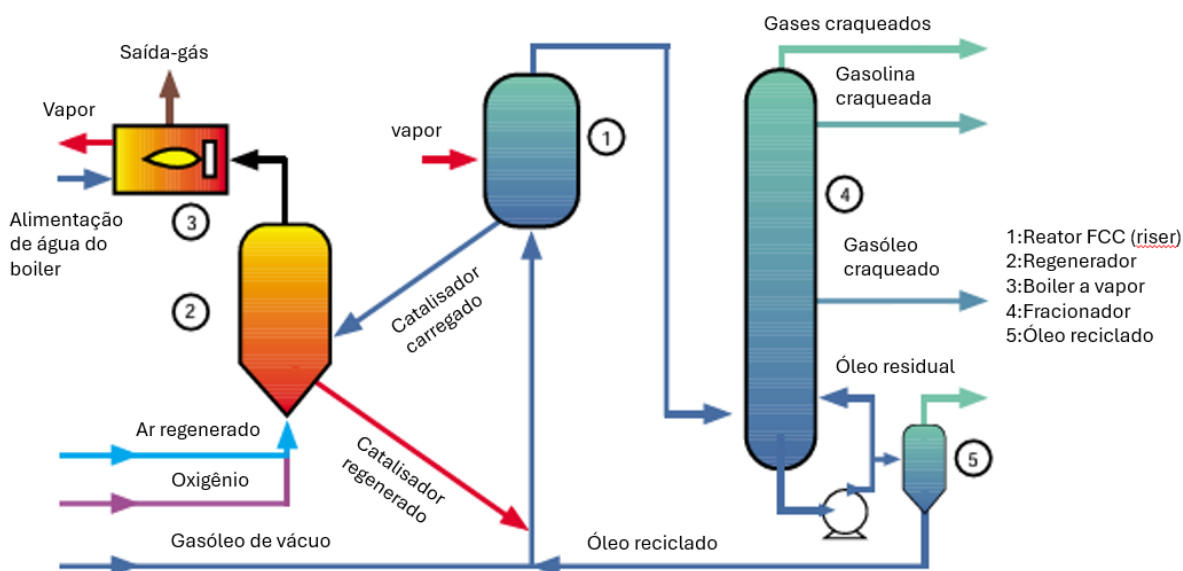
Segundo Neves *et al.* (2015), a indústria petroquímica tem utilizado em suas unidades de craqueamento catalítico fluido as zeólitas como catalisadores, que promovem a quebra e o rearranjo das moléculas dos hidrocarbonetos para gerar novos produtos. Após vários ciclos, o catalisador se torna gasto devido ao acúmulo de metais pesados e carbono na sua superfície. Esses catalisadores de craqueamento fluido usados, dada a sua composição, que é formada, principalmente, por aluminossilicatos, podem ter utilização como aditivos para concreto.

De acordo com Almeida *et al.* (2018), a procura por sustentabilidade inspirou pesquisadores a avaliarem subprodutos de materiais tradicionais, como o resíduo de catalisador de petróleo, que tem sido usado em conjunto com o cimento para produzir concretos mais sustentáveis. Ademais, o efeito da incorporação do REC na durabilidade, permeabilidade, sucção capilar, carbonatação e resistência aos cloretos no concreto tem sido investigados.

Conforme detalhado na Figura 3, o hidrocarboneto ou gasóleo de vácuo *feed* é pré-aquecido e injetado no *riser* - um reator cilíndrico em forma de tubo vertical -, por meio de um bocal de alimentação, e entra em contato com o catalisador fluidizado (zeólita) pela injeção de vapor *steam*, em temperaturas que variam de 665°C a 760°C. A alta temperatura do catalisador vaporiza o hidrocarboneto ou gasóleo e ativa a reação de catálise dentro do reator. A mistura é separada pelos ciclones dentro do reator *riser* e, então, os hidrocarbonetos craqueados e os não craqueados isolados do catalisador são levados ao fracionamento *fractionator*, onde ocorre a extração do óleo leve de reciclo *light gasoil* (diesel e combustível de aviação), do óleo pesado de reciclo *heavy gasoil*, e da borra ou lama *slurry*. A outra fração gaseificada é direcionada por sucção para o despropanizador, onde são gerados o butano, o buteno, o propano e o propeno. Então, o catalisador retido nos ciclones do reator fica coberto por um resíduo de alto teor de carbono, o coque, que, depositado na superfície do catalisador, reduz sua atividade e seletividade. O catalisador segue na sequência para um separador

específico *stripper* para remover os hidrocarbonetos que ficaram em seus poros e, por fim, tem a sua capacidade catalítica restaurada, por meio de combustão e retirada do coque, que ocorre no regenerador *regenerator*. Após vários ciclos, o catalisador passa a ter a sua capacidade catalítica comprometida, por causa de forte contaminação por coque e metais pesados. Assim, parte dos catalisadores com baixa atividade são removidos do sistema por uma linha de descarte. Esse catalisador removido é chamado de *catalisador de equilíbrio* (ECAT). Em separado, outros catalisadores são regenerados e coletados em um precipitador eletrostático, sendo chamados de *catalisador precipitador eletrostático* (EPCAT) (De Faria, 2012; Fajardo 2005).

Figura 3: Esquema de unidade de craqueamento catalítico fluidizado



Fonte: O autor, adaptado de (Craqueamento Catalítico Fluidizado, 2024)

Segundo Rudžionis *et al.* (2014), em cada ano, 400 mil toneladas de resíduos de catalisador são geradas mundialmente em refinarias. Com o crescente consumo de petróleo e derivados, a quantidade de resíduo de catalisador gerado inevitavelmente tende a aumentar. Somente no Brasil, 13 refinarias realizam o processo de craqueamento catalítico e, dessas, 10 são da Petrobras e três de outras empresas. A maioria dessas refinarias se encontra na Região Sudeste do país, onde ficam os maiores polos produtores de petróleo e as cidades mais industrializadas e populosas (Will, 2022).

3.2.2 Concreto com resíduo de catalisador de petróleo

O resíduo de catalisador de petróleo (REC), também chamado de ECAT (*Equilibrium catalyst*) ou FCR3 (*Fluid Catalytic Cracking Catalyst Residue*), é um resíduo gerado a partir do catalisador virgem zeolítico após a exaustão da sua atividade (De Faria, 2012; Payá *et al.*, 1999; Will, 2022).

Uma das formas de se destinar adequadamente o REC é por meio da sua utilização em matrizes cimentícias. Entretanto, a sua adição provoca perda de trabalhabilidade da massa, acarretando acréscimo de água na mistura ou mesmo aditivos superplastificantes (Cunha, 2012; Rudžionis *et al.* 2014; Payá *et al.*, 1999; Will, 2022).

No Brasil, o principal fornecedor de catalisador para a Petrobras S.A. é a Fábrica Carioca de Catalisadores S.A., sendo esta uma das responsáveis pelo recolhimento e destinação do REC. Na Tabela 3, apresenta-se a composição química básica do REC no Brasil.

Tabela 3- Composição química básica do Catalisador de Equilíbrio, segundo a Fábrica Carioca de Catalisadores S.A.

Nome químico	% Peso / Peso 1(1)	Numero do CAS(2)
Óxido de sílica amorfa	25,0 a 60,0	7631-86-9
Óxido de alumínio	25,0 a 55,0	1344-28-1
Vanádio	0,0 a 10,0	68188-83-0
Óxidos de terras-raras	0,2 a 2,0	7439-89-6
Níquel	0,0 a 1,5	7440-44-0
Ferro	0,0 a 0,1	7440-62-2
Cobre	0,0 a 0,1	7440-02-0
Carbono	0,0 a 0,01	7440-50-8
Antimônio	0,0 a 0,03	7440-36-0

Obs.:

(1): “% Peso / Peso 1” significa peso do composto por peso unitário de catalisador de equilíbrio.

(2) Número do CAS ou registro CAS de um composto químico, é um número de registro único no banco de dados do Chemical Abstracts Service, uma divisão da Chemical American Society.

Fonte: Ficha de Informação de Segurança de Catalisador de Equilíbrio, 2024

Na literatura, é possível encontrar valores da massa específica real do REC que se aproximam, conforme se vê na Tabela 4:

Tabela 4 - Massa específica real de REC encontradas em literatura

Autores	Massa específica (kg/m³)
SU et al, (2000)	2480
CHEN et al, (2003)	2460

Fonte: Chen *et al.*, 2003; SU *et al.*, 2000

De acordo com a ABNT NBR 10004 (2004), os catalisadores gastos provenientes do hidrotratamento das operações de refino de petróleo, incluindo leitos usados para dessulfurizar as alimentações para outros reatores catalíticos, têm a indicação de características de periculosidade de resíduo inflamável e tóxico, por possuírem concentrações de benzeno e arsênico, que são constituintes tóxicos.

Inicialmente, os catalisadores à base de zeólitas foram considerados um resíduo não perigoso pela USEPA (Agência Norte-Americana de Proteção ao Meio Ambiente). No entanto, em 1996, a mesma agência foi obrigada a rever a sua classificação (Afonso *et al.*, 2004; Will, 2012; USEPA, 1996, 1998, 2002a, 2002b).

Em 1998, a USEPA publicou uma lista final com considerações sobre resíduos perigosos, principalmente aqueles gerados nas refinarias de petróleo. Essa listagem foi revisada em 2002. Assim, a USEPA caracterizou definitivamente os catalisadores usados das unidades de hidrotratamento, hidrorrefino, hidroprocessamento e hidrocrackeamento como resíduos perigosos, entre esses as zeólitas (Afonso *et al.*, 2004; USEPA, 1996, 1998, 2002; Will, 2012).

Após serem usados em atividades petroquímicas, os catalisadores tornam-se poluentes em potencial, devido, sobretudo, a três fatores: um teor considerável de metais pesados, alguns compostos cancerígenos como o benzeno, provenientes do coque depositado na superfície do catalisador “exausto”, e a elevada acidez desses materiais, muito superior à dos solos (Afonso *et al.*, 2004; Will, 2012).

De acordo com Afonso *et al.* (2004), o tratamento adequado para o descarte consiste em uma oxidação à alta temperatura, de forma a eliminar o coque e insolubilizar os componentes inorgânicos (com a eliminação da acidez dos sólidos), mas o processo demanda um consumo elevado de energia. Com a produção mundial de zeólitas cada

vez mais elevada, o reaproveitamento desse material usado é de suma importância para uma indústria mais sustentável, tanto em termos de consumo de energia como de contaminação do ecossistema.

Payá *et al.* (1999) estudaram as características gerais do resíduo de catalisador de petróleo obtido na BP Oil España e a sua utilização em argamassas cimentícias. O REC apresentou partículas esferoidais de tamanho que variou entre 0,1 μm e 30 μm . O peso específico encontrado foi de 2,45 g/cm^3 . Devido à grande área superficial específica, a absorção de moléculas de água é acentuada. Desse modo, houve perda na trabalhabilidade das argamassas estudadas com o acréscimo do REC, exigindo o uso de aditivos superplastificantes. A moagem acentuou as propriedades pozolânicas do REC, com um tempo ótimo de moagem de 20 minutos. A substituição do cimento pelo REC em argamassas trouxe incrementos na resistência à compressão, bem como a substituição de areia pelo REC. A Figura 4 mostra a morfologia das partículas do resíduo de catalisador de petróleo estudada por meio de microscopia de varredura eletrônica

Figura 4: Morfologia do resíduo de catalisador de petróleo obtido na BP Oil España



Fonte: Payá *et al.* (1999)

Guilhermino (2006), de forma a verificar o potencial de risco ambiental do REC, realizou ensaios de lixiviação e solubilização, de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (2004), comparando-os com os limites básicos estabelecidos pela NBR 10004 (2004). Os resultados dessa pesquisa demonstraram que nenhum dos seus constituintes apresentaram concentração superior aos limites, podendo, então, esse resíduo ser classificado pela NBR 10004 (2004) como Classe II – inerte. Fajardo

(2005) e Fay (2006) chegaram a conclusões semelhantes. Assim, o REC não é um material tóxico.

Silva (2015) confirmou a pozolanicidade do REC, por meio de ensaios de Luxán, Chapelle Modificado, e análise térmica por DTA e TG/DTG, que foram eficientes para quantificar e determinar as fases pozolânicas C-S-H e C-A-S-H + C-A-H formadas durante a hidratação das misturas contendo REC nas pastas de hidróxido de cálcio. Da mesma forma, análise térmica por DTA e TG/DTG, realizadas nas pastas de cimento contendo REC, também confirmaram os resultados obtidos nos estudos das pastas contendo hidróxido de sódio.

Nos últimos anos, vários pesquisadores em todo o mundo têm estudado o uso potencial de subprodutos industriais em matrizes cimentícias de argamassas, pastas e concretos, e o REC está entre eles, devido principalmente à similaridade de algumas propriedades físico-químicas do REC com o cimento Portland. O REC pode ser utilizado nas matrizes cimentícias de duas maneiras: a primeira é *in natura*, conforme é recolhido nos silos de armazenamento das refinarias, e a segunda é por meio do beneficiamento, mediante o qual o REC é moído em frações menores, o que acarreta um aumento da sua superfície específica e consequente potencialização da sua atividade pozolânica (Silva, 2015). A substituição parcial do pó do cimento Portland em matrizes cimentícias foi uma das técnicas mais vistas na literatura, pois não afeta sobremaneira as propriedades mecânicas dos compostos (Will, 2022).

As primeiras referências sobre o uso do REC em produção de cimento e concreto foram vistas em Monzó (1997), que serviu de referência para o estudo de Payá *et al.* (1999), no qual foi analisada a substituição de 15% e 30% de REC em argamassa de cimento. Foi concluído que a trabalhabilidade da argamassa com adição de REC é inferior à da argamassa de referência, principalmente devido à absorção de água causada por sua elevada área superficial. A influência da moagem no aumento das propriedades pozolânicas também foi destacada.

Pacewska (1998) fez o seu primeiro estudo, comparando o efeito da adição de 25% de REC, 25% de microssílica e 25% cinzas volantes no curso de hidratação de pastas de cimento. Os resultados obtidos foram considerados promissores, sendo que as

pastas adicionadas de REC sofreram aceleração no processo de hidratação, bem como apresentaram uma maior resistência à compressão após 28 dias de hidratação.

Su *et al.* (2000) realizaram uma análise acerca das propriedades químicas básicas do REC e a sua viabilidade como substituto de 5%, 10% ou 15% do cimento em matrizes cimentícias. As análises indicaram que os REC estudados são compostos principalmente por SiO₂ e Al₂O₃, com uma distribuição de partículas entre 10 e 130µm. Os resultados demonstraram que, quando em uma relação água/cimento de 0,55 ou 0,485, as argamassas com 5% ou 10% de substituição apresentaram maior resistência à compressão que a amostra de controle. A amostra de 15% de substituição apresentou resistência inferior ao controle - situação esta atribuída à compactação inadequada.

Payá *et al.* (2001) estudaram as propriedades físicas, químicas e mecânicas da utilização do REC obtido na BP Oil España S.A. para a produção de matrizes de cimento com incorporação de 6%, 10%, 15% e 20% em substituição ao material cimentante. Esse material foi processado em laboratório em um moinho de bolas, apresentando então os parâmetros granulométricos de 2% retidos na peneira 80-µm, 25% retidos na peneira 40-µm e 50% retidos na peneira 20-µm. As características das amostras incorporadas com REC foram comparadas com a amostra de controle, e observou-se a ocorrência de atividade pozolânica somente nas amostras com 15% e 20% de incorporação. Notou-se que, com um aumento na proporção de REC nas matrizes de cimento, ocorre perda na trabalhabilidade, resultando na necessidade de adicionar de mais água. Aumento na resistência à compressão foi observado nas amostras com 10%, 15% e 20% de incorporação a partir dos 7 dias de cura. Concluiu-se, neste estudo, que o REC é adequado para a substituição do cimento e que as porcentagens mais adequadas seriam de 15% a 20%.

Pacewska *et al.* (2002) aprofundaram seus estudos, procurando determinar a função do REC no processo de hidratação do cimento e avaliando o seu efeito nas propriedades tecnológicas do concreto mantido em condições não agressivas, incluindo resistência mecânica, absorção de água, porosidade, resistência ao gelo e passivação em armações de aço. A relação água/aglomerante foi de 0,5 para as

pastas e de 0,55 para o concreto. As proporções de substituição de cimento para REC foram de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. A conclusão do estudo foi que a atividade pozolânica do REC é dependente do diâmetro médio das partículas, sendo que frações de partículas mais graúdas tendem a apresentar menor atividade pozolânica. A resistência do concreto foi melhorada com a adição do REC, e o ganho mais expressivo ocorreu aos 28 dias de hidratação. Uma efetividade maior foi observada em frações de partículas menores. O REC tornou a microestrutura do concreto mais compacta, aumentando a sua densidade e, assim, reduzindo a absorção de água pelos poros da estrutura. Dessa forma, a incorporação do REC tornou a amostra menos suscetível a patologias resultantes da expansão das moléculas de água pelo congelamento. O REC não piorou o índice de passivação do aço.

Payá *et al.* (2003) fizeram uma análise mais detalhada para o estabelecimento da atividade pozolânica do REC em matrizes de cimento Portland, investigando a influência da relação água/ligante e comparando a sua reatividade com outras pozolanas artificiais, como o Metacaulin. Também se procurou estabelecer a influência das porcentagens de substituição do REC e sua respectiva reatividade. O REC estudado também foi obtido da BP Oil España S.A. e processado durante 20 minutos em moinho de bola. A relação água/aglomerante foi de 0,20, 0,30, 0,35, 0,40, 0,45, 0,50 e 0,55. A porcentagem de substituição foi de 5%, 10%, 15% e 20%, adotando-se a relação água/aglomerante a partir de 0,35% em 5% de substituição. As amostras foram avaliadas aos 3, 7, 14, 28 e 90 dias de cura e o aditivo superplastificante teve de ser utilizado a partir de 20% de substituição. A análise termal revelou que o índice de Ca(OH)_2 diminuiu à medida que a relação água/aglomerante reduziu, sendo esse efeito mais acentuado nas pastas com REC e Metacaulin. Ambas as pozolanas tiveram reatividades similares, ficando maiores nas pastas com REC em idades mais avançadas. A análise termal também mostrou que o conteúdo de produtos de hidratação aumentou à medida que a porcentagem de substituição foi maior.

Zornoza *et al.* (2009a) estudaram, por meio de análise termogravimétrica e difração de raios X, a influência da carbonatação na hidratação e produtos pozolânicos de pastas com substituição de cimento Portland por REC nos teores de 20%, 35% e 50%. Chegou-se à conclusão de que 20% de substituição rendeu produtos cimentantes

devido à atividade pozolânica do REC com a portlandita liberada na hidratação do cimento. No entanto, proporções maiores de substituição esgotaram toda a portlandita. Houve produção de componentes similares pela carbonatação nas pastas com substituição e nas pastas de referência, e, desse modo, os autores concluíram que não existem riscos de perda de resistência à carbonatação, não obstante a redução da reserva alcalina.

Zornoza *et al.* (2009b) buscaram avaliar a influência da incorporação do REC em matrizes de cimento Portland com relação à resistência e à contaminação por cloretos. Os teores de substituição de REC por cimento nesse estudo foram de 5%, 10%, 15% e 20%. Foram realizadas porosimetria por intrusão de mercúrio, análise termogravimétrica e intrusão de raios X, teste de migração de cloreto e teste de taxa de corrosão. Foi demonstrado que a incorporação do REC em quantidades de até 20% acarretou a formação de C-A-H e C-A-S-H, o que levou a uma redução da porosidade capilar das matrizes cimentícias. A melhora na resistência à entrada dos cloretos levou a um aumento na resistência à corrosão das pastas contendo REC. Com esses resultados, o autor recomendou o uso do REC em estruturas de concreto armado expostas a ambientes contaminados por cloretos.

De Faria (2012) verificou a pozolanicidade do REC como adição mineral para concretos autoadensáveis. Em função dessa característica, houve o melhoramento de uma série de propriedades nas pastas cimentícias. Quando testado *in natura*, o REC interagiu bem com o cimento Portland CPV – ARI. Quando testado moído para utilização como pozolana, conforme critério da ABNT NBR 12653 (2014), exibiu atividade pozolânica de 112%. Essa atividade foi confirmada nas análises por termografia, em que se evidenciou a participação do REC na hidratação das pastas, consumindo hidróxido de cálcio e gerando hidratos secundários. Nos ensaios de resistência à compressão, esse resultado foi comprovado. Assim como em outras pesquisas, a adição do REC nas pastas piorou a viscosidade delas, algo que se acentuou à medida que houve aumento na substituição. Na produção de concretos autoadensáveis, foi utilizado somente o REC moído, tendo sido mantidas as suas propriedades reológicas. As propriedades mecânicas (incluída resistência à compressão e módulo de elasticidade) dos concretos C60 com REC tiveram melhora em comparação à referência, enquanto, nos concretos C80, a resistência à

compressão se manteve equivalente. Nos ensaios de absorção capilar, penetração acelerada de íons cloreto e exposição a sulfato de sódio, o REC apresentou resultados que refletem na melhoria da vida útil do concreto, tanto o C60 quanto o C80.

Rudžionis *et al.* (2014) realizaram uma pesquisa experimental para investigar o efeito da adição do REC proveniente da companhia JSC “Mažeikiųnafta”, situada na Lituânia, nas propriedades reológicas e tecnológicas dos concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço. As proporções de substituição de cimento pelo REC foram de 10%, 20% e 30%. As proporções de fibras de aço utilizadas foram 15, 25 e 35 kg/m³. Para a combinação com o REC, só foi utilizada a proporção de 25 kg/m³ de fibras de aço. Foi necessária a utilização de 2,5% de aditivo superplastificante para a manutenção da trabalhabilidade. Substituindo-se 10% de cimento pelo REC, houve um aumento de 17,1% na resistência à compressão aos 28 dias. Também houve aumento de densidade da amostra sólida com esta proporção, a despeito do fato de o REC possuir uma densidade aproximadamente 34% menor que a do cimento. Com a substituição de 30% de cimento Portland por REC, houve baixa atividade de hidratação e redução na resistência à compressão nas primeiras idades, assim como somente um acréscimo de apenas 1,4% de resistência aos 90 dias. Ocorreu também que a demanda de água para manutenção da consistência da pasta aumentou 20,3%. Também houve prejuízo no *slump flow* da mistura do REC com fibras de aço.

Neves *et al.* (2015) realizaram trabalhos para investigar a influência do REC nas propriedades relacionadas à durabilidade do concreto, a saber, na permeabilidade do ar, sucção capilar, carbonatação e resistência a cloretos e o uso concomitante a inibidores de corrosão. O programa experimental executado apresentou dois lotes, cada um composto por quatro misturas de concreto. A relação água-aglomerante (cimento + REC) e a dosagem do plastificante foram mantidas constantes. As propriedades referentes à durabilidade foram avaliadas nas amostras de concreto com e sem adição de REC e um inibidor de corrosão à base de dimetilaminoetanol (DMEA). Nenhuma das duas adições causaram efeitos prejudiciais na permeabilidade do ar e sucção capilar. Em relação às propriedades físico-químicas, os resultados mostraram que, substituindo-se 15% (p/p) do pó de cimento por REC, aumentou-se claramente a resistência ao cloreto do concreto, porém houve efeito oposto na resistência à carbonatação. O inibidor de corrosão também ocasionou efeitos positivos

na resistência à carbonatação e resistência ao cloreto, embora não estatisticamente significativo neste último. Nenhum efeito sinérgico pela ação conjunta do REC como o inibidor de corrosão foi registrado. Esses resultados mostraram que o REC pode ser usado como material de cimentação eficaz e que também é apropriado para uso em concretos sujeitos à contaminação por cloretos, porém não é indicado quando for necessária uma maior resistência à carbonatação, o que pode ser equilibrado por meio da adição de um inibidor de corrosão na mistura.

Assim *et al.* (2021) avaliaram a utilização de vários resíduos da indústria petroquímica no setor da construção. Foi estudada a utilização de areias contaminadas com óleo, dejetos de perfuração da indústria de óleo e gás, lodo resultante de refinarias de petróleo, resíduo do catalisador de petróleo, enxofre, tensoativos, ácidos graxos e outros resíduos de hidrocarbonetos. A substituição de 10% a 20% do REC ao cimento incrementa a resistência à corrosão em argamassas e concretos devido às suas propriedades pozolânicas.

Costa *et al.* (2023) avaliaram a produção de concreto a partir da substituição parcial do cimento Portland pelo resíduo de catalisador de petróleo e adição de polietilenoglicol 400, de forma a investigar sua propriedade mecânica, e durabilidade. O uso do REC foi estudado em substituições parciais de 2%, 5%, 10% e 20% em relação à massa do aglomerante (cimento Portland) concomitante com a adição de PEG 400 (agente de autocura). Foram pesquisados o índice de vazios, a absorção de água, por capilaridade e por imersão, as massas específicas e o índice de pozolanidade do resíduo. Foi observado que, quanto maior a porcentagem do REC, maiores são as taxas de absorção de água e cimento, e, conseqüentemente, há um aumento da porosidade. A resistência à compressão do concreto produzido com 2% de substituição de REC e adição de 1,5% de PEG 400 sofreu aumento de 18,3% em relação ao concreto convencional. No entanto, um aumento na quantidade do resíduo resultou em queda na resistência do concreto. A adição de 1,5% de PEG 400 melhorou a trabalhabilidade da amostra no estado fresco, pelo fato de este polímero atuar como agente de autocura. Investigações por meio de microscopia eletrônica de varredura constataram uma menor porosidade na amostra com 2% de substituição parcial de REC. Foi constatado, ao final do estudo, que o REC pode ser utilizado de

forma satisfatória na construção civil, contribuindo, assim, para a sustentabilidade e para a redução no aquecimento global.

3.3 Fibras em matrizes cimentícias

Os materiais cimentícios são frágeis, com baixa resistência à tração. Por isso, requerem algum tipo de reforço antes que sejam utilizados extensivamente como materiais de construção. Tradicionalmente, o reforço mais utilizado é na forma de barras de aço, localizadas em pontos da estrutura onde são impostas as tensões de tração e cisalhamento. As fibras, por outro lado, são descontínuas e comumente se encontram distribuídas aleatoriamente na matriz; por consequência, não são tão eficientes em suportar as tensões de tração. Entretanto, por estarem mais próximas umas das outras, são melhores em controlar a fissuração (Bentur, 2007).

Desde o primeiro uso das fibras de amianto, uma grande variedade de outras fibras vêm sendo utilizadas em conjunto com o cimento Portland. Essas fibras variam quanto a propriedades físicas, químicas e mecânicas, forma, processo de fabricação efetividade, custo e origem. Podem ser metálicas, cerâmicas ou poliméricas (naturais ou sintéticas). A seguir, observa-se uma listagem exemplificativa de tipo e propriedades das fibras na Tabela 5 (De Andrade, 2019; Bentur, 2007).

Tabela 5 – Propriedades típicas das fibras

Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade (GPa) (g/cm ²)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Amianto	0,02-0,4	2,6 - 3,4	164-196	3,1-3,5	2-3
Polipropileno	20-200	0,9 - 0,95	3,5 - 10	0,45 - 0,76	15 - 25
Aramida (Kevlar)	10 - 12	1,44	63 - 120	2,3 - 3,5	2 - 4,5
Carbono	8 - 9	1,6 - 1,7	230 - 380	2,5 - 4,0	0,5 - 1,5
Nylon	23-400	1,14	4,1 - 5,2	0,75 - 1,0	16 - 20
Celulose	-	1,2	10	0,3 - 0,5	-
Acrílico	18	1,18	14 - 19,5	0,4 - 1,0	3
Poliétileno	25 - 1000	0,92 - 0,96	5	0,08 - 0,60	3 - 100
Fibra de Madeira	-	1,5	71,0	0,9	-
Sisal	10 - 50	1,5	-	0,8	3,0
Matriz de cimento (comparação)	-	1,5 - 2,5	10 - 45	0,003 - 0,007	0,02

Fonte: Bentur, 2007

Acerca da fração volumétrica das fibras em relação à matriz, pode-se classificá-las em: baixa fração volumétrica (<1%), utilizadas para redução da fissuração por retração em lajes e pavimentos com grandes superfícies expostas; fração volumétrica moderada (entre 1% e 2%), utilizadas em concreto projetado ou estruturas que exigem grande capacidade de absorção de energia; fração volumétrica alta (>2%), que levam ao endurecimento por deformação dos compósitos, os quais são comumente chamados de “compósitos de alto desempenho reforçados com fibras”. No entanto, a adição de um teor maior de fibras ocasiona piora na trabalhabilidade da estrutura, muitas vezes sendo necessária a incorporação de aditivos plastificantes (Mehta, 2014).

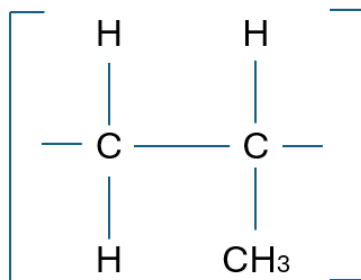
Mehta (2014) citam os ensaios de Krenchel (1974), os quais demonstram que a incorporação de 0,9% a 2% de fibras por volume, tanto em argamassas quanto em concreto, aumentou a resistência à flexão aproximadamente de 15% a 20%. Ocorreu também que deformação em ruptura aumentou de 9 a 10 vezes em relação à da argamassa sem reforço. Existe, no entanto, um delicado equilíbrio de aderência entre a matriz e a fibra. Se estas tiverem pouca aderência em relação à matriz, podem escorregar sobre solicitações baixas, não contribuindo para o controle da fissuração.

Caso a aderência das fibras em relação à matriz seja muito elevada, grande parte delas pode vir a sofrer ruptura antes de conseguir dissipar energia.

3.3.1 Fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno - consideradas de baixo módulo - são produzidas a partir da resina de polipropileno isotático (que tem todos os radicais de um mesmo lado da cadeia), do tipo homopolímero, em várias formas, tamanhos e propriedades. O polipropileno, por sua vez, é um polímero termoplástico de origem sintética da família das poliolefinas obtido da polimerização do monômero propileno C_3H_6 . A estrutura da unidade de repetição do polipropileno (PP) pode ser vista na Figura 5. Por causa do seu arranjo atômico estericamente regular, as fibras podem ser rapidamente produzidas em forma cristalina e, então, processadas por alongamento. Além disso, devido às suas propriedades e ao baixo custo, são as mais utilizadas em combinação com o concreto, na forma de monofilamentos cilíndricos, multifilamentos fibrilados, filmes ou fitas extrudadas (Bentur, 2007; De Andrade, 2019).

Figura 5: Estrutura da unidade de repetição do polipropileno



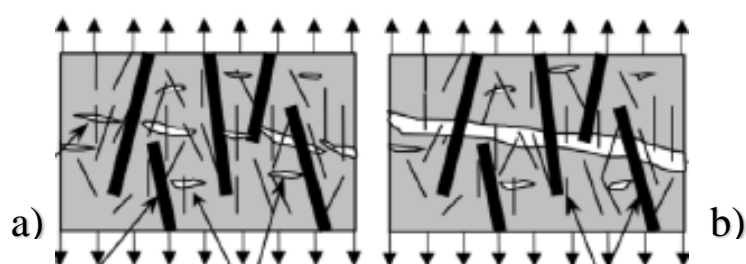
Fonte: O autor

As fibras são consideradas de baixo módulo quando possuem o módulo de elasticidade inferior ao da matriz cimentícia; como exemplo, temos as fibras de polipropileno. Já as de alto módulo possuem o módulo de elasticidade maior que o da matriz cimentícia e temos como exemplo as fibras de aço. Sendo assim, é necessário o uso de frações maiores de fibras de baixo módulo para que seja garantida a mesma resistência à fissuração que a das fibras de alto módulo (De Andrade, 2019).

As maiores vantagens dessas fibras são a resistência a álcalis, o ponto de fusão relativamente elevado (165°C) e o baixo custo de produção. Possuem como características negativas principais a baixa resistência ao fogo, a sensibilidade à radiação solar e ao oxigênio e o baixo módulo de elasticidade. Todavia, essas desvantagens podem ser contornadas caso estejam incorporadas a uma matriz, como o concreto ou as argamassas, o que pode melhorar as suas propriedades mecânicas. Devido à baixa densidade das fibras de polipropileno, um alto teor de fibras acarreta redução no peso do concreto ou argamassa (Bentur, 2007; Lucena, 2017).

O tamanho das fibras também tem influência no comportamento mecânico do compósito. Uma quantidade grande de fibras curtas contribui para o controle de microfissuras na estrutura, evita deformações localizadas e possibilita um aumento na ductilidade e resistência. Já para controle de microfissuras em cargas sob cargas mais elevadas, são indicadas as fibras longas. Entretanto, a adição de fibras longas prejudica a trabalhabilidade da pasta e, portanto, a sua fração volumétrica deve ser muito menor que a das fibras curtas. Na Figura 6, pode-se observar o resultado da adição de fibras curtas e longas sobre a microfissuração e a macrofissuração, respectivamente (Mehta, 2014) Blazy *et al.* (2021).

Figura 6: Influência das fibras curtas e longas sobre a microfissuração e macrofissuração: a) fibras curtas criando pontes nas microfissuras e aumentando a resistência à tração; b) fibras longas criando pontes nas trincas e assim aumentando a ductilidade

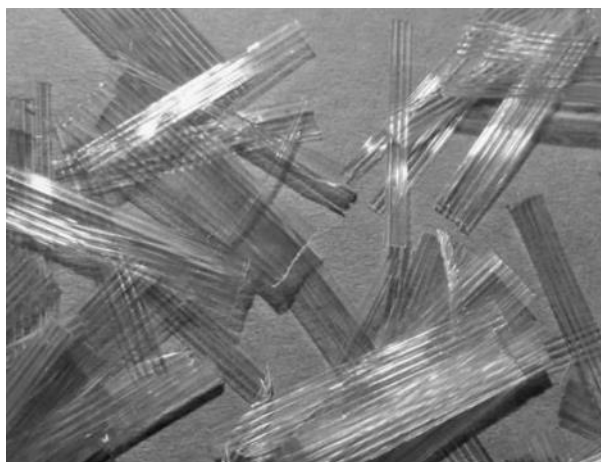


Fonte: Blazy *et al.* (2021)

As fibras de polipropileno podem se apresentar em três diferentes geometrias, comumente usadas como reforço em matrizes cimentícias: monofilamentadas, multifilamentadas (fibriladas) e fita extrusadas, conforme se observa nas Figuras 7 e 8. O módulo de elasticidade tanto da fibra monofilamentar quanto da fibrilada está na faixa de 3 – 5 GPa, e a resistência à tração, de 140 a 690 MPa. As monofilamentares (Figura 7) podem ter diâmetros de 50 µm a 0,5 mm, mas nas fibriladas (Figura 6) essa

grandeza é mais difícil de quantificar. Apesar de as fibras monofilamentares e fibrilares possuírem o mesmo módulo de elasticidade e resistência à tração, ocorre que as fibras monofilamentares são mais efetivas que as fibriladas em sua capacidade de combater a fissuração do concreto (Bentur, 2007).

Figura 7: Microfibras de polipropileno fibriladas



Fonte: Fibrillated Microfibers. Master builders solutions, 2024

Figura 8: Microfibras de polipropileno monofilamentares



Fonte: Concrete Monofilament Microfibers. Master builders solutions, 2024

3.3.2 Concreto reforçado com fibras de polipropileno

Conforme abordado por diversos autores, o concreto reforçado com fibras (CRF) tem sido cada vez mais utilizado na construção civil. Segundo Mehta e Monteiro (2014), o concreto convencional se rompe repentinamente quando a deflexão supera a

resistência à flexão última. O concreto reforçado com fibras, por outro lado, permanece a suportar as cargas admissíveis, ainda que as deformações sejam maiores à deflexão de ruptura. A performance da fibra como ponte de transferência de tensão na fissuração do concreto é o que proporciona a sua eficácia. Nesse contexto, dois tipos de fibras têm se destacado quando incorporadas ao concreto: as fibras de aço e as fibras de polipropileno. Os concretos adicionados destas fibras, tem por características principais maior resistência à flexão, à tração e ao impacto, controle de fissuração e maior durabilidade (Choi, 2004; Figueiredo, 2010; Kakooei, 2012).

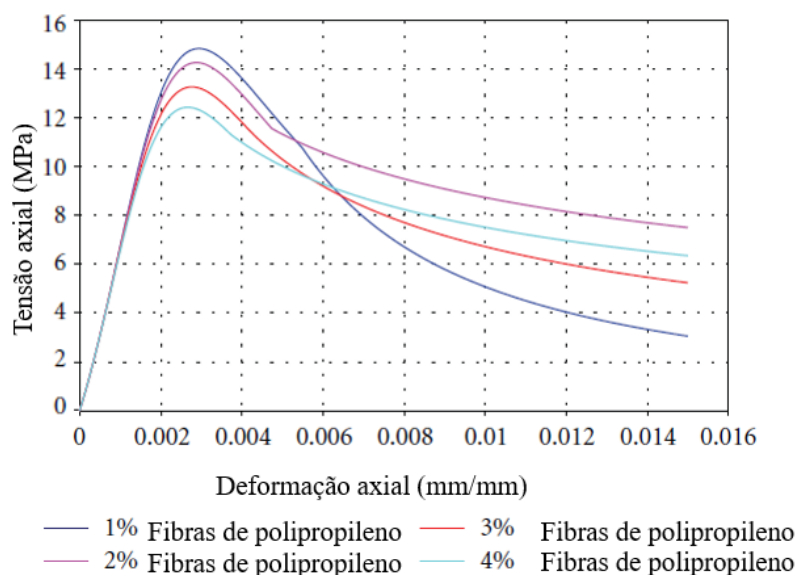
As fibras de polipropileno, quando comparadas com outros tipos de fibras, têm como vantagens, além de sua baixa densidade, imunidade a ataques de microrganismos e resistência à corrosão e à degradação em meio alcalino do cimento (Lucena, 2017).

Choi e Yuan (2006) realizaram um estudo experimental para avaliar a relação entre a tensão de fissuração e a resistência à compressão de um concreto reforçado com fibras de vidro e um concreto reforçado com fibras de polipropileno. Foram ensaiadas amostras aos 7, 28 e 90 dias. Foram preparadas amostras com os teores de 27,5 kg/m³ e 55 kg/m³ de fibras de vidro e 9,5 kg/m³ e 19 kg/m³ de fibras de polipropileno, atingindo um *slump* de 102 mm, 13 mm, 2,5 mm, 38 mm e 6,5 mm, respectivamente. As proporções de cimento, água e agregados graúdos foram fixadas em 418 kg/m³, 200 kg/m³ e 998 kg/m³, respectivamente. Seus resultados indicaram que a adição de fibras de vidro e de polipropileno ao concreto aumentaram a resistência à fissuração do concreto em aproximadamente 20% a 50%, e a resistência à fissuração das amostras oscilaram de 9% a 13% da resistência à compressão. Baseada em um número relativamente baixo de dados experimentais, uma simples relação de 0,5 entre a resistência à fissuração na tração e a resistência à compressão pode ser utilizada com sucesso para estimar a resistência à fissuração na tração.

Kim *et al.* (2010) estudaram concretos de baixo peso aerados reforçados com fibras de carbono e de polipropileno, com o objetivo de reduzir a densidade deste, bem como melhorar a sua resistência ao fogo, condutividade termal e absorção energética. Os teores em volume de fibra ensaiados foram 0%, 1%, 2%, 3% e 4%. Argila expandida foi utilizada como agregado de baixa densidade. Um agente de adensamento também foi adicionado, de forma a reduzir a relação água cimento e manter uma boa

trabalhabilidade. Para introduzir ar dentro do concreto, lançou-se mão de um surfactante. Esse trabalho chegou às seguintes conclusões: com a utilização de agregado de baixa densidade e 0,1% de surfactante, obteve-se uma densidade de 1137 kg/m³. Tanto a resistência à compressão quanto o módulo de elasticidade são fortemente dependentes da quantidade de ar no concreto. O incremento de surfactante na amostra resulta em uma menor resistência à compressão e módulo de elasticidade quando comparado a uma amostra sem este aditivo. Porém, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade são fracamente dependentes da quantidade de fibras adicionadas ao concreto. O índice de dureza é fortemente dependente da quantidade de fibras adicionada no concreto aerado. Enquanto um incremento na fração volumétrica de fibras de polipropileno melhora o índice de dureza do concreto, fibras de carbono melhoram esse índice em um grau mais elevado. A curva tensão-deformação foi representada usando uma equação fracional baseada na taxa de reforço (Figura 9).

Figura 9: Curvas tensão-deformação das amostras de concreto com fibras de polipropileno e 0,1% de surfactante em MPa



Fonte: O autor, adaptado de Kim *et al.* (2010)

Gencil *et al.* (2011), em função da perda na trabalhabilidade que a adição de fibras acarreta ao concreto, avaliaram as propriedades mecânicas do concreto autoadensável reforçado com fibras monofilamentares de polipropileno. Por possuir alta fluidez, sem a necessidade de vibração, esse tipo de concreto se apresentou ideal

para o estudo. Foram ensaiadas a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas do concreto autoadensável com cinzas volantes e reforçado com fibras de polipropileno. As proporções de cimento adotadas foram de 350 kg/m³ e 450 kg/m³, assim como as de fibras, que estiveram em 3 kg/m³, 6 kg/m³, 9 kg/m³ e 12 kg/m³, respectivamente. A relação água cimento se manteve constante em 0,40, a quantidade de cinzas volantes foi de 120 kg/m³ e o superplastificante ficou em 1% da quantidade de cimento. Foi concluído nesse trabalho que, para todas as proporções de fibras utilizadas, não houve problemas de mistura, quando a distribuição de fibras se manteve uniforme, e que, embora a adição de fibras em concreto convencional ocasione perda de trabalhabilidade, em todas as misturas do concreto autoadensável, os resultados foram satisfatórios na trabalhabilidade e na fluidez. A adição das fibras de polipropileno ao concreto reduziu o peso específico total e ainda potencializou sua resistência à compressão, resistência à tensão de fissuração e especialmente resistência à flexão e módulo de elasticidade.

Kakooei *et al.* (2012), em seu estudo, verificaram as propriedades do concreto reforçado com fibras de polipropileno relativas a resistência à compressão, permeabilidade e resistividade elétrica. As amostras foram preparadas com diferentes proporções de fibras, que variaram de 0, 0,5 kg/m³, 1,5 kg/m³ e 2 kg/m³ de concreto, assim como algumas produzidas com agregado de coral. As proporções dos materiais utilizados foram 190 kg/m³ de água, 400 kg/m³ de cimento, 1769 kg/m³ de agregados e relação água/cimento de 0,48. De acordo com os resultados de resistência à compressão, houve um incremento de resistência à medida que aumentou a proporção de fibras nas amostras. Por meio da redução da permeabilidade e da retração e expansão do concreto endurecido, a presença de fibras de polipropileno causa retardamento no início do processo de degradação do concreto. Foi observado que a resistividade elétrica das amostras de concreto contendo teores de fibras de 1 kg/m³ e 1,5 kg/m³ apresentou valores mais elevados que a das demais amostras, assim tendo um efeito direto na redução da corrosão das armaduras. As amostras com utilização de agregados de coral apresentaram menor resistividade elétrica e resistência à compressão, quando comparadas com agregados de silício, não se mostrando, portanto, adequadas para a utilização em estruturas em atmosferas terrestres. No geral, as amostras contendo 1,5 kg/m³ de fibras apresentaram uma performance superior à das outras amostras.

Mogre *et al.* (2012) realizaram uma série de investigações do comportamento do concreto quando substituída areia natural por areia artificial e também do concreto com areia natural e fibras de polipropileno. As fibras utilizadas, por serem mais resistentes e dúcteis que o concreto matriz, ajudam a deter a fissuração bem como transferir as tensões através da fratura. No entanto, para conseguir tal efeito, deve existir ligação entre a fibra e o concreto. Nesses estudos, utilizaram-se fibras monofilamentadas na proporção de 0,4% a 1,5% em massa de cimento. Toda a areia natural foi substituída pela artificial em proporções de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Concluiu-se que a substituição de areia natural por artificial é factível e que o uso de fibras de polipropileno aumenta a resistência última do concreto a impactos por carga e ao fogo. Em um experimento de aquecimento por 4,5 horas, a resistência residual da amostra com fibras de polipropileno foi superior à da amostra sem fibras em mais de 60%. Não foram observadas falhas repentinas nas amostras contendo fibras.

Lucena (2017) fez um estudo da aplicação de concreto reforçado com fibras de polipropileno em um painel alveolar de parede fina. Para a avaliação do comportamento estrutural e propriedades mecânicas desse compósito, foram realizados ensaios de consistência, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e tenacidade. Os teores de fibras de polipropileno das amostras destes experimentos foram 0%, 1% e 2% em volume de concreto. Também foram moldados dois corpos de prova de painéis alveolares com paredes finas, ambos com seção transversal de 300 mm x 140 mm e comprimentos de 600 mm e 1200 mm. Esses foram compostos por concreto com adição de fibras de polipropileno, nos teores de 0% e 2% e ensaiados para carga concentrada e flexão. Nos ensaios para avaliação das propriedades mecânicas, não houve mudanças significativas nos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade para adição dos teores de fibras de 1% e 2%. Já nos ensaios de tenacidade, consistência e resistência à tração, houve mudanças consideráveis no tocante aos teores de 2% de fibras. Quando comparados com a referência, o ensaio de tração na flexão para o teor de 2% de fibras apresentou valores 11,79% superiores. Já para o ensaio de tração por compressão diametral, o valor foi cerca de 26% superior para o teor de 2% de fibras com relação à argamassa de referência. Os ensaios de tenacidade mostraram valores de absorção de energia

mecânica 27 e 37 vezes maiores, respectivamente, para os teores de 1% e 2% de fibras de polipropileno, quando comparados às amostras sem fibras. Nos ensaios dos corpos de prova de painéis alveolares, os resultados foram ainda mais expressivos, com 10 vezes mais capacidade de carga para ensaio de carga concentrada, cinco vezes maior capacidade de deslocamento e sete vezes maior resistência à punção, concluindo-se que o material cimentício com adição de fibras é apropriado para a aplicação em painéis alveolares de paredes finas. Um problema, detectado também em outros trabalhos, foi a piora na trabalhabilidade da mistura, cujo adensamento foi prejudicado. Houve redução no índice de consistência em, respectivamente, 38% e 48% para os teores 1% e 2% de fibras de polipropileno.

De Andrade (2019), buscando atuar tanto na incorporação de resíduos industriais quanto na minimização da fragilidade dos materiais cimentícios, realizou um trabalho a fim de investigar as propriedades físicas (absorção de água e índice de vazios) e mecânicas (resistência à compressão e à tração) que a substituição de 25% de cimento por cinzas de casca de arroz e a adição de 0,5% de fibras de polipropileno ocasionam em argamassas. Os corpos de prova de argamassa foram ensaiados nas idades de 1, 3, 7, 28 e 63 dias. De modo geral, a substituição do teor de 25% de cimento por cinzas de casca de arroz produziu resultados similares ao da amostra convencional nos quesitos referentes às propriedades mecânicas, o que se mostrou uma opção interessante em situações em que não se necessita de grandes resistências aos primeiros dias. Não houve a redução na porosidade capilar pretendida. Com a adição de fibras na matriz, foi verificado ganho de resistência à tração até o sétimo dia. Já no uso conjunto de fibras de polipropileno com as cinzas da casca de arroz, houve problemas quanto à reologia dos materiais. Considerando-se a contribuição das cinzas da casca de arroz como adição mineral em pavimentos rígidos, apesar de o desempenho mecânico não ser superior, o resultado relativamente similar pode indicar uma boa relação custo-benefício em sua utilização.

Blazy *et al.* (2021) provaram que espaços públicos são um campo promissor para a aplicação de concretos reforçados com fibras de PP, pois estes estão constantemente submetidos a condições ambientais desfavoráveis, como impactos e abrasão de superfície. Foi observado que a adição das fibras de PP melhorou as propriedades do concreto referentes às resistências, à tração, à flexão, ao impacto, ao *spalling*, ao

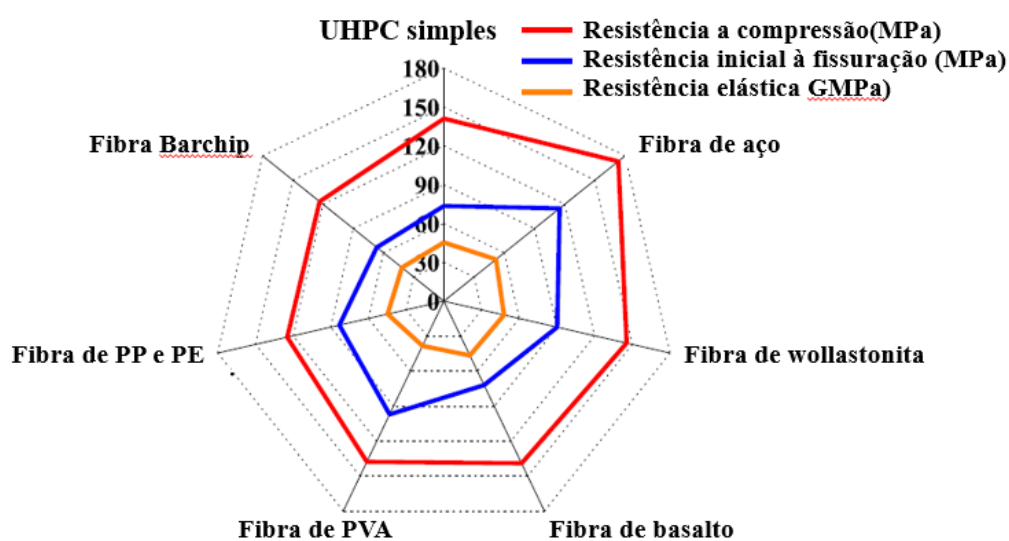
gelo/degelo e à abrasão. Houve incremento na durabilidade e na dureza, bem como controle de fissuração. Não houve mudanças significativas no módulo de elasticidade e na resistência à compressão nem nas propriedades referentes à absorção de água, à porosidade e à permeabilidade. Todavia, houve piora na trabalhabilidade.

Memon *et al.* (2021) procuraram desenvolver um concreto ecologicamente correto ao substituir parcialmente o cimento por cinzas da casca de arroz (CCA) e adicionar fibras de polipropileno. O concreto contendo 10% de CCA atingiu 39,31 MPa de resistência à compressão e 4,25 MPa de resistência à flexão aos 28 dias, um acréscimo de 10,11% e 10,15%, respectivamente, em comparação ao concreto convencional. No entanto, a trabalhabilidade reduziu significativamente devido a fato de o resíduo possuir maior área superficial e, assim, absorver mais água. Foi observado que reforçar o concreto com 0,25% de fibras de polipropileno (PP) atingiu 4,07 MPa de resistência à flexão - 5,4% maior que da amostra de controle (3,86 MPa). Assim como na CCA, a adição de PP reduziu a trabalhabilidade do concreto de modo significativo. A incorporação de CCA juntamente com PP ao concreto permitiu que fosse substituído um teor maior de cimento (15%) sem a redução da sua resistência. A utilização de um teor maior de CCA (20%) com o PP trouxe uma redução na resistência à compressão e à tração.

Gong *et al.* (2022) realizaram uma revisão sistemática sobre o efeito das fibras de diferentes texturas e geometrias nas propriedades dos UHPC (concretos de ultra alta performance), conforme os seguintes aspectos: mecanismos de ligação de fibras de aço na matriz de concretos UHPC; efeitos do formato, orientação e hibridização de fibras de aço na microestrutura, modo de falha, propriedades mecânicas, retração autógena e durabilidade em concretos UHPC; mecanismo de reforço de fibras sintéticas PVA (fibra de álcool polivinílico), PP (polipropileno), PE (polietileno), fibras minerais (fibras de basalto e wollastonita) e fibras de carbono em concretos UHPC, e o seu efeito neste mesmo concreto; o uso de fibras híbridas e o seu efeito sinérgico na performance mecânica e retração em concretos UHPC. O UHPC é um concreto avançado, reforçado com fibras e desenvolvido em meados dos anos 1990, o qual consiste em um alto volume de cimento, microssilica, fibras, superplastificante, bem como outros materiais cimentícios suplementares, concebido pela teoria de empacotamento denso de materiais sólidos, com fator água/cimento menor que 0,2.

Essas características levam a uma alta resistência a esforços de compressão (>150 MPa), assim como excelente ductilidade e propriedade de absorção de energia (Figura 10). No tocante ao estudo do UHPC com fibras sintéticas, como PVA, PP, PE, ficou provado que a sua utilização melhora a dureza e a durabilidade do UHPC. A hibridização das fibras de aço em combinação com fibras de polipropileno provou reduzir a permeabilidade aos íons cloreto, bem como melhorar a resistência ao fogo no UHPC. Uma combinação de fibras com diferente geometria é capaz de efetivamente resistir à abertura das fissuras no UHPC. Mesmo com este trabalho referente ao uso de fibras híbridas (fibras de aço em combinação com fibras sintéticas) no UHPC, o mecanismo do efeito sinérgico dessas fibras ainda é desconhecido, o que abre a possibilidade de maiores estudos que venham a otimizar a combinação das fibras híbridas de forma a melhorar a sua microestrutura, propriedades mecânicas e durabilidade do UHPC.

Figura 10: Resistência à compressão (MPa), resistência inicial à fissuração (MPa) e resistência elástica (GPa) para diferentes tipos de fibras no UHPC



Fonte: Gong *et al.* (2022)

Latifi *et al.* (2022) investigaram vantagens, desvantagens, trabalhabilidade, propriedades mecânicas, durabilidade, propriedades mecânicas e estabilidade dimensional de concretos reforçados com fibras de polipropileno. A adição de fibras de polipropileno afetou negativamente a trabalhabilidade dos corpos de prova. Esse efeito se deve ao fato de as fibras de PP não serem distribuídas de forma homogênea em sistemas cimentícios, o que eleva o risco de floculação. A resistência à

compressão das amostras não foi negativamente afetada ao se adicionarem fibras longas. No entanto, incrementos significativos na resistência à tração e flexão foram detectados. Adicionalmente, a tenacidade e ductilidade dos exemplares foi aumentada, situação essa que advém do combate à fissuração devido a capacidade das fibras em criarem pontes. Assim, com a adição de fibras, a resistência das amostras a temperaturas elevadas cresce. A fissuração ocorreu nos corpos de prova expostos a temperaturas elevadas devido ao aumento da pressão osmótica. Uma vez que o volume dos poros também aumenta (como resultado do derretimento das fibras), o efeito negativo da elevação da pressão osmótica é reduzido. Por outro lado, o aumento na porosidade tem um efeito negativo na resistência à compressão. A durabilidade e estabilidade dimensional das amostras foram positivamente afetadas, bem como o módulo de elasticidade, resistência à abrasão e ao impacto. Estudos na microestrutura mostraram que as fibras são distribuídas de forma mais homogênea na matriz com o acréscimo de aditivos minerais na amostra. Foi observado que o efeito de ponte das fibras aumentou a resistência ao gelo/degelo, devido à prevenção da propagação de fissuras, bem como a resistência ao ataque de sulfatos e reação álcali-sílica.

Asgarian *et al.* (2023) realizaram um estudo com a utilização de pó de vidro fino e pó de vidro ultrafino em substituição ao cimento nas proporções de 5% e 10%, respectivamente, na produção de concreto reforçado com fibras de polipropileno. As propriedades mecânicas e ecológicas de nove dosagens foram investigadas. Foi necessária a utilização de aditivo superplastificante em diversas proporções, conforme a necessidade. Baseado nos resultados, a incorporação de pó de vidro fino elevou a resistência à compressão do concreto entre 40% e 60% nos períodos de 7 a 90 dias. Porém, a melhor performance mecânica foi alcançada com 10% de substituição do cimento por pó de vidro ultrafino e 0,5% de inclusão de fibras de PP. Além disso, os resultados de investigações pelo microscópio de escaneamento eletrônico mostraram mais atividade do pó de vidro ultrafino e menos hidróxido de cálcio presente na matriz endurecida. Em termos de impactos ecológicos, entre 5% e 10% menos emissões de CO₂ e SO₂ foram obtidos, enquanto a energia requerida para o preparo dessas misturas subiu de 15% a 45%. Com 0,5% de inclusão de fibras de PP, as resistências à flexão e à tração do concreto se elevaram ligeiramente. Um aumento nessa proporção causa redução desses valores devido à distribuição não

uniforme. O efeito sinérgico da utilização de 10% de pó de vidro ultrafino e 0,5% de fibras de PP aumentou os valores de resistência à flexão e à tração do concreto em 20% e 50%, respectivamente, em comparação com o controle. Matrizes de concreto mais densas foram obtidas com a inclusão de pó de vidro ultrafino, em comparação com pó de vidro fino, pois menores valores de absorção de água foram obtidos. Uma menor quantidade de hidróxido de cálcio nas misturas contendo pó de vidro prova a contribuição química desse resíduo no processo de hidratação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão descritos os materiais utilizados, as suas respectivas caracterizações e os procedimentos para ensaios dos concretos nos estados fresco e endurecido.

4.1 Materiais utilizados

4.1.1 Cimento Portland

Foi utilizado o cimento Portland CP V – ARI (alta resistência inicial), conforme ABNT NBR 5733 (2018). Optou-se por este cimento devido ao fato de ele possuir uma menor quantidade de adições em relação aos outros cimentos disponíveis no mercado. Esse cimento é composto por 90% a 100% de clínquer mais sulfatos de cálcio e 0% a 10% de material carbonático. De acordo com a norma, para a realização do ensaio “Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias” (ABNT NBR 5752:2014), foi empregado o cimento CP II-F-32.

As características físico-químicas do cimento CPV-ARI produzido pela InterCement (Companhia Nacional de Cimento) e usado na produção das amostras estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características do cimento

Ensaio Químico	Resultado
Perda ao Fogo (%) - NBR NM 18:2012	5,1
MgO %	2,7
SO ₃ %	3,8
Exigências Físicas - Finura	
Área Superficial Específica – Blaine (cm ² /g) - NBR 16372:2015	5270
#200 %	0,2
#325 %	1,3
Exigências Físicas - Tempo de Pega (NBR 16607:2018)	
Início de pega (min)	151
Fim de pega (min)	200
Exigências Mecânicas - Resistência à Compressão (NBR 7215:1996)	
Resist. à Compressão - 1 Dia (MPa)	28,3
Resist. à Compressão - 3 Dias (MPa)	38,7
Resist. à Compressão - 7 Dias (MPa)	42,7
Resist. à Compressão - 28 Dias (MPa)	49,8

Fonte: InterCement (2024)

Os resultados apresentados pelo cimento utilizado comprovam que ele atende às exigências normativas.

4.1.2 Agregado miúdo

Como agregado miúdo, foi utilizada areia quartzosa média lavada proveniente de jazidas da Região Metropolitana da cidade de Belo Horizonte.

Para o ensaio de determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (ABNT NBR 5752:2014), foram empregadas como agregado miúdo as frações granulométricas 16, 30, 50 e 100 da areia normal brasileira, produzida pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), de acordo com a norma NBR 7214/2015 – areia normal para ensaio de cimento.

4.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo empregado foi do tipo brita 0 de gnaíse, com granulometria variando de 2,36 mm a 12,5 mm, provenientes de jazidas da região de Belo Horizonte, MG). Optou-se pela brita 0 devido a uma melhor trabalhabilidade que ela proporciona durante a confecção dos corpos de prova.

4.1.4 Resíduo de catalisador de petróleo

O REC utilizado neste trabalho foi obtido na Refinaria Gabriel Passos (REGAP), localizada em Betim, Região Metropolitana de Belo Horizonte (Figura 11).

Figura 11: Imagem fotográfica do resíduo de catalisador de petróleo



Fonte: Almeida (2017)

4.1.5 Fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno adicionadas ao concreto foram do tipo Fibromac 24, fabricadas pela Maccaferri. Elas são do tipo monofilamentares, de seção circular, diâmetro de 18 μm , comprimento de 24 mm, e produzidas a partir de multifilamentos de polipropileno. Por serem fibras curtas, sua principal indicação técnica é o controle de microfissuras na estrutura. São consideradas de baixo módulo, pois possuem módulo de elasticidade inferior ao da matriz cimentícia. A Tabela 7 evidencia as propriedades físicas e mecânicas das fibras de polipropileno.

Tabela 7 – Características físicas e mecânicas das fibras de polipropileno

Propriedades Físicas	Resultado
Diâmetro μm	18
Seção	Circular
Alargamento %	80
Fim de pega (min) – NBR 16607:2018	200
Peso Específico g/cm^3	0,91
Propriedades Mecânicas	Resultado
Temperatura de fusão $^{\circ}\text{C}$	160
Temperatura de ignição $^{\circ}\text{C}$	365
Resistência à tração MPa (N/mm^2)	300
Módulo de Young GPa	3

Fonte: Maccaferri

4.1.6 Água

A água utilizada para moldagem e cura das amostras foi oriunda do sistema de abastecimento público do município de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais, que é considerada adequada para o uso em questão e não necessita ser ensaiada, conforme a ABNT NBR 15900-1:2009.

4.1.7 Aditivo superplastificante

Foi utilizado o aditivo superplastificante redutor de água tipo 2 Viscocrete 5800 FTN, fabricado pela Sika, com densidade de (1,07+-0,02 kg/L). A utilização do plastificante tem por objetivo proporcionar significativa redução na demanda de água que as substituições pelo resíduo causam e tornar o concreto mais trabalhável, evitando a segregação e melhorando a coesão. A dosagem recomendada pelo fabricante é de 0,2% a 2,0% sobre a massa do cimento e, para os ensaios realizados, foi utilizada uma dosagem de 1,0%.

Na Tabela 8, estão expostas as propriedades do aditivo superplastificante utilizado.

Tabela 8 - Propriedades do aditivo superplastificante Viscocrete 5800 FTN

Característica	Resultado
Base química	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Aspecto / Cor	Líquido castanho
Massa específica kg/L	1,07 +/- 0,02
Valor do pH	4,5 +/- 1,0
Teor de íons cloreto	Aditivo isento de cloretos

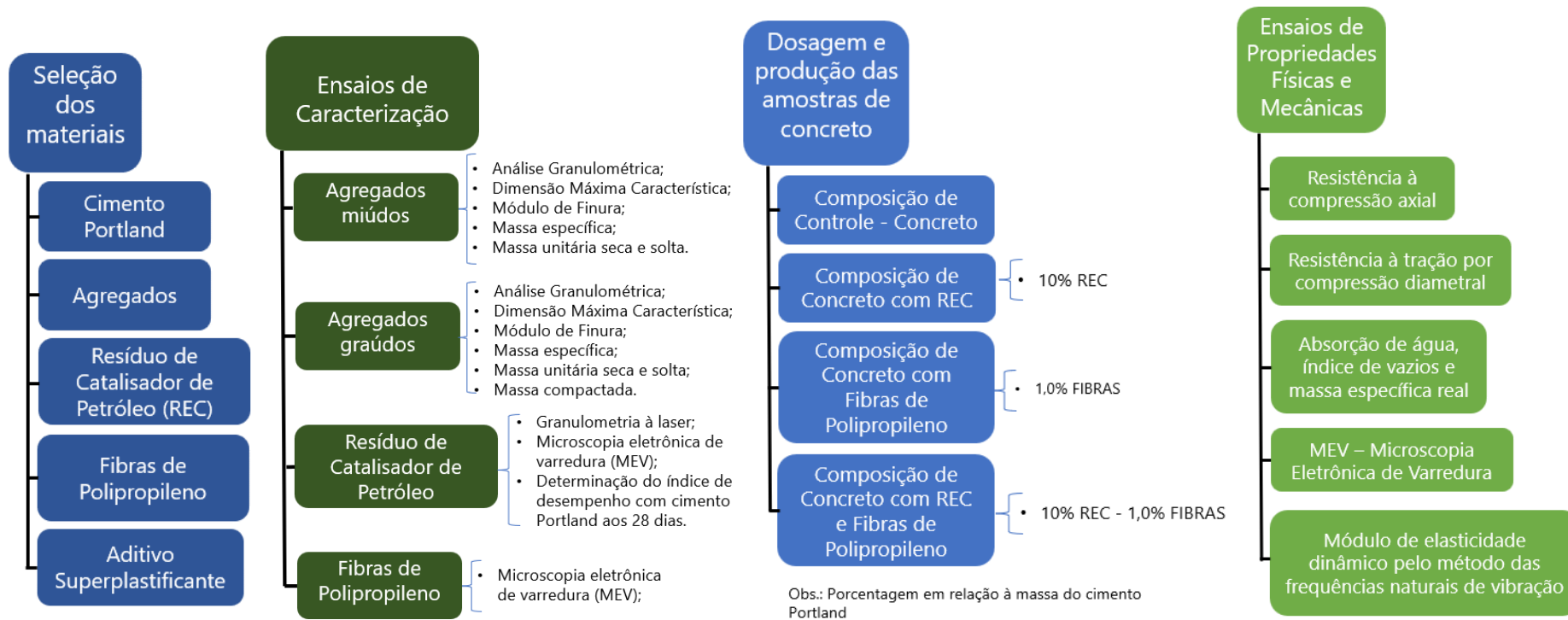
Fonte: Sika

4.2 Métodos

A produção das amostras de concreto foi feita no Laboratório de Concreto e Argamassas da UFMG. Os ensaios de resistência à compressão axial (NBR 5739:2018), resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222:2011), determinação de módulos de elasticidade e deformação (NBR 8522-2:2021), e

absorção de água e índice de vazios (NBR 9778:2005) foram realizados no laboratório Consultare Labcom. A microscopia eletrônica de varredura foi realizada no no Centro Design Empresa (CDE) da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG). A fase experimental desse trabalho consistiu nas seguintes etapas, conforme pode ser visto no fluxograma da Figura 12.

Figura 12: Fluxograma da fase experimental



Fonte: O autor

4.2.1 Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados foram caracterizados conforme os seguintes ensaios relacionados na Tabela 9:

Tabela 9 – Ensaios de caracterização

Material	Ensaio	Metodologia
Cimento Portland	Perda ao Fogo	NBR NM 18:2012
	Área Específica – Blaine	ABNT NBR 16372:2015
	Início e Fim de Pega	ABNT NBR 16607:2018
	Resistência à Compressão	ABNT NBR 7215:1996
Agregados miúdos	Análise Granulométrica	ABNT NBR 17054:2022
	Dimensão Máxima Característica	ABNT NBR 17054:2022
	Módulo de Finura	ABNT NBR 17054:2022
	Teor de materiais pulverulentos	ABNT NBR 16973:2021
	Massa específica	ABNT NBR 16916:2021
	Massa unitária seca e solta	ABNT NBR 16972:2021
Agregados graúdos	Análise Granulométrica	ABNT NBR 17054:2022
	Dimensão Máxima Característica	ABNT NBR 17054:2022
	Módulo de Finura	ABNT NBR 17054:2022
	Massa específica	ABNT NBR 16917:2022
	Massa unitária seca e solta	ABNT NBR 16972:2021
	Massa compactada	ABNT NBR 16972:2021
Resíduo de catalisador do petróleo - REC	Granulometria por difração à laser	Método Fraunhofer
	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	-
	Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias	ABNT NBR 5752:2014
Fibras de polipropileno	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	-

Fonte: O autor

4.2.1.1 Determinação do Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (ABNT NBR 5752:2014)

Para a determinação da pozolanicidade do resíduo de catalisador de petróleo, foi feito o ensaio, conforme a norma ABNT NBR 5752:2014 *Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias*. Os materiais utilizados foram o cimento Portland CP II-F-32, areia normal, material pozolânico e aditivo superplastificante quando necessário. O material pozolânico deve ser secado em estufa a 105+/-5 °C durante 24 horas.

Foram preparados seis corpos de prova para cada uma das duas argamassas com dosagens diferentes, a argamassa A, contendo cimento Portland, areia normal e água, e a argamassa B, contendo substituição de 25% em massa do cimento pelo REC.

As quantidades dos materiais foram exatamente as indicadas na NBR 5752:2014 (Tabela 10).

Tabela 10 – Quantidade de material em massa, para moldagem de seis corpos de prova cilíndricos 5 x 10 cm conforme NBR 5752:2014

Material	Massa(g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento CII-F-32	624 +/- 0,4	468 +/- 0,4
Material Pozolânico	-	156 +/- 0,2
Areia Normal (b)	1872,0	1872,0
Água	300 +/- 0,2	300 +/- 0,2

Fonte: O autor, adaptado da ABNT NBR 5752:2014

A mistura dos materiais foi feita conforme a ABNT NBR 7215:2019. Tomou-se cuidado de manter o índice de consistência normal (I_c) da argamassa B em +/- 10 mm do obtido com a argamassa A. Não foi necessária a utilização de aditivo superplastificante, pois o índice de consistência se manteve no intervalo estabelecido por norma.

A moldagem dos corpos de prova segue a NBR 7215:2019, e a cura foi separada em duas fases: a primeira, em cura úmida de 20 a 24 horas, e a cura final, em água saturada e de cal, com os corpos de prova já desformados, de 28 dias.

Finalizada a cura, as amostras foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão, e o desempenho delas aos 28 dias foi calculado conforme a equação (2):

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

I: índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. O resultado, expresso em porcentagem (%), deve ser arredondado ao inteiro;

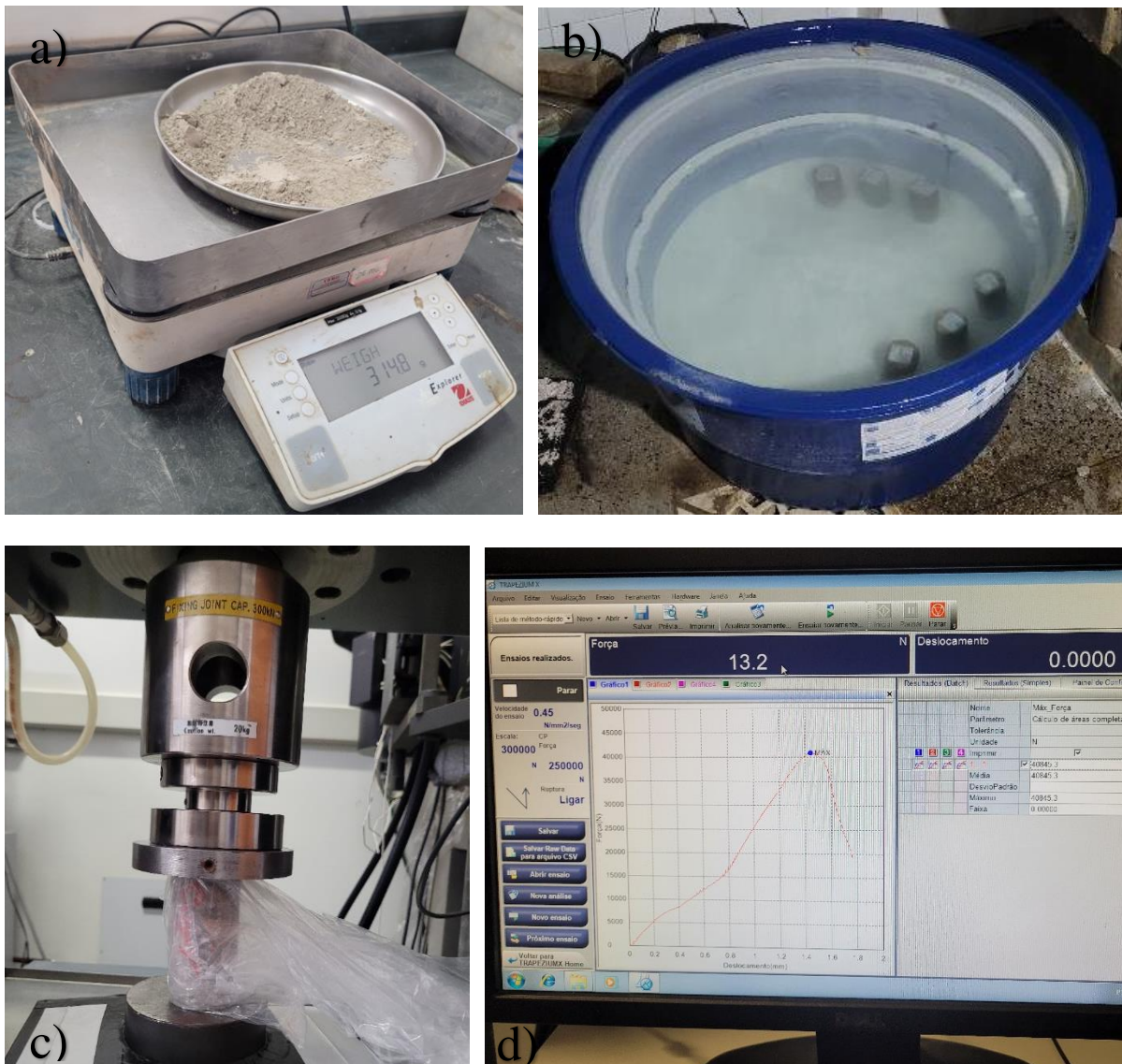
f_{cB}: resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F e 25% de material pozolânico (argamassa B), aproximada ao décimo e expressa em (MPa);

f_{cA}: resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento CP II-F (argamassa A), aproximada ao décimo e expressa em (MPa).

Para o material ser considerado pozolânico, o índice de desempenho obtido com cimento Portland aos 28 dias deve ser igual ou superior a 90%.

Para a realização desse ensaio, foram produzidos 12 corpos de prova sendo seis da argamassa A (cimento, areia normal e água) e seis da argamassa B (cimento, resíduo de catalisador de petróleo, areia normal e água). Primeiramente, foram feitas as dosagens, com a pesagem em balança de precisão e a separação dos materiais para as respectivas misturas. Após o processo de mistura mecânica, foi realizada a moldagem dos corpos de prova, cuja cura foi feita conforme ABNT NBR 7215:2019, inicialmente 24 horas em câmara úmida e, após a desmoldagem, em um sistema aquoso de solução saturada de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , a uma temperatura de (23 ± 2) °C. Passados 28 dias da moldagem, os corpos de prova foram retirados da solução aquosa de Ca(OH)_2 e submetidos ao ensaio de resistência à compressão em prensa hidráulica, conforme ABNT NBR 7215:2019. Os corpos de prova foram protegidos por película plástica de forma a não danificar o equipamento (Figura 13).

Figura 13: Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias: a) dosagem dos materiais; b) cura em solução aquosa de hidróxido de cálcio; c) ensaio de resistência à compressão axial; d) *display* eletrônico para leitura dos dados de ruptura



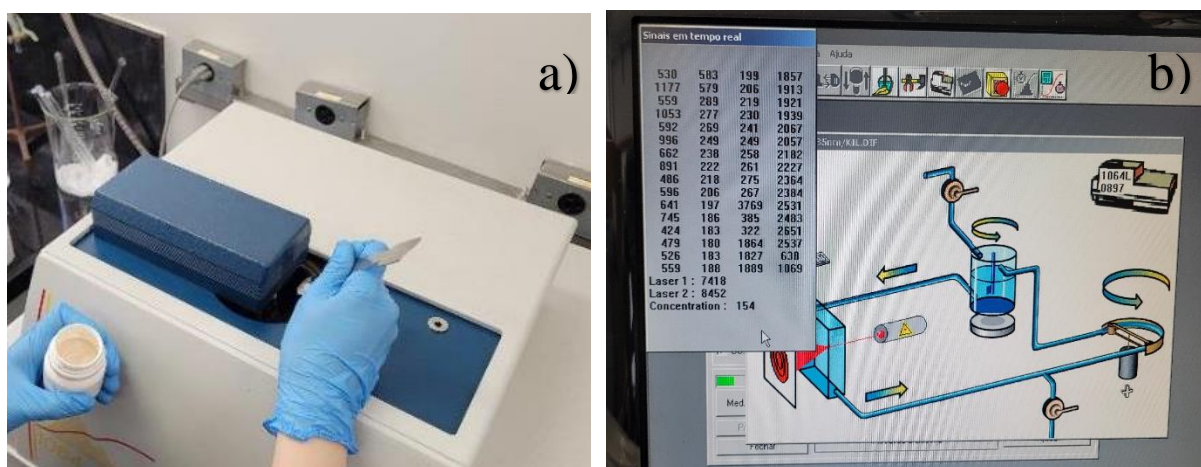
Fonte: O autor

4.2.1.2 Granulometria do resíduo do catalisador de petróleo por difração a laser

Com o objetivo de caracterizar e conhecer as características granulométricas do REC utilizado e compará-lo com resultados observados em literatura, foi realizado o ensaio de granulometria por difração a laser. Este tem o aspecto pulverulento e é classificado como resíduo não perigoso (Classe II) e inerte, de acordo com a norma ABNT NBR 10004:2004. Para esse ensaio, uma vez que o material fica em suspensão em meio aquoso (água como agente dispersante), ele deve ser inerte em água. O método

utilizado foi o de Fraunhofer e a duração do ensaio foi de 25 minutos. O equipamento usado foi o espectrômetro Cilas modelo 1064, fabricado pela Oxford Lasers (Figura 14). Ele opera com laser de 820 nm, com determinação da distribuição pelo método Fraunhofer e Mie para amostras com granulometria inferior a 500 μm . A norma técnica que rege esse experimento é a “BS ISO 13320:2020 – *Particle size analysis: Laser diffraction methods.*”

Figura 14: Granulometria por difração a laser: a) colocação do material no equipamento; b) display eletrônico com leitura dos dados



Fonte: O autor

4.2.2 Produção das amostras/dosagens de concreto

Os corpos de prova de concreto produzidos neste trabalho foram dosados com base nos métodos de dosagem do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e referência de estudo feito por Costa *et al.* (2023), com consumo de 370kg de cimento, 740kg de agregado miúdo e 1110kg de agregado graúdo. A relação água/cimento de 0,55 e a porcentagem de aditivo superplastificante foi de 1% em relação à massa do aglomerante.

Para a produção dos concretos, determinaram-se quatro dosagens diferentes, sendo elas:

C – Amostra de Controle;

R – Concreto com teor de 10% de substituição de REC em relação à massa total de cimento (adaptado de Rudžionis *et al.* 2014);

P - Concreto com adição de 1% de fibras de polipropileno em relação à massa do aglomerante (adaptado de Asgarian *et al.* 2023);

RP - Concreto com teor de 10% de substituição de REC em relação à massa total de cimento e adição de 1% de fibras de polipropileno em relação à massa do aglomerante.

As dosagens estão demonstradas na Tabela 11.

Tabela 11 – Dosagem de materiais para 1m³ de concreto e relação de a/c igual a 0,55

DOSAGEM	CORPO DE PROVA	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	10% REC (kg)	Aditivo superplastificante 1% em relação a massa cimento (kg)	Fibras de Polipropileno 1% em relação a massa cimento (kg)	Água relação a/c 0,55(kg)	Relação a/c
C	Amostra de Controle	370	740	1110	0	3,7	-	203,5	0,55
R	10% REC (1)	333	740	1110	37	3,7	-	203,5	0,55
P	1% PP (1)	370	740	1110	0	3,7	3,7	203,5	0,55
RP	10% REC + 1% PP (1)	333	740	1110	37	3,7	3,7	203,5	0,55

(1) - Porcentagem em relação à massa do aglomerante

Fonte: O autor

O teor de 10% de substituição de REC em relação à massa do cimento foi definido a partir de resultados positivos vistos nos trabalhos de Rudžionis *et al.* (2012), Assim *et al.* (2021) e Costa *et al.* (2023). Já a porcentagem de adição de 1% de PP nas amostras foi estabelecida conforme conclusões observadas nos estudos de Kim *et al.* (2010), Mogre *et al.* (2012) e Asgarian *et al.* (2023).

Preliminarmente, foi feita uma dosagem experimental. Os agregados foram colocados em misturador manual, conforme dosagem. O REC foi adicionado ao cimento. O aditivo superplastificante foi juntado à água de amassamento e as fibras de polipropileno foram adicionadas à mistura já incorporada na água. A amostra contendo REC e fibras de polipropileno apresentaram baixa trabalhabilidade, mesmo com o aditivo superplastificante. Por causa dessa baixa trabalhabilidade, a relação água cimento foi ajustada para 0,55, e o aditivo superplastificante trocado por um mais forte, o Viscocrete 5800 FTN fabricado pela Sika.

A mistura dos materiais foi realizada com auxílio de uma betoneira e, de acordo com a ABNT NBR 12655: 2022, foi feita até formar uma massa homogênea dos materiais e garantir a dispersão do aditivo superplastificante (Figura 15).

Figura 15: Mistura dos materiais na betoneira



Fonte: O autor

4.2.3 Consistência do concreto no estado fresco

O estudo da consistência e trabalhabilidade do concreto fresco, com a finalidade de conhecer suas características reológicas, foi feito através do ensaio de abatimento de tronco de cone, de acordo com ABNT NBR 16889:2020 (Figura 16).

Figura 16: Execução do ensaio de abatimento de tronco de cone



Fonte: O autor

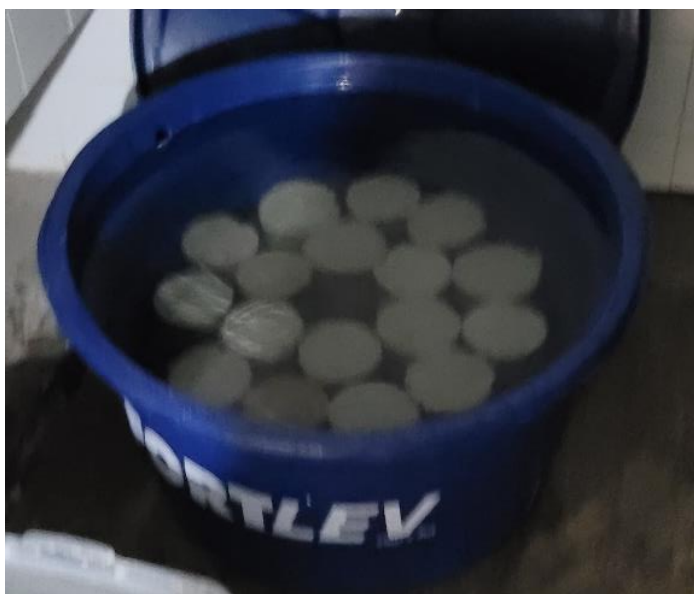
4.2.4 Moldagem e cura

A moldagem dos corpos de prova foi feita à temperatura ambiente, em formas cilíndricas metálicas, seguindo os preceitos da norma ABNT NBR 5738:2016, com adensamento mecânico, por meio de vibrador de imersão de haste metálica, que procurou reduzir os vazios da mistura. Adotou-se um curto tempo de vibração, para não segregar os agregados graúdos do concreto.

Foram confeccionados um total de 18 corpos de prova cilíndricos de 10x20cm para cada dosagem, sendo seis destinados aos ensaios de resistência à compressão axial e seis dedicados aos ensaios resistência à tração por compressão diametral; três destinados à determinação do módulo de elasticidade pelo método das frequências de vibração e três dedicados aos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Após a moldagem dos corpos de prova de concreto, eles foram mantidos protegidos, a uma temperatura ambiente por 24 horas para a sua cura inicial. Terminado esse tempo, as amostras foram cuidadosamente desmoldadas, identificadas e inseridas em um sistema aquoso para cura em solução de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Figura 17), onde permaneceram imersas por 28 dias (até a data dos ensaios).

Figura 17: Amostras em sistema aquoso com hidróxido de cálcio



Fonte: O autor

Finalizado o período de cura, os corpos de prova foram retirados do sistema aquoso e retificados previamente à execução dos ensaios, de forma a proporcionar uma superfície lisa e livre de ondulações e abaulamentos. Na sequência, eles foram transferidos ao laboratório para realização dos ensaios de caracterização mecânica.

4.2.5 Ensaios do concreto no estado endurecido

A resistência à compressão do concreto foi verificada por meio do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos, conforme norma ABNT NBR 5739:2018. Esse ensaio consiste na compressão axial dos corpos de prova cilíndricos em prensa hidráulica até a sua ruptura. O carregamento foi de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s, aplicado continuamente. O ensaio foi realizado em seis corpos de prova por dosagem, aos 28 dias de cura (Figura 18).

Figura 18: Ensaio de resistência à compressão axial: a) medição das dimensões de corpo de prova por meio de paquímetro; b) posicionamento de corpo de prova em prensa hidráulica; c) ruptura de corpo de prova; d) display eletrônico para leitura dos dados de ruptura



Fonte: O autor

A resistência à tração das amostras de concreto foi verificada por meio do ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, conforme norma ABNT NBR 7222:2011. Esse ensaio consiste na compressão dos corpos de prova cilíndricos posicionados diametralmente na prensa hidráulica até a sua ruptura, de forma a calcular a sua resistência à tração. Para a realização do procedimento, é necessária a utilização de gabarito auxiliar para posicionamento do corpo de prova nos pratos da prensa hidráulica. O carregamento

foi de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s, aplicado continuamente. O ensaio foi realizado em seis corpos de prova, aos 28 dias de cura (Figura 19).

Figura 19: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral: a) gabarito auxiliar e tira de madeira para apoio do corpo de prova; b) posicionamento de corpo de prova em prensa hidráulica; c) ruptura de corpo de prova; d) display eletrônico para leitura dos dados de ruptura.

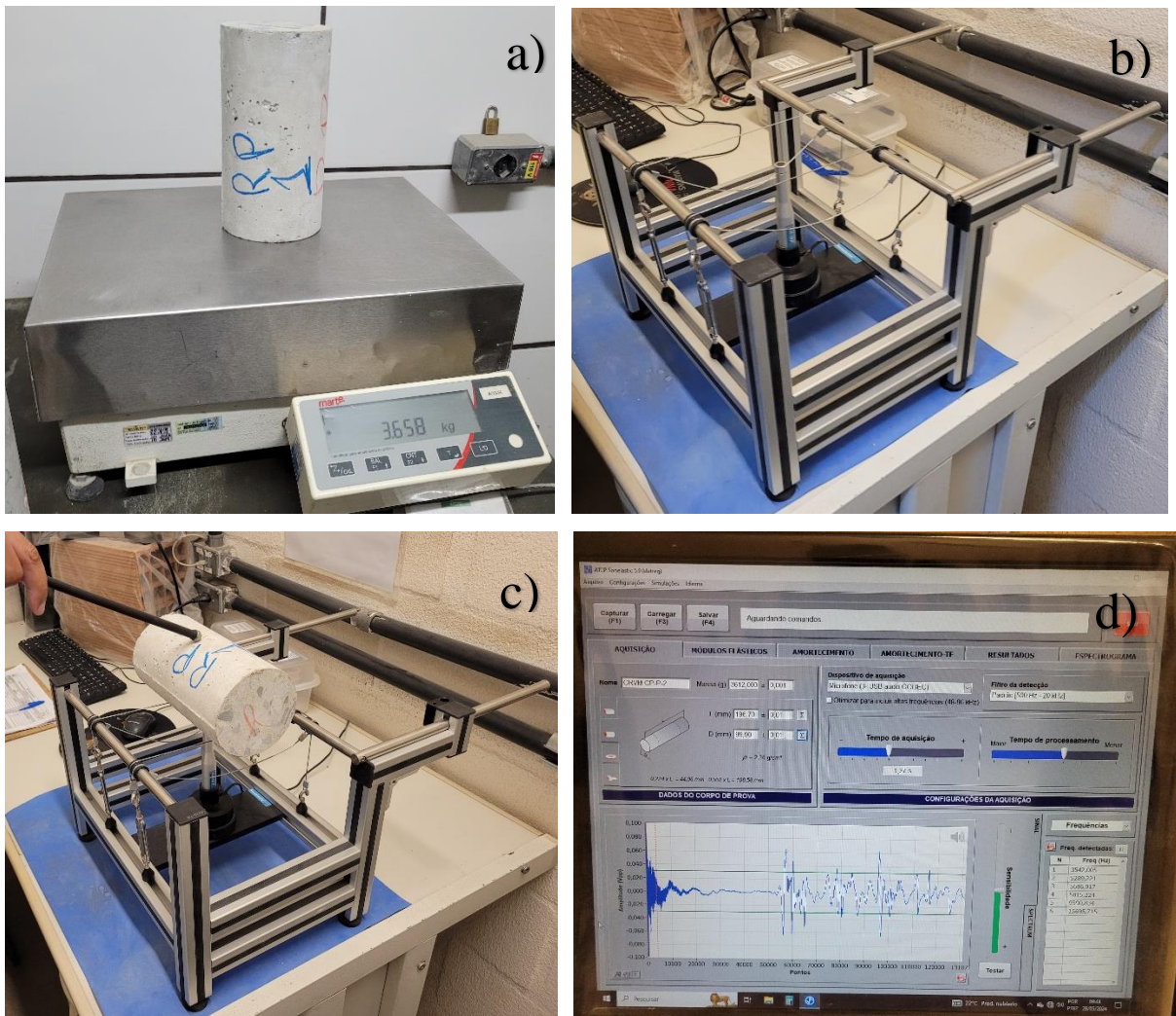


Fonte: O autor

O módulo de elasticidade das amostras de concreto foi verificado por meio do ensaio de determinação de módulos de elasticidade e deformação pelo método das frequências de vibração, de acordo com ABNT NBR 8522-2:2021. Esse ensaio consiste em apoiar o corpo de prova nas linhas nodais do modo de vibração flexional fundamental, aplicar uma excitação por impacto, captar a resposta acústica ou

dinâmica, processar essa resposta para identificação da frequência de ressonância flexional e calcular o módulo de elasticidade dinâmico. O experimento foi realizado em três corpos de prova por dosagem, aos 28 dias de cura, sendo que a norma preconiza um mínimo de dois corpos de prova (Figura 20).

Figura 20: Ensaio de determinação de módulo de elasticidade: a) pesagem de corpo de prova; b) suporte de corpo de prova ajustável com apoio em cabos de aço; c) aplicação de força por meio de martelo de impacto manual; d) leitura da resposta acústica em computador.



Fonte: O autor

Os ensaios para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos foram feitos conforme os preconizados pela ABNT NBR 9778:2009. Utilizaram-se três corpos de prova por dosagem, aos 28 dias de cura. Esses testes consistiram nos seguintes procedimentos: secagem dos corpos de prova em estufa para determinação da sua massa na condição seca; saturação do corpo de

prova por 72 horas e determinação da sua massa na condição saturada e imersa em água. Completada a etapa de saturação, houve a imersão do corpo de prova em um recipiente cheio de água, que deve ser progressivamente levado à ebulição por 5h, mantendo-se constante o volume de água. Após resfriamento, registrou-se a massa saturada imersa por meio de balança hidrostática e, após retirada do corpo de prova da água e enxágue, foi determinada a sua massa saturada (Figura 21).

Figura 21: Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica: a) secagem das amostras em estufa; b) pesagem das amostras; c) imersão em água levada à ebulição; d) pesagem das amostras em balança hidrostática.



Fonte: O autor

4.2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Foi realizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) com o objetivo de analisar a morfologia das superfícies das amostras dos concretos, para, assim, concluir como o REC e as fibras de polipropileno alteram as propriedades do concreto em nível microscópico. A preparação das amostras consistiu em cortar moldes cúbicos com aproximadamente 30 mm x 30 mm x 30 mm e limpar a superfície. Em seguida, os moldes foram analisados no Centro *Design* Empresa da Universidade do Estado de Minas Gerais em MEV. O equipamento utilizado foi o TM4000Plus da Hitachi, no qual foi selecionado aumento de 150 a 500 vezes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As conclusões e resultados dos ensaios executados serão descritos, analisados e discutidos nesta seção.

5.1 Caracterização dos materiais

5.1.1 Agregado miúdo

A Tabela 12 evidencia as propriedades físicas do agregado miúdo. A Tabela 13 e a Figura 22 mostram a granulometria do agregado miúdo utilizado.

Tabela 12 – Características físicas do agregado miúdo

Propriedade - Unidade	Norma	Valor
Massa específica - g/cm ³	NBR 16916:2021	2,63
Massa unitária seca e solta - g/cm ³	NBR 16972:2021	1,22
Teor de materiais pulverulentos - %	NBR 16973:2021	1,04
Módulo de Finura	NBR 17054:2022	1,96
Dimensão Máxima Característica - mm	NBR 17054:2022	4,75

Fonte: O autor

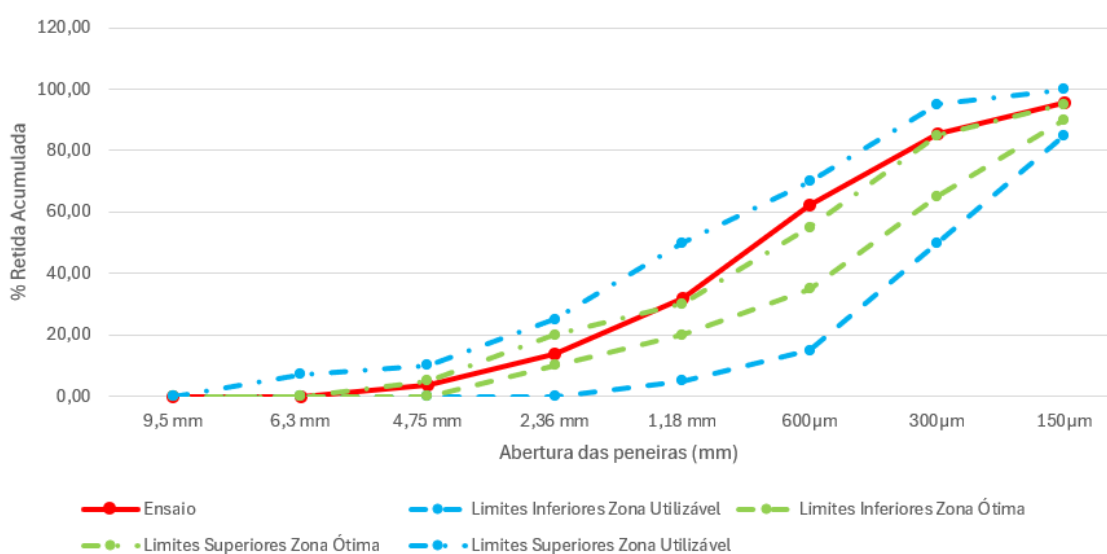
Tabela 13 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneiras	Massa retida g	% retida	% retida acumulada
75 mm	0,00		0,00
63 mm	0,00		0,00
50 mm	0,00		0,00
37,5 mm	0,00		0,00
31,5 mm	0,00		0,00
25 mm	0,00		0,00
19 mm	0,00		0,00
12,5 mm	0,00		0,00
9,5 mm	0,00		0,00
6,3 mm	0,00		0,00
4,75 mm	34,40	3,44	3,44
2,36 mm	104,50	10,46	13,90
1,18 mm	180,45	18,06	31,95
600µm	302,85	30,30	62,26
300µm	229,75	22,99	85,25
150µm	103,95	10,40	95,65
Fundo	43,50	4,35	100,00
	999,4		

Fonte: O autor

Conforme pode ser observado na Figura 22, a curva granulométrica do agregado miúdo se encontra dentro dos limites inferiores e superiores da zona utilizável, de acordo com a ABNT NBR 7211: 2022, portanto o material é adequado para a utilização no concreto. Pela norma ABNT NBR 17054: 2022, a dimensão máxima característica do agregado corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada que seja igual ou inferior a 5% em massa. Como se pode ver na Tabela 12, a dimensão máxima do agregado miúdo foi de 4,75 mm. Também pela mesma norma, o módulo de finura do agregado foi igual a 1,96 mm. A massa específica encontrada foi de 2,63g/cm³, próxima aos valores descritos em bibliografia por Costa *et al.* (2023).

Figura 22: Curva granulométrica agregado miúdo



Fonte: O autor

5.1.2 Agregado graúdo

A Tabela 14 mostra as propriedades físicas do agregado graúdo. A Tabela 15 e a Figura 23 apresentam a granulometria do agregado graúdo utilizado.

Tabela 14 – Características físicas do agregado graúdo

Propriedade - Unidade	Norma	Valor
Massa específica - g/cm ³	NBR 16917:2022	2,81
Massa unitária seca e solta - g/cm ³	NBR 16972:2021	1,56
Massa unitária compactada- g/cm ³	NBR 16972:2021	1,72
Módulo de Finura	NBR 17054:2022	5,48
Dimensão Máxima Característica - mm	NBR 17054:2022	12,5

Fonte: O autor

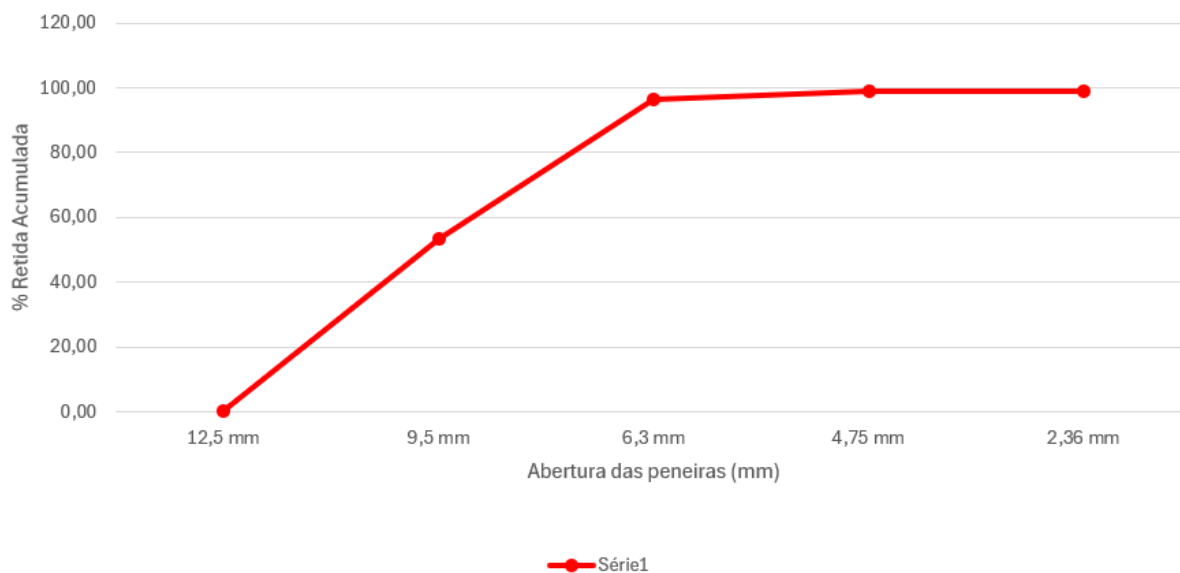
Tabela 15 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Peneiras	Massa retida g	% retida	% retida acumulada
75 mm	0,00		0,00
63 mm	0,00		0,00
50 mm	0,00		0,00
37,5 mm	0,00		0,00
31,5 mm	0,00		0,00
25 mm	0,00		0,00
19 mm	0,00		0,00
12,5 mm	5,00	0,25	0,25
9,5 mm	1062,50	53,08	53,33
6,3 mm	858,90	42,91	96,24
4,75 mm	50,70	2,53	98,77
2,36 mm	5,40	0,27	99,04
Fundo	19,25	0,96	100,00
	2001,75	100	

Fonte: O autor

Pela Tabela 15 e Figura 23, pode ser observado que a composição granulométrica do agregado graúdo utilizado foi de 12,5 mm a 2,36 mm. Segundo a norma ABNT NBR 17054: 2022, a sua dimensão máxima característica é de 12,5 mm e o módulo de finura de 5,48 mm. A massa específica encontrada foi de 2,81g/cm³, em conformidade com os valores encontrados em bibliografia por Costa *et al.* (2023).

Figura 23: Curva granulométrica agregado graúdo



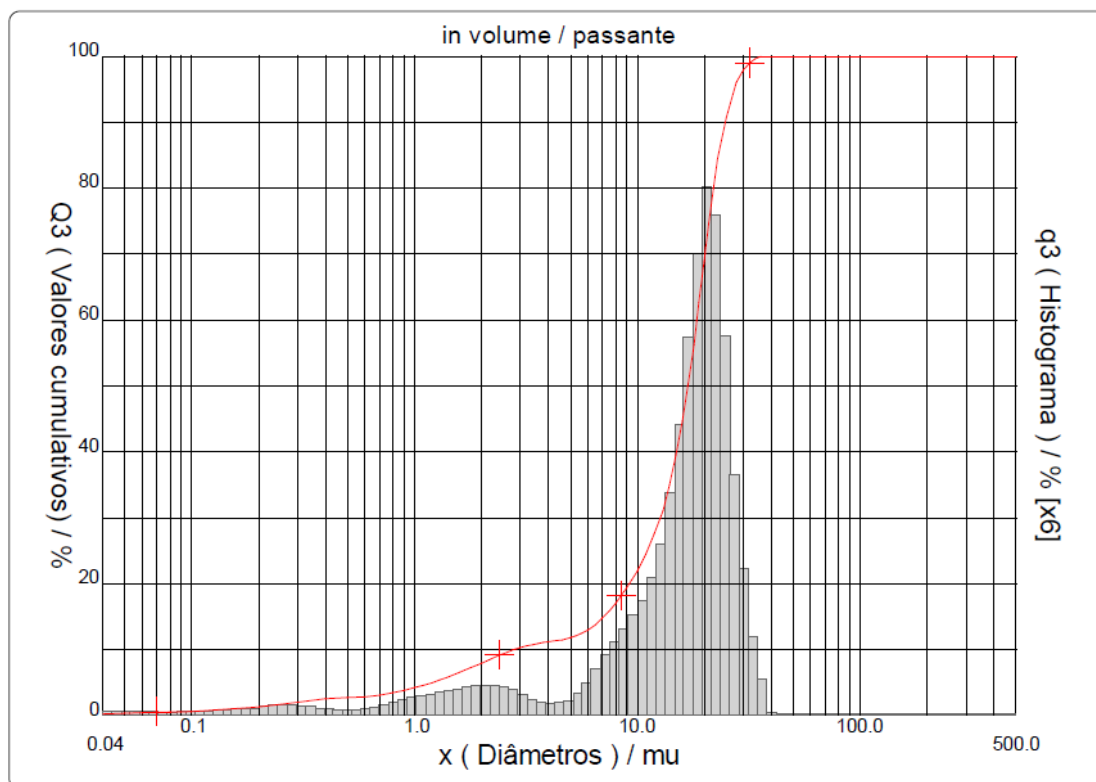
Fonte: O autor

5.1.3 Resíduo de catalisador de petróleo

Granulometria

De acordo com as curvas granulométricas apresentadas, verifica-se que o resíduo apresenta granulometria fina, com tamanho de partículas entre $0,04\ \mu\text{m}$ e $36\ \mu\text{m}$, monomodal, pois existe um grande pico, no gráfico de distribuição, do tamanho das partículas, polidisperso, visto que as partículas apresentam tamanhos diferentes. O D50 da amostra (tamanho da partícula correspondente quando a porcentagem acumulada chega a 50%) foi de $19\ \mu\text{m}$; o D10 (tamanho da partícula correspondente quando a porcentagem acumulada chega a 10%) foi de $2\ \mu\text{m}$; e o D90 (tamanho da partícula correspondente quando a porcentagem acumulada chega a 90%) foi de $24,76\ \mu\text{m}$. Esses resultados correspondem aos encontrados em literatura. Payá *et al.* (1999), em seu estudo, encontraram uma granulometria entre $0,1\ \mu\text{m}$ e $30\ \mu\text{m}$ para o REC obtido na BP Oil España. Já Pacewska *et al.* (2002a) encontraram grãos variando de $20\ \mu\text{m}$ a $80\ \mu\text{m}$. O histograma de distribuição granulométrica pode ser observado na Figura 24.

Figura 24: Distribuição granulométrica do REC



Fonte: O autor

Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (ABNT NBR 5752:2014)

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa foram descritos nas Tabelas 16 e 17:

Tabela 16 – Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova em MPa

Argamassa	Corpos de prova	Carga de Ruptura (N)	Carga de Ruptura (kgf)	Área (cm ²)	Resistência (kgf/cm ²)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
A	CP1	40845,3	4165,08	19,634	212,14	20,81	20,03
A	CP2	34097,5	3476,99	19,634	177,09	17,37	
A	CP3	35016,3	3570,68	19,634	181,86	17,84	
A	CP4	43050,2	4389,91	19,634	223,59	21,93	
A	CP5	43430	4428,64	19,634	225,56	22,13	
A	CP6	39392	4016,88	19,634	204,59	20,07	
B	CP1	25149,8	2564,58	19,634	130,62	12,81	13,16
B	CP2	20654,2	2106,15	19,634	107,27	10,52	
B	CP3	31670,2	3229,47	19,634	164,48	16,14	
B	CP4	27633,9	2817,88	19,634	143,52	14,08	
B	CP5	24328,6	2480,84	19,634	126,35	12,40	
B	CP6	25585,6	2609,01	19,634	132,88	13,04	

Fonte: O autor

Tabela 17 – Resistência à compressão axial mínima para material pozolânico

Resistência mínima para material ser considerado pozolânico (90%) em MPa	Porcentagem da resistência obtida pelos CPS com resíduo
18,02	65,73%

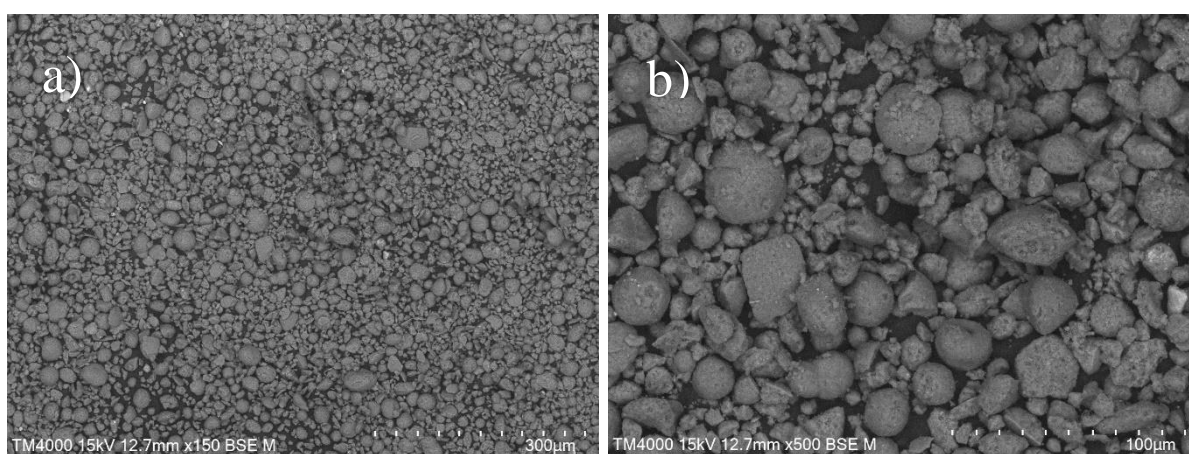
Fonte: O autor

Segundo determinação da ABNT NBR 12653:2015, para ser considerado pozolânico, a amostra do material ensaiado deve atingir, no mínimo, 90% da resistência à compressão alcançada pela argamassa de referência. Logo, para este trabalho, o valor a ser alcançado deveria ser, no mínimo, 18,02 MPa. No teste, o valor obtido foi de 13,16 MPa, portanto inferior ao resultado considerado mínimo pela norma. De acordo com Almeida *et al.* (2020), o REC possui uma proporção de aproximadamente 54% de sílica (SiO_2). Essa elevada porcentagem de sílica evidencia potencial verdadeiro de pozolanicidade. O fato de o resíduo não ter sido submetido à moagem e ao ensaio de finura na peneira de 325 # pode ter levado a esse resultado menor que 90%. A redução pode também estar associada ao efeito de deposição de metais provenientes do craqueamento na superfície do REC, com consequente diminuição da área superficial, o que provoca a perda da eficiência reativa deste com o hidróxido de cálcio (Silva 2015). Payá *et al.* (2001) não observaram a ocorrência de atividade pozolânica em todas as suas amostras, somente nas com 15% e 20% de incorporação de REC em relação ao cimento. Pacewska *et al.* (2002a) constataram que a atividade pozolânica do REC é dependente do diâmetro médio das partículas, apresentando uma efetividade maior em frações de partículas menores, com aproximadamente 21 μm , e uma efetividade menor em frações de partículas maiores, com aproximadamente 76 μm . Zornoza *et al.* (2009a) chegaram à conclusão de que 20% de substituição rendeu produtos cimentantes devido à atividade pozolânica do REC com a portlandita liberada na hidratação do cimento; entretanto, proporções maiores de substituição esgotaram toda a portlandita durante a fase de hidratação, comprometendo, pois, a atividade pozolânica.

Microscopia eletrônica de varredura

Na Figura 25, pode-se observar a morfologia das partículas do resíduo de catalisador de petróleo, que apresenta estrutura esferoidal, fragmentada e aparência porosa, abrangendo diâmetros de 5 μm a 30 μm , conforme também constatado por Almeida *et al.* (2020). A porosidade das partículas pode justificar a maior absorção de água ocorrida nas amostras R e RP, o que reduziu a fluidez do concreto.

Figura 25: Morfologia das partículas do resíduo de catalisador de petróleo: a) ampliação de 150 X; b) ampliação de 500 X.



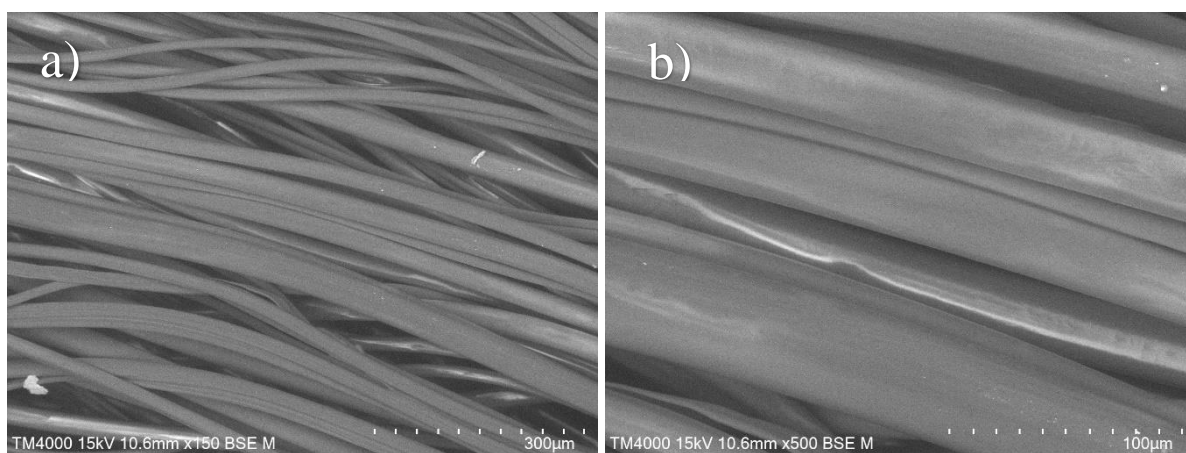
Fonte: O autor

5.1.4 Fibras de polipropileno

Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 26, a seguir, mostra a estrutura das fibras de polipropileno de seção circular e diâmetros variando de 18 μm a 40 μm , monofilamentares e superfície lisa.

Figura 26: Morfologia das fibras de polipropileno: a) vista geral da PP com ampliação de 150 X; b) vista com ampliação de 500 X.



Fonte: O autor

5.2 Consistência do concreto no estado fresco

A Tabela 18 mostra os resultados obtidos para o estudo do abatimento do tronco de cone, conforme preconizado pela ABNT NBR 16889:2020.

Tabela 18 – Abatimento do tronco de cone das amostras: C) amostra de controle; R) 10% de substituição do cimento por REC; P) adição de 1% em fibras de polipropileno; RP) substituição de 10% de cimento por REC e adição de 1% em fibras de polipropileno

Dosagem	Corpo de Prova	Relação Água/Aglomerante	Abatimento do tronco de cone (mm)
C	Amostra de Controle	0,55	148
R	10% REC	0,55	88
P	1% PP	0,55	0
RP	10% REC + 1% PP	0,55	0

Fonte: O autor

Com base nos estudos dos valores obtidos do abatimento de tronco de cone na Tabela 18, observa-se uma gradual perda de trabalhabilidade, mantendo-se fixa a relação água/cimento e a quantidade de aditivo superplastificante. A substituição de 10% em massa do cimento pelo REC trouxe pequena perda de trabalhabilidade, e houve queda no abatimento de 148 mm para 88 mm. Mesmo assim, o aspecto do concreto fresco com a substituição se manteve similar ao do concreto da amostra de controle (Figuras 24). Essa perda na trabalhabilidade pode ser explicada devido à possibilidade de as partículas do REC serem mais finas que as do cimento Portland,

ocasionando, assim, maior absorção de água desse material. A área superficial específica do cimento utilizado é de $0,527\text{m}^2/\text{g}$, enquanto a do REC é de $150\text{ m}^2/\text{g}$, conforme estudo de Almeida (2017).

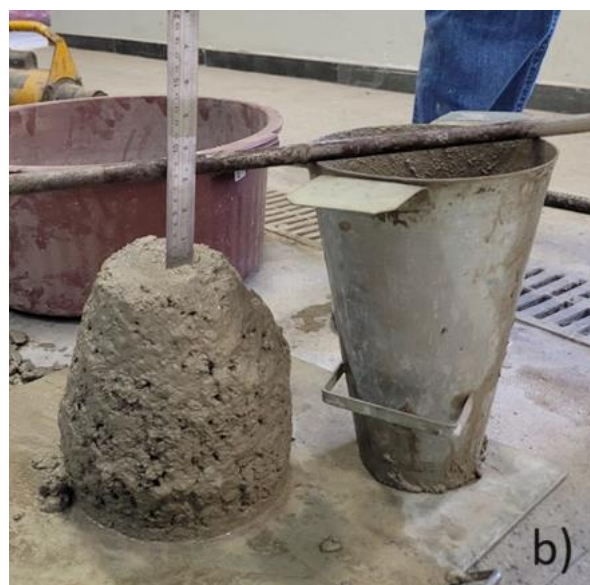
Costa *et al.* (2023) verificaram redução da fluidez do concreto com a adição de REC, devido aos grãos deste serem mais finos que os de cimento Portland. Rudžionis *et al.* (2014) constataram a necessidade de utilização de aditivo superplastificante para a manutenção da trabalhabilidade no concreto.

Com a adição das fibras de polipropileno na proporção de 1%, a perda de trabalhabilidade foi acentuada, apresentando abatimento nulo do tronco de cone. Na dosagem contendo substituição de 10% da massa do cimento pelo REC e acréscimo de 1% de fibras de polipropileno, além do abatimento nulo, pode-se observar a aglomeração do material em torno da brita, formando grumos (Figura 26). Com a vibração, houve recuperação do aspecto homogêneo do concreto. Nas duas amostras acrescidas de fibras, foi necessária a aplicação de uma maior energia para promover o correto adensamento do concreto e evitar a ocorrência de brocas nos exemplares. Essa queda na trabalhabilidade do concreto com o acréscimo das fibras de polipropileno também foi observada em outros trabalhos, como Gencil *et al.* (2011), de Faria (2012) e Lafiti *et al.* (2022). Devido a esse resultado de *slump* zero do tronco de cone, deve-se usar dosagens maiores de aditivo superplastificante, ou até mesmo um aditivo hiperplastificante, sempre que forem adicionadas fibras de polipropileno ao concreto, de forma a garantir trabalhabilidade e fluidez à pasta.

Na Figura 27, é possível verificar os ensaios de abatimento de tronco de cone para os concretos no estado fresco nas dosagens C, R, P e RP.

Figura 27: Ensaio de tronco de cone para os concretos no estado fresco nas dosagens C, R, P e RP:

a) dosagem C; b) dosagem R; c) dosagem P; d) dosagem RP



Fonte: O autor

Figura 28: Grumos formados em torno dos grãos de brita



Fonte: O autor

5.3 Ensaios com o concreto no estado endurecido

Os resultados dos ensaios com o concreto no estado endurecido serão descritos e analisados nesta seção.

5.3.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados aos 28 dias de cura em seis amostras para cada dosagem, conforme ABNT NBR 5739:2018. A Tabela 19 e a Figura 29 mostram os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial dos seis corpos de prova de cada dosagem:

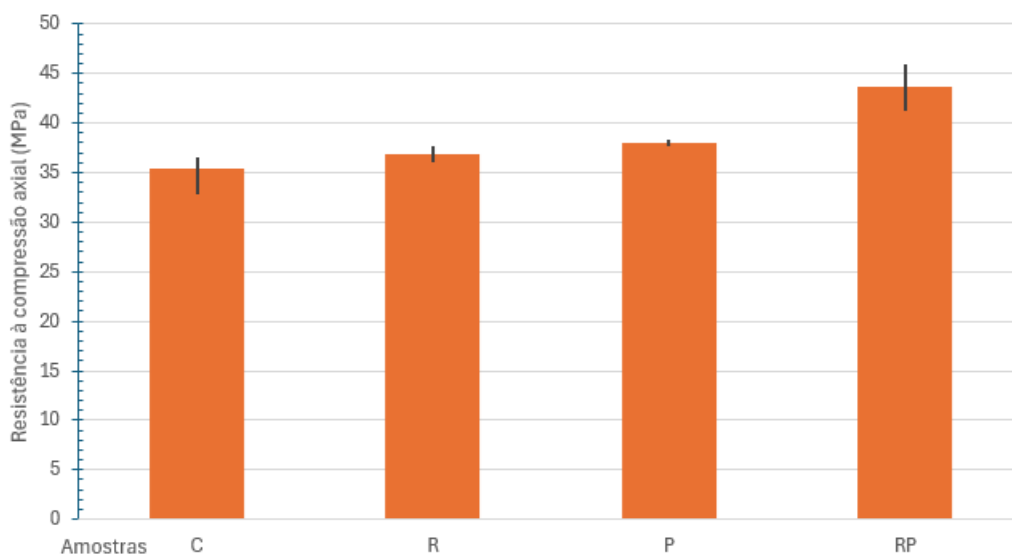
Tabela 19 –Ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova em MPa

Amostra	Ø Médio (mm)	Altura (mm)	Relação H/D	Fator Correção (h/d)	Carga(kN)	Fc (MPa)	Fc média (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Relação Fc média amostra / Fc média amostra C	
1	C	100,58	195,82	1,94	1,00	285,50	35,90	35,38	1,40	3,95%	1,00
2	C	100,13	194,54	1,94	1,00	281,10	35,70				
3	C	100,31	196,46	1,95	1,00	288,60	36,50				
4	C	100,40	193,20	1,92	0,99	279,30	34,90				
5	C	100,05	195,66	1,96	1,00	257,50	32,80				
6	C	100,56	194,54	1,93	0,99	293,10	36,50				
1	R	99,89	197,04	1,96	1,00	295,00	37,60	36,83	0,58	1,57%	1,04
2	R	99,78	196,70	1,96	1,00	281,90	36,10				
3	R	99,74	195,11	1,95	1,00	291,20	37,30				
4	R	100,01	196,05	1,96	1,00	290,70	37,00				
5	R	99,88	195,28	1,94	1,00	284,10	36,30				
6	R	99,83	197,27	1,98	1,00	287,50	36,70				
1	P	100,06	197,25	1,97	1,00	295,50	37,60	37,93	0,34	0,89%	1,07
2	P	102,00	200,84	1,96	1,00	307,70	37,70				
3	P	99,86	196,61	1,96	1,00	299,80	38,30				
4	P	100,10	196,69	1,96	1,00	301,70	38,30				
5	P	99,97	198,58	1,99	1,00	295,00	37,60				
6	P	100,01	195,83	1,95	1,00	299,60	38,10				
1	RP	100,39	196,47	1,97	1,00	342,50	43,30	43,65	1,52	3,47%	1,23
2	RP	100,50	194,60	1,95	1,00	342,90	43,20				
3	RP	99,90	194,60	1,94	1,00	343,50	43,80				
4	RP	99,85	194,20	1,94	1,00	359,10	45,90				
5	RP	99,45	192,40	1,92	0,99	324,30	41,30				
6	RP	100,35	192,30	1,90	0,99	354,80	44,40				

Fc - Resistência à compressão axial

Fonte: O autor

Figura 29: Resistência à compressão axial



Fonte: O autor

Os resultados da Tabela 19 e da Figura 29 evidenciam que a dosagem RP obteve a maior média entre os resultados de resistência à compressão axial (43,65 MPa), cerca de 23,37% superior ao da amostra de controle. Os corpos de prova R tiveram uma média de 36,83 MPa, resultado 4,09% superior aos do controle. A dosagem P teve uma média de 37,93 MPa, isto é, 7,20% superior ao valor da amostra de controle. Já os corpos de prova RP tiveram um resultado de 43,65 MPa, 23,37% superior aos do controle. De acordo com Pacewska *et al.* (2002), a resistência do concreto tende a melhorar com a incorporação do REC. Rudžionis *et al.* (2014) conseguiram um aumento de 17,1% na resistência à compressão aos 28 dias com a substituição de 10% de cimento pelo REC. Costa *et al.* (2023) também verificaram um aumento no valor da resistência à compressão axial de 7,34% em CPs de concreto com substituição parcial do 10% do cimento Portland pelo REC. Kakooei *et al.* (2012) observaram incremento na resistência à compressão das amostras reforçadas com fibras de polipropileno proporcionalmente ao aumento na proporção das amostras, com os maiores valores sendo obtidos nas proporções de 1,5 kg/m³ e 2 kg/m³. Blazy *et al.* (2021) citaram que a resistência à compressão aumentou para baixas proporções de adição de fibras de polipropileno. Com proporções mais altas, a resistência tendeu a cair devido à baixa trabalhabilidade e às dificuldades no adensamento, tendo por consequência incremento de vazios na matriz.

5.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados aos 28 dias de cura em seis amostras para cada dosagem, conforme ABNT NBR 7222:2011, com as mesmas designações indicadas nos testes de resistência à compressão axial. Na Tabela 18 e na Figura 28, a seguir, observa-se a sistematização dos processos:

Tabela 20 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Corpos de prova	Ø Médio (mm)	Altura(mm)	Força máxima obtida (N)	Fct_sp (MPa)	Fct_sp média (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Relação Fct_sp média amostra/ Fct_sp média amostra C	Fct	Relação Fct / Fc	
1	C	100,67	193,54	91400,00	2,99	2,96	0,35	11,86%	1,00	2,66	0,0753
2	C	100,44	193,13	96000,00	3,15						
3	C	100,60	195,20	105400,00	3,42						
4	C	100,29	193,91	74400,00	2,44						
5	C	102,02	195,89	84100,00	2,68						
6	C	100,13	196,12	95200,00	3,09						
1	R	100,02	196,54	99300,00	3,22	3,30	0,38	11,47%	1,11	2,97	0,0806
2	R	99,88	191,15	82800,00	2,76						
3	R	100,46	193,86	112000,00	3,66						
4	R	100,30	194,16	115200,00	3,77						
5	R	100,24	194,81	102500,00	3,34						
6	R	100,37	195,36	93600,00	3,04						
1	P	99,91	194,49	94800,00	3,11	3,36	0,27	8,09%	1,13	3,02	0,0797
2	P	100,21	195,75	116500,00	3,78						
3	P	99,90	197,19	97700,00	3,16						
4	P	99,98	195,58	99500,00	3,24						
5	P	99,76	197,51	100800,00	3,26						
6	P	100,18	195,52	111000,00	3,61						
1	RP	100,08	194,24	114600,00	3,75	3,24	0,47	14,38%	1,09	2,92	0,0668
2	RP	100,09	195,50	99600,00	3,24						
3	RP	99,44	192,19	73400,00	2,45						
4	RP	99,78	195,10	94600,00	3,09						
5	RP	100,41	195,60	112600,00	3,65						
6	RP	100,46	195,77	100500,00	3,25						

Fct = 0,9 x Fct sp : Resistência à tração direta

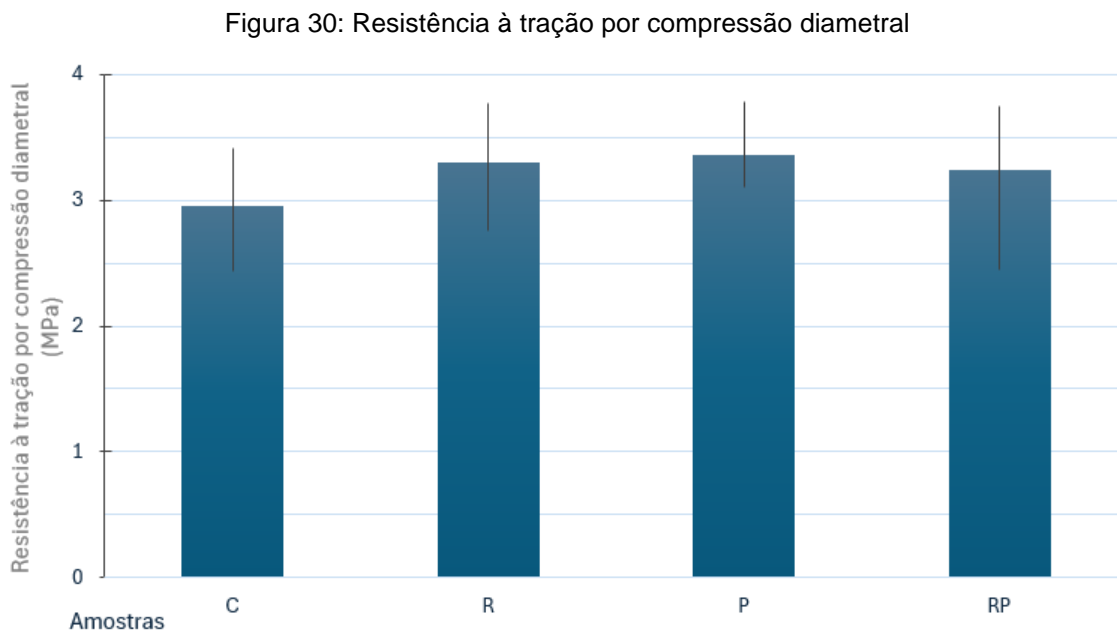
Fct sp : Resistência à tração indireta (ensaio de compressão diametral)

Fc : Resistência à compressão axial

Fonte: O autor

Os resultados da Tabela 20 e da Figura 30 mostram que a dosagem P obteve a maior média entre os resultados de resistência à tração por compressão diametral (3,36 MPa), cerca de 13,51% superior ao da amostra de controle. Os corpos de prova R e RP tiveram médias de 3,30 MPa e 3,24 MPa, respectivamente. O resultado da dosagem R foi 11,48% superior ao da amostra de controle, e os resultados dos corpos de prova RP foram 9,45% superiores aos do controle. Esses números indicam que, conforme o esperado, as dosagens que continham a adição de fibras tiveram uma resistência à tração consideravelmente superior à das amostras sem fibras. Lucena (2017) constatou incremento de 16,28% na resistência à tração do exemplar com 1% de fibras de polipropileno em relação à amostra de controle. Blazy *et al.* (2021) citaram que a resistência à tração com o acréscimo de 1% de fibras de polipropileno provocou um aumento de 8% na resistência à tração. Também foi observado o fato de os corpos de prova com PP terem ficado com as metades dos cilindros solidarizadas pelas fibras mesmo após o rompimento. Esse fato ocorreu com as amostras P e RP (Figura 31). A adição da fibra favorece o aumento da resistência à tração, visto que, ao atuar na

zona de transição do concreto (ponto mais fraco do material), ocorre, conseqüentemente, uma melhora na interação da pasta de cimento com o agregado graúdo.



Fonte: O autor

Figura 31: Corpo de prova da dosagem RP após o ensaio de tração por compressão diametral: a) corpo de prova logo após o rompimento; b) fibras ligando as duas metades do corpo de prova



Fonte: O autor

5.3.3 Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração

Os resultados dos ensaios para determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração podem ser visualizados na Tabela 21 e na Figura 32:

Tabela 21 – Módulo de elasticidade dinâmico e módulo de elasticidade estático estimado

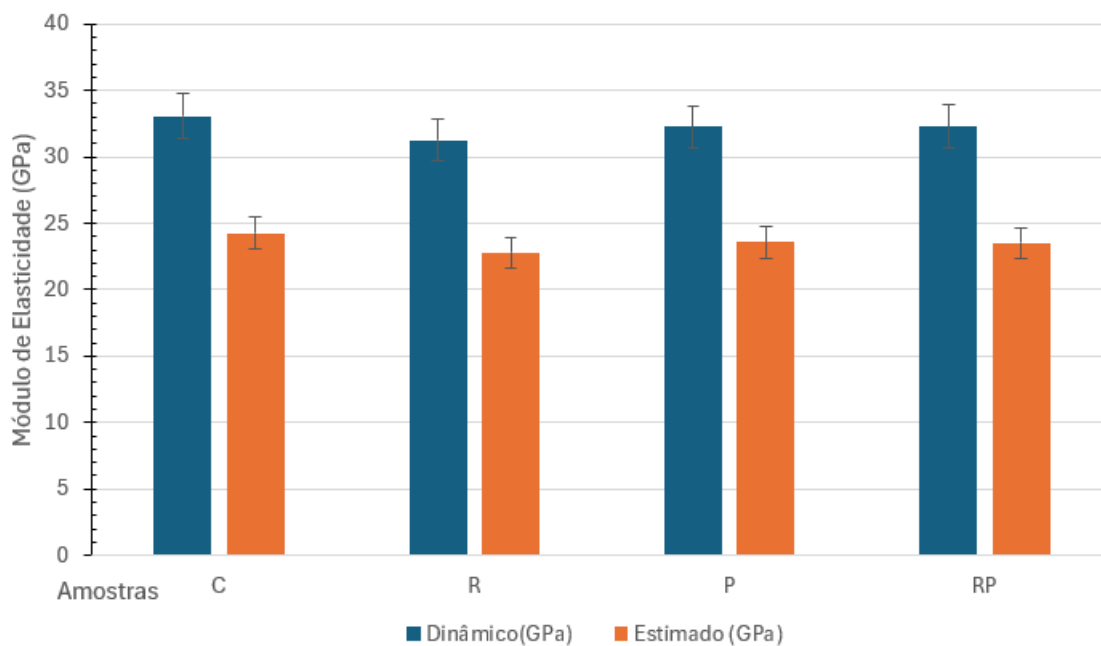
Corpos de prova	Diâmetro Médio (mm)	Altura Média (mm)	Massa (g)	Massa Específica (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade Dinâmico (Ecd)				Módulo de Elasticidade Estático Estimado(Eci)*	Relação Ecd Média/Eci Média	
					Ecd Individual (GPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Relação Ecd Média/ Ecd Média amostra C	Eci Individual (GPa)		
1	C	100,74	194,34	3656	2,36	0,79	2,40%	1,000	33,56	24,78	1,365
2	C	99,92	192,73	3600	2,382				32,15	23,12	
3	C	100,25	195,26	3624	2,352				33,48	24,79	
Valores médios obtidos					33,06				24,23		
1	R	100,57	196,68	3636	2,328	0,75	2,40%	0,946	30,48	21,96	1,372
2	R	100,45	195,86	3616	2,33				31,37	22,84	
3	R	100,48	193,74	3564	2,32				31,97	23,56	
Valores médios obtidos					31,27				22,79		
1	P	100,31	198,38	3702	2,361	0,97	2,99%	0,975	33,22	24,41	1,368
2	P	99,9	196,7	3612	2,343				32,24	23,61	
3	P	100,19	199,53	3678	2,338				31,29	22,68	
Valores médios obtidos					32,25				23,57		
1	RP	100,63	195,41	3658	2,354	2,03	6,30%	0,976	30,29	21,53	1,373
2	RP	100,88	194,35	3626	2,334				32,16	23,61	
3	RP	99,49	193,64	3588	2,383				34,35	25,35	
Valores médios obtidos					32,27				23,50		

* Módulo de elasticidade estático (Eci) estimado a partir do módulo de elasticidade dinâmico conforme anexo B da NBR 8522 - 1

Fonte: O autor

Os resultados apresentados na Tabela 21 e na Figura 32 revelam que a amostra C obteve a maior média para o módulo de elasticidade dinâmico, de 33,06 GPa. A dosagem R teve a menor média (31,27 GPa), cerca de 5,41% inferior à da amostra de controle. As amostras P e RP tiveram médias de 32,25 GPa e 32,27 GPa, respectivamente. O resultado dos corpos de prova P foram 2,46% inferiores à média dos resultados da amostra de controle; o da dosagem RP foi 2,41% inferior ao da amostra de controle. No entanto, os resultados de todas as amostras se encontram em uma faixa de até 37% superiores aos valores estimados. Isso pode ter se dado devido a um maior índice de vazios das dosagens em relação à amostra de controle, conforme observado nos ensaios de absorção de água e índice de vazios. Kim *et al.* (2010) observaram, em seus estudos, que o módulo de elasticidade é fracamente dependente da quantidade de fibras adicionada ao concreto. No trabalho de Gencil *et al.* (2011), foi observado um aumento no módulo de elasticidade nos concretos com acréscimo de fibras de polipropileno, assim como no trabalho de Latifi *et al.* (2022). Lucena (2017) observou um pequeno aumento no módulo de elasticidade para um teor de 1% de fibras e um leve aumento 2% de fibras, com médias de 27,26 GPa e 31,09 GPa, respectivamente, em comparação a 27,26 GPa da amostra de controle.

Figura 32: Módulo de elasticidade



Fonte: O autor

5.3.4 Absorção de água, índice de vazios e massa específica real

Os resultados dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica real podem ser visualizados nas Tabelas 22, 23 e 24 e também nas Figuras 33 e 34:

Tabela 22 – Ensaio de absorção de água

Corpos de prova		Peso seco (g)	Peso imerso (g)	Peso saturado (g)	Absorção de água - Abs (%)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Relação Abs média / Abs média amostra C
1	C	3442,00	2121,00	3658,00	6,30	0,21	3,19%	1,000
2	C	3390,00	2095,00	3613,00	6,60			
3	C	3398,00	2089,00	3626,00	6,70			
Média					6,53			
1	R	3365,00	2086,00	3641,00	8,20	0,10	1,23%	1,240
2	R	3348,00	2074,00	3620,00	8,10			
3	R	3303,00	2046,00	3568,00	8,00			
Média					8,10			
1	P	3479,00	2142,00	3710,00	6,60	0,35	4,95%	1,071
2	P	3372,00	2070,00	3616,00	7,20			
3	P	3437,00	2108,00	3683,00	7,20			
Média					7,00			
1	RP	3423,00	2131,00	3680,00	7,50	0,46	6,03%	1,163
2	RP	3396,00	2107,00	3639,00	7,20			
3	RP	3351,00	2105,00	3624,00	8,10			
Média					7,60			

Fonte: O autor

Tabela 23 – Ensaio de índice de vazios

Corpos de prova		Peso seco (g)	Peso imerso (g)	Peso saturado (g)	Índice de Vazios - IV (%)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Relação IV média / IV média amostra C
1	C	3442,00	2121,00	3658,00	14,10	0,38	2,61%	1,000
2	C	3390,00	2095,00	3613,00	14,70			
3	C	3398,00	2089,00	3626,00	14,80			
Média					14,53			
1	R	3365,00	2086,00	3641,00	17,70	0,15	0,87%	1,209
2	R	3348,00	2074,00	3620,00	17,60			
3	R	3303,00	2046,00	3568,00	17,40			
Média					17,57			
1	P	3479,00	2142,00	3710,00	14,70	0,59	3,81%	1,057
2	P	3372,00	2070,00	3616,00	15,80			
3	P	3437,00	2108,00	3683,00	15,60			
Média					15,37			
1	RP	3423,00	2131,00	3680,00	16,60	1,07	6,35%	1,158
2	RP	3396,00	2107,00	3639,00	15,90			
3	RP	3351,00	2105,00	3624,00	18,00			
Média					16,83			

Fonte: O autor

Tabela 24 – Ensaio de massa específica real

Corpos de prova		Peso seco (g)	Peso imerso (g)	Peso saturado (g)	Massa Específica Seca - MESC (g/cm ³)	Massa Específica Saturada - MESat (g/cm ³)	Massa Específica Real - MER (g/cm ³)	Desvio Padrão MER	Coefficiente de Variação MER	Relação MER/MER média amostra C
1	C	3442,00	2121,00	3658,00	2,239	2,380	2,606	0,01	0,42%	1,000
2	C	3390,00	2095,00	3613,00	2,233	2,380	2,618			
3	C	3398,00	2089,00	3626,00	2,211	2,359	2,596			
Média					2,228	2,373	2,607			
1	R	3365,00	2086,00	3641,00	2,164	2,341	2,631	0,00	0,07%	1,009
2	R	3348,00	2074,00	3620,00	2,166	2,342	2,628			
3	R	3303,00	2046,00	3568,00	2,170	2,344	2,628			
Média					2,167	2,342	2,629			
1	P	3479,00	2142,00	3710,00	2,219	2,366	2,602	0,01	0,32%	0,995
2	P	3372,00	2070,00	3616,00	2,181	2,339	2,590			
3	P	3437,00	2108,00	3683,00	2,182	2,338	2,586			
Média					2,194	2,348	2,593			
1	RP	3423,00	2131,00	3680,00	2,210	2,376	2,649	0,03	1,05%	1,020
2	RP	3396,00	2107,00	3639,00	2,217	2,375	2,635			
3	RP	3351,00	2105,00	3624,00	2,206	2,386	2,689			
Média					2,211	2,379	2,658			

Fonte: O autor

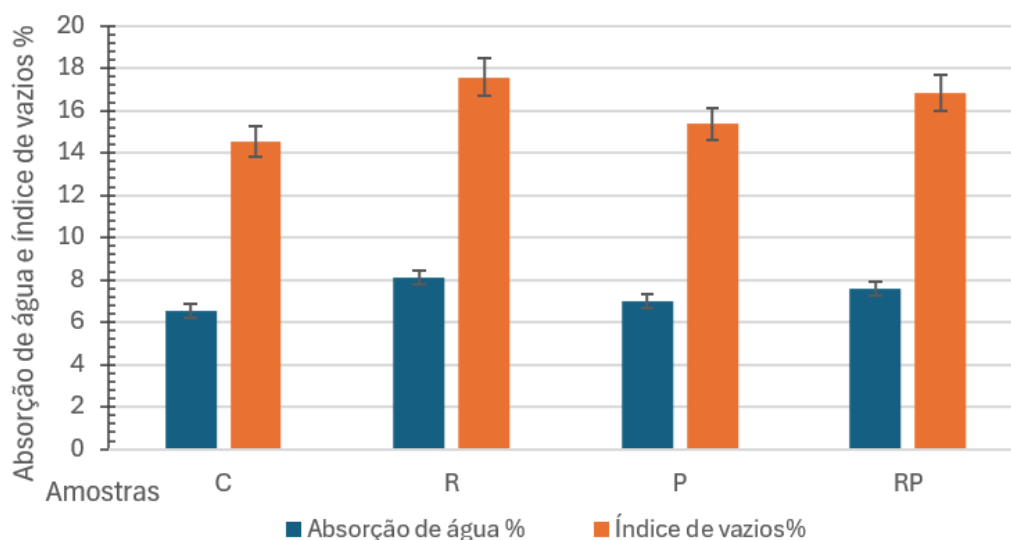
Os dados evidenciados nas Tabelas 22, 23 e 24 e nas Figuras 33 e 34 indicam que a amostra R obteve a maior porcentagem de absorção de água e índice de vazios de 8,1% e 17,57%, respectivamente. Os corpos de prova P e RP tiveram resultados próximos para absorção de água e índice de vazios, sendo o da amostra P de 7% e 15,37%, respectivamente, e o da amostra RP de 7,6% e 16,83%, respectivamente. A amostra de controle obteve resultados inferiores para absorção de água e índice de vazios, consistindo em 6,53% e 14,53%, respectivamente. Essas porcentagens se refletiram nos resultados da massa específica seca, que, para a amostra C, foram de 2,228 g/cm³, enquanto que, para as amostras R, P e RP, foram de 2,167 g/cm³, 2,194 g/cm³ e 2,211 g/cm³, respectivamente.

Pacewska *et al.* (2002a) observaram que o REC tornou a microestrutura do concreto mais compacta e, assim, aumentou a sua densidade. Blazy *et al.* (2021) citaram que, em estudos de diversos autores, a absorção de água com o acréscimo de fibras de polipropileno no concreto tanto pode decrescer, devido à redução da microfissuração na matriz, como pode aumentar, devido a uma pior trabalhabilidade e, conseqüentemente, um pior adensamento. Logo, fica claro que a dosagem das fibras tem grande influência nesses resultados. Costa *et al.* (2023) estudaram que as amostras com substituição de REC com dosagens de 2%, 5%, 10% e 20% tiveram

uma maior absorção de água e índice de vazios, apresentando massas específicas menores que as do controle. Asgarian *et al.* (2023) testemunharam que uma dosagem de 1% de fibras de polipropileno no concreto levou à formação de mais áreas porosas, promovendo maior absorção de água e, conseqüentemente, menor compactação da matriz.

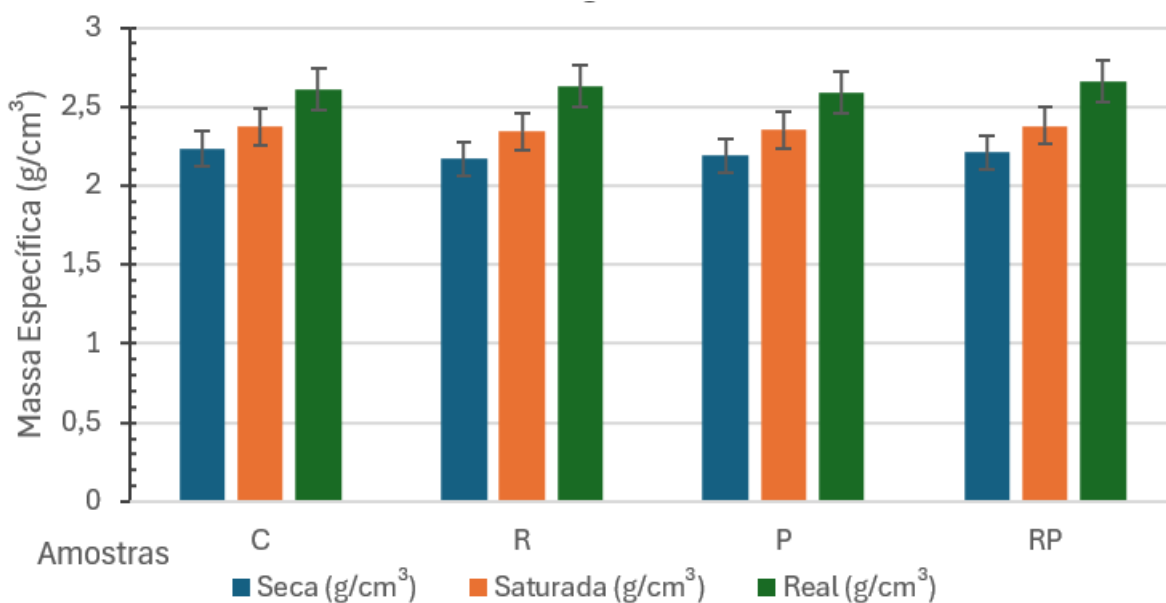
A massa específica real das amostras teve resultados próximos para todas elas, sendo 2,61g/cm³ para a amostra C, 2,64 g/cm³ para a amostra R (1,14% superior à C), 2,59 g/cm³ para a dosagem P (0,76% inferior à C), e 2,66 g/cm³ para os corpos de prova RP (1,91% superior aos da C), o que demonstra que, excluindo-se os vazios, as matrizes dos materiais são similares. Os exemplares com o REC apresentaram uma maior massa específica real que as amostras de controle e as amostras somente com o acréscimo de fibras de polipropileno. Isso pode ser explicado por uma provável redução da porosidade, ocasionada pela adição do REC, e uma conseqüente matriz cimentícia mais densa.

Figura 33: Absorção de água e índice de vazios



Fonte: O autor

Figura 34: Massa específica seca, saturada e real



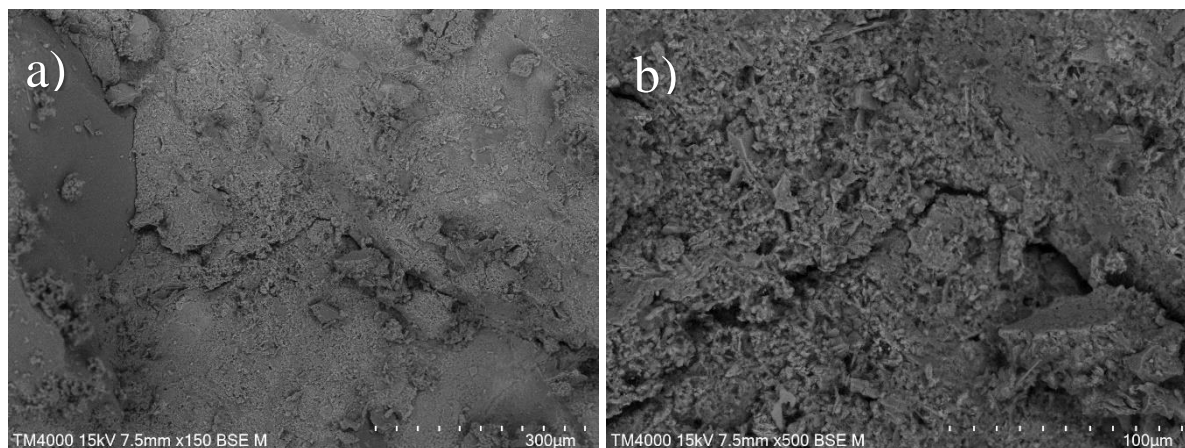
Fonte: O autor

5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

As imagens geradas pela microscopia eletrônica de varredura forneceram resultados importantes no que diz respeito à morfologia das partículas, microestrutura do concreto, porosidade, zona de transição e interação entre os elementos.

Na Figura 35 da amostra de controle C, é possível observar claramente a zona de transição entre o agregado graúdo e a matriz cimentícia, bem como as microfissuras originadas desse ponto. De fato, a zona de transição é considerada o ponto mais frágil do concreto, em razão da dificuldade na aderência da pasta com agregado graúdo. São explícitas na imagem a presença de partículas soltas na superfície, que apresenta aspecto rugoso.

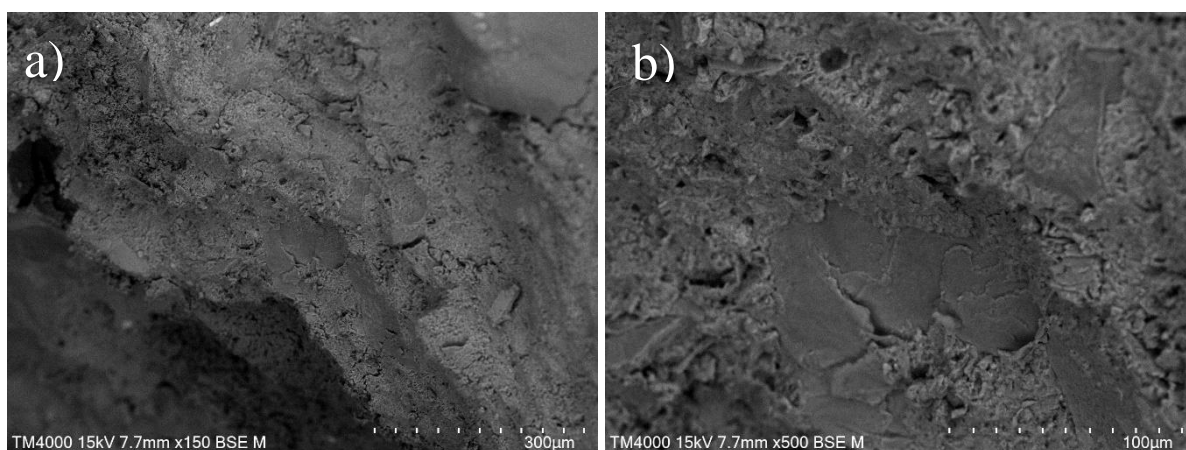
Figura 35: Amostra da microestrutura do concreto da dosagem C: a) vista geral com ampliação de 150 X; b) vista com ampliação de 500 X.



Fonte: O autor

A Figura 36, que exibe a amostra R, evidencia um aspecto mais poroso da matriz cimentícia que o da dosagem C, algo que também foi verificado no ensaio de absorção de água e índice de vazios. No entanto, pode-se observar um teor reduzido de fissuras, o que pode justificar que essa amostra teve resistências à compressão axial e tração superiores aos resultados do concreto de controle.

Figura 36: Amostra da microestrutura do concreto da dosagem R: a) vista geral com ampliação de 150 X; b) vista com ampliação de 500 X.

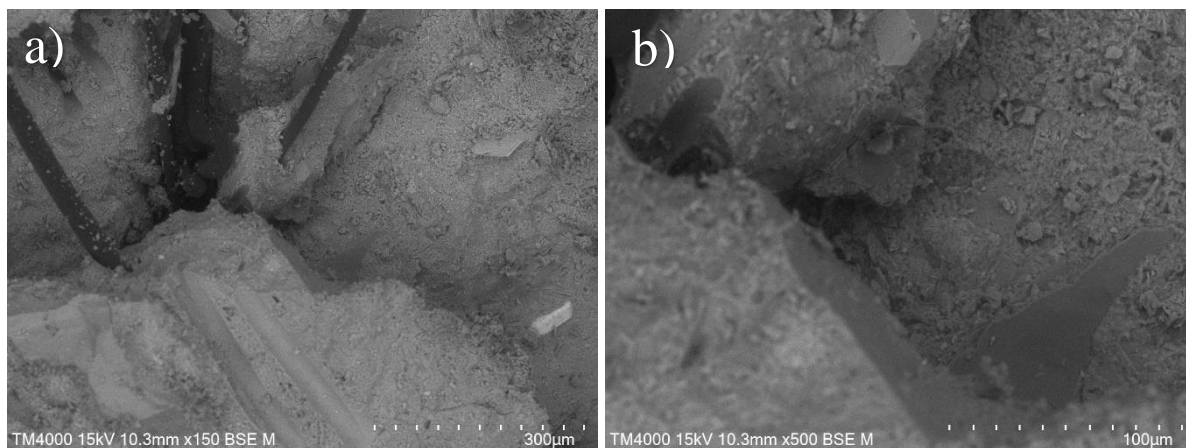


Fonte: O autor

Na Figura 37 (referente à dosagem P), é visível a presença das fibras de polipropileno dispersas na matriz cimentícia. Foi observado um número reduzido de fissuras nessa amostra quando comparada com o controle. Asgarian *et al.* (2023) também

observaram essa ação das fibras de PP no controle das fissuras. A adição da fibra favorece, pois, o aumento da resistência à tração ao atuar na zona de transição entre a pasta de cimento com o agregado graúdo. Essa amostra apresentou tanto resistência à compressão axial quanto à tração superiores ao controle.

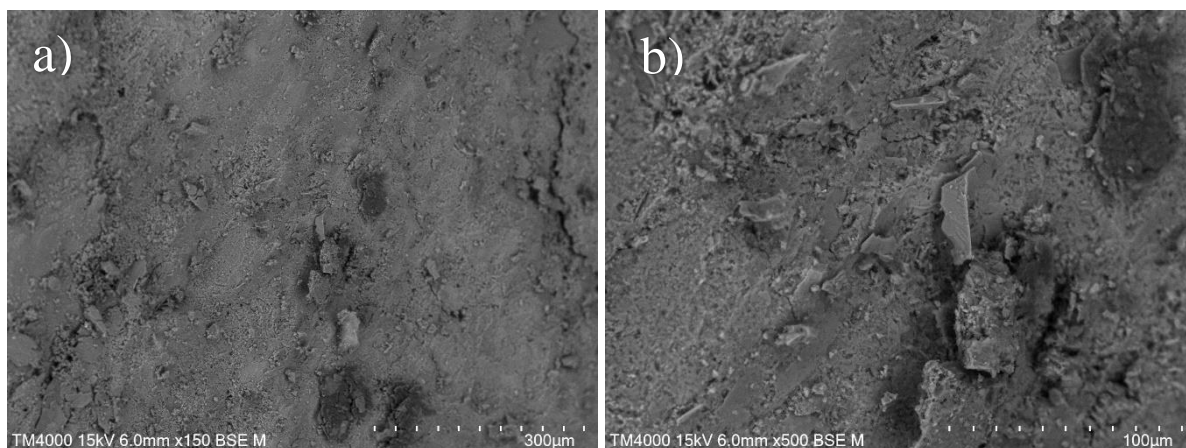
Figura 37: Amostra da microestrutura do concreto da dosagem P: a) vista geral com ampliação de 150 X; b) vista com ampliação de 500 X.



Fonte: O autor

Na Figura 38 - amostra RP - igualmente foi possível observar um número reduzido de fissuras e menos partículas soltas quando comparada com o controle. Essa amostra apresentou o maior resultado de resistência à compressão axial comparativamente às outras dosagens.

Figura 38: Amostra da microestrutura do concreto da dosagem RP: a) vista geral com ampliação de 150 X; b) vista com ampliação de 500 X.



Fonte: O autor

7 CONCLUSÃO

Os concretos desenvolvidos neste estudo demonstraram a viabilidade tanto da substituição parcial do resíduo de catalisador de petróleo, em relação à massa total de cimento, quanto da adição de fibras de polipropileno à matriz cimentícia. Os resultados obtidos, por meio dos experimentos, apresentaram melhorias de desempenho principalmente quanto à resistência mecânica.

O estudo da reologia dos concretos no estado fresco foi de extrema relevância, pois demonstrou que tanto a substituição parcial do cimento Portland pelo REC quanto a adição de fibras polipropileno acarretaram perda na trabalhabilidade das misturas. A porosidade das partículas do resíduo de catalisador de petróleo, observada por meio do MEV, pode ter ocasionado uma maior absorção de água nas amostras R e RP, reduzindo, assim, a fluidez do concreto. Dessa forma, o uso de aditivo superplastificante se mostrou fundamental para garantir a trabalhabilidade sem comprometer a resistência do concreto com um aumento na relação água/cimento.

Os concretos com teor de 10% de substituição de REC (amostra R), em relação à massa total de cimento, com adição de 1% de fibras de polipropileno, em relação à massa do aglomerante (amostra P), e com teor de 10% de substituição parcial de cimento pelo REC mais adição de 1% de fibras de polipropileno (amostra RP) mostraram-se superiores ao controle (amostra C) tanto nos ensaios de resistência à compressão axial quanto no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Nos ensaios de resistência à compressão, foram observados aumentos da ordem de 4,09% (36,83 MPa) para dosagem R, 7,2% (37,93 MPa) amostra P e 23,37% (43,65 MPa) na dosagem RP. No tocante aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, os concretos com adição de 1% fibras e os concretos com substituição de cimento pelo REC apresentaram resultados superiores aos do controle, com aumentos da ordem de 11,37% (3,30 MPa) a 13,45% (3,36 MPa). Em relação à amostra C, os resultados da amostra RP foram 9,34% superiores. Em relação à amostra R, os resultados da amostra RP foram 1,82% inferiores, mesmo com o acréscimo de 1% de PP. Isso pode ser atribuído ao fato de que as fibras não se distribuem de forma homogênea na mistura, podendo gerar amostras com uma maior

concentração de fibras que outras, conforme observado também nas imagens do MEV. Entretanto, os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral estão em conformidade com a literatura.

As amostras com substituição parcial do REC, classificadas como R e RP, assim como o exemplar com adição de fibras de polipropileno, classificado como P, apresentaram um grau de porosidade e índice de vazios maior do que o da amostra de controle. Essa porosidade pode ser verificada nas imagens do MEV. Os resultados da massa específica real de todas as amostras ficaram bem próximos, o que demonstra que, em se excluindo os vazios, as matrizes dos materiais são similares.

A dosagem C obteve a maior média para o módulo de elasticidade dinâmico, de 33,06 GPa. As dosagens R, P e RP tiveram resultados de 31,27 GPa, 32,25 GPa e 32,27 GPa, isto é, 5,41%, 2,45% e 2,38%, respectivamente, inferiores à média dos resultados da amostra de controle. No entanto, os resultados de todas as amostras se encontram em uma faixa de até 37% superiores aos valores estimados.

O REC não pôde ser considerado um material pozolânico pelo ensaio de determinação de índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias. É possível que esse resultado tenha se dado porque o resíduo não foi submetido à moagem e ao ensaio de finura na peneira de 325 #. O fato de o REC possuir uma proporção de até 60% de sílica evidencia potencial de pozolanicidade. Conforme mencionado na literatura, substituições superiores a 20% de REC pelo cimento acarretaram perda de resistência pelo esgotamento da portlandita nas fases de hidratação e cura. Desse modo, embora o REC não tenha sido considerado um material pozolânico neste estudo, a sua utilização pode ser considerada tecnicamente factível, além de apresentar um grande potencial de ganho econômico e ambiental.

A incorporação de resíduo de catalisador de petróleo no concreto, associado à adição de fibra de polipropileno, demonstra viabilidade técnica, ambiental e econômica, ao reduzir custos, fomentar a economia circular e mitigar impactos ambientais. Essa abordagem contribui para a redução das emissões de CO₂, ao mesmo tempo em que

promove o reaproveitamento de resíduos industriais e a diminuição do consumo de recursos naturais, fortalecendo a sustentabilidade.

8 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Aplicar outros métodos de ensaios para a avaliação da pozolanicidade do REC, como o método de Luxán ou o método de Chapelle modificado;
- Realizar a moagem e o ensaio de finura na peneira de 325 # no REC;
- Desenvolver um estudo de viabilidade econômica da substituição parcial do cimento pelo REC no concreto;
- Utilizar um aditivo hiperplastificante nas amostras de concreto com fibras de polipropileno, ou PP mais REC;
- Verificar a influência do REC e da PP na resistividade do concreto.
- Investigar a liberação de calor durante o processo de cura dos concretos com REC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of concrete practice**. Part I. 1973

AFONSO, J. C., PONTES, A. B., SANTOS, E. S., et al., “**Recuperação de Elementos de Zeólitas Desativadas**”. *Quim. Nova*, Vol. 27, No. 2, 315-319, 2004.

ALMEIDA, Marys Lene B. **Espumas Poliméricas Contendo Resíduo de Catalisador da Indústria de Petróleo como Adsorventes para Contaminantes Orgânicos Aquosos**. 156 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

ALMEIDA, Marys Lene B.; AYRES, Eliane; MOURA, Flávia Cristina C.; ORÉFICE, Rodrigo L. **Polyurethane foams containing residues of petroleum industry catalysts as recoverable pH-sensitive sorbents for aqueous pesticides**. *Journal of Hazardous Materials*, 346, p. 285 – 295, 2018.

ALMEIDA, Marys Lene Braga; AYRES, Eliane; LIBÂNIO, Marcelo; GAMARANO, Daniel de Souza; RIBEIRO, Carmen Couto; ORÉFICE, Rodrigo Lambert. **Bio-Based Polyurethane Foams with Enriched Surfaces of Petroleum Catalyst Residues as Adsorbents of Organic Pollutants in Aqueous Solutions**. *Journal of Polymers and the Environment*, 28, p. 2511 – 2512, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, West Conshohocken. **ASTM C267 / C267-20**: Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes, 2020, 7p.

ASSIM, Nifolar; BADIEI, Marzieh; TORKASHVAND, Mohammad; MOHAMMAD, Masita; ALGHOUL, Mohammad A.; GASAYMEH Shawkat S.; SOPIAN, Kamaruzzaman. **Wastes from the petroleum industries as sustainable resource materials in construction sectors: Opportunities, limitations, and directions**. *Journal of Cleaner Production*, v. 284, 125459, 2021.

ASGARIAN, Atena; ROSHAN, Naeim; GHALEHNOVI, Mansour; **The Strength, Microstructure, and ecological assessment of concrete mix incorporating waste**

glass powder and polypropylene fiber. Construction and Building Materials, v. 371, 130726, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 5732:** Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, 2018.

____. **NBR 5733:** Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 2018.

____. **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

____. **NBR 5739:** Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

____. **NBR 5751:** Materiais pozolânicos: Determinação de atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro 2015.

____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro 2014.

____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro 2022.

____. **NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro 2015.

____. **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro 2019.

____. **NBR 7222:** Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro 2011.

____. **NBR 8522 - 1:** Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro 2021.

____. **NBR 8522 - 2**: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Rio de Janeiro 2021.

____. **NBR 9204**: Concreto endurecido - Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro 2012.

____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro 2009.

____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro 2012.

____. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação, Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR 11172**: Aglomerantes de origem mineral - Terminologia. Rio de Janeiro 1990.

____. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos –Requisitos, Rio de Janeiro, 2014.

____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação, Rio de Janeiro, 2022.

____. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto: parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

____. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. 2000.

_____. **NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 2006.

_____. **NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NM 76**: Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). 1996.

_____. **NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção**, 1.5ª ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2014

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2ed. London: Elsevier, 1990.

BLAZY, J.; BLAZY, R. **Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces**. Case Studies in Construction Materials, v.14, e00549, 2021.

CALLISTER Jr. W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 9ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CANEVAROLO Jr., S.V. **Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ed São Carlos, SP: Artliber 2006.

CHEN, J.; CHOW, C. L.; LAU, D. **Developing green and sustainable concrete in integrating with different urban wastes**. Journal of Cleaner Production, v. 368, 133057, 2022.

CHOI, Y.; YUAN, Robert L. **Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC**. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 1587– 1591, 2005.

Concrete Monofilament Microfibers. **Master builders solutions, 2024**. Disponível em: <https://www.master-builders-solutions.com/en-us/products/fiber-reinforced-concrete/monofilament-microfibers>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024

CORDEIRO, Guilherme Chagas. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 445 f. Tese (Doutorado) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

COSTA, Tiago Luiz da. **Desempenho de Materiais Cimentícios Produzidos com Polietilenoglicol e Resíduo de Catalisador da Indústria de Petróleo**. 112 f. Dissertação (Mestrado) – UFMG, Belo Horizonte, 2022.

COSTA, Tiago Luiz da. **Sustainable concrete produced with petroleum catalyst waste and polyethylene glycol as a self-healing agent**. RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental, ISSN: 1981-982X, 2023

Craqueamento Catalítico Fluidizado. **Linde Portugal, 2024**. Disponível em <https://www.linde-gas.pt/shop/pt/pt-ig/craqueamento-catalitico-fluido>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024

CUNHA, Armando Lucas Cherem da. **Caracterização e Estudo de Aplicação de Rejeito Catalítico de Unidade FCC como Material Pozolânico**. 110 f. Tese (Doutorado) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

CYR M., TAGNIT-HAMOU A. **Particle size distribution of fine powders by LASER diffraction spectrometry. Case of cementitious materials.** Materials and Structures/Matériaux et Constructions Vol. 34, pp 342-350, July 2001

DE ANDRADE, Kathleen Brito. **Estudo dos efeitos da cinza da casca de arroz e das fibras de polipropileno em argamassas.** 108 f. Dissertação (Mestrado) - Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2019.

DE FARIA, E. F. **Concretos autoadensáveis de alto desempenho com catalisador residual do craqueamento catalítico fluido (Ecat) de refinarias de petróleo.** 222 p. Tese (Doutorado). COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro. 2012.

FAJARDO, B. F. **Aproveitamento de dois resíduos industriais – pó do corte do granito e catalisador do craqueamento do petróleo – na fabricação de elementos construtivos estruturais.** 312 p. Dissertação (Mestrado). COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro. 2005.

FAY, L., 2006, **Aproveitamento de Resíduos Siderúrgicos para a Fabricação de Elementos Construtivos para Alvenarias na Construção Civil,** 233 p. Tese (Doutorado). COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro. 2006.

Fibrillated Microfibers. **Master builders solutions, 2024.** Disponível em: <https://www.master-builders-solutions.com/en-us/products/fiber-reinforced-concrete/fibrillated-microfibers>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024

Ficha de Informação de Segurança de Catalisador de Equilíbrio, FÁBRICA CARIOCA DE CATALISADORES, Disponível em: https://www.fccsa.com.br/media/filer_public/01/4d/014dfbdb-b372-4a23-a4a3-5124372015a7/ecat_port_2024.pdf. Acesso em 04 agosto de 2024.

FIGUEIREDO, Enio Pazini; RÉGO, João Henrique da Silva. Materiais e produtos poliméricos. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** vol. 2. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

GENCEL, O; BROSTOW, W.; ÖZEL, C. **Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres**. Materials Research Innovations, DOI: 10.1179/143307511X13018917925900, 2011.

GONÇALVES, Leonardo Marques. **Desenvolvimento de compósitos de polipropileno (PP) com bagaço de malte e argila organofílica**, 72 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Nova Friburgo, 2021.

GONG, J.; MA, Y; FU, J.; HU, J.; OUYANG X.; ZHANG, Z.;. **Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: A review**. Composites Part B, 241, 109995, 2022.

GUILHERMINO, R. L. **Estudo de Laboratório de um Resíduo Catalisador de Equilíbrio para utilização em Alvenaria na Construção Civil**. 152 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro. 2008.

KAKOOEI, S. AKIL, H. Md, JAMSHIDI, M., ROUHI J. **The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures**. Construction and building Materials, v. 27, p. 73– 77, 2012.

KIM, Y.; HU J., LEE, S.; YOU, B. **Mechanical Properties of Fiber Reinforced Lightweight Concrete Containing Surfactant**. Hindawi Publishing Corporation - Advances in Civil Engineering, id.549642, doi:10.1155/2010/549642, 2010.

LATIFI, Mujeebul Rahman; BIRICIK, Oznur; AGHABAGLOU, Ali Mardani. **Effect of the addition of polypropylene fiber on concrete properties**. Journal of Adhesion Science and Technology, v.36, No. 4, 345–369, 2022.

LUCENA, Júlio César Tavares. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. 83f. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

MACCAFERRI. **Fibromac 6, 12, 24 - fibras para reforço de concreto: características técnicas** 2024. Disponível em: <https://www.maccaferri.com/br/produtos/fibromac/>. Acesso em: 15 de agosto de 2024

MADALENA Riccardo, ROBERTS Jennifer J., HAMILTON Andrea. **Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements.** 10f. In Journal of Cleaner production 186 (2018) 933-942.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 1ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEMON, M.J.; JHATIAL, A. A.; MURTAZ, A.; RAZA, M. S.; PHULPOTO, K.B. **Production of eco-friendly concrete incorporating rice husk ash and polypropylene fibres.** Environmental Science and Pollution Research, v. 28, p. 39168–39184 , 2021.

MOGRE, RAJENDRA P.; Dr. PARBAT, D. K. **Behaviour of Polypropylene Fibre Reinforced Concrete with Artificial Sand.** International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES), v. 1, n. 2, p. 37–40, 2012.

MONZÓ, J.; PAYÁ, M. BORRACHERO, V. **Uso de un catalisador gastado de base zeolítica para la mejora de cementos y hormigones (Utilization of a zeolitic spent catalyst for enhancement of cements and concrete),** patent application P 9 700 999, 1997.

NEVES, R.; VICENTE, C.; CASTELA, A.; MONTEMOR, M. F. **Durability performance of concrete incorporating spent fluid cracking catalyst.** Cement & Concrete Composites, 55, p. 308 –214, 2015.

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

TAYLOR, H. F. W.. **Cement Chemistry.** 2. ed. London: Thomastelford, 1997.

TORRES, Sarah Martins. **Aplicação da difração de raios x na análise do potencial pozolânico da cinza do bagaço da cana-de-açúcar para adição ao cimento**

portland. 101f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

PACEWSKA, B.; WILIŃSKA, I.; KUBISSA, J. **Use of spent catalyst from catalytic cracking in fluidized bed as a new concrete additive**, *Thermochimica Acta* v. 322 p. 175–181, 1998.

PACEWSKA, B.; BUKOWSKA, M.; WILIŃSKA, I.; SWAT, M. **Modification of the properties of concrete by a new pozzolan - A waste catalyst from the catalytic process in a fluidized bed**. *Cement and Concrete Research*, v. 32, n. 1, p. 145–152, 2002a.

PACEWSKA, B.; WILIŃSKA, I.; BUKOWSKA, M. **Hydration of cement slurry in the presence of spent cracking catalyst**. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 60, n. 1, p. 71–78, 2002b.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V. **Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R): An excellent mineral by-product for improving early-strength development of cement mixtures**. *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 11, p. 1773–1779, 1999.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V. **Physical, chemical and mechanical properties of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) blended cements**. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 1, p. 57–61, 2001.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V. **Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes**. *Cement and Concrete Research*, v. 33, p. 603–609, 2003.

RIBEIRO, C. C., PINTO, J. S., SATARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 4. ed. Editora UFMG, 2013. 1 v. 212 p.

RODRIGUEZ, E.D.; BERNAL, S.A.; PROVIS, J.L.; GEHMAN, J.D.; MONZÓ, J.M.; Payá, J.; BORRACHERO, M.V. **Geopolymers based on spent catalyst residue from a fluid catalytic cracking (FCC) process**. *Fuel*. v.109, p.493-502, 2013.

RUDŽIONIS, Ž.; GRIGALIŪNAS, P.; VAIČIUKYNIENĖ, D. **The Influence of Zeolitic Spent Refinery Admixture on the Rheological and Technological Properties of Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete**. *World Academy of Science, Engineering and Technology - International Journal of Civil and Environmental Engineering*, v.8, n.1, 2014.

SILVA, Francisco Gabriel Santos. **Estudo do uso de resíduo catalítico do refino de petróleo na construção civil**. 215 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, 2015.

SILVA-JÚNIOR, Wanderley Ferreira da. **Avaliação da gestão ambiental de uma Refinaria de Petróleo para as perdas de catalisador de craqueamento**. 73 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Medicina da Bahia, Salvador. 2010.

SU, N.; FANG, H. Y.; CHEN, Z. H.; LIU, F. S. **Reuse of waste catalysts from petrochemical industries for cement substitution**. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 11, p. 1773–1783, 2000

SU, N.; CHEN, Z. H.; FANG, H. Y. **Reuse of spent catalyst as fine aggregate in cement mortar**. *Cement and Concrete Composites*, v. 23, n. 1, p. 111–118, 2001.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, **Study of Selected Petroleum Refining Residuals** - Industry Study, U.S. E.P.A. - Office of Solid Waste, Washington, DC, 1996.

_____, **Petroleum Refining Listing Determination Proposed Rule Response to Comment Document – Part III**, U.S. E.P.A. - Office of Solid Waste, Washington, DC, 1998.

____, **Background Document: Clarifying the Scope of Petroleum Hazardous Waste Listings: Supplemental Information Regarding Petroleum Hydroprocessing Units**, U.S. E.P.A. - Office of Solid Waste, Washington, DC, 2002.

WILL, Ramon. **Incorporação do resíduo catalítico do refino de petróleo em compósitos cimentícios**. 122f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São Carlos - UNIFESP, São Carlos, 2022.

KRENCHER, H., **Fiber Reinforced Concrete**, ACI SP-44, pp. 45-77, 1974.

ZORNOZA, E.; GARCÉS, P.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.V.; PAYÁ, J. **Accelerated carbonation of cement pastes partially substituted with fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R)**. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 2, p. 134–138, 2009a

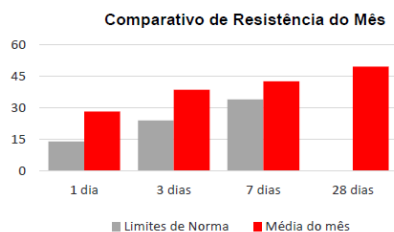
ZORNOZA, E.; GARCÉS, P.; PAYÁ, J.; CLIMENT, M.A. **Improvement of the chloride ingress resistance of OPC mortars by using spent cracking catalyst**. *Cement and Concrete Research*, v. 39, n. 2, p. 126–139, 2009b

APÊNDICE A – Exigências físicas, mecânicas e químicas- InterCement



Mapa de Qualidade

IJACI		CIMENTO CP V ARI ESTRUTURA GRANEL								Abril 2024				
		EXIGÊNCIAS FÍSICAS E MECÂNICAS						EXIGÊNCIAS QUÍMICAS (%)						
EXIGÊNCIA NBR 16697	Média	FINURA			TEMPO DE PEGA (min)		RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)				MgO	SO3	Perda ao Fogo	Resíduo Insolúvel (%)
		BLAINE (cm ² /g)	# 200 (%)	# 325 (%)	INICIO	FIM	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias				
		-	≤ 6,0	-	≥ 60	≤ 600	≥ 14	≥ 24	≥ 34	-	≤ 6,5	≤ 4,5	≤ 6,5	-
		5270	0,20	1,30	193	252	28,3	38,7	42,7	49,8	2,7	3,8	5,1	-



Norma: ABNT NBR - 16697
Responsável Técnico: Ana Livia Caneschi

