



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS
GERAIS – CAMPUS ARAXÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL

GABRIELA BRENDA DE LIMA RIBEIRO

**CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (CAD) COM UTILIZAÇÃO DE
REJEITO MAGNÉTICO DE MINÉRIO FOSFÁTICO**

ARAXÁ/MG
Junho, 2022

GABRIELA BRENDA DE LIMA RIBEIRO

**CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (CAD) COM UTILIZAÇÃO DE
REJEITO MAGNÉTICO DE MINÉRIO FOSFÁTICO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Campus Araxá como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marcela Maira Nascimento de Souza Soares

Coorientadores: Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra

Prof. Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez

Linha de pesquisa: Processamento de Minérios e Rejeitos

ARAXÁ/MG
Junho, 2022

R484c Ribeiro, Gabriela Brenda de Lima
Concreto de alto desempenho (CAD) com utilização de rejeito magnético de minério fosfático / Gabriela Brenda de Lima Ribeiro. – 2022.
73 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Marcela Maira Nascimento de Souza Soares.
Coorientadores: Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra.
Prof. Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2022.
Bibliografia.

1. Mineração – Impactos ambientais – Teses. 2. Rejeitos de Mineração – Teses. 3. Concreto – Teses. 4. Agregado Miúdo – Teses. I. Soares, Marcela Maira Nascimento de Souza. II. Bezerra, Augusto Cesar da Silva. III. Gimenez, Alexander Martin Silveira. IV. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. V. Título.

CDU 622:502.131.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

GABRIELA BRENDA DE LIMA RIBEIRO

CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (CAD) COM UTILIZAÇÃO DE REJEITO MAGNÉTICO DE MINÉRIO FOSFÁTICO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Campus Araxá como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia de Minas.

Data de aprovação: 27 / 06 / 2022

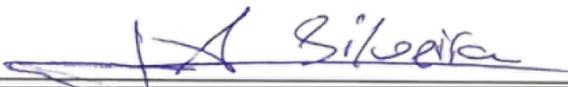
Banca Examinadora:



Prof.ª. Dr.ª. Marcela Maira Nascimento de Souza Soares - CEFET-MG



Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra - CEFET-MG



Prof. Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez - CEFET-MG



Prof.ª. Dr.ª. Dayana Cristina Silva Garcia - UFMG



Prof.ª. Dr.ª. Flávia Spitale Jacques Poggiali - CEFET-MG

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, gratidão ao meu pai Maciel e à minha mãe Teresinha por toda luta para me trazerem até aqui, à minha irmã Jussara pelo incentivo para continuar trilhando esse caminho.

Aos professores da Universidade Federal de Viçosa – Campus Rio Paranaíba por serem parte fundamental da minha formação acadêmica, em especial ao professor Lucas Martins Guimarães pelo auxílio no desenvolvimento do pré-projeto de pesquisa para ingresso no mestrado.

Aos professores do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) que tive a honra de conhecer e muito engradeceram minha participação no programa.

À professora Marcela pela orientação, confiança, pelos ensinamentos e por todo apoio permitindo que este sonho pudesse se concretizar.

Aos professores coorientadores Alexander e Augusto pela disponibilidade em contribuir para o aprimoramento desta pesquisa.

Às professoras Dayana e Flávia por aceitarem o convite de compor a banca avaliadora e pelas valiosas contribuições.

Ao CEFET-MG – Campus Araxá pela concessão da bolsa de estudos do curso de mestrado e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas (PPGMIN) pela oportunidade e espaço de trocas preciosas de conhecimento.

Aos Laboratórios de Tratamento de Minérios e de Solos do CEFET-MG – Campus Araxá, em especial aos técnicos João Victor e Mariana e ao colaborador Ricardo. Ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Tecnologia dos Materiais Sustentáveis do CEFET-MG – Campus Nova Suíça pelo suporte na realização de ensaios sob orientação do professor Augusto.

Ao meu amigo Luís que, com sua visão e experiência acadêmica, tanto contribuiu com sugestões de melhorias para a redação deste trabalho.

Por fim, em especial, quero agradecer ao meu namorado Patrick, que esteve sempre ao meu lado me incentivando e apoiando com carinho e compreensão desde o ingresso no programa. Muito obrigada a todos!

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”.

John F. Kennedy (1917 - 1963)

RESUMO

A crescente quantidade de resíduos gerados nas atividades de mineração tem levantado o interesse de diversos pesquisadores em estudar maneiras adequadas de destinação desses materiais. Ao mesmo tempo, a busca por materiais sustentáveis fornece motivação para utilização de rejeito magnético como agregado miúdo em concreto. Este estudo desenvolveu três dosagens de concreto de alto desempenho (CAD), caracterizado por apresentar alta resistência à compressão e elevada durabilidade – um concreto referência e dois com substituição parcial do agregado miúdo, nas porcentagens de 50 e 100% da areia média, por rejeito magnético proveniente do processamento de rocha fosfática. Almejou-se melhorar a estrutura de poros do concreto através da otimização do empacotamento dos materiais granulares, a partir do modelo de Andreasen com auxílio do software *Elkem Materials Mixture Analyzer* (EMMA) e incorporação de adição mineral (sílica ativa), bem como adequar a trabalhabilidade com uso de aditivo químico (superplastificante). Foi realizada a caracterização física e química dos componentes do concreto, e a avaliação do comportamento da consistência no estado fresco através de ensaios de abatimento do tronco de cone. As propriedades dos concretos produzidos no estado endurecido foram avaliadas utilizando os ensaios de resistência mecânica à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água para inferir condições de permeabilidade, massa específica e durabilidade frente ao ataque por ácido sulfúrico. A resistência à compressão foi superior à 60 MPa para todos os concretos e, assim como o módulo de elasticidade, aumentou com o aumento da porcentagem da substituição proposta, sendo a melhor performance obtida com a substituição total. Todos os concretos apresentaram boa durabilidade, uma vez que absorção de água para todos foi inferior a 10% e a substituição proposta reduziu a vulnerabilidade do concreto ao ataque ácido. Quanto à massa específica, todos os concretos foram classificados como normal. A metodologia de dosagem aplicada foi eficaz, produzindo concretos de alto desempenho com incorporação de rejeito magnético.

Palavras-chave: Concreto de alto desempenho, Rejeito magnético, Agregado miúdo, Empacotamento de partículas.

ABSTRACT

The increasing amount of tailings generated in mining activities has raised the interest of several researchers in providing an appropriate destination for them. At the same time, the pursuit of sustainable materials provides motivation for using magnetic tailings as fine aggregate in concrete. This study developed three dosages of high-performance concrete (HPC), a type of concrete that has high compressive strength and high durability – one reference concrete and two concretes with partial replacement of the fine aggregate, in the percentages of 50 and 100% of the medium sand by magnetic tailings derived from the phosphate rock beneficiation process. The aim was to improve the pore structure of concrete by optimizing the particle packing of granular materials, using the Andreasen model with the aid of the Elkem Materials Mixture Analyzer (EMMA) and incorporating mineral addition (silica fume), as well as adjusting the workability using a chemical additive (superplasticizer). The physical and chemical characterization of the concrete components were carried out, and the consistency behavior in the fresh state was assessed through slump tests. The properties of the produced concretes in the hardened state were evaluated using the tests: compressive strength, modulus of elasticity, water absorption to infer permeability conditions, specific mass and durability against sulfuric acid attack. The compressive strength was greater than 60 MPa for all the concretes, and like the elastic modulus, it increased with the increase in the proposed replacement percentage; the best performance was obtained with the total replacement. All concretes had good durability, since the water absorption for all of them was less than 10% and the proposed replacement reduced the vulnerability of the concrete to acid attack. Regarding the specific mass, all concretes were classified as normal. The concrete dosage methodology applied was effective, producing high-performance concrete with the incorporation of magnetic tailings.

Keywords: High-performance concrete, Magnetic tailings, Fine aggregate, Particle packing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática (a) da flocculação de partículas de cimento hidratadas antes da adição do aditivo redutor de água e (b) a dispersão após a adição de plastificante....	26
Figura 2 – Fluxograma explicativo da metodologia empregada na pesquisa.....	33
Figura 3 – Amostra de rejeito magnético.	34
Figura 4 – Areia média	35
Figura 5 – Areia grossa.....	35
Figura 6 – Brita 0.....	36
Figura 7 – Cimento CPV.	36
Figura 8 – Sílica ativa.....	37
Figura 9 – Superplastificante.....	38
Figura 10 – Pré homogeneização da amostra de rejeito magnético.	39
Figura 11 – Pilha alongada	40
Figura 12 – Série de peneiras utilizada para a realização do ensaio de composição granulométrica.	41
Figura 13 – Concreto homogeneizado em betoneira de eixo inclinado.	43
Figura 14 – Ensaio de abatimento do tronco de cone.....	44
Figura 15 – Moldagem de corpo de prova.....	44
Figura 16 – Corpos de prova (a) desmoldados e (b) em cura úmida.....	45
Figura 17 – Equipamento universal de ensaios servo controlado.	46
Figura 18 – Curva granulométrica do rejeito magnético.....	48
Figura 19 – Curva granulométrica da areia média.	49
Figura 20 – Curva granulométrica da areia grossa.....	50
Figura 21 – Curva granulométrica do agregado graúdo.....	51
Figura 22 – Curva de empacotamento dos materiais granulares do concreto referência.	53
Figura 23 – Resistência à compressão dos concretos.....	55
Figura 24 – Módulo de elasticidade dos concretos.....	56
Figura 25 – Massa específica, absorção de água e índice de vazios dos concretos.....	57
Figura 26 – Perda de massa dos concretos após o ataque ácido.....	58
Figura 27 – Concreto referência (a) antes e (b) depois do ataque ácido.	59
Figura 28 – Concreto com substituição de 50% de areia média por rejeito magnético (a) antes e (b) depois do ataque ácido.	59

Figura 29 – Concreto com substituição de 100% de areia média por rejeito magnético (a) antes e (b) depois do ataque ácido. 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais compostos do cimento Portland.....	22
Tabela 2 – Classe de consistência do concreto e aplicações típicas.....	29
Tabela 3 – Artigos publicados em 2020 relacionados à substituição dos compostos do concreto de alto desempenho.	31
Tabela 4 – Materiais alternativos utilizados em substituição ao agregado miúdo na composição de CAD.....	31
Tabela 5 – Características físicas e químicas da sílica ativa.	38
Tabela 6 – Análises química da amostra de rejeito magnético e replicata (REP) em porcentagem.....	47
Tabela 7 – Caracterização do rejeito magnético.....	48
Tabela 8 – Caracterização da areia média.	49
Tabela 9 – Caracterização da areia grossa.....	50
Tabela 10 – Caracterização do agregado graúdo.....	51
Tabela 11 – Composição dos concretos.	53
Tabela 12 – Resultados do abatimento do tronco de cone.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – relação água/cimento

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

C – concreto normal

CAD – concreto de alto desempenho

CAR – concreto de alta resistência

CC – concreto convencional

CD – concreto pesado ou denso

CL – concreto leve

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

cm – centímetros

C-S-H – silicato de cálcio hidratado

CP – corpo-de-prova

CPV – ARI – cimento Portland de alta resistência inicial

CUAD – concreto de ultra-alto desempenho

DRX - difração de raios X

EMMA – Elkem Materials Mixture Analyzer

f_{ck} – resistência característica do concreto

GPa – Giga Pascal

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

m^3 – metro cúbico

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MF – módulo de finura

MG – Minas Gerais

mm – milímetros

MPa – Mega Pascal

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

NM – Norma Mercosul

ZT – zona de transição

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	13
1.1 – Justificativa.....	14
1.2 – Objetivos	15
1.2.1 – Objetivo geral	15
1.2.2 – Objetivos específicos.....	15
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 – Rejeito magnético.....	17
2.2 – Concreto.....	17
2.3 – Concreto de alto desempenho	18
2.3.1 – Composição do CAD.....	21
2.3.2 – Dosagem do CAD	27
2.3.3 – Propriedades mecânicas do concreto.....	28
2.3.4 – Propriedades físicas do concreto	29
2.4 – CAD com materiais alternativos	30
3 – METODOLOGIA DE PESQUISA	33
3.1 – Procedimentos metodológicos	33
3.1 – Seleção dos materiais	34
3.2 – Caracterização dos materiais.....	38
3.2.1 – Rejeito magnético.....	39
3.2.2 – Areia média e areia grossa.....	41
3.2.3 – Agregado graúdo	41
3.2.4 – Cimento	42
3.2.5 – Adição mineral	42
3.3 – Método de dosagem	42
3.4 – Produção dos corpos de prova.....	42
3.5 – Caracterização física e mecânica dos concretos.....	45
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 – Caracterização dos materiais.....	47
4.1.1 – Rejeito magnético.....	47
4.1.2 – Areia média e areia grossa.....	49
4.1.3 – Agregado graúdo	51
4.1.4 – Cimento	52
4.1.5 – Adição mineral	52
4.2 – Dosagem.....	52

4.3 – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone	54
4.4 – Caracterização física e mecânica do concreto	54
4.4.1 – Resistência à compressão	54
4.4.2 – Módulo de elasticidade.....	55
4.4.3 – Massa específica, absorção de água e índice de vazios.....	57
4.4.4 – Ataque por ácido sulfúrico	58
5 – CONCLUSÕES.....	61
6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS	63

1 – INTRODUÇÃO

A atividade de extração mineral se relaciona diretamente com o meio ambiente devido ao grande volume de material que é extraído, gerando grande volume de rejeitos (NOCITE, 2011). De acordo com o relatório anual de atividades do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), o Brasil exportou em 2018 um volume de mais de 409 milhões de toneladas de bens minerais (IBRAM, 2018). Um desafio das empresas mineradoras, é encontrar destinações para materiais que seriam descartados no ambiente (ZHANG *et al.*, 2020).

De maneira paralela, a busca por construções com métodos e materiais sustentáveis tem aumentado com a evolução da humanidade, devido à necessidade de mitigar efeitos prejudiciais de resíduos industriais, do consumo de energia e da emissão de CO₂ (LIEW; SOJOBI; ZHANG, 2017). Dentre os materiais de construção civil, o concreto é o mais utilizado devido à alta disponibilidade de seus componentes, alta resistência mecânica, durabilidade e baixo custo de manutenção. Estudos sugerem que pode haver um aumento rápido na demanda de concreto no futuro podendo chegar a um pico de 20 bilhões de toneladas por ano até 2050 (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Esse elevado volume de concreto produzido vem levantando preocupações relacionadas ao alto consumo de materiais (RACHAD, 2013). A indústria de construção consome quantidades crescentes de agregado natural, e o uso de areia natural para projetos de construção tem causado uma série de problemas ambientais (PRABUH; HYUN; KIM, 2014).

Com a urbanização, a demanda por recursos naturais aumenta no mundo todo e o progresso das atividades de mineração junto com o crescimento da escala de operação causam preocupações ambientais e sociais. Tem se tornado crescente a utilização de materiais alternativos como substituição parcial aos componentes do concreto devido ao benefício ambiental gerado pela destinação de materiais residuais com potencial poluidor, além da melhora que podem proporcionar às características do mesmo (ZHANG *et al.*, 2020).

O concreto convencional (CC) algumas vezes não atende aos requisitos exigidos para utilização em determinadas aplicações, sobretudo estruturais. Por este motivo, foram desenvolvidos concretos especiais com características aprimoradas e propriedades superiores, chamados concretos de alta resistência (CAR), concretos de alto desempenho (CAD), e ainda concretos de ultra-alto desempenho (CUAD). A inclusão de elementos no concreto, como adições minerais e aditivos, aliada à diferentes técnicas de execução, permitem produzir

concretos especiais capazes de atender solicitações de projeto mais exigentes, que possibilitam execuções com segurança e durabilidade (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Os componentes do concreto são materiais heterogêneos que possuem características físicas e químicas diversificadas, logo a obtenção de um concreto homogêneo que atenda as características esperadas requer esforços para harmonização dos componentes (NEVILLE, 2016). A dosagem do CAD é mais complexa que a do concreto convencional por envolver muitas variáveis e geralmente incluir adições minerais e aditivos químicos. Além disso, a dificuldade na dosagem do CAD, se dá pela falta de códigos e normas que padronizem sua produção (JUCÁ *et al.*, 2001). O estudo do empacotamento dos materiais granulares do concreto, referente ao proporcionamento e tamanho ideais das partículas, tem sido realizado para obtenção de concretos com alta durabilidade e resistência mecânica (CASTRO; FERREIRA, 2016).

O rejeito magnético de minério fosfático utilizado nesse estudo, possui possível potencial para utilização na produção de concreto, como substituinte parcial do agregado miúdo, por possuir características físicas, à princípio, compatíveis a este componente. No passado, os rejeitos das usinas de beneficiamento de minérios eram geralmente descartados sem que fosse feita qualquer caracterização do material. Porém, com o aumento da preocupação com questões ambientais e com a busca pelo estudo da viabilização do aproveitamento de rejeitos, esses materiais vêm sendo estudados (BORGES; LUZ; FERREIRA, 2008).

Este trabalho analisou a utilização do rejeito magnético em concreto em substituição parcial ao agregado miúdo, em diferentes porcentagens, a fim de obter com essa destinação um material resistente e durável. O trabalho estudou a influência da substituição proposta nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos produzidos.

1.1 – Justificativa

Buscou-se a utilização de rejeito magnético depositado em pilhas como um material alternativo na produção do concreto. Este uso auxilia em problemas que sua disposição traz para a usina de beneficiamento de minérios, entre eles a falta de espaço físico que é demandado para a construção das pilhas e o monitoramento necessário à garantia da estabilidade e segurança das estruturas de contenção (MACHADO, 2007).

A areia, amplamente utilizada como agregado miúdo constituinte do concreto, geralmente é extraída de jazidas naturais em grandes volumes. A indústria da construção civil é o maior consumidor de recursos naturais (NAIK, 2008), chegando a consumir entre 14% e 50% do total extraído no planeta (JOHN, 2000). Esse alto consumo de agregados naturais tem diminuído a disponibilidade desses recursos (SAMPAIO; ALMEIDA, 2008). Por esse motivo, a substituição do agregado miúdo em concreto por materiais alternativos tem sido crescente (ZHANG *et al.*, 2020).

Tutikian, Isaia e Helene (2011) afirmam que a utilização de CAD, em comparação ao CC, confere maior durabilidade às estruturas, de forma que venham a resistir com segurança às solicitações externas em sua combinação mais desfavorável, todavia com desempenho de serviço superior ao mínimo. O CAD com constituintes residuais é essencial para manter o equilíbrio do impacto da poluição ambiental, alocação inteligente de recursos escassos e desenvolvimento da economia, abrindo caminho para muitas inovações e tecnologias avançadas na indústria da construção (JAMIL *et al.*, 2010).

Portanto, este trabalho se justifica pela necessidade da redução de impactos ambientais gerados pelo depósito de rejeitos em pilhas e barragens e pelo alto consumo de agregado miúdo natural, além da busca pela produção de um concreto com propriedades superiores aplicando o conceito de alta densidade de empacotamento de partículas na otimização de concretos de alto desempenho.

1.2 – Objetivos

Os objetivos podem ser divididos em geral e específicos.

1.2.1 – Objetivo geral

Avaliar a performance do concreto de alto desempenho (CAD) produzido com substituição parcial do agregado miúdo por rejeito magnético de minério fosfático.

1.2.2 – Objetivos específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Desenvolver uma dosagem para o CAD, com abatimento de cone de aproximadamente 200 mm e resistência à compressão superior a 60 MPa;
- b) Avaliar as propriedades mecânicas dos concretos aos 63 dias (resistência à compressão o módulo de elasticidade);
- c) Avaliar os concretos quanto à durabilidade (por meio de ensaios de absorção de água, índice de vazios e ataque por ácido sulfúrico);
- d) Analisar a influência do rejeito magnético na massa específica do concreto.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essa seção destina-se a apresentar o embasamento teórico, necessário à compreensão da pesquisa, a ser utilizada para fundamentar as demais etapas do projeto com base nos conceitos que irão nortear o trabalho. Apresenta uma contextualização da geração do rejeito magnético, conceitos referentes ao concreto de alto desempenho, e estudos realizados por outros autores em trabalhos similares de substituição de componentes do CAD.

2.1 – Rejeito magnético

Um projeto de mineração se divide em etapas, onde na etapa de lavra são gerados materiais estéreis e na etapa do processamento mineral, os rejeitos. Os materiais estéreis, que resultam do decapeamento e lavra da mina, possuem características variáveis que dependem da forma como os depósitos minerais foram geologicamente formados, não sendo possível relacionar as proporções estéril/produto final para os mais diversos minerais. Os rejeitos apresentam características variáveis de acordo com o processamento utilizado na planta (SILVA, 2014).

Bittar (2006, p. 51) destaca que o processo de beneficiamento da rocha fosfática constitui-se essencialmente “pelas operações de moagem, pré-classificação, classificação, separação magnética, deslamagem, condicionamento, remoagem e flotações de barita e apatita”, sendo gerados três tipos de rejeitos, os magnéticos (chamados, às vezes, apenas de magnetita), as lamas e os rejeitos de flotação.

A caracterização tecnológica de minérios é essencial para o aproveitamento máximo de qualquer recurso mineral. É uma etapa aplicada ao beneficiamento de minérios, que analisa especificamente a mineralogia dos minérios. Através dela, obtém-se informações importantes ao desenvolvimento e a otimização de processos (GOMES, 1984).

2.2 – Concreto

Concreto é um material compósito, essencialmente composto por um meio aglomerante onde estão as partículas ou fragmentos de agregado. Essa mistura adquire coesão e resistência mecânica, podendo assim ser utilizada como importante material de construção, sendo o

material mais utilizado no mundo. Estima-se que o consumo anual de concreto seja da ordem de 19 bilhões de toneladas. Ele apresenta facilidade de fabricação de elementos estruturais em uma variedade de formas e tamanhos devido à sua consistência inicial plástica, baixo custo e alta disponibilidade no mercado, fatores que o tornam o material de construção mais popular e mais consumido (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Um bom concreto no estado fresco deve possuir uma consistência que permite seu adensamento à uma determinada energia e ter coesão suficiente para que não ocorra segregação durante seu transporte e lançamento, já no estado endurecido ele deve alcançar resistência mecânica e durabilidade adequadas (NEVILLE, 2016). A durabilidade do concreto é sua capacidade de resistir à ação de ataques químicos, abrasão, intempéries, ou qualquer outro processo de deterioração (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A qualidade do concreto é caracterizada por suas propriedades mecânicas, e capacidade de resistir à deterioração. Algumas das propriedades mecânicas são: módulo de elasticidade, resistência mecânica à compressão e resistência à tração, fluência, retração, comportamento sob fadiga e características de durabilidade, como por exemplo, porosidade, permeabilidade e resistência à abrasão (BACCIN, 1998).

De acordo com Almeida (2002), quando se deseja um concreto resistente, durável e econômico, é imprescindível pesquisar:

- a) As propriedades de seus componentes;
- b) As propriedades do concreto produzido e os fatores que podem alterá-las;
- c) Proporções adequadas e execução cuidadosa da mistura;
- d) Controle do concreto durante a produção bem como após o seu endurecimento.

2.3 – Concreto de alto desempenho

O termo concreto de alto desempenho foi usado pela primeira vez por Mehta e Aïtcin para misturas de concreto com as três seguintes características: alta trabalhabilidade, alta resistência e alta durabilidade (MEHTA; AÏTCIN, 1990). De acordo com Mendes (2002), a distinção primária entre o concreto de alta resistência (CAR) e CAD foi o requisito obrigatório de alta durabilidade no caso do CAD.

No Brasil não existe um consenso para a definição de CAD, somente de CAR. A NBR 8953 (ABNT, 2015) divide os concretos de alta resistência em duas classes, a classe I que especifica concretos de resistência compreendida entre 20 e 50 MPa, com intervalos de 5 MPa, e a classe II (CAR) que abrange os concretos de resistência entre 55 e 80 MPa (55, 60, 70 e 80 MPa). Ao mesmo tempo, o Comitê 363 do *American Concrete Institute* (ACI) adotou a seguinte definição para concreto de alta resistência (CAR): “concreto com resistência à compressão especificada para projeto de 55 MPa ou superior” (ACI, 1998).

O ACI (1998) define o CAD como um concreto capaz de atender uma combinação entre desempenho e requisitos de uniformidade que não poderia ser atingida com o uso de componentes convencionais e práticas normais de mistura, lançamento e cura.

Segundo Neville e Aïtcin (1998), o diferencial do CAD para o concreto de alta resistência não é apenas uma resistência muito alta, que já chegava a 140 MPa, mas o conjunto de outras propriedades desejáveis em algumas circunstâncias, como o alto módulo de elasticidade, alta densidade, baixa permeabilidade e resistência à algumas formas de ataque (cloretos, sulfatos, dióxido de carbono e névoa salina). Para Aïtcin (2000) qualquer estrutura de concreto que enfrente condições ambientais adversas deveria ser feita com concreto de alto desempenho para aumentar sua vida útil.

O CAD apresenta melhor desempenho que os concretos convencionais, estando este desempenho não apenas condicionado à resistência mecânica, mas também à trabalhabilidade, estética, integridade, ao acabamento, e, principalmente, a durabilidade do material (TUTIKIAN ISAIA; HELENE, 2011). Em sua composição, o CAD recebe incorporação de aditivos e adições em seu estado fresco capazes de alterar algumas propriedades, para adequá-las às necessidades construtivas. A aplicação do CAD permite diminuir relativamente a massa total de construções, o consumo de aço de reforço, e aumentar o período de segurança e manutenção das construções e os intervalos de reparo (KONKOV, 2013).

Mendes (2002) cita como principais vantagens da utilização do CAD: redução significativa nas dimensões de pilares de edifícios altos, aumentando a área útil, principalmente, nos andares mais sobrecarregados; redução do peso próprio da estrutura e da carga nas fundações; possível redução nas taxas de armadura dos pilares; maior rapidez na desforma, aumentando a velocidade de execução da obra; menor segregação propiciando melhor acabamento em peças pré-moldadas; aumento da durabilidade das estruturas; possível redução

de custos devido, principalmente, à diminuição das dimensões dos elementos estruturais e pelo aumento da velocidade de execução.

O CAD tem sido muito utilizado em estruturas de plataformas de petróleo em virtude da alta capacidade de suportar a ação de agentes agressivos, boa durabilidade, menor custo de manutenção, facilidade de moldagem dos elementos devida a grande fluidez do concreto (BACCIN, 1998). Entre obras que utilizam CAD estão ainda edifícios operando sob condições complexas que incluem centrais nucleares e hidrelétricas, unidades industriais, arranha-céus, centros esportivos, comerciais e de entretenimento de grande extensão submetidas a um impacto dinâmico acústico e de vibração significativo, pontes (especialmente sobre estreitos marítimos), plataformas marítimas de petróleo e gás natural, edifícios industriais e elementos tecnológicos sob alta temperatura, ameaça de ácido e sal, impacto dinâmico (KONKOV, 2013).

Mehta e Monteiro (2014) citam que a literatura já publicada tende a descrever o concreto de alto desempenho como qualquer concreto que tenha pelo menos uma propriedade incomum em comparação com o concreto convencional, e que idealmente, uma mistura de concreto de alto desempenho deve atender às seguintes características:

- a) Alta construtibilidade (sem segregação);
- b) Alta produtividade de recursos através de alta durabilidade (baixa permeabilidade e alta resistência a trincas);
- c) Resistência máxima elevada e resistência inicial moderada (uma vez que misturas de concreto de resistência inicial muito alta tendem a trincar);
- d) Alta compatibilidade ambiental (através do uso máximo possível de subprodutos industriais);
- e) Relação custo-benefício (o concreto deve ser um produto de tecnologia simples e materiais convencionais).

Para Tutikian, Isaia e Helene (2011), o princípio básico para o CAD fundamenta-se na diminuição da porosidade do concreto, através da modificação da estrutura dos poros (tipos, tamanhos e distribuição). Algumas ações são necessárias para atingir esse objetivo, entre elas:

- a) Diminuição da relação água/aglomerante (por meio do uso de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes);

- b) Otimização da granulometria dos agregados a fim de aumentar o esqueleto inerte e obter maior compacidade (através do uso de agregados graúdos de menor diâmetro máximo e composição granulométrica adequada dos finos);
- c) Reforço das ligações químicas primárias e secundárias entre as partículas (utilizando adições minerais que provocam o refinamento dos poros e dos grãos, principalmente do silicato de cálcio hidratado (C-S-H)).

O concreto pode ser separado em três fases, como mencionam Mehta e Monteiro (2014), sendo elas: pasta de cimento hidratada, a zona de transição (ZT) (região situada na interface pasta-agregado, tanto para o agregado graúdo quanto para o miúdo) e os agregados. A fim de atuar como material composto homogêneo, as três fases do concreto devem possuir aproximadamente o mesmo comportamento resistente. Para obter um CAD, é necessário estudar essas três fases da mistura.

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), a resistência mecânica da pasta pode ser controlada pela relação água/cimento, sua redução faz com que as partículas de cimento fiquem mais próximas umas das outras, diminuindo assim a porosidade capilar e o espaço livre para a formação de vazios que são prejudiciais à resistência. A ZT, geralmente a mais porosa e frágil no CAD com microfissuras que limitam a resistência mecânica e aumentam a deformabilidade do CAD, também é influenciada pela relação água/cimento, além da natureza mineralógica e dimensão máxima característica do agregado.

Aumentando a resistência dos concretos, especialmente depois de melhorar a pasta de cimento hidratada e a ZT, os agregados tornam-se o elo fraco da mistura. Por este motivo, devem-se selecionar agregados de maior resistência para o CAD que irão interferir não apenas na resistência à compressão da mistura de forma direta, mas também nas resistências à abrasão, ao módulo de elasticidade, às deformações instantâneas e de longa duração, à resistência ao impacto, entre outras propriedades (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

2.3.1 – Composição do CAD

Patel e Shah (2013) destacam que os constituintes do CAD utilizados em pesquisas geralmente são: cimento, água, agregado miúdo, agregado graúdo, adições minerais e aditivos químicos. A seleção adequada de todos estes constituintes é indispensável à dosagem de um concreto resistente, durável e com características que atendam à aplicação prevista.

O cimento Portland é o aglomerante hidráulico utilizado na produção do concreto. A Tabela 1 apresenta os compostos constituintes do cimento Portland e suas principais propriedades.

Tabela 1 – Principais compostos do cimento Portland.

Compostos	Fórmula química	Símbolo	% no clínquer	Propriedades
ALITA (Silicato Tricálcico)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	50 a 65	Endurecimento rápido Alto calor de hidratação Alta resistência inicial
BELITA (Silicato Dicálcico)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15 a 25	Endurecimento lento Baixo calor de hidratação Baixa resistência inicial
CELITA (Aluminato Tricálcico)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 a 10	Acelera a pega Alto calor de hidratação Suscetível ao ataque de sulfatos Aumenta a retração e reduz a resistência final
FERRITA (Ferro Aluminato Tetracálcico)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	3 a 8	Endurecimento lento Não contribui para a resistência mecânica Resistente a sulfatos e de coloração escura
CAL LIVRE	CaO	C	0,5 a 1,5	Em elevadas quantidades provocam expansibilidade e fissuração

Fonte: Melo (2009).

O cimento Portland se torna um material aglomerante pelas reações químicas que acontecem durante o processo de hidratação na pasta, composta por água e cimento. Na presença de água, os silicatos e aluminatos formam produtos hidratados que, com o passar do tempo, originam uma massa firme e resistente, a pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2016).

A hidratação do cimento consiste fundamentalmente na reação entre os grãos de cimento anidro e a água. Deste processo resultam três compostos sólidos distintos, os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), os cristais de hidróxido de cálcio e sulfoaluminato de cálcio (etringita), além de grãos de cimento que não chegam a se hidratar por completo a depender do tamanho das partículas de cimento anidro bem como do grau de hidratação. O composto C-S-H deve ser

o mais denso possível, uma vez que ele é o principal responsável pela resistência do concreto (ALVES, 2000).

O agregado é o principal constituinte do concreto, influenciando nas características de resistência mecânica e durabilidade do mesmo. Ele deve, essencialmente, permanecer estável dentro do concreto em suas condições de exposição. Devem ser misturados com pasta de cimento para formar concreto, por ser mais barato que o cimento, reduzindo custos; por reduzir o encolhimento e a fluência, proporcionando melhor estabilidade de volume; e por oferecer maior durabilidade ao concreto, visto que muitos processos de deterioração afetam principalmente a pasta de cimento (NEWMAN; CHOO, 2003). A norma NBR 7211 (ABNT, 2019) classifica os agregados quanto ao tamanho dos grãos em miúdos (0,075 – 4,75 mm) e graúdos (4,75 – 50 mm).

As adições minerais são materiais compostos por partículas sólidas muito finas, adicionadas ao cimento, ou em substituição a parte dele, visando modificações no comportamento da mistura de concreto no estado fresco e/ou endurecido. São classificadas em função de sua composição química, mineralógica, morfológica, e ainda de acordo com sua forma de atuação no concreto (efeito filer, cimentante ou pozolânico) (SANTOS, 2011).

O efeito filer, das adições altamente finas que não interagem quimicamente com os compostos cimentantes, se relaciona diretamente com o empacotamento de partículas e preenchimento de vazios existentes na mistura. Já o efeito cimentante ocorre quando a adição forma produtos cimentantes (exemplo: C-S-H de menor densidade) em contato com a água de maneira mais lenta. Por fim, entende-se por efeito pozolânico aquele ocorrido quando a adição de origem silicosa ou sílico-aluminosa que quase não possui propriedade cimentícia, porém quando finamente moída reage quimicamente com o hidróxido de cálcio do cimento hidratado, na presença de umidade à temperatura ambiente formando compostos com propriedades cimentantes (DAL MOLIM, 2005).

O tamanho reduzido das adições permite que as reações ocorram rapidamente, quebram ainda a inércia do sistema, agindo através de ação de nucleação das partículas de cimento e fazendo com que se hidratem mais rapidamente e de forma completa. Normalmente, as adições possuem elevada reatividade química, auxiliando na trabalhabilidade da mistura, o que para CAD é importante, pois apresentam resistências elevadas e coesão acima do normal, o que dificulta a plasticidade (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

A inclusão de uma adição mineral pode ser feita por adição ao cimento (retirando-se de parte dos agregados) ou por substituição ao cimento (retirando-se parte do cimento), de acordo com os procedimentos escolhidos durante o estudo de dosagem (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). Os autores destacam que as adições minerais, são partículas finas capazes de densificar o concreto, conferindo ao CAD coesão e microestrutura densa.

As adições minerais com atividade pozolânica são utilizadas para diversos fins, melhorando as propriedades do concreto a depender de sua composição química. Além de ajudar a melhorar as características de resistência e durabilidade do concreto de alto desempenho, também ajudam a descartar mais subprodutos industriais, que são as principais ameaças ambientais. Essas adições modificam a estrutura interna da pasta de cimento hidratada, promovendo uma redução na porosidade capilar, diminuindo o calor de hidratação e, conseqüentemente, as fissuras de origem térmica (PATEL; SHAH, 2013).

Uma pozolana é um material natural ou artificial que contém sílica na forma reativa. Por si só, as pozolanas têm pouco ou nenhum valor cimentício, porém, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, elas reagirão quimicamente com álcalis para formar compostos cimentícios. Devem ser finamente divididas de maneira a expor uma grande área superficial às soluções alcalinas para que a reação prossiga. A sílica em uma pozolana deve ser amorfa (vítrea) para ser reativa (NEWMAN; CHOO, 2003).

Um exemplo de adição pozolânica é a sílica ativa que é um subproduto obtido no processo de fabricação do metal silício e do ferro-silício, um pó fino com cor variando de cinza claro a cinza escuro, sendo esta determinada pelo teor de carbono e de óxido de ferro presentes. Com relação às características físicas, suas partículas são esféricas, extremamente pequenas, com diâmetro médio entre 0,1 μm e 0,2 μm , sendo 50 a 100 vezes menores que as partículas do cimento (MENDES, 2002).

A sílica ativa atua de duas formas no concreto: fisicamente através do chamado efeito de fíler (preenchimento de vazios), atuando no aumento da coesão e da compacidade uma vez que este mecanismo reduz os vazios existentes; e quimicamente pela reação pozolânica com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), para a formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que contribui significativamente para a resistência do conjunto (ALMEIDA, 2005).

Algumas aplicações da sílica ativa são na economia de cimento, na produção de concreto de altíssima resistência, no controle das reações álcali-agregados, com a vantagem de que

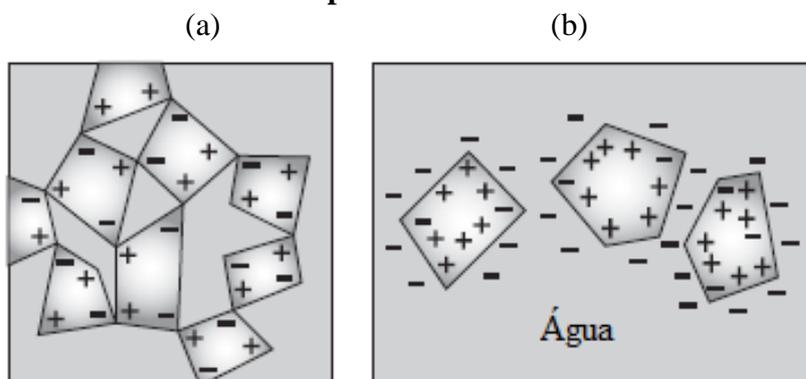
somente pequenas quantidades são necessárias; e na redução da corrosão associada a cloretos e sulfatos, em razão da alta impermeabilidade (SILVA, 1995).

Os aditivos químicos são materiais solúveis em água ou emulsionados, adicionados em pequenas quantidades no concreto imediatamente antes ou durante a mistura, capazes de trazer benefícios às propriedades do concreto produzido (RAMACHANDRAN, 1996). Eles atuam nas propriedades reológicas do concreto alterando as reações de hidratação do cimento, melhorando a trabalhabilidade, modificando a viscosidade, atuando na retenção de água, acelerando ou retardando o tempo de pega, controlando o desenvolvimento de resistências mecânicas, intensificando a resistência à ação do congelamento, diminuindo a fissuração térmica, atenuando as consequências do ataque por sulfatos, reação álcali-agregado, corrosão de armadura (HARTMANN; HELENE, 2003).

Os principais aditivos químicos são os aceleradores e retardadores de pega, incorporadores de ar e redutores de água (plastificantes e superplastificantes). Os concretos de alta resistência possuem em sua composição pelo menos aditivos redutores de água do tipo superplastificantes (ALVES, 2000). Para obter concretos duráveis, é necessário dosá-los com relação água/cimento inferior a 0,40, contudo, sem prejudicar sua trabalhabilidade, o que só é possível utilizando aditivos plastificantes e/ou superplastificantes (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Os aditivos redutores de água são moléculas longas e pesadas que se envolvem em torno das partículas de cimento e dão a elas uma carga elétrica altamente negativa, para que se repelam. Isso resulta na defloculação do sistema (cimento em hidratação) e dispersão das partículas de cimento, melhorando a trabalhabilidade da mistura e diminuindo a quantidade de água necessária ao preparo do concreto (Figura 1) (NEVILLE; AÏTICIN, 1998). Desta forma, sua incorporação pode possibilitar, a produção de concretos com resistência mecânica elevada (superior a 50 MPa) (HARTMANN; HELENE, 2003).

Figura 1 – Representação esquemática (a) da floculação de partículas de cimento hidratadas antes da adição do aditivo redutor de água e (b) a dispersão após a adição de plastificante.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Para que a dispersão das partículas promovida pelo aditivo ocorra de maneira eficiente, alguns fatores são importantes: a compatibilidade física e química entre cimento e aditivo, a adsorção do aditivo na superfície da partícula do cimento além da dosagem correta do aditivo, uma vez que em excesso pode provocar fluidez excessiva, segregação do concreto ou retardo excessivo no tempo de pega (GRILLO, 2014).

De acordo com Hartmann e Helene (2003), os aditivos superplastificantes são utilizados para os seguintes propósitos:

- a) Reduzir a quantidade de água, para uma mesma consistência e consumo de cimento, aumentando a resistência e durabilidade por meio da redução da relação água/cimento;
- b) Aumentar a fluidez da mistura para melhorar algumas características do concreto sem alterar o consumo de água;
- c) Reduzir o consumo de cimento, mantendo a trabalhabilidade e resistência, visando reduzir retração, fissuras, e tensões térmicas que o calor de hidratação do cimento pode causar.

As principais famílias de aditivos redutores de água são (AÍTCIN, 2000):

- a) Lignossulfonatos: sais de ácido hidrocarboxílicos com teores muito baixos de açúcares e de surfactantes;
- b) Naftaleno sulfonato: sais sulfonados de policondensados de naftaleno e formaldeído;
- c) Melamina sulfonato: sais sulfonados de policondensados de melamina e formaldeído;
- d) Poliacrilatos ou policarboxilato-poliésteres.

Quando se utiliza superplastificante, deve-se atentar para a perda rápida de trabalhabilidade da mistura, já que sua eficiência é limitada a um curto tempo. Este fato se dá pela formação de sulfoaluminato de cálcio hidratado, chamado também de etringita, que precipita na mistura incorporando um grande volume de água livre. Os fatores que podem originar este fenômeno estão relacionados com o tipo de aditivo, sua dosagem, a natureza dos agregados, o tipo de cimento e a temperatura do concreto (ALVES, 2000).

O momento de colocação do aditivo e a maneira como é adicionado à mistura são essenciais para sua eficiência, bem como para a melhoria da consistência do concreto. Sua seleção deve ser determinada, sobretudo, em função de seu desempenho, dosagem, custo, compatibilidade com o cimento. Deve-se ainda considerar a disponibilidade dos tipos de cimento ou de aditivo no local a serem aplicados (MENDES, 2002).

2.3.2 – Dosagem do CAD

Toda mistura de concreto deve ser proporcionada de acordo com as condições de exposição, considerações de construção e critérios estruturais (TIKALSKY, 2000). O objetivo de um método de dosagem é a determinação de uma proporção dos materiais constituintes do concreto que seja adequada e econômica, com o intuito de produzir um concreto com desempenho que atenda aos requisitos previamente estabelecidos, tais como durabilidade, resistência e consistência adequadas, ao menor custo possível (MENDES, 2002).

O estudo do empacotamento de partículas constituintes do concreto, trata da otimização do proporcionamento e do tamanho ideal dos materiais granulares, de modo que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Féret publicou em 1892 o primeiro estudo sobre empacotamento de partículas em concreto e, a partir daí, modelos vêm sendo propostos como ferramenta de otimização de misturas granulares de concreto. Esses modelos prescrevem a interação geométrica de partículas com diferentes tamanhos por meio de equações, calculando uma densidade de empacotamento teórica para que a curva granulométrica real possa ser ajustada à curva ideal (AIQIN; CHENGZHI; NINGSHENG, 1997; LARRARD; SEDRAN, 2002).

É preciso definir o coeficiente de distribuição granulométrica (valor-q) que fornece a inclinação da curva ideal no gráfico (OLIVEIRA, 2018). Quanto mais alto o valor-q, menor a trabalhabilidade da mistura. Com valor-q baixo, maior a quantidade de partículas finas e maior

trabalhabilidade. A densidade de empacotamento máxima acontece com o valor-q próximo de 0,37, porém esse valor não proporciona fluidez máxima da mistura, uma vez que a interferência entre os agregados é alta por estarem extremamente próximos (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Para concreto com uma capacidade de escoamento boa recomenda-se valor-q próximo de 0,30 (VANDERLEI, 2004).

A alta densidade de empacotamento tem sido considerada como parâmetro importante para obter concretos duráveis com alta resistência mecânica, o que é possível com a utilização de adições minerais e aditivos químicos simultaneamente (CASTRO; FERREIRA, 2016).

Se comparado à utilização dos métodos de dosagem convencional, o uso de métodos de dosagem específicos para CAD traz grandes vantagens técnicas e econômicas ao produto final como o consumo de cimento significativamente menor. Apesar de existirem métodos de dosagem e procedimentos específicos, os materiais constituintes e suas proporções às vezes são selecionados empiricamente por meio de extensos testes laboratoriais (ALVES, 2000).

2.3.3 – *Propriedades mecânicas do concreto*

A resistência à compressão é definida como a capacidade que um material possui de resistir a um determinado esforço de tensão sem se romper (MEHTA; MONTEIRO, 2014). É geralmente considerada a propriedade mais importante do concreto, sendo empregada como método de avaliação da qualidade de uma estrutura. A idade mais importante para obtenção da resistência característica do concreto (f_{ck}) é aos 28 dias, mas informações adicionais referentes à evolução da resistência à compressão com a idade também são imprescindíveis para um CAD (FREITAS JÚNIOR, 2005).

Em estruturas de concreto, o módulo de elasticidade é um parâmetro de projeto que está diretamente relacionado ao encurtamento de componentes de concreto sob tensão de compressão e devido à fluência e retração. Esse encurtamento do concreto provoca a redistribuição das tensões internas entre pilares, vigas ou paredes em estruturas de concreto armado. O módulo de elasticidade é necessário ao estimar a deflexão dos componentes para garantir que os requisitos de serviço sejam atendidos, podendo ser determinado por meio de testes de laboratório ou estimado com base na resistência à compressão (ALSAMAN *et al.*, 2017).

O conhecimento do módulo de elasticidade do concreto ajuda a prever deformações, conhecer as tensões entre o concreto e o aço das estruturas de concreto armado e protendido e contribui ainda para o cálculo das tensões resultantes de retração e de recalque (SOUZA et al., 2015). O módulo de elasticidade do concreto depende, sobretudo, da porosidade de suas fases (pasta de cimento, agregado e zona de transição) por estar relacionada à sua rigidez e resistência. Com relação ao agregado, sua composição mineralógica, granulometria, dimensão máxima, forma e textura superficial podem também influir no módulo de elasticidade uma vez que estas características influenciam a microfissuração da zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

2.3.4 – Propriedades físicas do concreto

A determinação da consistência do concreto é feita através do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) pela medida do assentamento do concreto no estado fresco. A norma NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica o concreto em classes de acordo com o grau de abatimento e apresenta as aplicações típicas de cada classe, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Classe de consistência do concreto e aplicações típicas.

Classe	Abatimento	Aplicações
S10 (concreto com consistência seca)	10 - 50	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado.
S50 (concretos pouco trabalháveis)	50 - 100	Alguns tipos de pavimento e fundação.
S100 (concretos de aplicação normal)	100 - 160	Elementos estruturais com lançamento convencional.
S160 (concretos plásticos para bombeamento)	160 - 200	Elementos estruturais com lançamento bombeável.
S220 (concretos fluidos)	≥220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras.

Fonte: NBR 8953 (ABNT, 2015).

A durabilidade do concreto é muito mais dependente da permeabilidade e capacidade de absorção, que são condicionadas à porosidade, do que de propriedades como resistência, módulo de elasticidade (BRANDÃO, 1998; NEVILLE, 2016). Diferentes ensaios permitem estimar a porosidade do concreto, entre eles estão os ensaios para determinação da absorção de água e do índice de vazios regulamentados pela norma NBR 9778 (ABNT, 2009). Grande parte dos concretos de boa qualidade possuem absorção de água inferior a 10%. Um concreto durável precisa dificultar a penetração de substâncias agressivas (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A massa específica é a relação entre a massa e o volume do material. A NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica o concreto de acordo com sua massa específica seca, obtida conforme NBR 9778 (ABNT, 2009), em concreto normal (C) quando está compreendida entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³, em concreto leve (CL) quando é inferior a 2000 kg/m³; e em concreto pesado ou denso (CD) quando é superior a 2800 kg/m³.

Ataques ácidos externos podem causar reações expansivas no concreto e degradação acelerada, comprometendo a durabilidade do material que poderá apresentar queda da resistência à compressão e aumento das perdas de massa. A durabilidade de concretos que sofrem ataques ácidos é determinada pelas propriedades de absorção e a permeabilidade. Estudos que avaliaram o impacto causado por ataques ácidos ao concreto mostram que a degradação é superior em concretos com taxa mais elevada de absorção e permeabilidade (ABREU *et al.*, 2020).

2.4 – CAD com materiais alternativos

Um mapeamento sistemático foi realizado para avaliar a tendência atual de estudos conduzidos para avaliar a possibilidade de substituição dos componentes do concreto de alto desempenho por materiais alternativos. Utilizou-se a base de dados *Science Direct* para buscar artigos publicados no ano de 2020, utilizando os descritores “*high performance concrete*” e “*waste*”. Inicialmente, foram encontrados 24 artigos, dos quais foram selecionados 17 que se relacionavam diretamente à produção de concreto de alto desempenho com materiais alternativos.

A Tabela 3 apresenta os componentes do concreto substituídos nos estudos selecionados, a quantidade de publicações e seus respectivos autores. Percebe-se com a análise que os agregados miúdos são os componentes substituídos em maior proporção no mapeamento.

Tabela 3 – Artigos publicados em 2020 relacionados à substituição dos compostos do concreto de alto desempenho.

Material substituído	Número de artigos	Autores
Agregado miúdo	6	Jiao <i>et al.</i> (2020); Shen <i>et al.</i> (2020); Wei, <i>et al.</i> (2020); Yang <i>et al.</i> (2020); Yu; Wu (2020); Zhang <i>et al.</i> (2020).
Cimento Portland	4	Al Khatib; Maslehuddin; Al-Dulaijan (2020); Qian <i>et al.</i> (2020); Venkatesan <i>et al.</i> (2020); Yang <i>et al.</i> (2020).
Adições	4	Dixit; Du; Pang (2020); Fares; Albaroud; Khan (2020); Rojas; Pineda-Gómez; Guapacha-Flores (2020); Mustapha <i>et al.</i> (2020).
Agregado graúdo	3	Amin; Bassam; Ibrahim (2020); Makul, N. (2020); Ostrowski <i>et al.</i> (2020).

Fonte: elaborado pela autora.

Os materiais alternativos utilizados, nos estudos encontrados, em substituição ao agregado miúdo estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Materiais alternativos utilizados em substituição ao agregado miúdo na composição de CAD.

Autores	Material alternativo utilizado
Jiao <i>et al.</i> (2020)	Vidro residual moído
Shen <i>et al.</i> (2020)	Cinza de incineração de resíduos sólidos municipais
Wei, <i>et al.</i> (2020)	Tubos catódicos residuais de vidro moídos
Yang <i>et al.</i> (2020)	Pó de rocha reciclado
Yu; Wu (2020)	Resíduo de construção e demolição
Zhang <i>et al.</i> (2020)	Rejeitos de minério de ferro

Fonte: elaborado pela autora.

Dentre os estudos encontrados, o material que mais se assemelha ao rejeito magnético é o utilizado no estudo de Zhang *et al.* (2020). Os autores avaliaram a influência de rejeitos de minério de ferro em substituição à areia (em taxas de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% em massa) na resistência à compressão e permeabilidade de argamassas de concreto de ultra-alto desempenho (CUAD), através de métodos que incluíram microscopia eletrônica de varredura e porosimetria por intrusão de mercúrio. Em termos de resistência à compressão, os resultados mostraram que a substituição proposta de 40% obteve a melhor performance e a de 80% foi comparável à mistura controle. A permeabilidade diminuiu com o aumento da quantidade de

rejeito, o que o torna um material alternativo viável para utilização como agregado miúdo, reduzindo o custo do CUAD e os problemas ambientais.

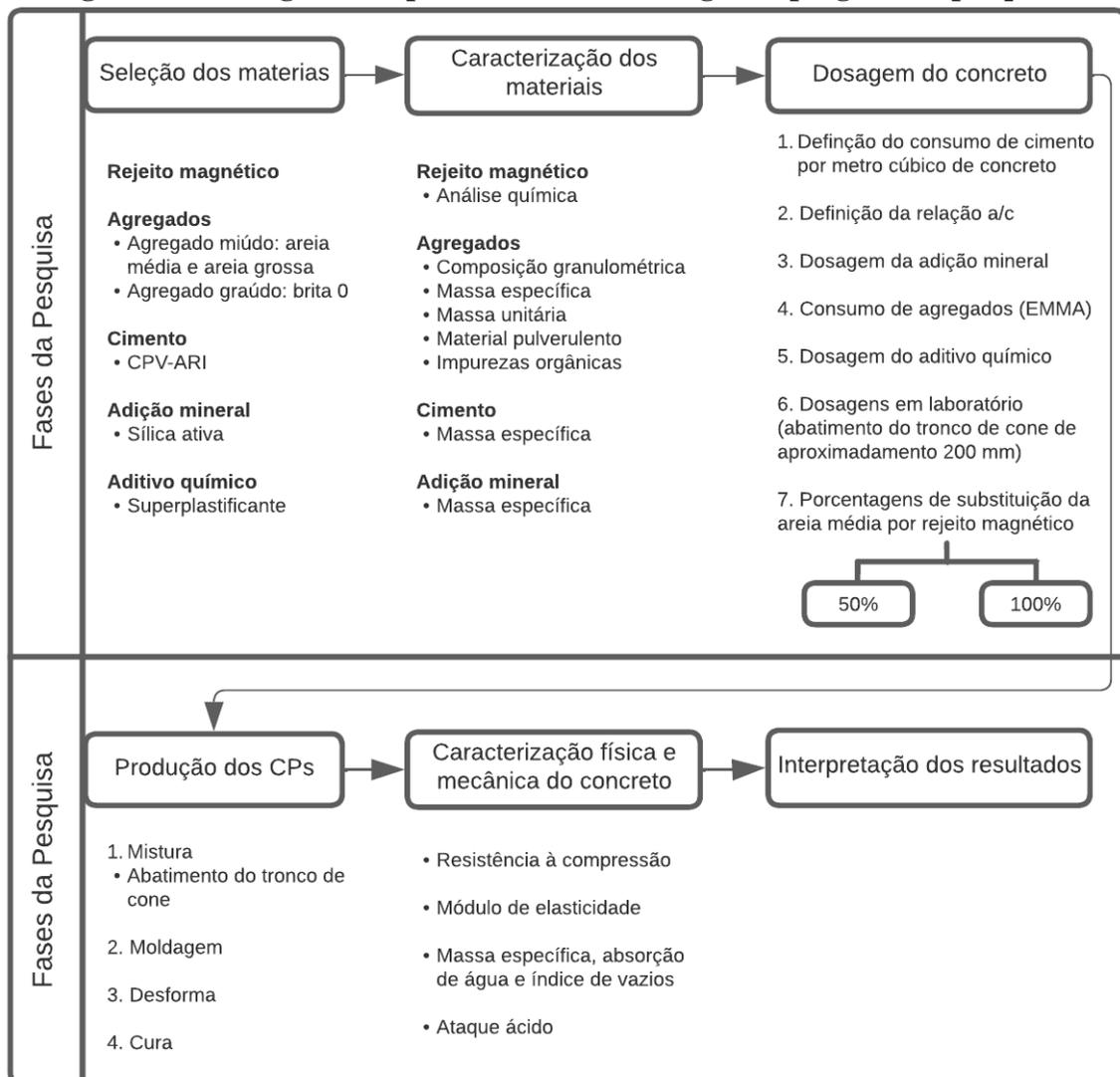
Além dos estudos encontrados nessa busca, Mendes (2016) estudou o comportamento da resistência mecânica de concretos convencionais produzidos com substituição parcial do agregado miúdo também por rejeito magnético, porém originário do processamento de rocha fosfática da região de Catalão/GO. Foram realizados ensaios físicos e químicos para caracterizar os componentes do concreto, avaliar o comportamento da consistência no estado fresco, a resistência mecânica à compressão e tração, inferir condições de permeabilidade por meio de ensaios de absorção por imersão, mensurar possíveis propriedades magnéticas e determinar o percentual de aumento da massa específica, de forma a definir as dosagens com características finais semelhantes ou superiores ao concreto referência. A substituição proposta influenciou nos resultados do teste de consistência para concretos com quantidade moderada de água. A permeabilidade foi maior para concretos com altas taxas de água. A massa específica não sofreu alteração significativa, e não foram apresentadas propriedades magnéticas nos concretos. Nos testes de resistência mecânica, os resultados foram semelhantes ao concreto padrão, comprovando a possibilidade de substituição da areia por rejeito magnético em teores de 5, 10 e 30%.

3 – METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1 – Procedimentos metodológicos

O fluxograma da Figura 2 apresenta o procedimento experimental do trabalho. Inicialmente, foi realizada a seleção dos materiais utilizados, e, logo depois, as caracterizações necessárias. Em seguida, o método de dosagem a ser empregado foi definido. Posteriormente, os corpos de prova (CPs) foram produzidos. Depois, as caracterizações mecânicas e físicas (a partir dos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água e durabilidade frente ao ataque por ácido sulfúrico). A influência da substituição proposta na massa específica do concreto foi analisada. Por fim, a análise dos resultados foi realizada.

Figura 2 – Fluxograma explicativo da metodologia empregada na pesquisa.



Fonte: elaborado pela autora.

3.1 – Seleção dos materiais

Os materiais utilizados na pesquisa estão descritos a seguir:

- Rejeito magnético

O rejeito magnético em estudo, é proveniente das atividades mineradoras de uma mina, onde se processa rocha fosfática.

O maciço da mina é constituído principalmente por rochas carbonatíticas e glimeríticas. Nessa jazida, o minério é residual e constituído principalmente por apatita, argilo-minerais, barita, fosfatos secundários de alumínio e ferro, magnetita, minerais de titânio (ilmenita e anatásio), minerais hidratados de ferro (goethita e limonita), e outros (GUIMARÃES, 1997).

Abrão (1987) apresenta em seu estudo algumas razões médias entre o produto final e o rejeito gerado que exemplificam a magnitude de resíduos gerados no processo de mineração. Seu estudo aponta essa relação para a mineração de fosfato de 83,33% de rejeito.

A coleta da amostra de rejeito magnético (Figura 3), selecionada para este estudo, foi realizada nas pilhas de rejeito magnético da mina, em outubro de 2019.

Figura 3 – Amostra de rejeito magnético.



Fonte: elaborado pela autora.

- Agregado miúdo: areia média (Figura 4) e areia grossa (Figura 5), extraídas em leitos de rio, adquiridas em um depósito de materiais de Araxá/MG;

Figura 4 – Areia média



Fonte: elaborado pela autora

Figura 5 – Areia grossa.



Fonte: elaborado pela autora.

- Agregado graúdo: brita 0 (Figura 6) extraída de rocha basáltica, adquirida em um depósito de materiais de Araxá/MG; estudos realizados indicam a produção de

resistências maiores com partículas angulares, que é o caso da pedra britada, existindo uma maior facilidade de aderência entre pasta e agregado (ACI, 2010);

Figura 6 – Brita 0.



Fonte: elaborado pela autora

- Água: água potável proveniente do sistema de abastecimento de água de Araxá/MG, atendendo os mesmos requisitos adotados para a água utilizada em concretos convencionais conforme NBR 15900-1 (ABNT, 2009);
- Cimento: cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI) (Figura 7) que é o mais adequado para a produção de CAD, devido ao seu maior teor de C_3S e superior área superficial (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011) apresentando-se como uma boa opção por possuir alta resistência inicial, conforme estudos de Toralles-Carbonaria *et al.*, (2010) e de Tutikian, Isaia e Helene. (2011). Foi adquirido em uma empresa de Araxá, MG;

Figura 7 – Cimento CPV.



Fonte: elaborado pela autora.

- Adição mineral: Sílica ativa (Figura 8), adquirida na empresa CN Revestimentos, cujas características químicas, físicas e mecânicas, fornecidas pelo vendedor estão apresentadas na Tabela 5;

Figura 8 – Sílica ativa.



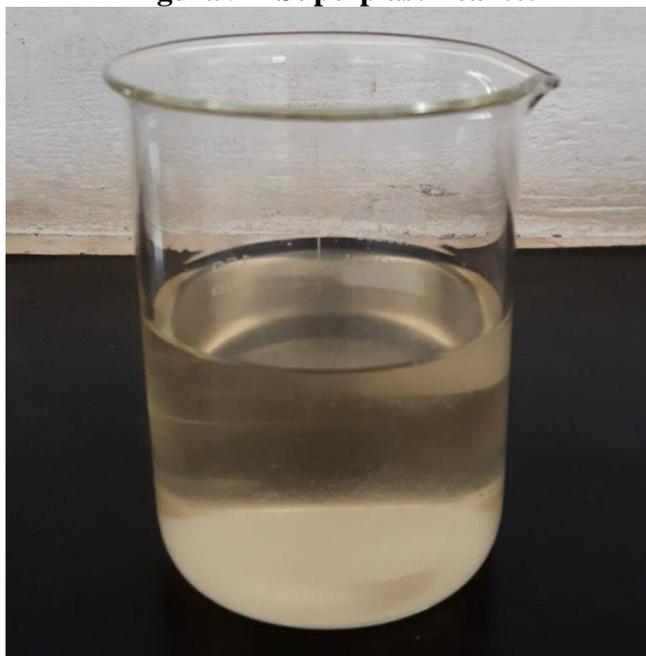
Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 5 – Características físicas e químicas da sílica ativa.

Massa específica	2220 kg/m ³
Teor de SiO ₂	> 90%
Superfície específica (B.E.T)	~19000 m ² /kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio da partícula	0,20 µm

Fonte: adaptado de CN Revestimentos.

- Aditivo químico: superplastificante à base de éter policarboxílico (Figura 9) que segundo o fabricante deve ser utilizado nas dosagens de 0,2 a 1,0% sobre o peso de cimento.

Figura 9 – Superplastificante.

Fonte: elaborado pela autora.

3.2 – Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais utilizados é uma etapa fundamental para a realização da dosagem das misturas de concreto, permitindo uma melhor aplicação dos constituintes. A utilização de materiais na produção de CAD deve seguir exigências existentes das normas para fabricação do concreto convencional, sendo elas: NBR 7211 (ABNT, 2019), NBR 7215 (ABNT, 2019), e NBR 12655 (ABNT, 2015).

3.2.1 – Rejeito magnético

A amostra de rejeito magnético foi enviada para o Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG e acondicionada em saco plástico com aproximadamente 50 kg. A amostra foi inicialmente disposta em bandejas de aço inoxidável e seca em estufa a uma temperatura de 100 °C, por 24 horas. Após a secagem, a amostra foi pré homogeneizada para obtenção de uma distribuição mais uniforme dos constituintes, colocando-se a amostra sobre uma superfície limpa (lona), Figura 10, e revolvendo-a com o auxílio da própria lona.

Figura 10 – Pré homogeneização da amostra de rejeito magnético.



Fonte: elaborado pela autora.

Para o quarteamento da amostra utilizou-se o método de pilha alongada, descrito por Oliveira (2017), apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Pilha alongada

Fonte: elaborado pela autora

A composição química do rejeito magnético de minério fosfático foi obtida por fluorescência de raios-X. Nessa técnica acontece irradiação de feixes primários, resultando na produção de uma irradiação secundária de acordo com as características dos elementos químicos presentes, podendo ser uma análise quantitativa e qualitativa (BRANDÃO, 2015). Realizou-se também o ensaio de perda ao fogo.

O ensaio de composição granulométrica foi executado de acordo com as orientações da norma técnica NBR NM 248 (ABNT, 2003). A Figura 12 mostra a série de peneiras acopladas ao peneirador do Laboratório de Solos do CEFET-MG – Campus Araxá, utilizada para a realização do ensaio de composição granulométrica. A dimensão máxima característica e o módulo de finura foram determinados em conformidade com essa mesma norma, a massa específica com a NBR 16916 (ABNT, 2021), a massa unitária com NBR 16972 (ABNT, 2021), o material pulverulento com a NBR 16973 (ABNT, 2021), as impurezas orgânicas com a NBR NM 49 (ABNT, 2001).

Figura 12 – Série de peneiras utilizada para a realização do ensaio de composição granulométrica.



Fonte: elaborado pela autora.

3.2.2 – Areia média e areia grossa

A curva granulométrica da areia média e da areia grossa foi feita em conformidade com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), a dimensão máxima característica e o módulo de finura foram determinados em conformidade com essa mesma norma, a massa específica com a NBR 16916 (ABNT, 2021), a massa unitária com NBR 16972 (ABNT, 2021), o material pulverulento com a NBR 16973 (ABNT, 2021), as impurezas orgânicas com a NBR NM 49 (ABNT, 2001).

3.2.3 – Agregado graúdo

A curva granulométrica do agregado graúdo (brita 0) foi feita em conformidade com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), a dimensão máxima característica e o módulo de finura foram determinados em conformidade com essa mesma norma, a massa específica com a NBR 16917 (ABNT, 2021), a massa unitária com NBR 16972 (ABNT, 2021), o material pulverulento com a NBR 16973 (ABNT, 2021).

3.2.4 – Cimento

A massa específica do CPV-ARI foi calculada conforme NBR 16605 (ABNT, 2017).

3.2.5 – Adição mineral

A massa específica da sílica ativa foi feita pelo método de picnometria.

3.3 – Método de dosagem

Para avaliar os concretos contendo rejeito magnético, um concreto sem rejeito magnético (referência) e concretos contendo 50 e 100% de rejeito magnético em substituição (do volume) à areia média foram produzidos.

A dosagem de materiais do concreto referência foi realizada seguindo os seguintes passos:

1. Definição do consumo de cimento por metro cúbico de concreto.
2. Definição da relação água/cimento.
3. Definição da quantidade de sílica ativa.
4. Cálculo do consumo de agregados com o auxílio do software Elkem Materials Mixture Analyzer (EMMA), para otimização do empacotamento de agregados da mistura.
5. Definição do teor de aditivo superplastificante.
6. Dosagens em laboratório para ajustes na mistura experimental com objetivo de atingir para o concreto referência abatimento do tronco de cone igual ou superior a 200 mm. Segundo Baccin (1998), o CAD é frequentemente utilizado em elementos estruturais com alta taxa de armadura, implicando a necessidade de obter concretos com abatimento próximo ao adotado (200 mm ou mais).

3.4 – Produção dos corpos de prova

Para cada dosagem, amostras cilíndricas de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (6 para os ensaios de resistência à compressão, 3 para absorção de água e ataque por ácido sulfúrico) foram moldadas, conforme as diretrizes da norma NBR 5738 (ABNT, 2016).

Os materiais foram pesados separadamente em uma balança de precisão. Para o processo de mistura do concreto (amassamento) foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 145 litros. Primeiramente, o interior da betoneira foi molhado para evitar a absorção de água da mistura, destinada a hidratar o cimento, por suas paredes internas, conforme sugerido por Mendes (2002). Depois, foram inseridos os constituintes da mistura, permanecendo por tempo suficiente para sua completa homogeneização (Figura 13).

Figura 13 – Concreto homogeneizado em betoneira de eixo inclinado.



Fonte: elaborado pela autora.

O tempo de mistura para CAD é maior que aqueles utilizados para concretos convencionas, em virtude do comportamento tixotrópico deste material que demanda uma energia de amassamento superior. A tixotropia é a propriedade de adquirir consistência gelatinosa quando em repouso que alguns materiais apresentam, porém retornam a um estado fluido – viscoso ao serem agitados por esforços externos (MENDES, 2002).

Imediatamente após a mistura, o concreto foi removido do misturador e o abatimento do tronco de cone foi realizado, como apresentado na Figura 14, antes da moldagem das amostras

(Figura 15) para determinação da consistência, conforme orientações da norma NBR 16889 (ABNT, 2020).

Figura 14 – Ensaio de abatimento do tronco de cone.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 15 – Moldagem de corpo de prova.



Fonte: elaborado pela autora.

As amostras foram desmoldadas após 24 horas (Figura 17 (a)) e, então, submetidas ao processo de cura úmida em um tanque com água e hidróxido de cálcio (Figura 16 (b)), durante 50 dias. O período de cura foi superior ao convencional (28 dias) devido à espera pela disponibilidade do envio das amostras para o Laboratório dos Pavimentos e Tecnologia dos Materiais Sustentáveis do CEFET-MG – Campus Nova Suíça, onde foram realizados os ensaios de caracterização dos concretos.

Figura 16 – Corpos de prova (a) desmoldados e (b) em cura úmida.



Fonte: elaborado pela autora.

Os corpos de prova foram, então, enviados para o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Tecnologia dos Materiais Sustentáveis do do CEFET-MG – Campus Nova Suíça para realização dos ensaios de caracterização dos concretos.

3.5 – Caracterização física e mecânica dos concretos

Para avaliação do estado endurecido do concreto, o ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova foi realizado em equipamento universal de ensaios servo controlado (Figura 17), conforme orientações da NBR 5739 (ABNT, 2018) para a idade de 63 dias. Essa idade, não convencional, foi determinada pela necessidade de espera pela disponibilidade do envio das amostras para o laboratório onde foram realizados os ensaios de caracterização das amostras de concreto, que foram enviadas após o período de cura de 50 dias. Foi definida a idade de 63 dias, por ser uma idade múltipla de sete, que apesar de não ser comum é utilizada em alguns estudos, uma vez que nessa idade já aconteceram as reações químicas mais importantes esperadas.

Figura 17 – Equipamento universal de ensaios servo controlado.



Fonte: elaborado pela autora.

O módulo de elasticidade foi calculado de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2021).

O índice de absorção de água dos concretos produzidos foi calculado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009). O índice de vazios e a massa específica das amostras também foram calculados.

A massa específica do CAD com rejeito magnético, nas duas porcentagens de substituição, foi calculada e comparada com a massa específica do concreto referência para calcular o aumento percentual de massa dos concretos.

Para avaliar a resistência ao ataque ácido, os CPs curados foram secos em estufa, pesados e imersos em solução de 5% de ácido sulfúrico (H_2SO_4) em relação à água destilada, por 7 dias, simulando de maneira acelerada a deterioração em concretos ocasionada pela exposição a meios agressivos. Após retirados da solução, os CPs foram lavados em água corrente com escova de cerdas poliméricas, secos em estufa e pesados novamente para determinar a perda de massa. Além disso, a degradação superficial foi avaliada por inspeção visual, antes e depois do ataque. Este ensaio foi realizado conforme metodologia do estudo de Magalhaes *et al.* (2020).

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Caracterização dos materiais

4.1.1 – Rejeito magnético

A composição química obtida por fluorescência de raios-X, e o ensaio de perda ao fogo do rejeito magnético, realizadas pelo Laboratório SGS GEOSOL, estão apresentados na Tabela 6.

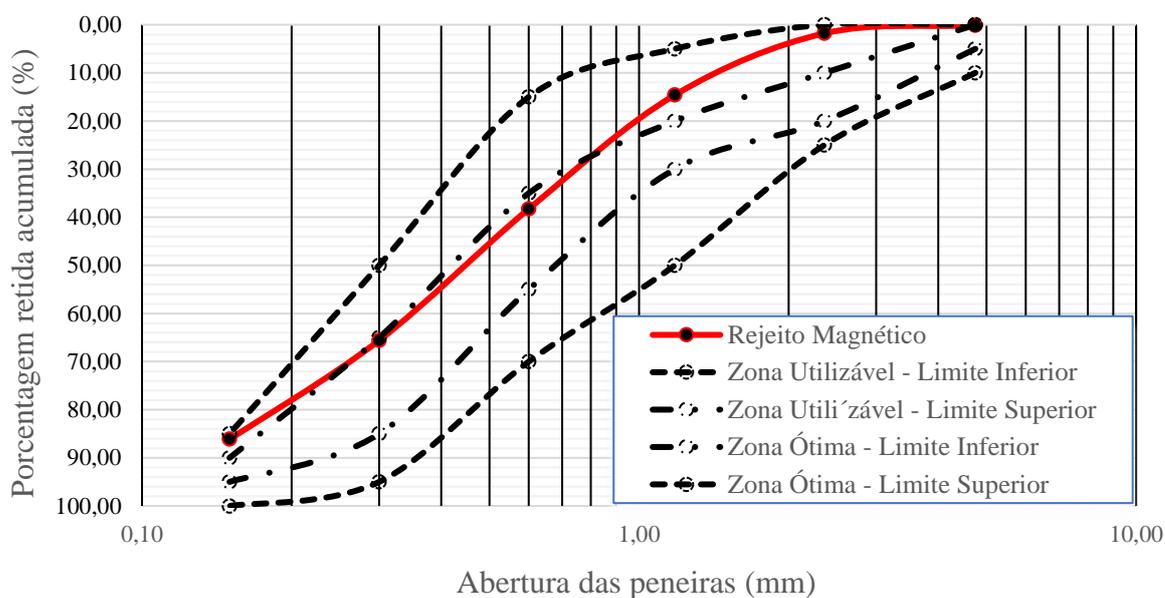
Tabela 6 – Análises química da amostra de rejeito magnético e replicata (REP) em porcentagem.

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	LOI
1	1,63	0,36	84,8	2,25	1,65	5,78	1,88	0,18	0,05	0,6	-0,57
REP	1,67	0,37	85,7	2,29	1,67	5,88	1,9	0,2	0,05		-0,59

Fonte: elaborado pela autora.

O ensaio de composição granulométrica, Figura 18, foi executado de acordo com as orientações da norma técnica NBR NM 248 (ABNT, 2003). O rejeito magnético possui granulometria contínua, não apresentando deficiência ou excesso de alguma fração do agregado. A granulometria contínua gera um melhor empacotamento pois as partículas menores preenchem os vazios existentes entre as partículas maiores diminuindo ainda a quantidade necessária de pasta de cimento e, conseqüentemente, o consumo de cimento (ALVES, 2000).

Figura 18 – Curva granulométrica do rejeito magnético.



Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 7 apresenta os parâmetros ensaiados para caracterização do rejeito magnético com suas respectivas normas e resultados.

Tabela 7 – Caracterização do rejeito magnético.

Parâmetro	ABNT	Resultado	Limites Normalizados NBR 7211 (2019)
Dimensão máxima característica	NBR NM 248 (2003)	2,36 mm	$\leq 4,8$ mm
Módulo de finura (MF)	NBR NM 248 (2003)	2,06	-
Massa específica	NBR 16916 (2021)	4,63 g/cm ³	-
Massa unitária	NBR 16972 (2021)	2,51 g/cm ³	-
Material pulverulento	NBR 16973 (2021)	4,29%	$\leq 3\%$
Impurezas orgânicas	NBR NM 49 (2001)	OK	Cor mais clara que a da solução padrão

Fonte: elaborado pela autora.

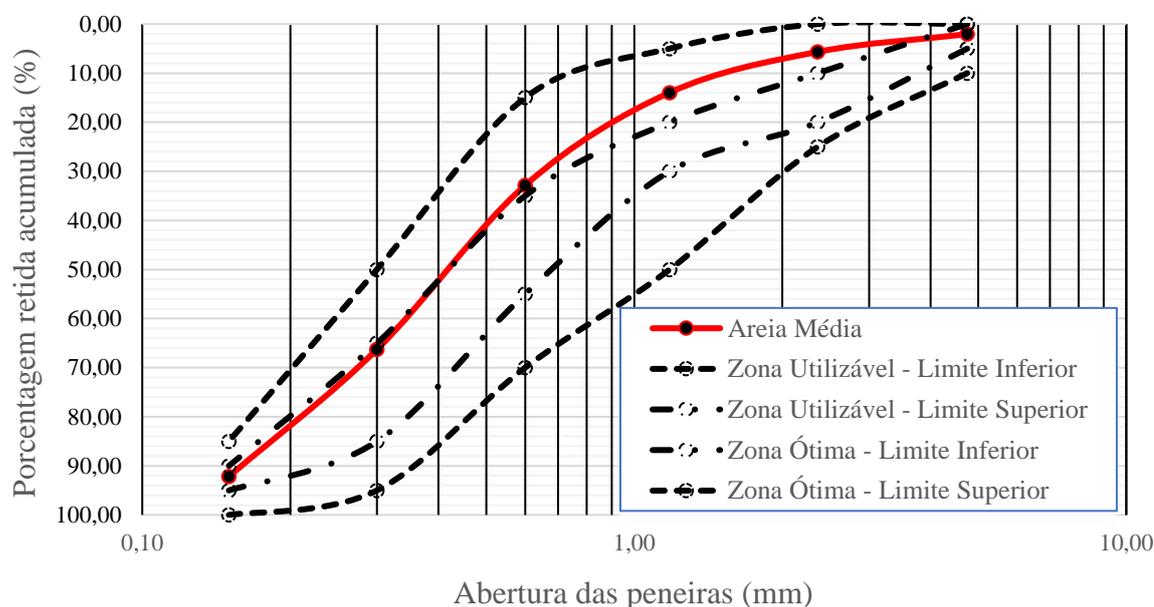
O material pulverulento foi superior ao limite que a norma estabelece. As partículas dos agregados devem estar livres de camadas de silte e argila, uma vez que estes materiais diminuem a resistência da ligação cimento-agregado e aumentam a demanda de água (BACCIN, 1998). Uma forma de reduzir a quantidade de pó e substâncias deletérias presentes na superfície dos agregados, fortalecendo a aderência na ligação agregado-pasta, seria através

da lavagem que pode ocasionar ganhos na resistência à compressão de até 8% (MENDES, 2002).

4.1.2 – Areia média e areia grossa

A Figura 19 apresenta a curva granulométrica da areia média, feita em conformidade com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), e a Tabela 8 apresenta os parâmetros ensaiados com suas respectivas normas e resultados para caracterização deste material.

Figura 19 – Curva granulométrica da areia média.



Fonte: elaborado pela autora.

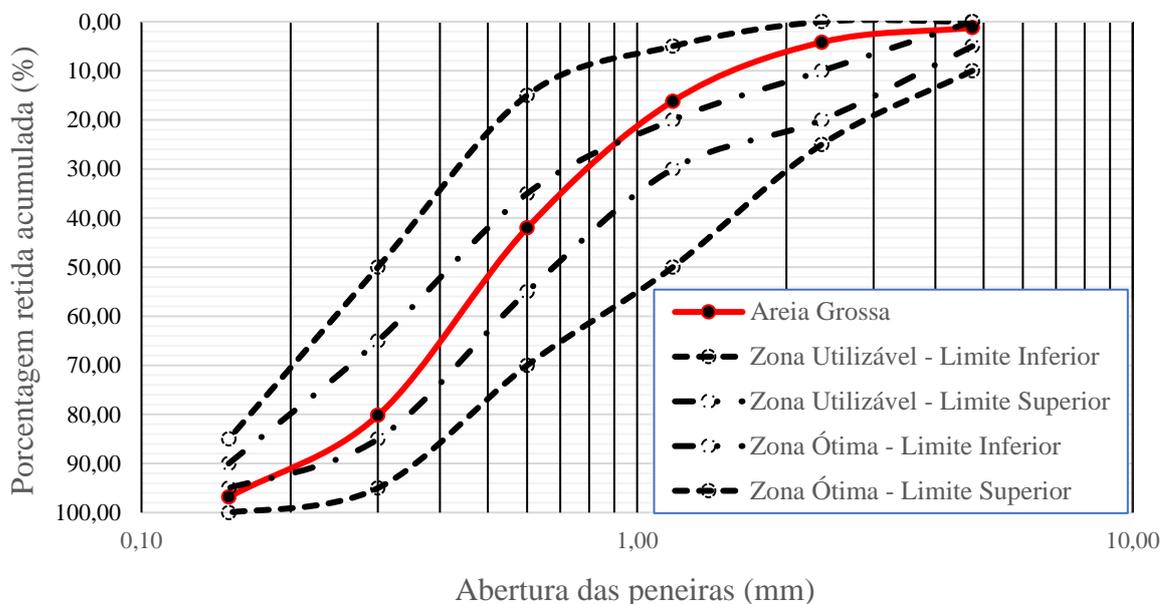
Tabela 8 – Caracterização da areia média.

Parâmetro	ABNT	Resultado	Limites Normalizados NBR 7211 (2019)
Dimensão máxima característica	NBR NM 248 (2003)	4,75 mm	≤ 4,8 mm
Módulo de finura (MF)	NBR NM 248 (2003)	2,13	-
Massa específica	NBR 16916 (2021)	2,32 g/cm ³	-
Massa unitária	NBR 16972 (2021)	1,42 g/cm ³	-
Material pulverulento	NBR 16973 (2021)	2,1%	≤ 3%
Impurezas orgânicas	NBR NM 49 (2001)	OK	Cor mais clara que a da solução padrão

Fonte: elaborado pela autora.

A Figura 20 apresenta a curva granulométrica da areia grossa, feita de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), e a Tabela 9 apresenta os parâmetros ensaiados com suas respectivas normas e resultados para sua caracterização.

Figura 20 – Curva granulométrica da areia grossa.



Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 9 – Caracterização da areia grossa.

Parâmetro	ABNT	Resultado	Limites Normalizados NBR 7211 (2019)
Dimensão máxima característica	NBR NM 248 (2003)	2,36 mm	$\leq 4,8$ mm
Módulo de finura (MF)	NBR NM 248 (2003)	2,42	
Massa específica	NBR 16916 (2021)	2,47 g/cm ³	-
Massa unitária	NBR 16972 (2021)	1,38 g/cm ³	-
Material pulverulento	NBR 16973 (2021)	0,67%	$\leq 3\%$
Impurezas orgânicas	NBR NM 49 (2001)	OK	Cor mais clara que a da solução padrão

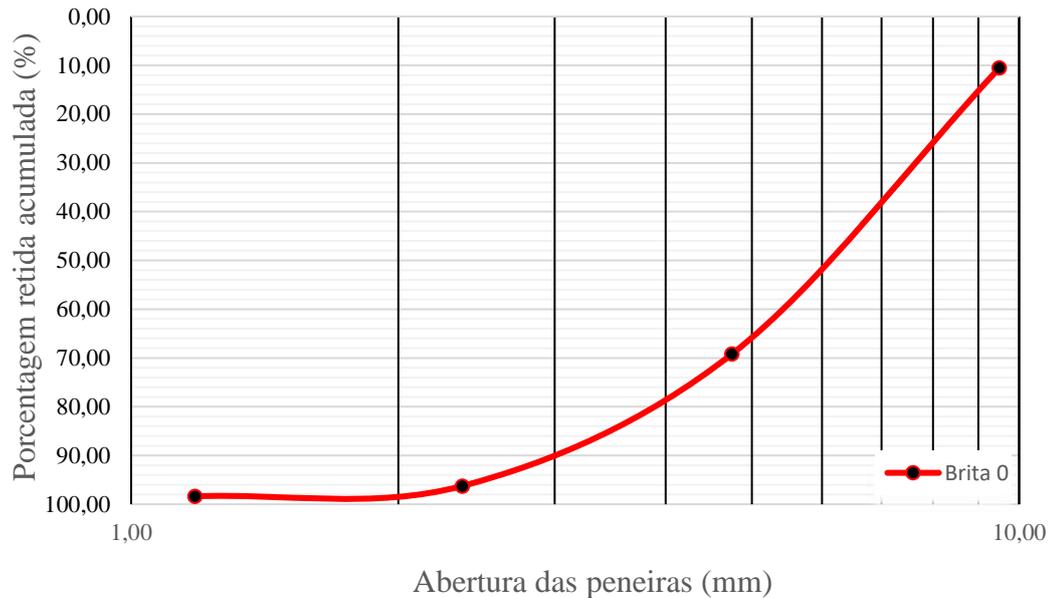
Fonte: elaborado pela autora.

Observa-se pelos resultados que ambos agregados miúdos se encontram dentro da zona utilizável, próximas à zona ótima, e apresentaram características dentro dos limites normalizados.

4.1.3 – Agregado graúdo

A Figura 21 apresenta a curva granulométrica do agregado graúdo feita em conformidade com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Figura 21 – Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 10 apresenta os parâmetros ensaiados para caracterização do agregado graúdo com suas respectivas normas e resultados.

Tabela 10 – Caracterização do agregado graúdo.

Parâmetro	ABNT	Resultado	Limites Normalizados NBR 7211 (2019)
Dimensão máxima característica	NBR NM 248 (2003)	9,50 mm	≥ 6,3 mm
Módulo de finura (MF)	NBR NM 248 (2003)	2,74	-
Massa específica	NBR NM 16917 (2021)	2,79 g/cm ³	-
Massa unitária	NBR 16972 (2021)	1,52 g/cm ³	-
Material pulverulento	NBR 16973 (2021)	0,82%	≤ 1%

Fonte: elaborado pela autora.

Observa-se que o agregado graúdo apresentou características dentro dos limites normalizados.

4.1.4 – Cimento

A massa específica do CPV-ARI, calculada conforme NBR 16605 (2017), foi de 3,08 g/cm³, corroborando com os parâmetros encontrados na literatura (LU *et al.*, 2021).

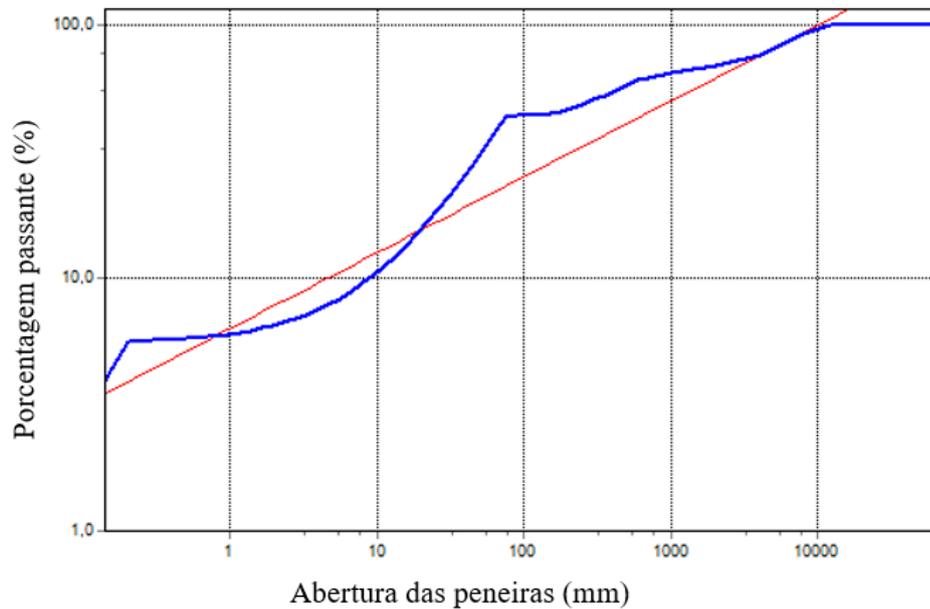
4.1.5 – Adição mineral

O resultado médio da massa específica da sílica ativa foi de 2,07 g/cm³, um valor coerente pois se aproxima do valor indicado na ficha técnica do produto (2,22 g/cm³).

4.2 – Dosagem

O consumo de cimento por metro cúbico de concreto foi definido como 700 kg/m³ de concreto, visando alcançar alta resistência à compressão (LU *et al.*, 2021). A relação a/c foi de 0,30, para garantir o valor mínimo necessário de água para que ocorra a hidratação do cimento (NEVILLE, 2016). A sílica foi adicionada na dosagem em 10% em relação à massa de cimento, conforme sugerido por Aïtcin (2000), que definiu como máximo esse valor em função da otimização da eficiência desta adição.

Para a determinação da proporção ótima dos demais materiais particulados do concreto referência foi utilizado o software EMMA, empregando o modelo de Andreasen e adotando o valor-q inicial de 0,29, conforme indicação de Oliveira (2018), sendo ajustado para 0,30 para melhor ajuste das curvas teórica e ideal. A Figura 22 apresenta a curva de distribuição granulométrica otimizada, linha em azul, com base no conceito de empacotamento de partículas. A linha vermelha representa a distribuição granulométrica ideal sugerida pelo software.

Figura 22 – Curva de empacotamento dos materiais granulares do concreto referência.

Fonte: elaborado pela autora.

A composição do concreto referência otimizado com base no conceito de empacotamento de partículas, e dos concretos com substituição, nas porcentagens de 50 e 100% do volume da areia média por rejeito magnético, são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Composição dos concretos.

Dosagem	Cimento	Sílica ativa	Consumo de materiais (kg/m ³ de concreto)			Brita 0	Água
			Agregado miúdo		Agregado graúdo		
			Areia média	Rejeito magnético	Areia grossa		
Referência	700	70	261	-	150	500	217
50%	700	70	130,5	230,7	150	500	217
100%	700	70	-	461,4	150	500	217

*Teor de superplastificante para todas as dosagens: 1% sobre a massa de cimento.

Fonte: elaborado pela autora.

O aditivo superplastificante foi utilizado na dosagem de 1% sobre o peso de cimento, conforme indicação do fabricante e conferência por meio de testes em laboratório dessa dosagem, proporcionando um abatimento igual a 225 mm próximo ao alvo (200 mm).

A quantidade de cimento, a relação a/c, a quantidade de sílica ativa, de agregado graúdo e o teor de superplastificante se mantiveram iguais nas três dosagens, para efeito de comparação dos resultados.

4.3 – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

Os resultados encontrados de abatimento do tronco de cone, conforme a norma NBR 16889 (ABNT, 2020), foram apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados do abatimento do tronco de cone.

Dosagem	Abatimento
Referência	225 mm
50%	230 mm
100%	120 mm

Fonte: elaborado pela autora.

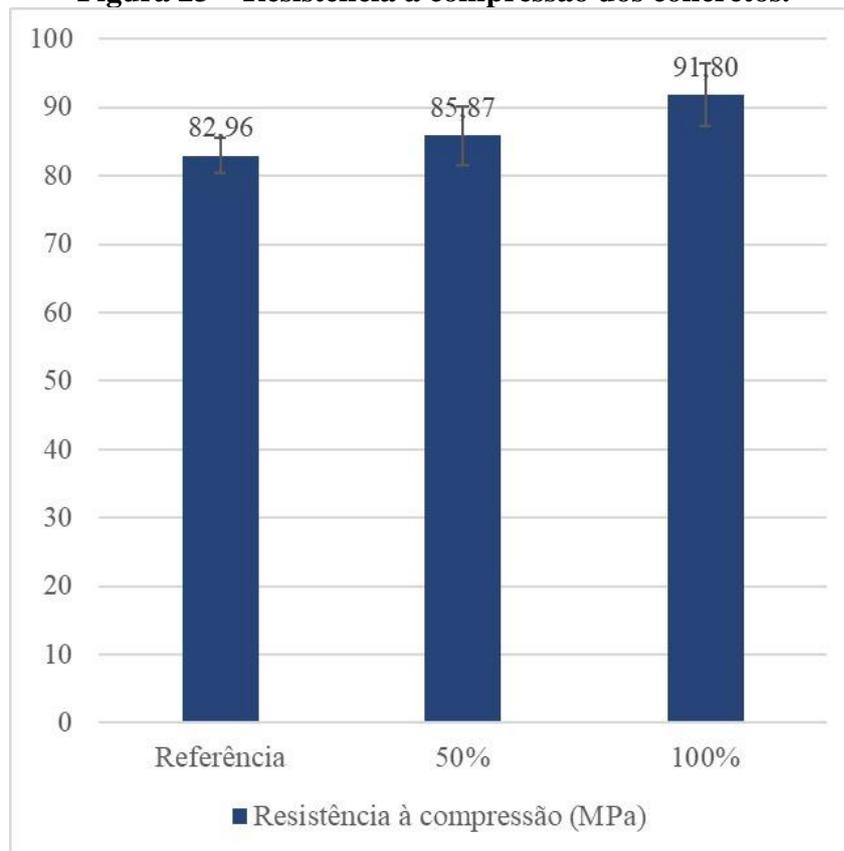
Observa-se que a substituição de 50% da areia média por rejeito magnético pouco alterou a trabalhabilidade do concreto. Já a substituição total de areia média por rejeito magnético diminuiu o abatimento do concreto em 105 mm, produzindo um concreto com consistência menos fluida. Essa redução do abatimento do concreto com 100% de substituição da areia média por rejeito magnético pode ser atribuída à forma mais angular das partículas de rejeito magnético, pois angulosidades elevadas reduzem a trabalhabilidade da mistura. De forma geral, partículas de areia natural são mais arredondadas a lisas.

O concreto referência e o concreto com substituição de 50% da areia média por rejeito magnético se enquadram na classe S220 da norma NBR 8953 (ABNT, 2015), sendo considerados concretos fluidos e podendo ser utilizados em elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armadura. O concreto com substituição total de areia média por rejeito magnético se enquadra na classe S100, sendo considerado concreto de aplicação normal e podendo ser utilizado em elementos estruturais com lançamento convencional.

4.4 – Caracterização física e mecânica do concreto

4.4.1 – Resistência à compressão

A Figura 23 apresenta um gráfico com os valores de resistência à compressão, obtidos conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 2018), para a idade de 63 dias dos três concretos produzidos.

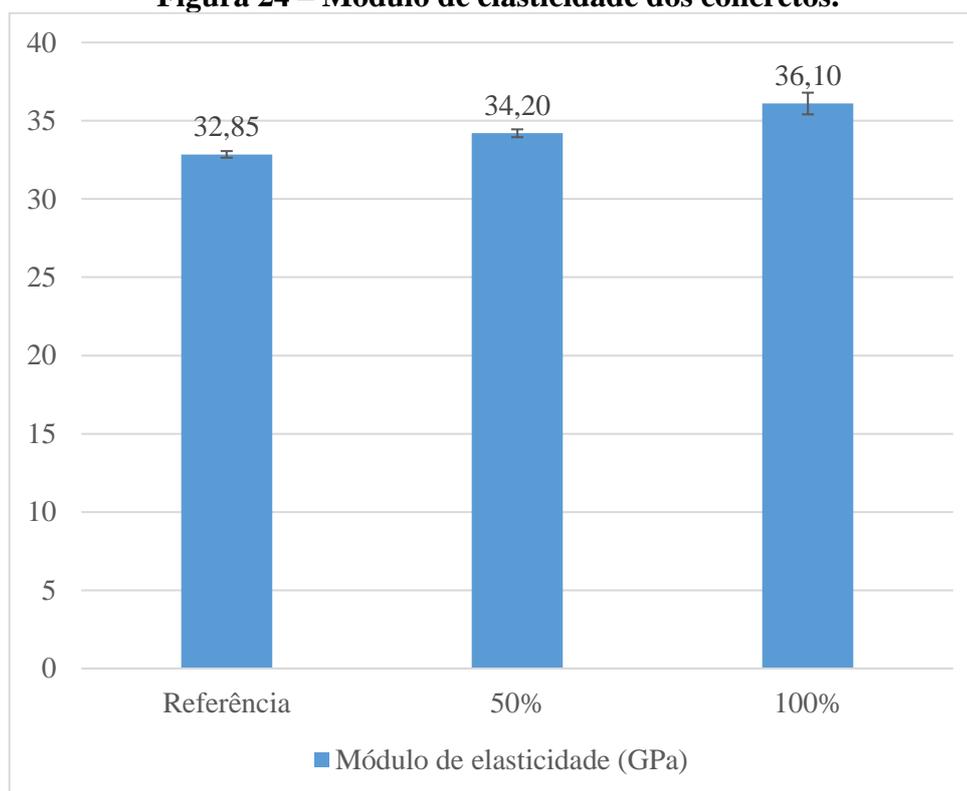
Figura 23 – Resistência à compressão dos concretos.

Fonte: elaborado pela autora.

Notou-se que as três dosagens atingiram resistência à compressão superior à 60 MPa, sendo, portanto, considerados concretos de alta resistência. A resistência à compressão aumentou com o aumento percentual da substituição de areia média por rejeito magnético, apresentando um ganho de 3,51% com a substituição de 50%, e um ganho de 10,66% com a substituição de 100% em comparação ao concreto referência.

4.4.2 – Módulo de elasticidade

A Figura 24 apresenta um gráfico com os valores de módulo de elasticidade, obtidos conforme a norma NBR 8522-1 (ABNT, 2021), para a idade de 63 dias dos três concretos produzidos.

Figura 24 – Módulo de elasticidade dos concretos.

Fonte: elaborado pela autora.

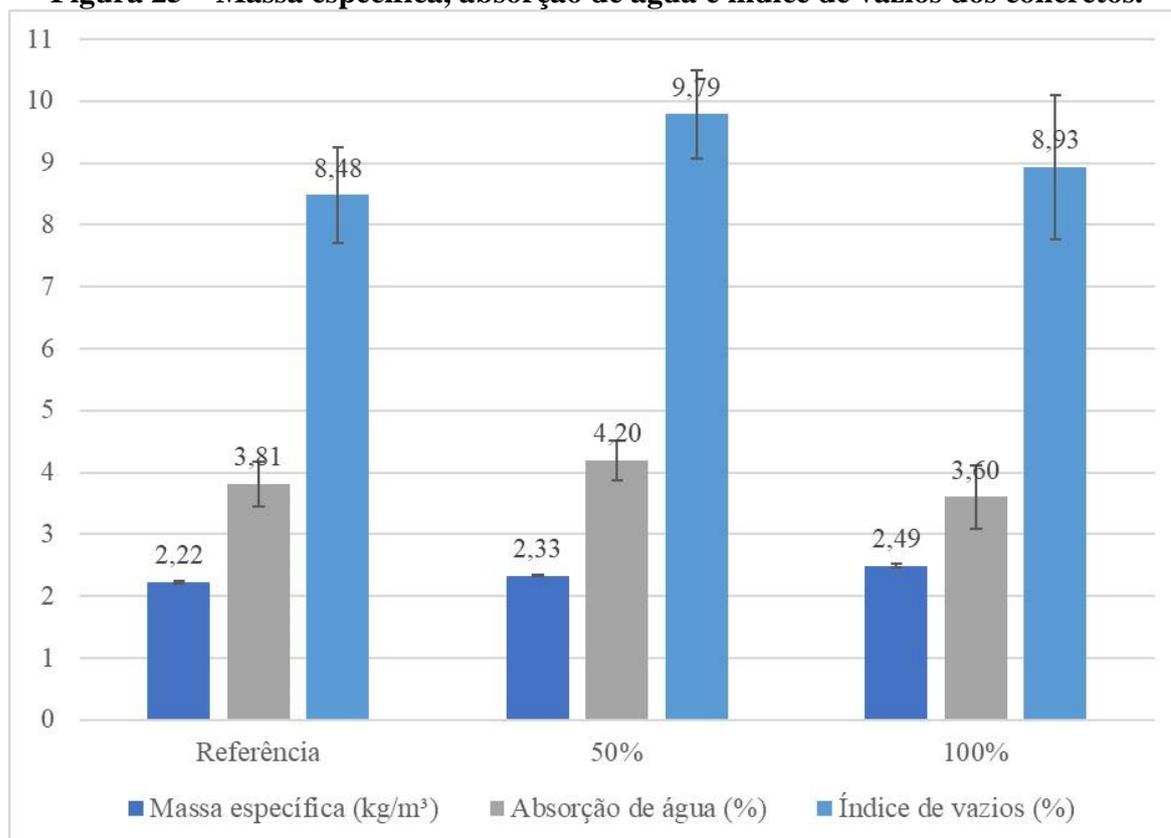
Notou-se que o módulo de elasticidade foi mais alto que o do concreto referência nos dois níveis de substituição da areia média, indicando que o módulo de elasticidade pode ser melhorado com a incorporação do rejeito magnético. Comparado ao concreto referência, o módulo de elasticidade do concreto com 50% de substituição da areia média por rejeito magnético aumentou aproximadamente 4%, e do concreto com 100% de substituição da areia média por rejeito magnético aumentou aproximadamente 10%. O módulo de elasticidade dos concretos produzidos corroboraram com os valores encontrados na literatura para concretos com resistências à compressão similares aos concretos desse estudo (GRAYBEAL, 2006; ICHINOMIYA *et al.*, 2005).

O concreto convencional geralmente consiste em agregado, pasta de cimento e uma zona de transição interfacial e, portanto, o módulo de elasticidade é determinado principalmente pelo conteúdo e módulos de elasticidade desses três componentes (WANG *et al.*, 2019). Devido à adição de sílica ativa, frequente em CAD, o processo de hidratação do cimento é acelerado e as microestruturas dos materiais cimentícios são melhoradas, e a zona de transição interfacial é mais densa (MUSTAPHA *et al.*, 2021). Portanto, o elevado módulo de elasticidade do CAD deve-se também à incorporação de sílica ativa.

4.4.3 – Massa específica, absorção de água e índice de vazios

A Figura 25 apresenta um gráfico com os valores de massa específica, absorção de água e índice de vazios, obtidos de acordo com orientações da norma NBR 9778 (ABNT, 2009), para a idade de 63 dias dos três concretos.

Figura 25 – Massa específica, absorção de água e índice de vazios dos concretos.



Fonte: elaborado pela autora.

A absorção de água dos três concretos foi inferior a 10%, sendo considerados de boa qualidade conforme Neville e Brooks (2013).

Quanto à massa específica, todos os concretos produzidos são classificados como concreto normal conforme norma NBR 8953 (ABNT, 2015). O aumento percentual da massa específica com relação ao CAD referência foi de 4,95% para a substituição de 50% de areia média por rejeito magnético e de 12,16% para a substituição de 100% de areia média por rejeito magnético.

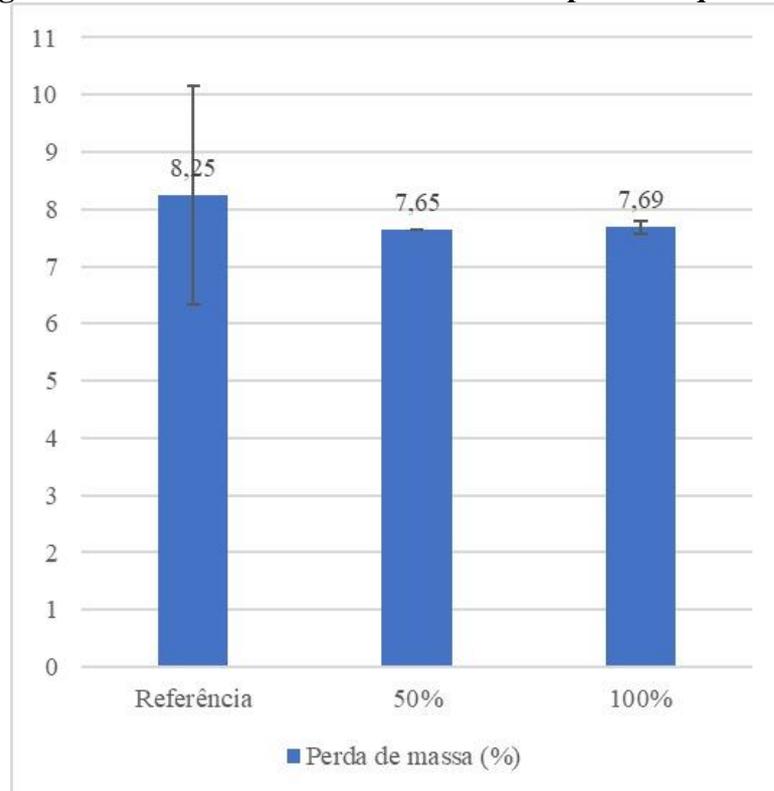
Observou-se que apesar de aumentar a resistência à compressão com o aumento da porcentagem de substituição de areia média por rejeito magnético, houve também aumento da

do índice de vazios, o que pode reduzir a durabilidade desses concretos. Vale ressaltar que a otimização do empacotamento das partículas granulares foi realizada apenas para o concreto referência a fim de comparar as três dosagens. Como a granulometria do rejeito magnético não foi exatamente igual à da areia média, a interação geométrica das partículas nos concretos com substituição pode ter sido responsável pela alteração na densidade da matriz dos concretos com rejeito magnético.

4.4.4 – Ataque por ácido sulfúrico

A Figura 26 mostra os valores da perda de massa dos três concretos produzidos após o ataque por ácido sulfúrico por 7 dias. Este ácido foi escolhido devido à sua alta acidez, sendo extremamente agressivo aos compostos cimentícios (MAGALHÃES *et al.*, 2020).

Figura 26 – Perda de massa dos concretos após o ataque ácido.



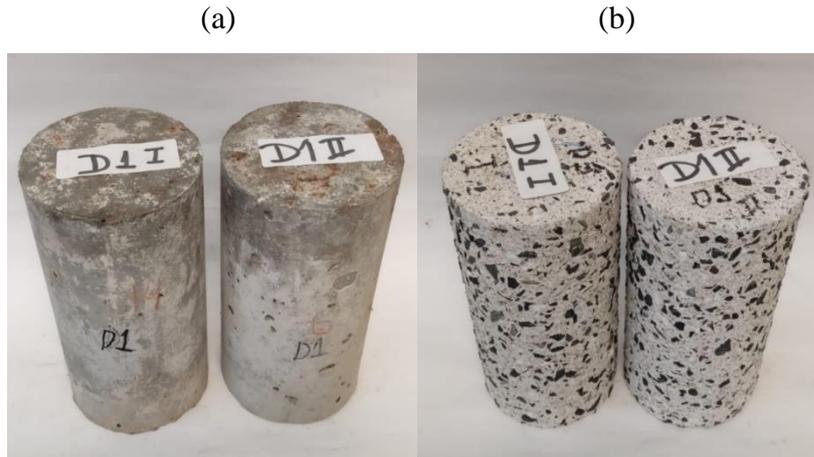
Fonte: elaborado pela autora.

A resistência ao ataque está relacionada à distribuição do tamanho dos poros (ZIVICA; BAJZA, 2001), além da química do cimento e dos agregados envolvidos. Pelos resultados, é possível observar que a perda de massa foi menor nos concretos produzidos com substituição

de areia média por rejeito magnético, em comparação ao concreto referência. Portanto, pode-se concluir que a substituição proposta reduziu a vulnerabilidade do concreto ao ataque ácido.

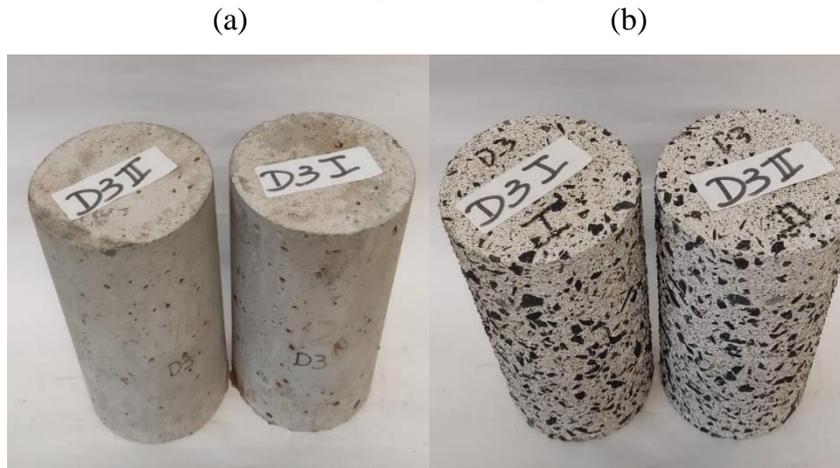
As Figuras 27, 28 e 29 mostram os concretos antes e depois do ataque ácido, sendo possível observar a degradação superficial ocorrida. Todos os concretos em contato com ácido sulfúrico apresentaram aumento da rugosidade superficial e exposição de agregados.

Figura 27 – Concreto referência (a) antes e (b) depois do ataque ácido.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 28 – Concreto com substituição de 50% de areia média por rejeito magnético (a) antes e (b) depois do ataque ácido.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 29 – Concreto com substituição de 100% de areia média por rejeito magnético
(a) antes e (b) depois do ataque ácido.

(a)

(b)



Fonte: elaborado pela autora.

5 – CONCLUSÕES

- Em uma análise geral baseada nos resultados obtidos, pode-se afirmar que o rejeito magnético proveniente do processo de beneficiamento de minério fosfático é um grande potencial para substituição de areia média como agregado miúdo na produção de CAD;
- Com relação à consistência, o concreto com substituição de 50% da areia média por rejeito magnético e o concreto referência foram considerados concretos fluidos (S220). O concreto com substituição total de areia média por rejeito magnético produziu um concreto com consistência menos fluida no estado fresco sendo considerado concreto de aplicação normal (S100);
- Os três concretos produzidos foram considerados concreto de alta resistência, uma vez que a resistência à compressão de todos foi superior a 60 MPa, e a resistência à compressão aumentou com o aumento percentual da substituição de areia média por rejeito magnético;
- O módulo de elasticidade dos concretos produzidos está entre 32,85 GPa e 36,10 GPa. Em comparação ao concreto referência, o módulo de elasticidade foi aumentado em aproximadamente 4% e 10% pela substituição de 50% e 100% de areia média por rejeito magnético, respectivamente;
- Os três concretos apresentaram boa durabilidade, pois a absorção de água foi inferior a 10% e a substituição proposta reduziu a vulnerabilidade do concreto ao ataque ácido;
- Houve aumento da massa específica dos concretos com o aumento percentual da substituição de areia média por rejeito magnético, porém, todos os concretos produzidos são classificados como concreto normal;
- A metodologia de dosagem de concreto aplicada foi eficaz, conforme verificado com a análise dos resultados, uma vez que produziu concretos de alto desempenho com incorporação de rejeito magnético.

6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros relacionados a esta pesquisa, são sugeridos os seguintes itens:

- Realizar ensaio de granulometria à laser para o cimento e adição mineral, para otimizar ainda mais o empacotamento dos materiais particulares ajustado pelo software EMMA;
- Lavar previamente o rejeito magnético para reduzir a quantidade de material pulverulento, fortalecendo a aderência na ligação agregado-pasta com objetivo de obter ganhos na resistência à compressão;
- Avaliar qualitativamente as fases formadas antes e depois do ataque ácido por difração de raios X (DRX).

REFERÊNCIAS

- ABRÃO, P. C. Sobre a disposição de rejeitos de mineração no Brasil. *In: Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração*, 1., 1987, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: 1987, p. 1-10.
- ABREU F. S. *et al.* Análise da eficiência da tinta de base epoxídica na proteção do concreto leve com argila expandida contra o ataque por ácido sulfúrico. **Revista Matéria**, v. 25, n. 3, 11 p. 2020.
- AIQIN, W.; CHENGZHI, Z.; NINGSHENG, Z. Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 5, p. 685-695, 1997.
- AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Pini, 2000. 667 p.
- ALKHATIB, A.; MASLEHUDDIN, M.; AL-DULAIJAN, S. U. Development of high-performance concrete using industrial waste materials and nano-silica. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 3, p. 6696-6711, 2020.
- ALMEIDA, I. R. Concretos de Alto Desempenho. *In: ISAIA, G. C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, cap. 38, p. 1159-1193.
- ALMEIDA, L. C. **Concreto**: notas de aula da disciplina. 2002. Disponível em: <www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Concreto.pdf>. Acesso em: 22 de fevereiro 2021.
- ALSALMAN, A. *et al.* Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 918-928, 2017.
- ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência**. 2000. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) 522R-10. **Report on pervious concrete.** Farmington Hills, Michigan, 2010.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). Committee 363R-92 (Reapproved 1997). **State of the art report on high strength concrete.** ACI Manual of Concrete Practice, part 1. Farmington Hills: ACI, 1998.

AMIN, M.; TAYEH, B. A.; AGWA, I. S. Effect of using mineral admixtures and ceramic wastes as coarse aggregates on properties of ultrahigh-performance concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 123073, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49:** Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001, 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003, 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de. Rio de Janeiro, 2016, 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018, 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019, 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019, 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1:** Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021, 24 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015, 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009, 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015, 23 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009, 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2017, 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020, 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021, 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021, 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021, 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021, 3 p.

BACCIN, A. G. C. **Fundamentos do concreto de alto desempenho e sua aplicação no projeto de pilares**. 1998. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BITTAR, R. J. **Caracterização tecnológica de rejeitos de fosfato e análises de estabilidade da barragem de rejeitos B5 da Bunge Fertilizantes S/A**. 2006. 257 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

BORGES, A. A.; LUZ, J. A. M.; FERREIRA, E. E. Caracterização da parcela magnética de minério fosfático de carbonatito. **Rem: Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 61, n. 1, p. 29-34, 2008.

BRANDÃO, A. M. S. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto**. 1998. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BRANDÃO, P. R. G. **Notas de aula da disciplina “Agregação e Dispersão”**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – (PPGEM), Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia, 2015.

CASTRO, A.; FERREIRA, F. Effect of particle packing in the durability of high performance concretes. **Ingengería de Construcción**. v. 31, n. 2, p. 91-104, 2016.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 341, p. 10-21, 2011.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. *In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 345-379.

DIXIT, A.; DU, H.; DAI PANG, S. Marine clay in ultra-high performance concrete for filler substitution. **Construction and Building Materials**, v. 263, p. 120250, 2020.

FARES, G.; ALBAROUD, M. H.; KHAN, M. I. Fine limestone dust from ornamental stone factories: a potential filler in the production of High-Performance Hybrid Fiber-Reinforced Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120009, 2020.

FREITAS JÚNIOR, J. A. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência com o uso de materiais disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

GOMES, C. B. **Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1984. 251 p.

GRAYBEAL, B. A. *et al.* **Material property characterization of ultra-high performance concrete**. United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development, 2006.

GRILLO, R. H. F. **Estudo da influência de aditivos redutores de água em concretos da construção civil**. 2014. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, Minas Gerais, 2014.

GUIMARÃES, R. C. **Aspectos relevantes da Separação de barita em minérios fosfáticos através de flotação**. 1997. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997.

HARTMANN, C; HELENE, P. R. L. HPCC in Brazilian office tower. **Concrete International**, v. 25, n. 12, p. 64-68, 2003.

ICHINOMIYA, T. *et al.* Experimental study on mechanical properties of ultra-high-strength concrete with low-autogenous-shrinkage. **Special Publication**, v. 228, p. 1341-1352, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Relatório anual de atividades**. 2018. 49 p. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/04/2018-2019.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2021.

JAMIL, M. *et al.* **Role of high-performance concrete in sustainable construction: A review on high performance concrete mix design expert system.** Faculty of Engineering & Built Environment, University Kebangsaan Malaysia, Malásia, 2010.

JIAO, Y. *et al.* Mechanical and fracture properties of ultra-high performance concrete (UHPC) containing waste glass sand as partial replacement material. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 123501, 2020.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** 2000. 113 f. São Paulo, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JUCÁ, T. P. *et al.* Estudo da dosagem de concreto de alto desempenho: comparativo de custos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 43., 2001. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: IBRACON, 2001. p. 1-11.

KONKOV, V. Principle approaches to high performance concrete application in construction. **Procedia Engineering**, v. 57, p. 589–596, 2013.

LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 11, p. 1699-1704, 2002.

LIEW, K. M.; SOJOBI, A. O.; ZHANG, L. W. Green concrete: Prospects and challenges. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 1063-1095, 2017.

LU, D. *et al.* Effects of curing conditions on the mechanical and microstructural properties of ultra-high-performance concrete (UHPC) incorporating iron tailing powder. **Materials**, v. 14, n. 1, p. 215, 2021.

MACHADO, W. G. F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos de mineração.** 2007. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MAGALHÃES, L. F. *et al.* Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123260, 2020.

MAKUL, N. Cost-benefit analysis of the production of ready-mixed high-performance concrete made with recycled concrete aggregate: A case study in Thailand. **Heliyon**, v. 6, n. 6, p. e04135, 2020.

MEHTA, P.K.; AÏTCIN, P.C. Principles underlying production of high-performance concrete. **Cement, concrete, and aggregates**, v. 12, n. 2, p. 70-78, 1990.

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

MELO, A. L. **Análise do comportamento reológico de pastas de cimento Portland contendo resíduos de pneu para poço**. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

MENDES, M. V. A. **Análise técnica da substituição parcial do agregado miúdo por rejeito magnético na produção de concreto**. 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Organizacional) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2016.

MENDES, S. E. S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. 2002. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

MUSTAPHA, F. A. *et al.* The effect of fly ash and silica fume on self-compacting high-performance concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 39, p. 965-969, 2021.

NAIK, T. R. Sustainability of Concrete Construction. **Structural Design and Construction**, v. 13, n. 2, p. 98–103, 2008.

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

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. São Paulo: Editora Pini, 2016.

NEVILLE, A.; AITCIN, P.C. High performance concrete: an overview. **Materials and Structures**, v. 31, p. 111-117, 1998.

NEWMAN, J.; CHOO, B. S. **Advanced concrete technology: constituent materials**. Elsevier, Linacre House: Jordan Hill, 2003. 1920 p.

NOCITE, D. M. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas**. 2011. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

OLIVEIRA, I. R. *et al.* **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000.

OLIVEIRA, C. O. *et al.* Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Matéria**, v. 23, n. 1, 2018.

OLIVEIRA, M. S. **Apostila prática experimental de tratamento de minérios**. Araxá, 2017.

OSTROWSKI, K. *et al.* Potential use of granite waste sourced from rock processing for the application as coarse aggregate in high-performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 238, p. 117794, 2020.

PATEL, V.; SHAH, N. A survey of high-performance concrete developments in civil engineering field. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 3, n. 2, p. 69-79, 2013.

PRABHU, G. G.; HYUN, J. H.; KIM, Y. Y. Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 514-521, 2014.

QIAN, D. *et al.* A novel development of green ultra-high performance concrete (UHPC) based on appropriate application of recycled cementitious material. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 121231, 2020.

RASHAD, A. M. A preliminary study on the effect of fine aggregate replacement with metakaolin on strength and abrasion resistance of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 487-495, 2013.

RAMACHANDRAN, V. S. Chemical admixtures - Recent Developments. *In: Concrete admixtures handbook*. 2. ed. William Andrew Publishing, 1996, cap. 4, p. 137-184.

ROJAS, D. F. H.; PINEDA-GÓMEZ, P.; GUAPACHA-FLORES, J. F. Effect of silica nanoparticles on the mechanical and physical properties of fibercement boards. **Journal of Building Engineering**, v. 31, p. 101332, 2020.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Calcário e Dolomito. *In: Rochas e Minerais Industriais - CETEM*, 2005. cap. 16, p. 327-350.

SANGIORGI, C. *et al.* Reuse of mining waste into innovative alkali-activated-based materials for road pavement applications. **Proceedings of the Functional Pavement Design**, Delft, The Netherlands, v. 26, p. 1735-1744, 2016.

SANTOS, S. B. **Análise da Fluência do concreto massa nas primeiras idades de carregamento**: influência de aditivos plastificantes e adições minerais. 2011. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SHEN, P. *et al.* Feasible use of municipal solid waste incineration bottom ash in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103814, 2020.

SILVA, I. S. **Concreto de alta resistência**: composição, propriedades e dimensionamento. 1995. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

SILVA, R. K. A. **Co-disposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis em cava exaurida**. 2014. 158 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

SOUZA, P. S. L. *et al.* Avaliação do módulo de elasticidade em concreto com metacaulim de alta reatividade, proveniente de rejeito industrial. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, p. 982-991, 2015.

TIKALSKY, P. J. **Concrete durability**. Committee on Durability of Concrete, 2000.

TORALLES-CARBONARIA, B. M. *et al.* Utilização do método ultra-sônico para avaliação da performance do concreto de alto desempenho. **Rev. IBRACON Estrut. Mater**, v. 3, n. 4, p. 494-511, 2010.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 439-471, 2011.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. *In*: ISAIA, G. C. *In*: **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. cap. 36.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2004.

VENKATESAN, B. *et al.* Experimental study on concrete using partial replacement of cement by Alccofine fine aggregate as iron powder. **Materials Today: Proceedings**, v. 37, p. 2183-2188, 2021.

WANG, Y. *et al.* Prediction of the elastic modulus and the splitting tensile strength of concrete incorporating both fine and coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 332-346, 2019.

WEI, H. *et al.* Dynamic and environmental performance of eco-friendly ultra-high performance concrete containing waste cathode ray tube glass as a substitution of river sand. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 162, p. 105021, 2020.

YANG, R. *et al.* Environmental and economical friendly ultra-high performance-concrete incorporating appropriate quarry-stone powders. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 121112, 2020.

YANG, R. *et al.* Feasibility analysis of treating recycled rock dust as an environmentally friendly alternative material in Ultra-High Performance Concrete (UHPC). **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120673, 2020.

YU, L.; WU, R. Using graphene oxide to improve the properties of ultra-high-performance concrete with fine recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 120657, 2020.

ZHANG, W. *et al.* Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 119917, 2020.

ZIVICA, V.; BAJZA, A. Acidic attack of cement based materials—a review: Part 1. Principle of acidic attack. **Construction and Building materials**, v. 15, n. 8, p. 331-340, 2001.