



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



LUCAS KUMMER PERINAZZO REZENDE

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS
UTILIZANDO AREIA RESIDUAL DO PROCESSO DE
EXTRAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO COMO AGREGADO
MIÚDO**

Uberlândia, 2025

LUCAS KUMMER PERINAZZO REZENDE

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS
UTILIZANDO AREIA RESIDUAL DO PROCESSO DE
EXTRAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO COMO AGREGADO
MIÚDO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil, Estruturas e Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Leila Aparecida de Castro Motta

Uberlândia, 2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R467
2025

Rezende, Lucas Kummer Perinazzo, 1998-
Avaliação das propriedades de concretos utilizando
areia residual do processo de extração do minério de
ferro como agregado miúdo [recurso eletrônico] / Lucas
Kummer Perinazzo Rezende. - 2025.

Orientadora: Leila Aparecida de Castro Motta.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.94>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Motta, Leila Aparecida de
Castro, 1970-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. III.
Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 315, PPGEC				
Data:	07 de fevereiro de 2025	Hora de início:	9h	Hora de encerramento:	11h 50min
Matrícula do Discente:	12222ECV002				
Nome do Discente:	Lucas Kummer Perinazzo Rezende				
Título do Trabalho:	Avaliação das propriedades de concretos utilizando areia residual do processo de extração do minério de ferro como agregado miúdo				
Área de concentração:	Construção Civil, Estruturas e Geotecnia				
Linha de pesquisa:	Construção Civil				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Inovação em materiais de construção civil				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Heber Martins de Paula - UFCAT, Lívia Borba Agostinho - UFU e Leila Aparecida de Castro Motta, orientadora do candidato.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Leila Aparecida de Castro Motta, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Leila Aparecida de Castro Motta**, **Membro de Comissão**, em 07/02/2025, às 11:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lívia Borba Agostinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 07/02/2025, às 11:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Heber Martins de Paula, Usuário Externo**, em 07/02/2025, às 11:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6029736** e o código CRC **FA8793FF**.

Referência: Processo nº 23117.002918/2025-48

SEI nº 6029736

AGRADECIMENTOS

Com gratidão e reconhecimento, manifesto os seguintes agradecimentos:

À minha mãe, **Daniela Kummer Perinazzo Rezende**, pela dádiva da vida e por todo o incentivo e apoio incondicional que me proporcionou ao longo dessa jornada.

Aos meus avós paternos, **João Batista de Rezende e Deolina Pires de Rezende**, e maternos, **Marino Perinazzo e Zuleica Kummer Perinazzo**, pelos valores morais e pela sabedoria transmitidos, que moldaram meu caráter e contribuíram significativamente para a pessoa que sou hoje.

Ao meu irmão, **Marcelo Augusto Kummer Perinazzo Rezende**, por sua constante parceria e companheirismo ao longo dessa caminhada.

À professora doutora **Leila Aparecida de Castro Motta**, orientadora deste trabalho, pelos ensinamentos preciosos, pela confiança depositada em mim e pelo incentivo contínuo, que tanto contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional. Expresso meu desejo de seguir colaborando profissionalmente no futuro.

À empresa **Vale S.A.** por fornecer os materiais e apoio financeiro necessários para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores da **FECIV**, cuja dedicação e paixão pela Engenharia Civil despertaram em mim um profundo amor pela área, culminando na elaboração desta dissertação de mestrado.

Ao amigo **Guilherme Resende Ponce**, se tornou um grande apoio para enfrentar os desafios da graduação e da pós-graduação, sendo uma companhia indispensável em muitos momentos.

Finalmente, estendo minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, direta ou indiretamente.

A todos, meu mais sincero e profundo agradecimento.

RESUMO

Os setores da construção civil e da mineração possuem grande impacto social e ambiental. Uma das alternativas encontradas para a mitigação de tais problemas é o uso de resíduos de mineração como constituintes de misturas cimentícias na construção civil. Ligante e agregados podem ser substituídos por resíduos de mineração em argamassas e concretos de forma a apresentar propriedades mecânicas aceitáveis e amenizar as consequências da extração de matérias primas não renováveis para sua confecção. Este trabalho tem o objetivo de avaliar as propriedades físicas e microestruturais de concretos fabricados com diferentes teores de material residual da extração de minério de ferro como agregado miúdo. Definiram-se 03 variáveis independentes: porcentagem de substituição de areia natural, consumo de cimento e tempo de cura. As propriedades físicas avaliadas foram resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração, absorção e capilaridade. Os traços foram definidos e aleatorizados com o software Statistica 12.0. Os resultados foram obtidos por meio de regressões múltiplas analisadas por Análise de Variância (ANOVA) e pelo Método das Superfícies de Resposta (MSR). Os resultados mostraram que a única variável que influenciou significativamente as propriedades de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade foi o tempo de cura. As variáveis porcentagem de substituição de areia natural e consumo de cimento não se mostraram significativas para absorção, mas foram significativas para capilaridade. Sendo que há uma tendência de diminuição dessas propriedades na faixa entre 50% e 70% de substituição.

Palavra-Chave: areia residual, concreto, superfície de resposta

ABSTRACT

The construction and mining sectors have a significant social and environmental impact. One of the alternatives found to mitigate these problems is the use of mining tailings as a component in cementitious mixtures in civil construction. Binders and aggregates can be replaced with mining tailings in mortars and concrete, maintaining acceptable mechanical properties while reducing the consequences of extracting non-renewable raw materials for their production. This study aims to evaluate the physical and microstructural properties of concrete made with different proportions iron ore tailings as fine aggregate. Three independent variables were defined: the percentage of natural sand replacement, cement consumption, and curing age. The physical properties evaluated included compressive strength, modulus of elasticity, splitting tensile strength, absorption, and capillarity. The mixtures were defined and randomized using the software Statistica 12.0. The results were obtained through multiple regressions analyzed by Analysis of Variance (ANOVA) and the Response Surface Methodology (RSM). The findings showed that the only variable that significantly influenced compressive strength, splitting tensile strength, and modulus of elasticity was curing age. The variables natural sand replacement percentage and cement consumption were not significant for absorption but were significant for capillarity, with a decreasing trend in these properties within the 50% to 70% replacement range.

Keywords: iron ore tailings, concrete, response surface

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de extração do minério de ferro	14
Figura 2: Imagens do material residual obtidas por microscopia eletrônica de varredura	24
Figura 3: Microestrutura de concreto com (a) 0% de substituição, (b) 40% de substituição e (c) 100% de substituição de agregado natural por agregado residual da extração de minério de ferro	27
Figura 4: Fluxograma das atividades e ensaios Fonte: Autor.....	33
Figura 5: Planejamento composto central para três fatores	34
Figura 6: (a) Resíduo da extração de minério de ferro, (b) areia natural fina e (c) areia natural média	37
Figura 7: Máquina utilizada no processo de fundição da amostra para ensaio de espectrometria por fluorescência de raios-x.....	38
Figura 8: Bruker S8 Tiger.....	38
Figura 9: (a) Máquina EMIC DL 60000, (b) Corpo de prova posicionado para ensaio de módulo de elasticidade e (c) corpo de prova posicionado para ensaio de resistência à tração por compressão diametral	42
Figura 10: Casos de substituição em massa de materiais com massas específicas diferentes..	48
Figura 11: Aspecto visual dos concretos com teores de argamassa (a) 45%, (b) 47%, (c) 49%, (d) 51% e (e) 53%.....	51
Figura 12: Superfícies de resposta para a resistência à compressão (f_c): (a) Porcentagem de substituição de areia natural no nível central ($X_1=0$); (b) Consumo de cimento no nível central ($X_2=0$); (c) Idade no nível central ($X_3=0$)	58
Figura 13: Superfícies de resposta para a resistência à tração (f_t): (a) Porcentagem de substituição de areia natural no nível central ($X_1=0$); (b) Consumo de cimento no nível central ($X_2=0$); (c) Idade no nível central ($X_3=0$)	62
Figura 14: Superfícies de resposta para o módulo de elasticidade estático (E_s): (a) Porcentagem de substituição de areia natural no nível central ($X_1=0$); (b) Consumo de cimento no nível central ($X_2=0$); (c) Idade no nível central ($X_3=0$)	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Porcentagem de pesquisas da Tabela 1 por país	17
Gráfico 2: Porcentagem de distribuição das pesquisas da Tabela 1 pela origem do resíduo ...	18
Gráfico 3: Porcentagem de distribuição das pesquisas da Tabela 1 conforme tipo de substituição	18
Gráfico 4: Relação entre composição química e variação na resistência à compressão de acordo com o tipo de utilização do material residual	22
Gráfico 5: Relação entre porcentagem de incorporação de resíduo e aumento na resistência à compressão	23
Gráfico 6: Relação entre porcentagem de incorporação de resíduo e aumento na resistência à tração	25
Gráfico 7: Modelos de previsão da resistência à compressão por idade do concreto plotados	30
Gráfico 8: Granulometria do cimento CP V ARI	46
Gráfico 9: Granulometria do resíduo da extração do minério de ferro	46
Gráfico 10: Granulometria de todos os constituintes do concreto.....	48
Gráfico 11: Massas unitárias obtidas das misturas de brita 0 e brita 1 em diferentes porcentagens.	49
Gráfico 12: Linha de tendência dos dados com indicação do teor de aditivo ideal	52
Gráfico 13: Lei de Prizskulnik & Kirilos	54
Gráfico 14: Gráfico de Pareto para a resistência à compressão	57
Gráfico 15: Gráfico de Pareto para a resistência à tração.....	61
Gráfico 16: Gráfico de Pareto para o módulo de elasticidade.....	64
Gráfico 17: Relação entre porcentagem de substituição de areia natural e absorção para diferentes consumos de cimento.....	67
Gráfico 18: Relação entre porcentagem de substituição de areia natural e teor de vazios para diferentes consumos de cimento.....	68
Gráfico 19: Relação entre porcentagem de substituição de areia natural e capilaridade para diferentes consumos de cimento.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Autores, ano de publicação, país, origem do resíduo e aplicação estudada	15
Tabela 2: Composição química dos resíduos de mineração	19
Tabela 3: Melhores resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão	21
Tabela 4: Melhores resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração.....	24
Tabela 5: Consumo de cimento das pesquisas	28
Tabela 6: Valores das variáveis independentes codificadas	35
Tabela 7: Matriz do Planejamento Composto Central.....	35
Tabela 8: Quantidade de corpos de prova por ensaio.....	41
Tabela 9: Propriedades físicas, químicas e mecânicas do CP V ARI.....	45
Tabela 10: Composição química da areia residual	47
Tabela 11: Massa específica, dimensão máxima e módulo de finura da areia e britas	47
Tabela 12: Abatimento de cone dos diferentes teores de argamassa.....	50
Tabela 13: Resultados do mini abatimento de cone no estudo do teor ótimo de aditivo	52
Tabela 14: Massa específica e consumo de cimento de diferentes teores de agregados	53
Tabela 15: Proporções dos concretos produzidos	54
Tabela 16: Resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade dos traços	55
Tabela 17: Absorção total e por capilaridade dos traços estudados	56
Tabela 18: Comparativo entre resistência à compressão medida e estimada	60
Tabela 19: Comparativo entre resistência à tração medida e estimada	63
Tabela 20: Comparativo entre módulo de elasticidade estático medido e estimado	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

a/c	Relação água/cimento
CO ₂	Dióxido de carbono
CaO	Óxido de cálcio
SiO ₂	Dióxido de silício
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro III
MgO	Óxido de magnésio
Na ₂ O	Óxido de sódio
K ₂ O	Óxido de potássio
SO ₃	Trióxido de enxofre
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio hidratado
TiO ₂	Dióxido de titânio
Mn ₂ O ₃	Óxido de manganês III
f _c	Resistência à compressão
f _t	Resistência à tração
E	Módulo de elasticidade
p	Probabilidade
R ²	Coefficiente de determinação
α	Alfa de ortogonalidade (nível extremo)

SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
CEB	<i>Comite Euro-International du Béton</i>
CP ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
ANOVA	Análise de Variância
FRX	Fluorescência de Raios-x
PCC	Planejamento Composto Central

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. JUSTIFICATIVAS	12
1.2. OBJETIVOS	12
1.2.1. <i>Objetivo geral</i>	12
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	12
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO EM CONCRETOS	14
2.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA	19
2.3. O EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS	20
2.3.1. <i>Trabalhabilidade</i>	20
2.3.2. <i>Resistência à compressão</i>	21
2.3.3. <i>Resistência à tração</i>	23
2.3.4. <i>Módulo de elasticidade</i>	26
2.3.5. <i>Porosidade e capilaridade</i>	26
2.4. O EFEITO DAS OUTRAS VARIÁVEIS	27
2.4.1. <i>Consumo de cimento</i>	27
2.4.2. <i>Idade de cura</i>	29
3. PLANEJAMENTO E METODOLOGIA	31
3.1. PLANEJAMENTO DA PESQUISA	31
3.2. PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL	31
3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	36
3.3.1. <i>Massa específica real e granulometria</i>	36
3.3.1.1. <i>Massa específica real e granulometria do cimento</i>	36
3.3.1.2. <i>Massas específicas reais e granulometrias dos agregados miúdos</i>	37
3.3.1.3. <i>Massa específica real e granulometria do agregado graúdo</i>	37
3.3.2. <i>Espectrometria por fluorescência de raios-x</i>	37
3.4. ESTUDOS PRÉVIOS	39
3.4.1. <i>Incorporação de brita 0 na brita 1</i>	39
3.4.2. <i>Teor de argamassa ideal</i>	39
3.4.3. <i>Teor de aditivo ideal</i>	40

3.4.4.	<i>Variação do consumo de cimento com o teor de agregados- Prizskulnik & Kirilos</i>	40
3.5.	PREPARAÇÃO DAS MISTURAS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	40
3.6.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	41
3.7.	MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO À COMPRESSÃO.....	42
3.8.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	42
3.9.	POROSIDADE POR ABSORÇÃO TOTAL.....	43
3.10.	ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	43
3.11.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	45
4.1.1.	<i>Resultados da caracterização do cimento</i>	45
4.1.2.	<i>Resultados da caracterização da areia residual</i>	46
4.1.3.	<i>Resultados da caracterização da areia natural e brita</i>	47
4.2.	RESULTADOS DOS ESTUDOS PRÉVIOS	49
4.2.1.	<i>Determinação da mistura de brita 0 e brita 1 ótima</i>	49
4.2.2.	<i>Determinação do teor de argamassa ideal</i>	50
4.2.3.	<i>Determinação do teor de aditivo ideal</i>	51
4.2.4.	<i>Determinação do teor de agregados a partir do consumo de cimento definido</i>	53
4.3.	MOLDAGEM E TRABALHABILIDADE	54
4.4.	RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	55
4.5.	ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DE RESPOSTA.....	56
4.5.1.	<i>Resistência à compressão</i>	57
4.5.2.	<i>Resistência à tração</i>	60
4.5.3.	<i>Módulo de elasticidade</i>	63
4.6.	ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS	66
4.7.	CAPILARIDADE.....	69

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

À medida que a população mundial cresce e o processo de expansão das cidades acontece, mais recursos naturais são utilizados. Os efeitos desse uso negligente já podem ser sentidos em diversas partes do mundo, o aumento da temperatura e outras mudanças climáticas, a falta de alguns recursos essenciais como água e até mesmo uma possível escassez de alimentos são temas recorrentes nas mais diversas áreas do conhecimento.

A engenharia civil é uma das áreas que mais impacta o meio ambiente, sendo que o setor de construção civil sozinho é responsável por cerca de 30% das emissões de gases de efeito estufa (PNUMA, 2009). Isso ocorre devido às atividades realizadas, à extração de matérias-primas, a fabricação de materiais (principalmente o cimento), além de outros aspectos relacionados ao setor. A utilização de materiais alternativos com propriedades cimentícias na fabricação do cimento como cinza volante, sílica ativa, e escória de alto forno têm sido a forma que a indústria do cimento encontrou para diminuir suas emissões de carbono (ZHAO J. *et al.*, 2020) e minimizar seu impacto no meio ambiente.

Além da indústria dos aglomerantes, outras indústrias de materiais integrantes da constituição do concreto enfrentam desafios relacionados à sustentabilidade. Em 2019, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA lançou o relatório “Areia e Sustentabilidade” para reforçar a importância do uso sustentável da areia, um dos materiais mais utilizados no mundo (PNUMA, 2019).

Outra área de grande impacto ambiental, relacionada à engenharia civil, é o setor de mineração, que é responsável por aproximadamente 10% das emissões de gases de efeito estufa em nível global (AZADI *et al.*, 2020). Além do fator ambiental, a mineração pode causar uma série de impactos sociais, como o rompimento da barragem da Mina do Córrego do Feijão em Brumadinho no estado de Minas Gerais no Brasil, com um saldo de 270 pessoas mortas e milhares de desalojados (CAETANO, G1, 2022).

Outro aspecto de grande importância é a disposição dos resíduos da mineração. Uma das maneiras mais usadas de descarte é a criação de barragens, que como citado anteriormente, já causaram diversos desastres humanos e ambientais ao longo da história. E além dos resultados a curto prazo, um dos recursos naturais mais importantes para a vida humana, a água, pode permanecer contaminada por um longo período após a ruptura dessas barragens

(GUIMARÃES *et al.*, 2022). Por isso, é inevitável o surgimento de estudos que buscam minimizar os impactos causados tanto pelo setor da construção civil, quanto da mineração, a fim de não somente proteger o meio ambiente como também mitigar os desastres socioambientais causados, promovendo assim um desenvolvimento sustentável.

Com o advento de legislações mais rigorosas por parte das instituições governamentais, muitas empresas são compelidas a encontrar novas soluções para o armazenamento e a reutilização de resíduos de mineração, para diminuir seu impacto ambiental (GHAZI *et al.*, 2022). Uma das alternativas é utilizar tais materiais como matéria-prima na fabricação de concreto. Algumas pesquisas já buscam avaliar a viabilidade do uso dos resíduos da mineração no concreto como material cimentício suplementar (BEZERRA *et al.*, 2021), substituição parcial do cimento (GHAZI *et al.*, 2022), agregados miúdos ou grãos (LOPES *et al.*, 2020) e até mesmo uma combinação como material ligante e agregados (Y. ZHANG *et al.*, 2023).

No entanto, esses estudos investigam as principais propriedades do concreto com percentuais estanques de substituição do material convencional pelos resíduos provenientes da mineração, uma vez que é um método simples e de fácil aplicação. Nenhuma pesquisa tem sido feita com a otimização da dosagem para alcançar a proporção ideal dos materiais.

De acordo com Mehta e Monteiro (2006), a dosagem é a arte de encontrar as proporções de materiais no concreto de forma a obter o melhor custo-benefício para uma determinada trabalhabilidade e com resistência adequada. Levando-se sempre em consideração as propriedades físicas e químicas dos materiais constituintes. Para otimização desses vários parâmetros existentes na dosagem de um concreto, pode-se recorrer à utilização de ferramentas matemáticas e estatísticas. No âmbito da engenharia civil, o Método das Superfícies de Resposta (MSR) tem sido usado para fazer a correlação de vários fatores nas propriedades químicas, físicas e reológicas de concretos (RAHEEL SHAH *et al.*, 2022).

Essa é uma das motivações deste trabalho, que buscou estudar o uso de areia residual do processo de extração do minério de ferro, como substituição do agregado miúdo natural na produção de concreto. Além disso, foram feitas análises estatísticas por meio da Metodologia das Superfícies de Resposta, um conjunto de técnicas utilizadas para otimizar processos nos quais a variável de resposta é influenciada por diversos fatores (COMPARINI *et al.*, 2012). Tal estudo tem por fim avaliar por meio de análises estatísticas a influência da areia residual nas propriedades das misturas e encontrar, caso existam, as faixas ótimas de uso de forma a manter ou até mesmo melhorar as propriedades dos concretos produzidos.

1.1. JUSTIFICATIVAS

Entende-se que há uma crise de disponibilidade de areia iminente no setor da construção civil, já existem entidades lançando relatórios sobre o uso consciente desse material não renovável (PNUMA, 2019).

O ferro é um dos metais mais consumidos do mundo, correspondendo a cerca de 95% de todo consumo de metais no mundo, e o Brasil é um dos seus maiores produtores (ARBILI *et al.*, 2022). O setor da mineração dispõe, aproximadamente, entre 65-80 bilhões de toneladas de resíduos mundialmente, sendo que a areia residual corresponde a um valor próximo de 1/6 do total (ADIGUZEL *et al.*, 2022).

Uma das alternativas para a disposição de tais resíduos é a construção de barragens para o armazenamento de tais materiais, o que pode representar um risco de vida para populações próximas, como mostra um histórico de rupturas (GUIMARÃES *et al.*, 2022).

O presente trabalho busca expandir os conhecimentos da área de utilização de areias provenientes da exploração de minério de ferro, buscando mitigar os impactos socioeconômicos que a extração de areia natural causa ao meio ambiente.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar as propriedades de concretos produzidos com areia residual do processo de extração do minério de ferro em substituição ao agregado miúdo natural.

1.2.2. Objetivos específicos

Analisar as características físicas e químicas da areia residual do processo de extração do minério de ferro;

Determinar, por meio da incorporação de teores diferentes de areia residual, a sua influência nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido;

Avaliar a influência da substituição da areia natural pela areia residual nas propriedades de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, absorção e capilaridade dos concretos produzidos e as faixas ótimas de incorporação, se existirem, por meio da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR);

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho apresentado é dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo foi apresentado nesta seção. O segundo capítulo consiste na revisão bibliográfica sobre o uso de materiais provenientes da extração de minério de ferro como agregado miúdo no concreto, destacando sua influência nas propriedades físicas do concreto no estado fresco e endurecido. Os materiais, o trabalho experimental e as metodologias utilizadas são dissecadas no terceiro capítulo. No quarto capítulo estão representados os resultados obtidos nos ensaios, suas respectivas análises e discussões. As considerações finais deste trabalho são apresentadas no quinto e último capítulo.

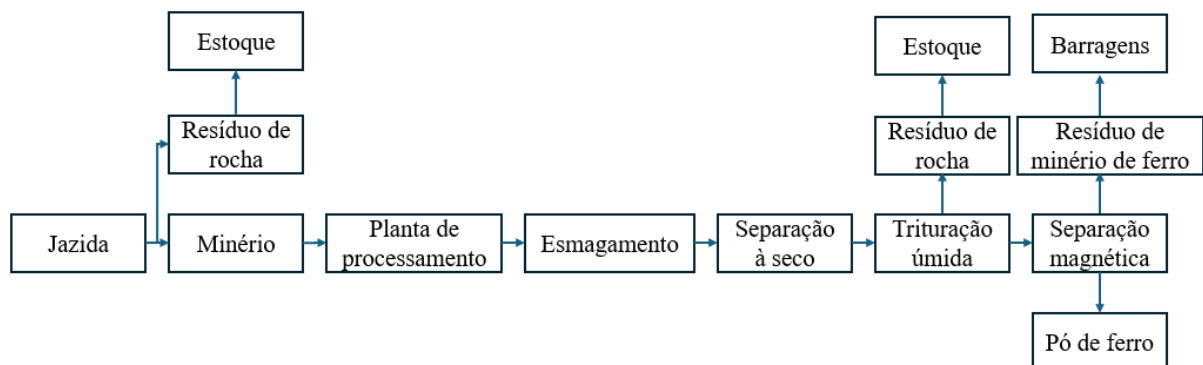
CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO EM CONCRETOS

A obtenção do minério de ferro se dá por meio da separação das partículas de óxidos de ferro (hematita e goetita) das partículas de quartzo e argila. Desse processo, o primeiro resíduo é uma lama com uma grande quantidade de óxidos de ferro. O segundo resíduo é uma areia muito fina obtida após o processo de deslamagem e flotação (separação das partículas de ferro e quartzo) (ZUCCHERATTE *et al.*, 2023). O processo é exemplificado na Figura 1.

Figura 1: Processo de extração do minério de ferro



Fonte: Adaptado de J. ZHAO *et al.*, 2021

Esse resíduo é, na maioria das vezes, uma areia fina e com granulometria inferior a granulometria das areias naturais usuais. Logo, pesquisas têm sido feitas para avaliação dos resíduos da mineração como substituição de diversos constituintes do concreto e avaliação dos seus impactos nas propriedades químicas e físicas, além da influência na durabilidade do material. Pode-se citar diversas aplicações estudadas, como substituição de parte do cimento (BEZERRA *et al.*, 2021; GHAZI *et al.*, 2022; SAEDI *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2022), substituição de agregado miúdo (ZHAO *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2022; W. ZHANG *et al.*, 2022), agregado graúdo, material cimentício suplementar (WU *et al.*, 2022) e até mesmo substituindo mais de um dos constituintes citados anteriormente no mesmo concreto (MA *et al.*, 2023; Y. ZHANG

et al., 2023). Para a utilização dos materiais como substituição de parte do cimento, é necessário que eles apresentem pozolanicidade, já para utilização como agregado ou filler, o material deve ser inerte (ADIGUZEL *et al.*, 2022).

Na Tabela 1 são mostrados os autores, o ano de publicação, o país de origem da pesquisa, a origem do resíduo e a aplicação do resíduo estudada dos artigos considerados relevantes no levantamento bibliográfico.

Tabela 1: Autores, ano de publicação, país, origem do resíduo e aplicação estudada

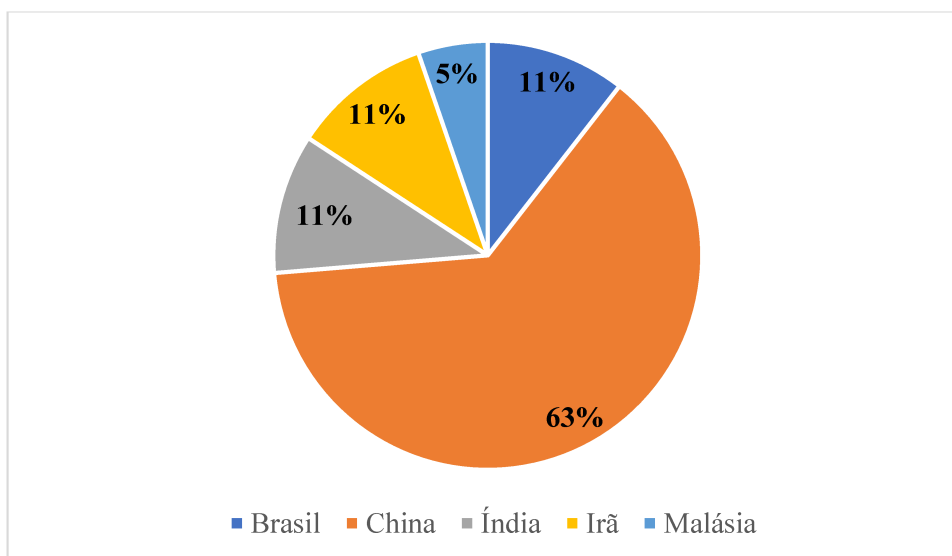
Autor	Ano	País	Minério explorado	Aplicação estudada
Shettima <i>et al.</i>	2016	Malásia	Ferro	Substituição de agregado miúdo. Avaliação de propriedades mecânicas e durabilidade do concreto.
Chinappa e Karra	2019	Índia	Ferro	Substituição de agregado miúdo. Avaliação de propriedades mecânicas do concreto.
W. Zhang <i>et al.</i>	2020	China	Ferro	Substituição do agregado miúdo. Avaliação dos efeitos na compressão e durabilidade de UHPC.
Zhao <i>et al.</i>	2020	China	Cobre e ferro	Substituição do agregado miúdo. Avaliação dos efeitos nas propriedades mecânicas e permeabilidade de argamassas curadas à vapor.
Cheng <i>et al.</i>	2020	China	Ferro	Substituição de cimento. Avaliação da durabilidade de concreto.
Bezerra <i>et al.</i>	2021	Brasil	Ferro	Substituição de cimento. Avaliação das propriedades mecânicas e cinética de hidratação de pastas de cimento.
Xu <i>et al.</i>	2021	China	Ferro	Concreto com 30% de adição de resíduo e agregado reciclado. Avaliação da utilização de fibras de polipropileno nas propriedades mecânicas.
Chen <i>et al.</i>	2022	China	Ferro	Substituição do agregado miúdo em concreto com cinza da casca de arroz. Avaliação das propriedades mecânicas e durabilidade de concreto.

Wu <i>et al.</i>	2022	China	Ferro	Adição mineral. Avaliação das propriedades mecânicas de concreto.
Azevedo <i>et al.</i>	2022	Brasil	Alumínio	Estudo prévio para avaliar a aplicação de resíduo no concreto.
Ghazi <i>et al.</i>	2022	Irã	Cobre	Substituição de cimento. Avaliação das propriedades mecânicas e durabilidade de concreto.
Saedi <i>et al.</i>	2022	Irã	Chumbo e Zinco	Substituição de cimento. Resíduos com diferentes teores de sulfato. Avaliação de propriedades mecânicas e durabilidade de concreto.
Liu <i>et al.</i>	2022	China	Ferro	Substituição do agregado miúdo. Avaliação de propriedades mecânicas e durabilidade de concreto.
Li <i>et al.</i>	2022	China	Ferro	Substituição do cimento. Avaliação das propriedades mecânicas e cinética de hidratação variando granulometria do resíduo em argamassas.
T. Luo <i>et al.</i>	2022	China	Molibdênio	Substituição de pasta de cimento. Avaliação das propriedades mecânicas e microestrutura de concreto.
Jayasimha <i>et al.</i>	2022	Índia	Ferro	Substituição do agregado miúdo. Avaliação de propriedades mecânicas do concreto.
Ma <i>et al.</i>	2023	China	Ferro	Adição mineral, substituição total de agregado miúdo e graúdo. Avaliação das propriedades mecânicas de colunas de concreto.
Y. Zhang <i>et al.</i>	2023	China	Ferro	Substituição do cimento, substituição total de agregado miúdo e graúdo. Avaliação das propriedades mecânicas e durabilidade.
Pei <i>et al.</i>	2023	China	Cobre	Adição mineral. Avaliação das propriedades mecânicas de argamassas com diferentes fases do resíduo.

Fonte: Autor

Pode-se notar maior preocupação de países em desenvolvimento com pesquisas para a aplicação desses materiais, como mostrado no Gráfico 1.

Gráfico 1: Porcentagem de pesquisas da Tabela 1 por país

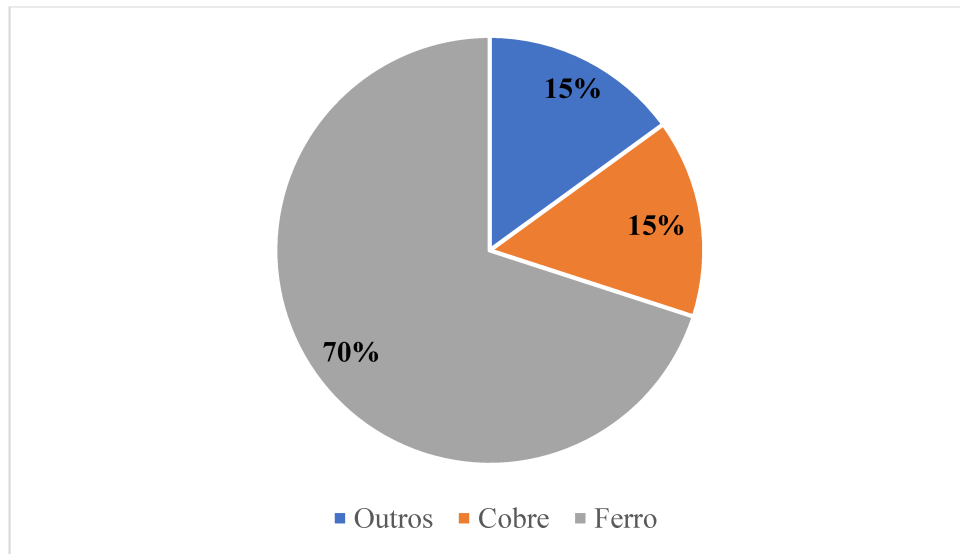


Fonte: Autor

A China é responsável por cerca de 41% das emissões de CO₂ do setor da construção civil (HUANG *et al.*, 2018), esse fato atrelado ao rápido desenvolvimento do país, a partir dos anos 2000, incentiva produção de pesquisas que buscam mitigação de emissões. A indústria cimenteira foi responsável pela emissão de 2,52 Gt de CO₂ em 2021 (IEA, 2022), as formas mais relevantes de aprimorar a eficiência da produção de cimento consistem na redução da quantidade de calcário na matéria-prima e na modificação da composição química do cimento (GAO *et al.*, 2018), o que mostra grande relevância em estudos que procuram substituição de parte do material por resíduos de mineração como solução para o problema das emissões de CO₂. Já a utilização desses resíduos como agregados no concreto ajuda a diminuir a concentração desses materiais em locais de descarte como barragens, além de poupar exploração de recurso naturais não renováveis.

Outro ponto importante é como a maioria dos materiais residuais vem da exploração do minério de ferro, como mostrado no Gráfico 2. Isso acontece pois o ferro é o metal mais utilizado no mundo todo, com uma produção anual de cerca de 2 bilhões de toneladas (ARBILI *et al.*, 2022). Sendo que dois dos países que mais extraem minério de ferro são o Brasil e a China, por este motivo há um grande volume de pesquisas sendo realizadas com resíduos dessa atividade nesses países.

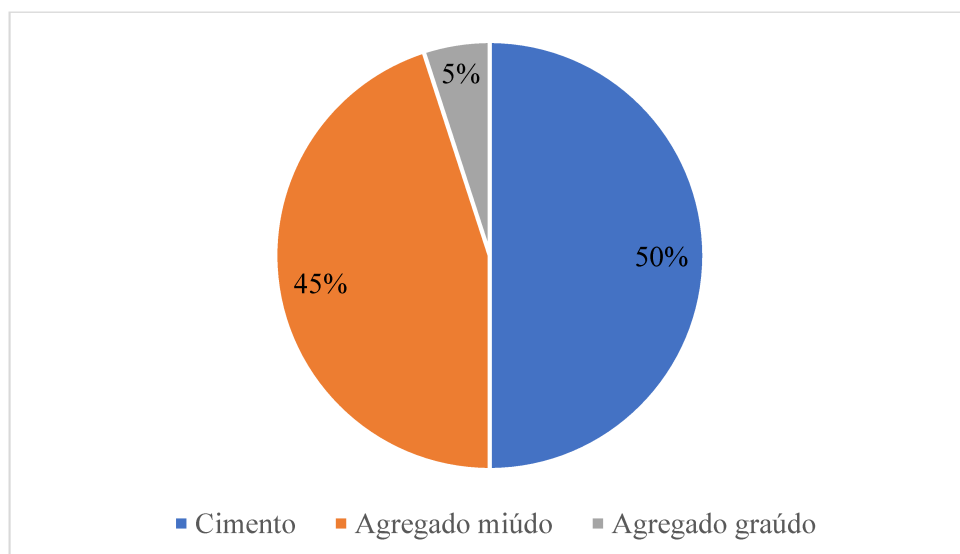
Gráfico 2: Porcentagem de distribuição das pesquisas da Tabela 1 pela origem do resíduo



Fonte: Autor

No Gráfico 3 são mostradas as porcentagens de utilização desses materiais como substituição ou adição do agregado miúdo, agregado graúdo e cimento. Como discutido anteriormente, a escolha da aplicação a qual o resíduo da mineração pode ser submetido depende de vários fatores, sendo a reatividade uma de suas características mais importantes. De forma geral, esses materiais são inertes devido a uma estrutura cristalina estável, e a reatividade pode ser melhorada quebrando essa estrutura por meio de ativação química, ativação mecânica, ativação térmica e ativação composta (J. ZHAO *et al.*, 2021).

Gráfico 3: Porcentagem de distribuição das pesquisas da Tabela 1 conforme tipo de substituição



Fonte: Autor

Portanto, é possível perceber que há uma grande gama de pesquisas sendo feitas sobre o tema, uma vez que cada material e cada aplicação possui suas peculiaridades. Neste trabalho será investigada a utilização de um resíduo de mineração como agregado miúdo em substituição ao agregado miúdo natural, dessa forma as próximas seções terão esse enfoque.

2.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Os quatro principais constituintes dos resíduos utilizados nos trabalhos foram CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . O óxido de silício é o principal composto químico da areia e um dos mais importantes do cimento, o óxido de alumínio e o óxido de ferro (III) também são compostos essenciais para o desenvolvimento das reações cimentícias. O alto teor de aluminossilicatos é um bom indicador de que o material pode ser utilizado como adição pozolânica, tendo que ser averiguada sua reatividade (AZEVEDO *et al.*, 2022). Caso o material não apresente reatividade e procura-se estudar a viabilidade de utilização como material cimentício suplementar, há pesquisas como a de Zhou *et al.* (2021) e Almeida *et al.* (2023) que utilizam um processo de ativação térmica para garantir reatividade do resíduo. Os resultados obtidos nas pesquisas com materiais provenientes da extração de minério de ferro e utilizados como agregado miúdo foram agrupados na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química dos resíduos de mineração

Autor	Ano	País	Principais compostos químicos (%)							
			CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Shettima <i>et al.</i>	2016	Malásia	4,30	56,00	10,00	8,30	0,00	0,00	1,50	0,00
Chinappa e Karra	2019	Índia	4,06	49,75	9,74	27,03	3,11	0,00	0,50	0,00
W. Zhang <i>et al.</i>	2020	China	5,05	72,84	4,74	8,88	6,06	0,00	0,00	0,05
Liu <i>et al.</i>	2022	China	4,21	70,26	6,42	13,75	2,85	1,22	1,01	0,24
Jayasimha <i>et al.</i>	2022	Índia	28,42	34,65	28,65	0,12	5,70	0,44	0,25	0,00

Fonte: Autor

Os trabalhos de Chen *et al.* (2022), Wu *et al.* (2022), Ma *et al.* (2023), W. Zhang *et al.* (2020), Liu *et al.* (2022), Y. Zhang *et al.* (2023), Li *et al.* (2022), apresentam materiais nomeados como resíduo da extração de minério de ferro, mas apresentam composições com

uma grande variabilidade, somente Bezerra *et al.* (2021) especificam o alto teor de óxido de ferro no resíduo como forma de caracterizar especificamente o resíduo. Portanto, há uma evidente falta de consenso sobre a nomenclatura e categorização desses resíduos.

2.3. O EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS

As partículas de resíduos de mineração apresentam uma superfície irregular e rugosa o que diminui a trabalhabilidade dos concretos com tais materiais (GOU *et al.*, 2019; ADIGUZEL *et al.*, 2022). Entretanto, a rugosidade da superfície melhora o vínculo entre a pasta de cimento e o agregado (W. ZHANG *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2022; LIU *et al.*, 2022; ZHAO *et al.*, 2023). Partículas mais finas favorecem o efeito filler e promovem a nucleação do C-S-H do concreto (BEZERRA *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2022; Y. ZHANG *et al.*, 2023). Do ponto de vista da utilização dos resíduos como material pozolânico, a elevada área superficial favorece o desenvolvimento das reações (AZEVEDO *et al.*, 2022). Esses efeitos podem ser responsáveis por uma melhora nas propriedades mecânicas do concreto.

2.3.1. Trabalhabilidade

Segundo Mehta e Monteiro (2006), a trabalhabilidade do concreto é uma característica composta por duas propriedades principais: consistência, que descreve a facilidade de escoamento do concreto, e coesão, que está relacionada à tendência do concreto de exsudar e segregar. A adição de um resíduo da extração de minério de ferro impacta essas características diretamente.

De acordo com as os trabalhos de revisão de Adiguzel *et al.* (2022) e Arbili *et al.* (2022), a utilização de resíduo da extração de minério de ferro como agregado miúdo no concreto diminui a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, devido à maior área superficial e superfície rugosa destes materiais.

Chinappa e Karra (2019) e Liu *et al.* (2022) obtiveram resultados que corroboram essa observação. O estudo de Chinappa e Karra demonstrou uma redução de 13% na trabalhabilidade do concreto quando 50% da areia natural foi substituída. Já a pesquisa de Liu *et al.* mostrou que, com a substituição total da areia natural, o concreto apresentou uma diminuição de 60% no valor do *slump*. O que pode explicar esse fenômeno, como explicado anteriormente, é a tendência de materiais com alta área superficial de aumentar a demanda por água nos concretos

(MEHTA E MONTEIRO, 2006), como há a substituição por um material mais fino sem aumento da relação água/cimento nestes casos, o slump do concreto tende a diminuir.

Há algumas exceções em que o *slump* aumentou conforme a substituição de agregado miúdo por resíduo. No trabalho de Jayasimha et al. (2022), essa observação pode ser explicada pelas características deste material ser não-absorvente e possuir superfície vítrea. Dessa forma o material age de duas maneiras, aumentando a disponibilidade de água no sistema por evitar adsorção em sua superfície e serve como uma superfície de rolagem entre as partículas, agindo como lubrificante.

2.3.2. Resistência à compressão

As informações obtidas nos estudos da revisão bibliográfica são compiladas na Tabela 3. Pode-se notar que não houve uma convergência dos dados no que se trata da porcentagem de aumento da resistência à compressão, isso acontece devido as diferentes características químicas e físicas dos resíduos, apresentadas e discutidas nas seções 3.2 e 3.3, respectivamente.

Tabela 3: Melhores resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão

Autor	Ano	País	Melhor resultado	
			Variação	Observação sobre o resíduo
Shettima <i>et al.</i>	2016	Malásia	+ 12%	25% de substituição do agregado miúdo
Chinappa e Karra	2019	Índia	+ 11%	30% de substituição do agregado miúdo
W. Zhang <i>et al.</i>	2020	China	+ 14%	40% de substituição do agregado miúdo
Liu <i>et al.</i>	2022	China	+ 5%	40% de substituição do agregado miúdo
Jayasimha <i>et al.</i>	2022	Índia	+ 5%	40% de substituição do agregado miúdo

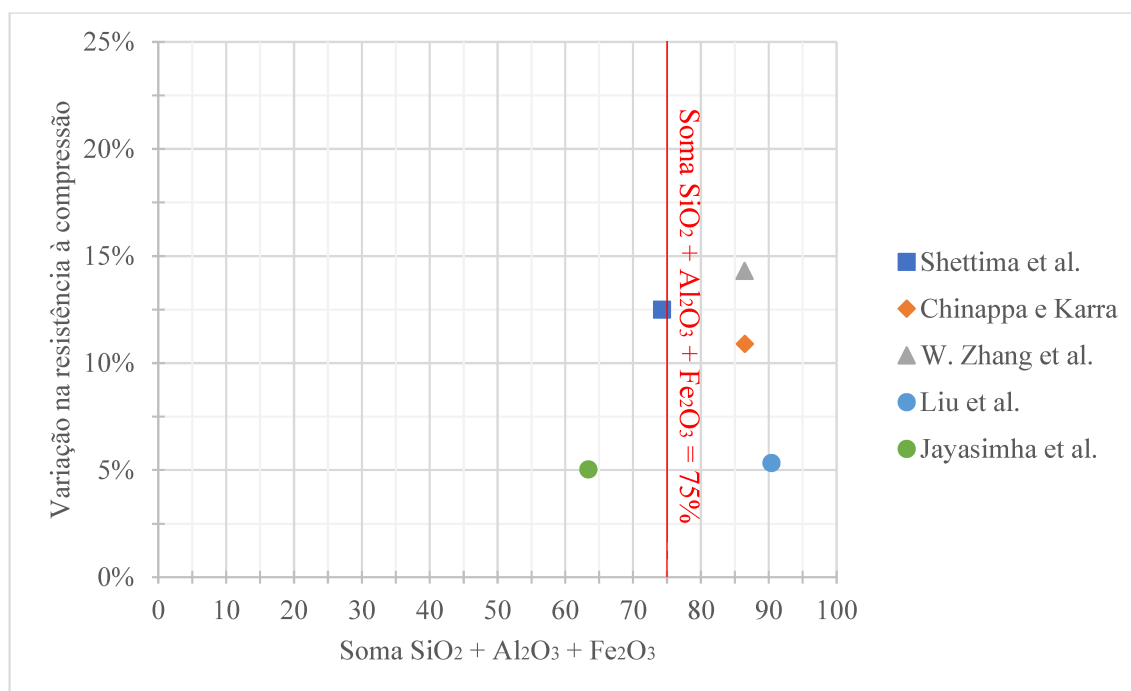
Fonte: Autor

Pela Tabela 3 percebe-se que a variação positiva máxima para o melhor resultado de concretos comuns foi de 14%, sendo essa uma variação relativamente pequena. Sendo preciso avaliar outros aspectos como o custo-benefício da utilização do material residual para aplicação.

Adiguzel *et al.* (2022) notaram que quando a soma de sílica, óxido de alumínio e óxido de ferro é maior que 75% da composição total do resíduo, há uma tendência de melhora na resistência à compressão, exceto em casos com baixo teor de sílica. E que a melhor porcentagem

de substituição de agregados está entre 10% e 40%, enquanto para substituição do cimento essa faixa é entre 5% e 20%. O Gráfico 4 estuda a relação da composição química do resíduo da extração do minério de ferro com a variação da resistência à compressão para as pesquisas apontadas.

Gráfico 4: Relação entre composição química e variação na resistência à compressão de acordo com o tipo de utilização do material residual



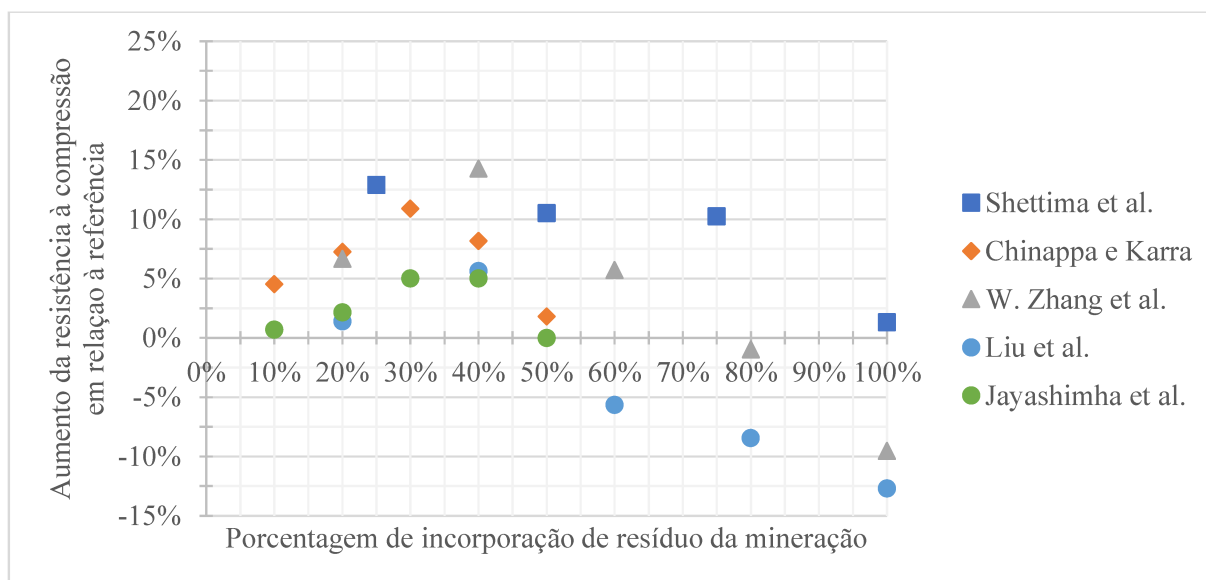
Fonte: Autor

Pode-se notar uma tendência de aumento na resistência à compressão quando o teor de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 somados é maior que 75%, como verificado por Adiguzel *et al.* (2022). Mas no caso de estudos com um teor elevado de CaO no material, como o trabalho de Jayasimha *et al.* (2022) indicado no gráfico, também ocorreu uma elevação na resistência, mesmo quando o teor dos outros óxidos citados anteriormente foi menor que 75%. Supõe-se então que a quantidade de CaO também deve ser levada em consideração quando analisar-se a composição química do resíduo.

A relação entre a porcentagem de aumento da resistência à compressão para cada uma das faixas de incorporação do resíduo da mineração em diferentes estudos é demonstrada pelo Gráfico 5, sendo que todos os resultados são para resistência aos 28 dias e com relações a/c variadas. Em se tratando da idade de ensaio, Shettima *et al.* (2016) obtiveram resultados nas primeiras idades (7 dias), nos quais os valores de resistência à compressão eram menores ou

iguais à referência em todos os casos estudados, diferente dos resultados mostrados no Gráfico 5 que são aos 28 dias e apresentam aumento na resistência à compressão.

Gráfico 5: Relação entre porcentagem de incorporação de resíduo e aumento na resistência à compressão



Fonte: Autor

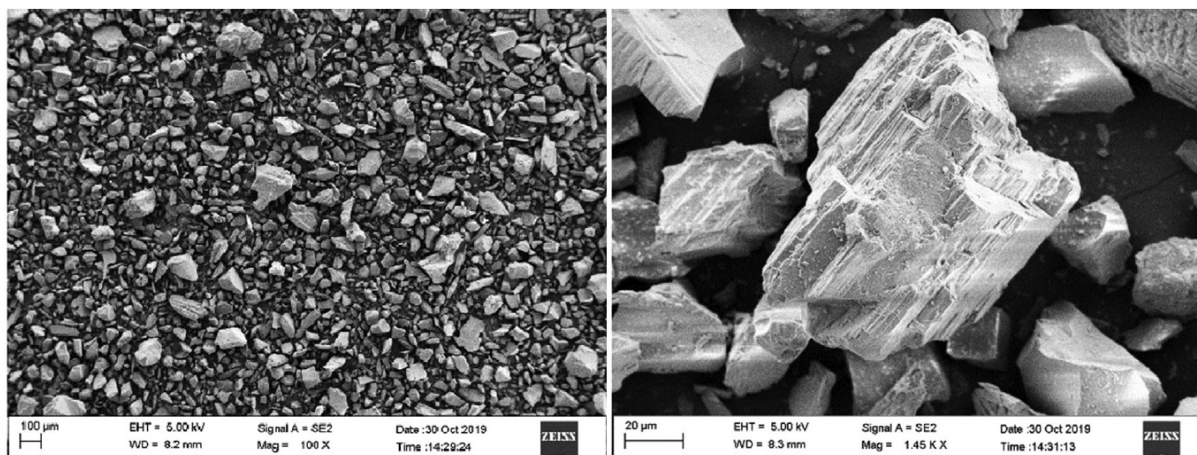
Além de obterem resultados que corroboram com a hipótese de que a idade de ensaio muda a porcentagem ideal de incorporação de material residual, no estudo de Chinappa e Karra (2019), as relações água/cimento de 0,35, 0,40 e 0,45 obtiveram as maiores elevações de resistência à compressão aos 28 dias nas porcentagens de substituição de 40%, 30% e 20%, respectivamente. Sendo assim, outra hipótese é de que a relação água/cimento também é relevante para otimização do teor de substituição de materiais residual como agregado miúdo no concreto.

2.3.3. Resistência à tração

Durante o levantamento do material desse referencial teórico, notou-se que o ensaio considerado mais importante para avaliação das propriedades mecânicas dos concretos com materiais residuais de mineração é a resistência à compressão. Mesmo em revisões anteriores, foram encontrados poucos trabalhos que usam a resistência à tração como indicativo de boa qualidade dos concretos com incorporação de resíduos (ADIGUZEL *et al.*, 2022).

No início da seção 3.3 discutiu-se como a forma angular e superfície rugosa dos materiais pode melhorar a interface entre agregado e a pasta de cimento, consequentemente melhorando as propriedades mecânicas. Características que podem ser observadas na Figura 2.

Figura 2: Imagens do material residual obtidas por microscopia eletrônica de varredura



Fonte: W. Zhang *et al.* (2020)

Analogamente ao que foi feito para a resistência à compressão, os de melhores resultados encontrados nas pesquisas para a resistência à tração foram compilados na Tabela 4. Pode-se notar que as porcentagens de incorporação dos melhores resultados não foram diferentes para a resistência à compressão e a resistência à tração, sendo que a única discrepância foi na variação, que é maior em todos os casos para a resistência à tração.

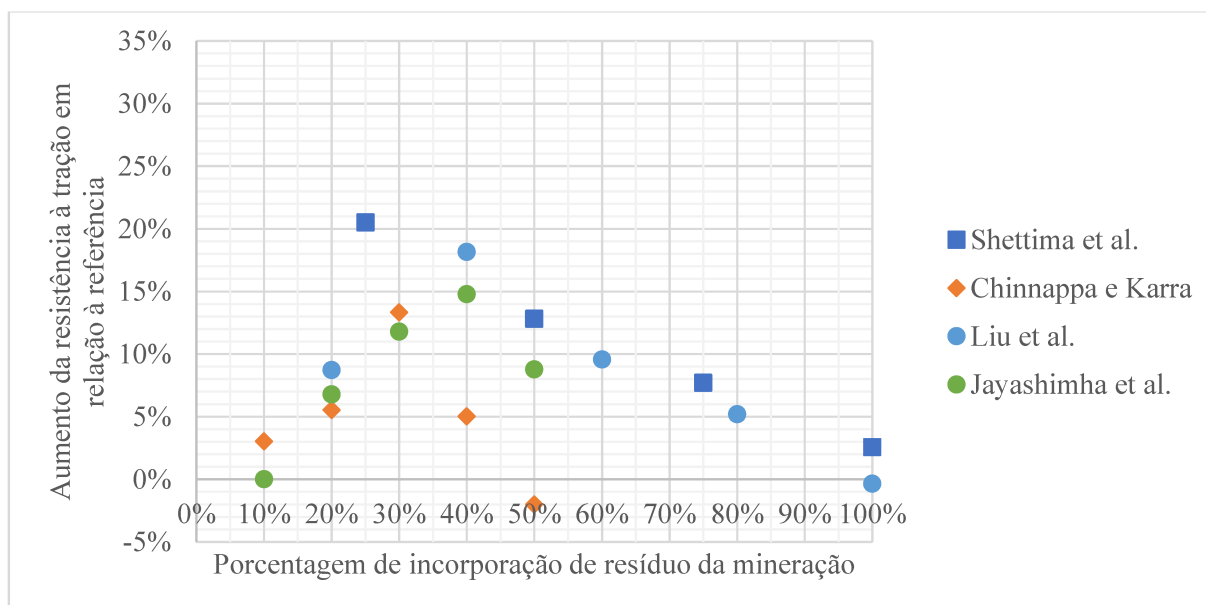
Tabela 4: Melhores resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração

Autor	Ano	País	Melhor resultado	
			Variação	Observação sobre o resíduo
Shettima <i>et al.</i>	2016	Malásia	+ 20%	25% de substituição do agregado miúdo
Chinappa e Karra	2019	Índia	+ 13%	30% de substituição do agregado miúdo
Liu <i>et al.</i>	2022	China	+ 18%	40% de substituição do agregado miúdo
Jayasimha <i>et al.</i>	2022	Índia	+ 15%	40% de substituição do agregado miúdo

Fonte: Autor

Os dados de variação na resistência à tração em relação a porcentagem de incorporação de material residual da mineração podem ser observados no Gráfico 6, aos 28 dias com relações água/cimento variadas.

Gráfico 6: Relação entre porcentagem de incorporação de resíduo e aumento na resistência à tração



Fonte: Autor

No estudo de Liu *et al.* (2022), a resistência à tração por compressão diametral de concretos com substituição de agregado miúdo por areia residual da extração de minério de ferro apresentou crescimento até o teor de substituição de 40%, assim como no caso da resistência à compressão. Entretanto, a partir do teor de 60% de substituição, a resistência à compressão desse estudo apresentou uma taxa de crescimento negativa em relação à referência, o que não aconteceu na resistência à tração, em que as taxas para 60% e 80% de substituição foram positivas. Esse efeito de crescimento maior em relação à referência também é observado na maioria dos outros trabalhos.

Uma hipótese que pode ajudar a explicar esse fenômeno é baseada na característica de possuir superfície rugosa e irregular encontrada nos resíduos da mineração, são propriedades que aprimoram a resistência à tração devido à melhora na ligação entre o cimento e os agregados (ARBILI *et al.*, 2022).

2.3.4. Módulo de elasticidade

O concreto como um material, ao contrário de seus constituintes agregados e pasta de cimento, não é um material elástico, justamente devido à diferença de elasticidades entre os materiais que o compõe, essa é a causa de fraturas que ocorrem no concreto submetido a uma carga (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

De acordo com a ASTM C469-22 o módulo de elasticidade do concreto pode ser obtido submetendo o corpo de prova a uma carga em seu regime elástico. Sendo calculado através da Equação (2.1).

$$E = \left(\frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.000050} \right) \quad (2.1)$$

Em que:

E é o módulo de elasticidade em MPa;

S_1 é tensão inicial;

S_2 é a tensão do corpo de prova que corresponde à 40% da tensão de ruptura;

ε_2 é a deformação do corpo de prova submetido à S_2 .

Shettima *et al.* (2016) observaram aumento no módulo de elasticidade estático em todos os teores de substituição de areia natural, sendo que com 100% de substituição o módulo era 40% superior ao registrado na referência. O que pode indicar que a utilização de um material proveniente da extração de minérios aumenta o módulo de elasticidade.

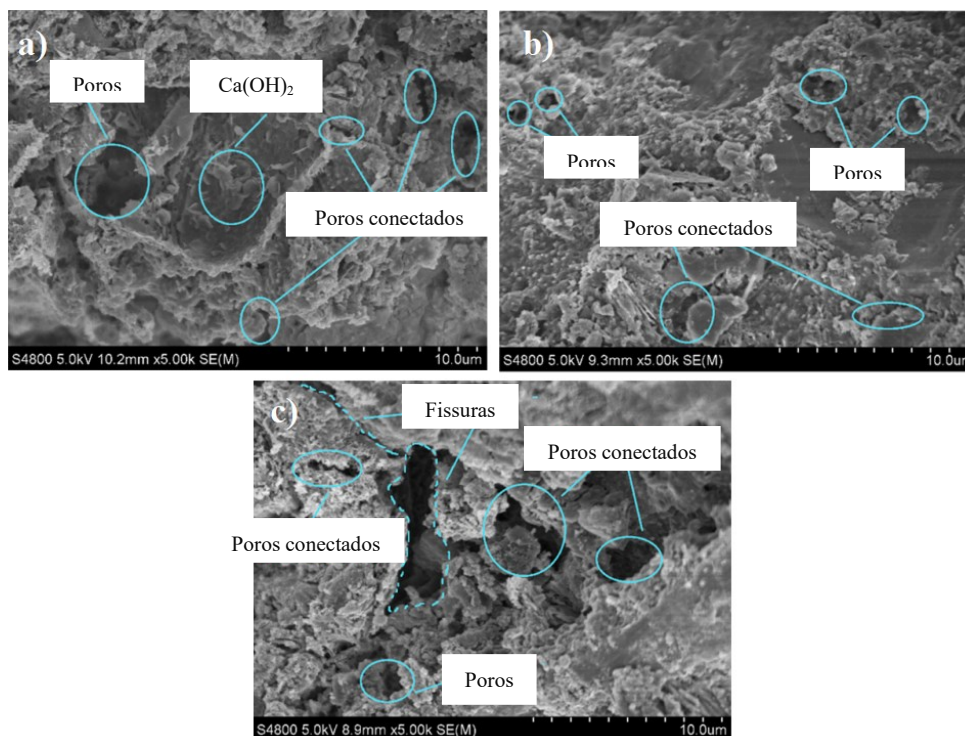
2.3.5. Porosidade e capilaridade

De acordo com Mehta e Monteiro (2006), a capilaridade está intrinsecamente ligada à resistência da interface pasta-agregado, sendo que um grande volume de capilares está relacionado com baixa resistência nessa zona.

A incorporação em porcentagens adequadas de um resíduo de mineração no concreto, na maioria dos casos, diminui a porosidade, enquanto, a superdosagem desses materiais aumenta a porosidade (W. ZHANG *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2022; LIU *et al.*, 2022; SAEDI *et al.*, 2022; Y. ZHANG *et al.*, 2023). Fato que reforça a importância de estudos buscando teores

ótimos de componentes da mistura. Os resultados de microscopia do estudo de Liu *et al.* (2002) são evidenciados na Figura 3, onde pode-se observar um aumento no número de poros da microestrutura conforme a dosagem de resíduo de material da mineração ultrapassa o limite ideal segundo o estudo.

Figura 3: Microestrutura de concreto com (a) 0% de substituição, (b) 40% de substituição e (c) 100% de substituição de agregado natural por agregado residual da extração de minério de ferro



Fonte: Adaptado de LIU *et al.* (2022)

Quando se trata da substituição como agregado, W. Zhang *et al.* (2020) encontraram que o ponto ótimo de substituição condiz com a faixa de 20% a 40% propostas anteriormente. Adiguzel *et al.* (2022), propõe que fora das dosagens ideais, o número de microporos formado no concreto aumenta e afeta as propriedades mecânicas negativamente.

2.4. O EFEITO DAS OUTRAS VARIÁVEIS

2.4.1. Consumo de cimento

Há uma busca para diminuir o consumo de cimento nos concretos, devido ao alto impacto ao meio ambiente que a produção deste material causa. No caso de argamassas e

concretos, as diretrizes de sustentabilidade se baseiam na redução do consumo de cimento, na reciclagem e em dosagens que utilizem quantidades adequadas de material para garantir durabilidade (PELISSER *et al.*, 2011).

A confecção de concretos com alto consumo de cimento, geralmente está ligada a concretos autoadensáveis e de ultra alto desempenho. De acordo com Pelisser, Vieira e Bernardin (2017), nesse tipo de material é utilizado uma grande quantidade de ligante e finos para garantir que o material ou estrutura atendam aos requisitos predeterminados. É possível verificar que concretos com resistências altas, como UHPC, possuem consumos de cimento altos, como 800 kg de cimento por m³ no estudo de W. Zhang *et al.* (2020).

Na Tabela 5, compilou-se os resultados de consumo de cimento das pesquisas com resíduo de mineração aqui apresentadas. Pode-se notar uma grande variedade nos consumos apresentados, sendo a maioria compreendida na faixa entre 350 kg/m³ e 500 kg/m³.

Tabela 5: Consumo de cimento das pesquisas

Autor	Ano	País	Consumo de cimento médio (kg/m ³)
Shettima <i>et al.</i>	2016	Malásia	380
Chinappa e Karra	2019	Índia	386
W. Zhang <i>et al.</i>	2020	China	800
Liu <i>et al.</i>	2022	China	440
Jayasimha <i>et al.</i>	2022	Índia	500

Fonte: Autor

Os trabalhos de Shettima *et al.* (2016) e Chinappa e Karra (2019), apesar de terem consumos parecidos, obtiveram resultados de 43 MPa e 55 MPa de resistência à compressão aos 28 dias respectivamente. Liu *et al.* (2022), chegam em valores próximos à 37 MPa, uma resistência inferior, mesmo com um consumo maior do que os dois trabalhos citados anteriormente. Sendo assim, é possível perceber que apenas o consumo de cimento não é um indicativo de como a resistência será afetada, é preciso levar em consideração outras características do concreto, como os materiais constituintes, a relação água cimento, o processo de cura e até mesmo a forma de ensaio.

2.4.2. Idade de cura

Em concordância com o ACI Committee 209 (2005), para cimentos do tipo I descritos na ASTM C150, a evolução da resistência à compressão do concreto pode ser prevista em qualquer estágio da cura pela Equação 2.2.

$$f_{cm}(t) = f_{c28} \left(\frac{t}{4 + 0,85t} \right) \quad (2.2)$$

Em que os parâmetros são descritos como:

f_{cm} é a resistência à compressão em um determinado tempo em MPa;

f_{c28} é a resistência à compressão do concreto aos 28 dias em MPa;

t é o tempo de ensaio em dias.

O CEB-FIP Models Code (1990), apresenta uma formulação para concretos curados a 20 °C dada pela Equação (2.3).

$$f_{cm}(t) = \exp \left\{ s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t/t_1}} \right) \right\} f_{cm} \quad (2.3)$$

Em que:

f_{cm} é a resistência à compressão em um determinado tempo em MPa;

s é um coeficiente que depende do tipo de cimento;

t é o tempo de ensaio em dias;

t_1 é igual a 1 dia.

Há pesquisas que buscam compreender e criar modelos para prever a resistência à compressão de concretos com a substituição de areia natural por resíduo da extração de minério de ferro como agregado miúdo. Chinappa e Karra (2019), utilizam de resultados obtidos a partir de um planejamento composto central para obter a Equação 2.5 com R^2 de 98,29%, adaptada para uma relação a/c 0,4 e porcentagem de substituição de 50%.

$$f_{cm}(t) = 26,74 + 1,3534 t - 0,013031 t^2 \quad (2.5)$$

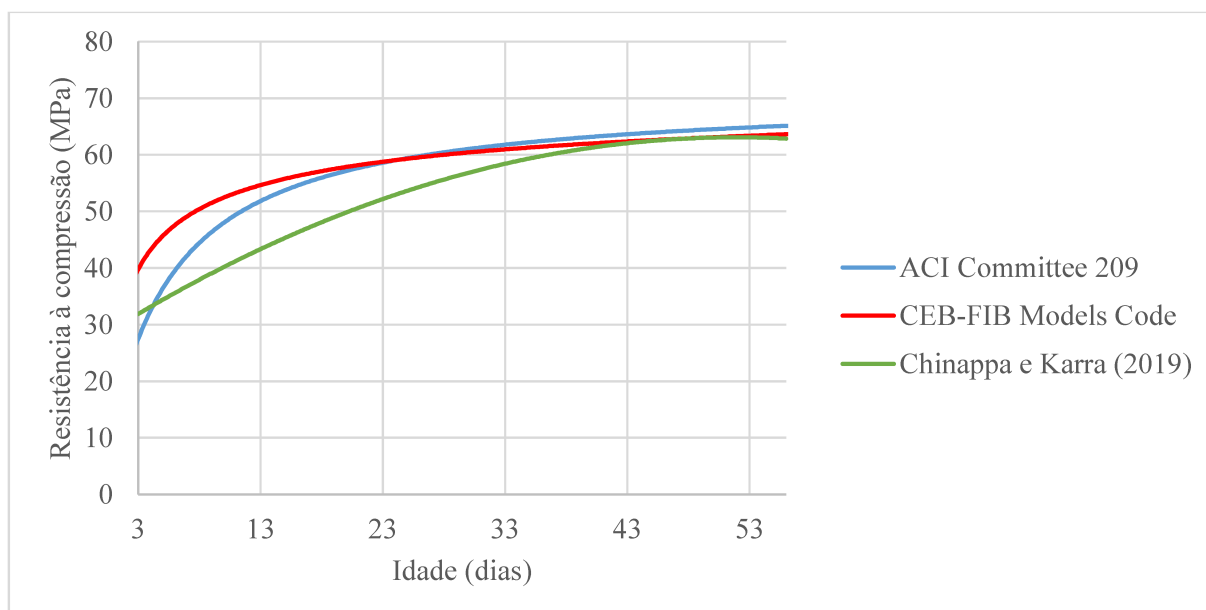
Sendo:

f_{cm} é a resistência à compressão em um determinado tempo em MPa;

t a idade em dias.

Plotando-se as três equações apresentadas anteriormente, para as idades compreendidas no período entre 3 e 56 dias, em um único plano cartesiano obtém-se o Gráfico 7.

Gráfico 7: Modelos de previsão da resistência à compressão por idade do concreto plotados



Fonte: Autor

Notou-se que o modelo de resistência à compressão do concreto produzido por Chinappa e Karra (2019), com agregado miúdo natural substituído em 50% por resíduo da extração de minério de ferro, chega ao mesmo resultado que os outros modelos em idades avançadas, mas com progressão diferente. Isso acontece pela substituição de cimento na mistura por um material cimentício suplementar, o que acaba atrasando o ganho de resistência inicial do concreto.

Esses dados corroboram com o que foi discutido nas seções anteriores, a utilização de materiais provenientes da mineração como agregado miúdo com características físico-químicas adequadas em proporções satisfatórias, não impacta negativamente na resistência à compressão. Mas os modelos de progressão dessa resistência devem levar em conta as características de cada um desses materiais.

CAPÍTULO 3

3. PLANEJAMENTO E METODOLOGIA

3.1. PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Foram determinadas massa específica, granulometria e composição química por espectrometria por fluorescência de raios-x dos agregados e do ligante. No estado fresco dos concretos, foi medida a consistência pelo ensaio de abatimento de tronco de cone e a densidade do concreto. No estado endurecido dos concretos produzidos, determinou-se a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a resistência à tração por compressão diametral, a porosidade por absorção total e absorção por capilaridade de forma a averiguar qual a influência do teor de areia residual nas propriedades mecânicas e físicas do concreto. Ainda no estado endurecido, realizou-se microscopia eletrônica de varredura para observação da microestrutura dos concretos produzidos. O fluxograma das atividades e ensaios realizados é apresentado na Figura 4.

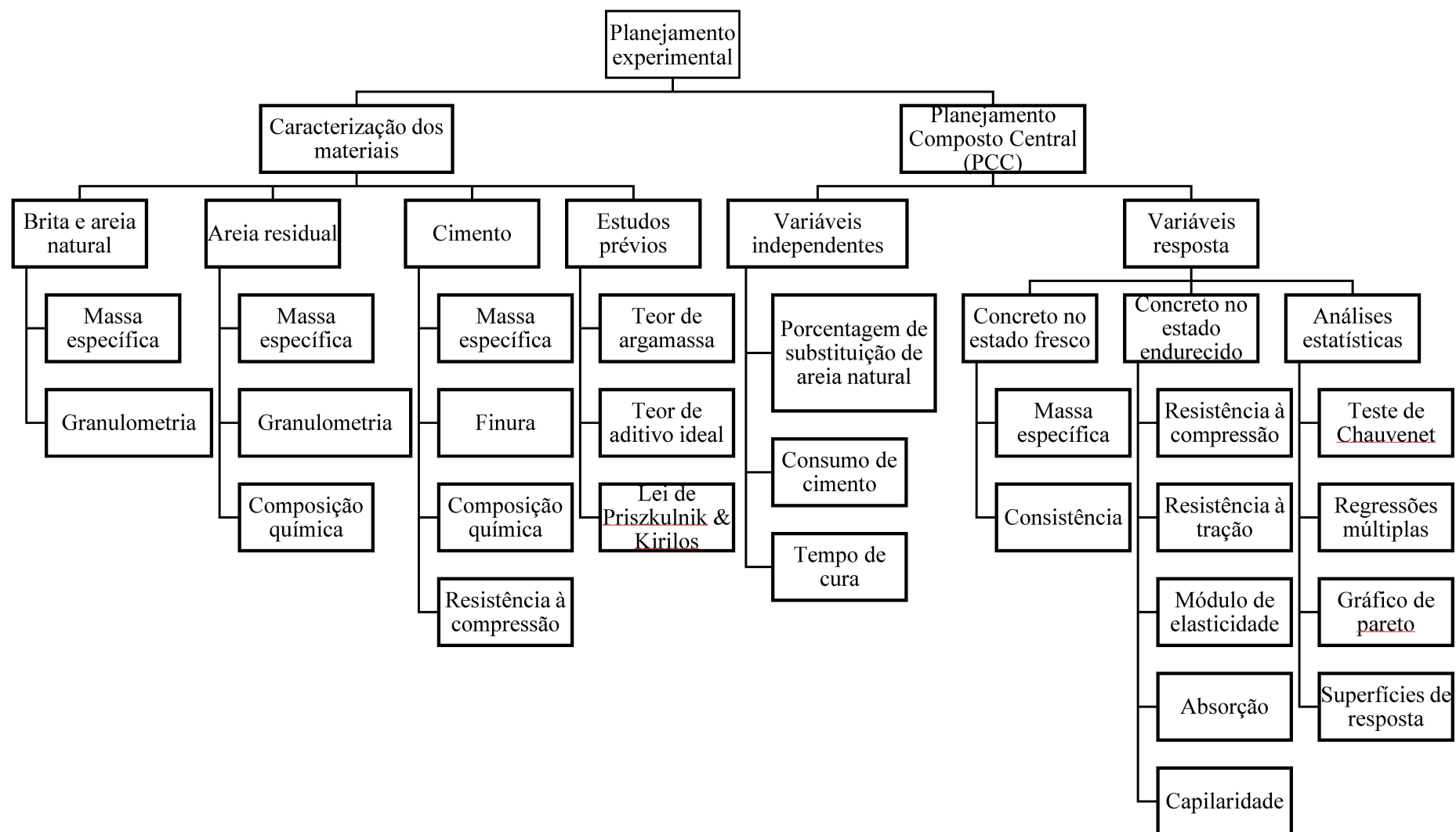
3.2. PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL

Como citado nos objetivos dessa dissertação, foi feita uma análise estatística de concretos dosados com areia residual da extração do minério de ferro em substituição ao agregado miúdo, com diferentes porcentagens.

No ramo da engenharia civil, uma das vertentes de utilização da metodologia das superfícies de resposta é a dosagem em proporções ótimas de materiais no concreto (X. LUO et al., 2022). De acordo com Calado e Montgomery (2003), a finalidade das superfícies de resposta é otimizar as variáveis de resposta, que são influenciadas por diversas variáveis independentes, além de aproximar os resultados obtidos de uma função polinomial de baixa ordem.

Neto, Scarminio e Bruns (2001) definem as três partes que compõem um planejamento composto central para k fatores codificados:

Figura 4: Fluxograma das atividades e ensaios

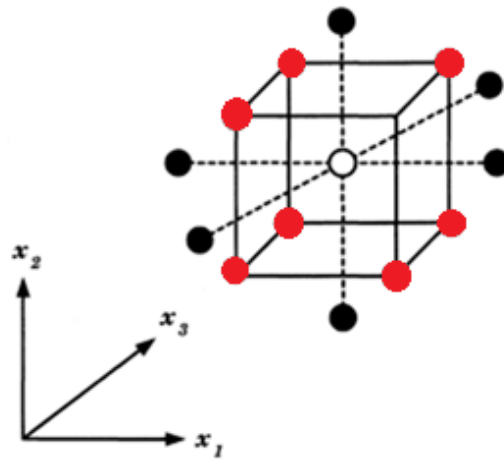


Fonte: Autor

1. Parte fatorial ou cúbica: um total de n_k pontos com coordenadas $x_i = -1$ ou $x_i = +1$, para todos $i = 1, \dots, k$ (bolas vermelhas);
2. Parte axial ou em estrela: todas coordenadas nulas, exceto uma com valor $+\alpha$ ou $-\alpha$ (bolas pretas);
3. Parte central: repetições do ensaio no ponto central, ou seja, $x_1 = x_k = 0$ (bola branca).

Na Figura 5 pode-se observar a representação em um plano cartesiano do planejamento composto central para três fatores, sendo que as bolas cinzas simbolizam a parte fatorial (ou cúbica), as bolas pretas a parte axial (ou em estrela) e a bola branca o ponto central.

Figura 5: Planejamento composto central para três fatores



Fonte: Neto, Scarminio e Bruns (2001)

A Equação 3.1 foi utilizada para encontrar as variáveis codificadas na forma adimensional. Os níveis de codificação são indicados na Tabela 6, sendo que cada fator é representado pelos símbolos $+\alpha$ e $-\alpha$, e pelos códigos -1, 0 e +1.

$$x_i = \left(\frac{E_i - E(0)}{\frac{E(1) - E(-1)}{2}} \right) \quad (3.1)$$

Sendo os fatores:

E_i é o valor do fator na escala original;

$E(0)$ é o valor central escolhido nos seus limites de trabalho (média entre $E(1)$ e $E(-1)$);

$E(1)$ é o penúltimo valor mais alto para o limite de trabalho;

$E(-1)$ é o penúltimo valor mais baixo para o limite de trabalho.

Tabela 6: Valores das variáveis independentes codificadas

Codificação	Teor de substituição (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Idade (h)
-1	14	372	35
0	50	425	90
+1	86	478	145
-α	0	350	12
+α	100	500	168

Fonte: Autor

Como citado anteriormente, o planejamento experimental foi definido variando o teor de substituição de areia natural por resíduo da extração de minério de ferro, o consumo de cimento e a idade dos ensaios. A matriz do planejamento composto central gerada por meio dos dados listados na Tabela 6 e utilizando-se a Equação 4, é mostrada na Tabela 7.

Tabela 7: Matriz do Planejamento Composto Central

Traço	Codificação			Teor de substituição (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Idade (h)
	x ₁	x ₂	x ₃			
14%372C35h	-1	-1	-1	14	372	35
14%372C145h	-1	-1	1	14	372	145
14%478C35h	-1	1	-1	14	478	35
14%478C145h	-1	1	1	14	478	145
86%372C35h	1	-1	-1	86	372	35
86%372C145h	1	-1	1	86	372	145
86%478C35h	1	1	-1	86	478	35
86%478C145h	1	1	1	86	478	145
0%425C90h	-1,41421	0	0	0	425	90
100%425C90h	1,41421	0	0	100	425	90
50%350C90h	0	-1,41421	0	50	350	90
50%500C90h	0	1,41421	0	50	500	90
50%425C12h	0	0	-1,41421	50	425	12
50%425C168h	0	0	1,41421	50	425	168
50%425C90h	0	0	0	50	425	90
50%425C90h	0	0	0	50	425	90
50%425C90h	0	0	0	50	425	90
50%425C90h	0	0	0	50	425	90

Fonte: Autor

O teor de substituição de agregado natural, de 0% até 100%, foi escolhido pelo objetivo do trabalho ser investigar como essa variação influencia nas propriedades do concreto. A faixa de consumos de cimento, de 350 kg/m³ até 500 kg/m³, foi determinada por serem valores encontrados na literatura (Tabela 5). As idades de cura, de 12 h até 168 h, foram selecionadas por representarem idades para uma possível aplicação do resíduo na produção de elementos pré-moldados de concreto, em especial dormentes protendidos para ferrovias.

Para cada uma das variáveis resposta nos estados endurecido e fresco foi gerada uma equação empírica ajustada, dadas pela Equação 3.2.

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k (b_i x_i)^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j \quad (3.2)$$

Em que:

\hat{y} é a resposta prevista;

x_i são as variáveis independentes;

b_i são os termos de regressão de primeira ordem.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.3.1. Massa específica real e granulometria

3.3.1.1. Massa específica real e granulometria do cimento

A massa específica real do cimento foi determinada de acordo com os parâmetros estabelecidos na ASTM C188-17. A distribuição granulométrica do material cimentício foi determinada por meio da técnica de difração de raios laser utilizando o equipamento Mastersizer Microplus da fabricante Malvern.

O meio de dispersão das partículas utilizado foi o álcool isopropílico, usado para evitar a hidratação do cimento. Para assegurar a precisão das medidas, as amostras foram analisadas em triplicata. A dimensão característica determinada pelo equipamento é o diâmetro volumétrico das partículas.

3.3.1.2. Massas específicas reais e granulometrias dos agregados miúdos

O processo nessa seção foi realizado de acordo com as normativas especificadas na ASTM C128-22 para a areia natural e para o resíduo da extração de minério de ferro. Na Figura 6 são mostradas a areia natural e a areia residual.

Figura 6: (a) Resíduo da extração de minério de ferro, (b) areia natural fina e (c) areia natural média



Fonte: Autor

Executou-se o ensaio de granulometria da areia média normal seguindo as recomendações normativas da ASTM C136/C136M-19. Já para a areia residual, que possui granulometria passante na peneira 200 em grandes quantidades, foi realizado um experimento análogo ao realizado para o cimento, sendo o meio de dispersão a água. Na condução dessas análises, uma solução aquosa de hexametáfosfato de sódio, com uma concentração de 1 g/L, foi empregada como dispersante para evitar a formação de aglomerados de partículas.

3.3.1.3. Massa específica real e granulometria do agregado graúdo

As normativas seguidas para determinação da massa específica estão descritas na ASTM C127-15, sendo que para a brita 0 desprezou-se o material passante na peneira 2,36 mm. Já o ensaio de granulometria seguiu as recomendações da norma ASTM C136/C136M-19 para ensaio realizado de forma manual.

3.3.2. Espectrometria por fluorescência de raios-x

Foram realizados três ensaios para a areia residual e um ensaio para o cimento, as amostras foram coletadas de pontos distintos no local de armazenamento do material e

homogeneizadas. 01 grama da amostra foi misturada com 09 gramas de tetraborato de lítio e 04 gotas de solução de brometo de lítio a 25%. Então a amostra foi fundida em uma *Vulcan Fusion Technology* da empresa *HD Eletronik* até sua vitrificação. A máquina utilizada para fundição, é mostrada na Figura 7.

Figura 7: Máquina utilizada no processo de fundição da amostra para ensaio de espectrometria por fluorescência de raios-x



Fonte: Autor

As amostras foram analisadas em equipamento *Bruker* modelo *S8 Tiger*, mostrado na Figura 8. Foi utilizado o método *Quant Express* para determinar a porcentagem dos principais óxidos constituintes da areia residual da extração de minério de ferro e do cimento.

Figura 8: Bruker S8 Tiger



Fonte: Autor

3.4. ESTUDOS PRÉVIOS

3.4.1. Incorporação de brita 0 na brita 1

Esse estudo foi realizado para se obter a maior compacidade da mistura de brita 0 e brita 1. Foi realizada mistura de brita 0 e brita 1 em diferentes proporções e determinada a massa unitária no estado solto de cada mistura de agregado como prescrito pela ABNT NBR 16972:2021.

3.4.2. Teor de argamassa ideal

A fim de se obter uma mistura com boa trabalhabilidade, desenvolveu-se o estudo do teor de argamassa de uma mistura com 50% de substituição de areia natural por areia residual da extração de minério de ferro (em volume) e consumo de cimento de 425 kg/m³, este teor de substituição foi escolhido por representar a situação com as variáveis do estudo na condição intermediária. O teor de argamassa é definido na Equação 3.3.

$$T = \frac{1 + a}{1 + m} \quad (3.3)$$

Em que:

T é o teor de agregados;

a é o teor de finos;

m é o teor de agregados.

O teor de argamassa com o qual se começou é de 45%, a trabalhabilidade foi analisada por meio do ensaio de abatimento como descrito na ABNT NBR 16889:2020 e pela observação e manuseio da mistura. Esse processo foi repetido em passos de 2% até o teor de argamassa de 55%.

3.4.3. Teor de aditivo ideal

O teor de aditivo ideal foi determinado em pasta. Sendo utilizado o aditivo líquido superplastificante *MasterGlenium 3500*. A variação da consistência com o teor de aditivo foi avaliada pelo método de ensaio descrito por Kantro (1980) em teste de abatimento com mini cone.

3.4.4. Variação do consumo de cimento com o teor de agregados- Priszkulnik & Kirilos

Segundo o estudo de Priszkulnik & Kirilos (1974) o consumo de cimento por metro cúbico de concreto varia na proporção inversa da relação em massa seca de agregados/cimento, conforme Equação 3.4. Esta lei de comportamento foi adotada para definir o teor de agregados para cada traço de concreto a ser produzido como mostrado na matriz do planejamento composto central (Tabela 6), definindo assim as demais proporções das misturas. Para isso, foram preparadas misturas com o teor de argamassa definido em 3.3.2, 50% de substituição de areia natural, consumos de cimento variados e relação água/cimento igual a 0,4. Com os resultados obtidos, determinaram-se as constantes k_5 e k_6 por ajuste dos resultados experimentais à curva da Equação 3.4.

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \cdot m} \quad (3.4)$$

Em que:

C é o consumo de cimento em kg/m^3 ;

k_5 e k_6 são constantes dos materiais;

m é o teor de agregados em m/m .

3.5. PREPARAÇÃO DAS MISTURAS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A mistura dos materiais do concreto foi realizada em betoneira CS 250L da fabricante CSM, com capacidade de 250 l e 60 rotações por minuto. Devido à perda de trabalhabilidade que ocorre com a adição da areia residual, era feita uma mistura durante 5 minutos e a aparência do concreto era avaliada visualmente, caso necessário, realizava-se raspagem das paredes da

betoneira e ajustes no teor de aditivo. A mistura acontecia por mais 5 minutos após esse processo.

Os corpos de prova produzidos estão em conforme recomendações da ABNT NBR 5738:2015, em moldes cilíndricos de dimensões 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Para cada traço definido na Tabela 7 foram confeccionados 4 corpos de prova por ensaio, como mostrado na Tabela 8.

O método de adensamento escolhido consistiu em uma mesa vibratória da fabricante SOLOTEST, sendo os moldes preenchidos até metade, vibrados por 20 s na superfície da mesa, depois foram completos e vibrados por mais 20 s.

Tabela 8: Quantidade de corpos de prova por ensaio

Ensaio	Quantidade de corpos de prova por traço
Resistência à compressão	4
Módulo de elasticidade	4
Resistência à tração por compressão diametral	4
Porosidade por absorção total	4
Absorção por capilaridade	4

Fonte: Autor (2023)

Nas primeiras 24 h os corpos de prova ficaram armazenados em câmara com umidade relativa e temperatura ambiente. Após esse tempo, desmoldou-se os corpos de prova, que foram curados submersos em água saturada com Ca(OH)_2 até a data de realização dos ensaios.

3.6. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Obteve-se a resistência à compressão dos espécimes de acordo com as especificações da ASTM C39/39M-21, que trata do método de ensaio para corpos de prova cilíndricos. As idades de ensaio foram aquelas especificadas na Tabela 6. A máquina de ensaio utilizada foi uma DL 60000 da marca EMIC, a máquina utilizada é ilustrada na Figura 9a.

3.7. MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO À COMPRESSÃO

Para a determinação do módulo de elasticidade estático à compressão foram utilizados corpos de prova nas idades mostradas na Tabela 6, seguindo as recomendações da ASTM C469/C469M-22, em uma máquina DL 60000 da marca EMIC, com extensômetros modelo EE08 (resolução 0,0001 mm) para medir sua deformação, como mostrado na Figura 9b.

3.8. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A determinação da resistência à tração por compressão diametral foi realizada de acordo com as especificações da norma ASTM C496/C496M-17. Nas idades indicadas na Tabela 6, os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina DL 60000 da marca EMIC, foram utilizadas tiras de madeira de cedrinho, como mostrado na Figura 9c.

Figura 9: (a) Máquina EMIC DL 60000, (b) Corpo de prova posicionado para ensaio de módulo de elasticidade e (c) corpo de prova posicionado para ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autor

3.9. POROSIDADE POR ABSORÇÃO TOTAL

Determinou-se a porosidade por absorção total de acordo com as especificações da ASTM C642-21. Todos os corpos de prova foram ensaiados com 28 dias de idade, para averiguar qual a influência do teor de incorporação de areia residual na porosidade, sem interferência do processo de hidratação da matriz cimentícia.

A estufa utilizada na secagem dos corpos de prova foi um forno da fabricante Luz Nobre. A Autoclave Vertical Modelo 103 da fabricante Fabbe-Primar foi empregada para a etapa de fervura dos espécimes. E a pesagem submersa foi realizada em uma balança analógica modelo 1020 da empresa Marte.

3.10. ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado de acordo com as especificações da norma ABNT NBR 9779:2012. Os testes foram feitos apenas em espécimes com 28 dias de cura, não sendo seguidas as idades impostas na Tabela 6. Essa condição foi escolhida para diminuir o impacto que o processo de hidratação na matriz cimentícia possui na capilaridade, investigando-se assim apenas como a incorporação de areia residual e consumo de cimento afetam essa propriedade.

3.11. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em um primeiro momento, foi aplicado o método de Chauvenet para determinar qual a aceitabilidade dos resultados obtidos nos ensaios das propriedades mecânicas de cada corpo de prova. Os testes estão compilados no Apêndice A dessa dissertação.

Dos resultados médios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade foram obtidas equações polinomiais de segundo grau (Equação 3.2) por meio de regressões múltiplas. ANOVA foi utilizada para averiguar a significância de cada uma das variáveis.

Com o *software Statistica 12.0*, foi gerado um gráfico de Pareto com valor de significância 90% para as propriedades de resistência à compressão, resistência à tração e

módulo de elasticidade. O objetivo desse gráfico é mostrar qual a significância das variáveis independentes nos resultados obtidos nas variáveis de resposta.

Com o *software Statistica 12.0*, plotou-se as equações polinomiais obtidas a partir das regressões múltiplas, fixando-se uma das variáveis. Dessa forma, obteve-se as Superfícies de Resposta de cada uma das variáveis resposta.

Para as propriedades de absorção, índice de vazios e capilaridade, foi utilizado ANOVA para averiguar qual a significância das variáveis porcentagem de substituição de areia natural e consumo de cimento, uma vez que a idade de cura do ensaio foi fixada (28 d).

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1. Resultados da caracterização do cimento

As propriedades, físicas, mecânicas e os principais constituintes do cimento CP V ARI, são compilados na Tabela 9. As exigências das normas ABNT NBR 16697 (2018) foram averiguadas e atendidas.

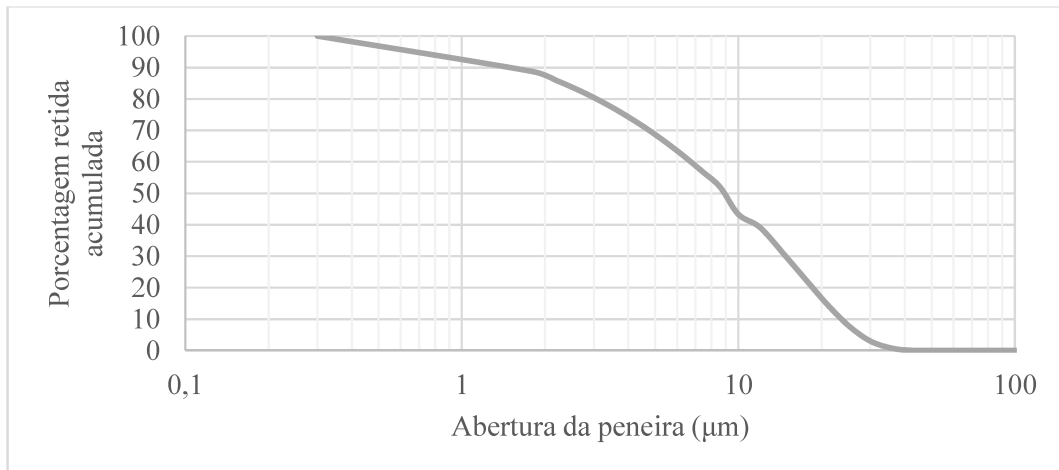
Tabela 9: Propriedades físicas, químicas e mecânicas do CP V ARI

Propriedades	Critérios	Resultado
<i>Óxidos e compostos</i>		<i>Teor (%)</i>
SiO ₂	ABNT NBR 16697 (2018)	18,52
Al ₂ O ₃	ABNT NBR 16697 (2018)	5,30
Fe ₂ O ₃	ABNT NBR 16697 (2018)	3,08
CaO	ABNT NBR 16697 (2018)	65,63
MgO	ABNT NBR 16697 (2018)	0,62
SO ₃	ABNT NBR 16697 (2018)	2,71
K ₂ O	ABNT NBR 16697 (2018)	0,83
R.I.	ABNT NBR 16697 (2018)	0,84
P.F. 950 C	ABNT NBR 16697 (2018)	5,73
<i>Propriedades físicas e mecânicas</i>		
Massa específica (g/cm ³)	ASTM C188-17	3,09
Finura Blaine (cm ² /g)	ABNT NBR 16372 (2015)	4612
Início de de pega (min)	ABNT NBR 16697 (2018)	149
Res. à compressão 1 dia (MPa)	ABNT NBR 16697 (2018)	22
Res. à compressão 3 dias (MPa)	ABNT NBR 16697 (2018)	36
Res. à compressão 7 dias (MPa)	ABNT NBR 16697 (2018)	40,6

Fonte: Autor

A granulometria do cimento pode ser observada no Gráfico 8. Posteriormente a granulometria é comparada com os outros materiais constituintes dos concretos estudados (seção 4.1.3).

Gráfico 8: Granulometria do cimento CP V ARI



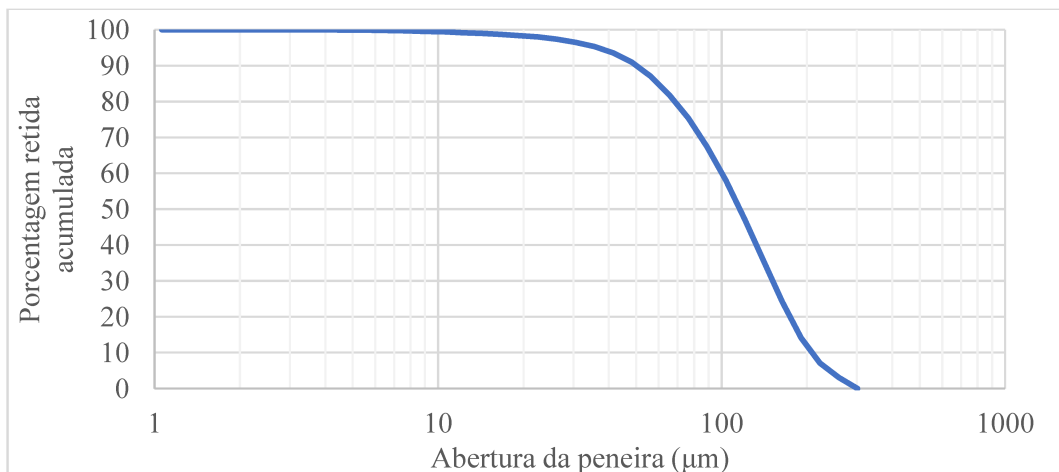
Fonte: Autor

4.1.2. Resultados da caracterização da areia residual

O resíduo da extração de minério de ferro é um material mais fino do que uma areia média comum, como pode ser observado na Figura 6 (p. 30). A massa específica do material é de 2,85 g/cm³, comumente, areias naturais tem a massa específica em torno de 2,60 g/cm³ (MEHTA E MONTEIRO, 2006).

O resultado do ensaio de granulometria do resíduo da extração do minério de ferro pode ser observado no Gráfico 9, posteriormente, na seção 4.1.3, é feita uma comparação entre a granulometria de todos os materiais constituintes do concreto.

Gráfico 9: Granulometria do resíduo da extração do minério de ferro



Fonte: Autor

Os resultados do ensaio de espectrometria por fluorescência de raios-x obtidos na análise do material residual estão apontados na Tabela 10. Em termos de distribuição da composição química do resíduo, o material se assemelha ao que é encontrado nos trabalhos de W. Zhang *et al.* (2020), Chen *et al.* (2022) e Liu *et al.* (2022), o resíduo possui alta concentração de sílica (SiO_2) em sua composição. Destaca-se ainda o teor de Fe_2O_3 de 12,93%, superior ao observado nos agregados naturais, mas esperado em um resíduo da mineração do ferro e dentro da faixa observada nas pesquisas apresentadas na revisão bibliográfica (Tabela 2).

Tabela 10: Composição química da areia residual

Principais compostos químicos (%)					
CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O
0,04	85,14	0,37	12,93	0,09	0,02

Fonte: Autor

Mencionados anteriormente, Adiguzel *et al.* (2022) citam que se a soma das porcentagens de sílica (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) for maior que 75%, pode-se esperar uma melhora das resistências à compressão e à tração dos concretos, com teores ótimos entre 20% e 40%. Conforme Tabela 10, neste estudo essa soma é igual a 98%.

4.1.3. Resultados da caracterização da areia natural e brita

Os dados de massa específica, dimensão máxima e módulo de finura obtidos da areia natural e britas são apresentados na Tabela 11. Os resultados foram condizentes com os materiais encontrados na região.

Tabela 11: Massa específica, dimensão máxima e módulo de finura da areia e britas

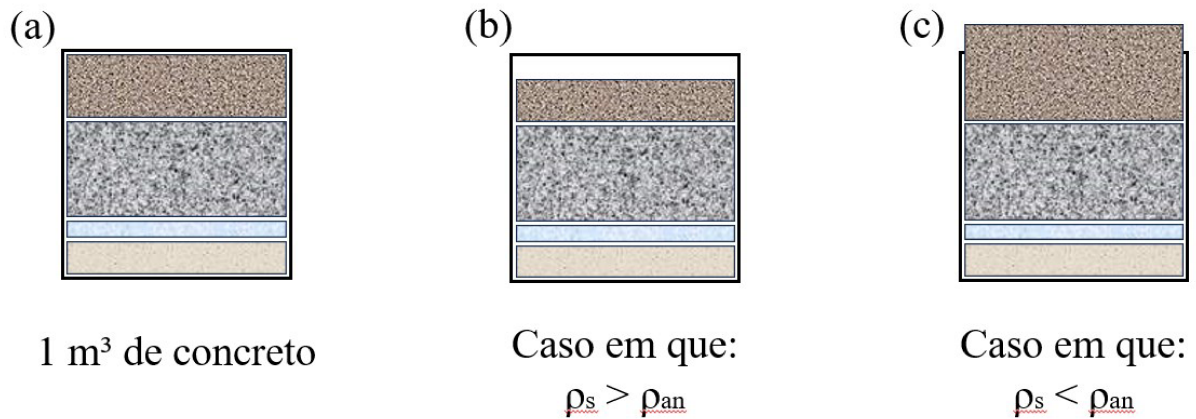
Material	Massa específica (g/cm^3)	Dimensão máxima (mm)	Módulo de finura
Areia natural	2,63	2,36	2,20
Brita 1	2,89	19	6,90
Brita 0	2,80	12,5	5,60

Fonte: Autor

Percebe-se a grande diferença entre a massa específica da areia natural e da areia residual. Esse fato reforça a importância de a substituição do agregado miúdo ser feita em

volume, uma vez que a substituição em massa mudar-se-ia a proporção dos materiais no concreto. Esse efeito é demonstrado na Figura 10.

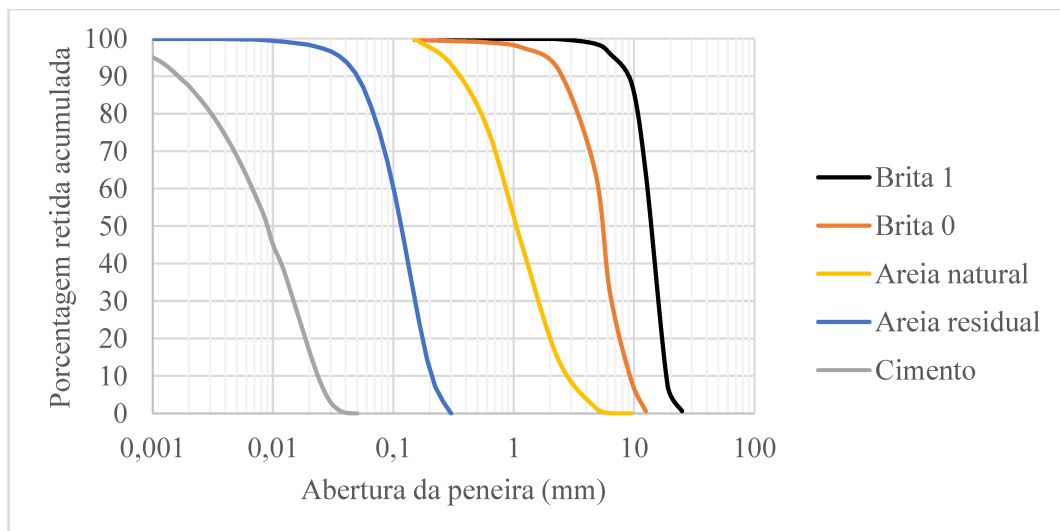
Figura 10: Casos de substituição em massa de materiais com massas específicas diferentes



Fonte: Autor

Sendo ρ_s a massa específica do resíduo e ρ_{an} a massa específica da areia natural, os concretos do estudo apresentariam o problema demonstrado na Figura 12b. Ou seja, haveria menos agregado miúdo no volume da mistura, consequentemente, alterando o consumo de cimento, que é uma das variáveis independentes estudadas com patamares a serem respeitados.

Gráfico 10: Granulometria de todos os constituintes do concreto



Fonte: Autor

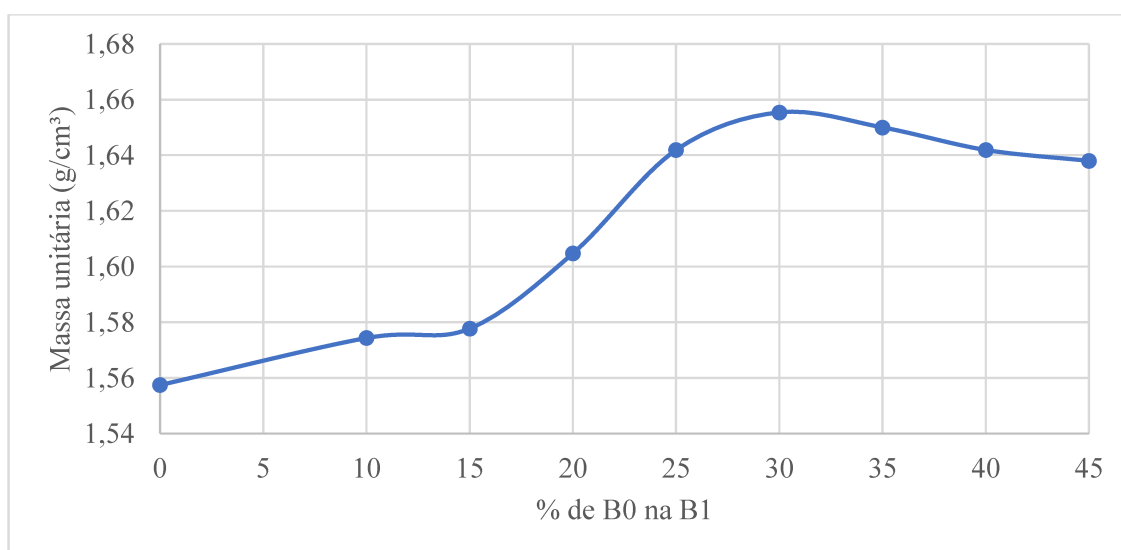
No Gráfico 10, compila-se os resultados das granulometrias de todos os materiais. Observa-se como o resíduo é bem mais fino do que a areia natural, o que já foi constatado visualmente na Figura 6 (p. 30).

A distribuição granulométrica menor do resíduo usado em substituição à areia natural acarreta aumento na área superficial. A área superficial mais elevada, acaba por aumentar a demanda de água da mistura pelo efeito da adsorção das partículas de água na superfície do agregado miúdo. Logo, espera-se que conforme a porcentagem de substituição aumente, a trabalhabilidade irá diminuir, pois a relação água/cimento foi mantida constante em todas as misturas.

4.2. RESULTADOS DOS ESTUDOS PRÉVIOS

4.2.1. Determinação da mistura de brita 0 e brita 1 ótima

Gráfico 11: Massas unitárias obtidas das misturas de brita 0 e brita 1 em diferentes porcentagens.



Fonte: Autor

Os resultados obtidos estão apresentados no Gráfico 11, a partir de 30%, a massa unitária reduz gradativamente até a massa unitária da brita 0. Dessa forma, a maior massa unitária é quando se mistura 30% de brita 0 e 70% de brita 1, essa foi a proporção utilizada na dosagem dos concretos. A massa unitária da brita 0 no estado solto é de 1,49 g/cm³ e sua massa específica

é 2,80 g/cm³, a brita 1 possui massa unitária igual a 1,56 g/cm³ e a massa específica de 2,89 g/cm³, dessa forma, o índice de vazios de ambas é 46%. Com a mistura das britas o índice de vazios da mistura passa a ser de 42%.

4.2.2. Determinação do teor de argamassa ideal

Os dados obtidos no ensaio de abatimento de cone para cada um dos teores de argamassa estudados estão compilados na Tabela 12. A diminuição no abatimento conforme o aumento do teor de argamassa era esperada, pois mantendo fixa a relação água/cimento e aumentando a quantidade de finos há maior demanda de água para molhar o agregado miúdo, além do aumento da coesão da mistura, reduzindo, portanto, o abatimento.

Tabela 12: Abatimento de cone dos diferentes teores de argamassa

Teor de argamassa (%)	Abatimento (mm)
45	183
47	170
49	159
51	117
53	75

Fonte: Autor

Analisando-se a Figura 11 foi possível fazer o comparativo visual das misturas citadas, percebeu-se o efeito visual dos concretos ficando mais coesos. O teor de argamassa escolhido foi de 49%, por ter um abatimento satisfatório (159 mm) e uma menor tendência de desmoronamento em comparação com a mistura de 47%. O concreto com 51% de argamassa já começa a apresentar coesão excessiva por causa da presença do agregado residual muito fino.

Figura 11: Aspecto visual dos concretos com teores de argamassa (a) 45%, (b) 47%, (c) 49%, (d) 51% e (e) 53%



Fonte: Autor

4.2.3. Determinação do teor de aditivo ideal

Os valores de espalhamento encontrados para cada um dos teores de aditivo utilizados são mostrados na Tabela 13. Os dados da Tabela 13, foram usados para criar uma curva de tendência (Gráfico 12), e com isso, traçar-se uma reta tangente ao ponto máximo da curva para determinação do teor de aditivo ótimo.

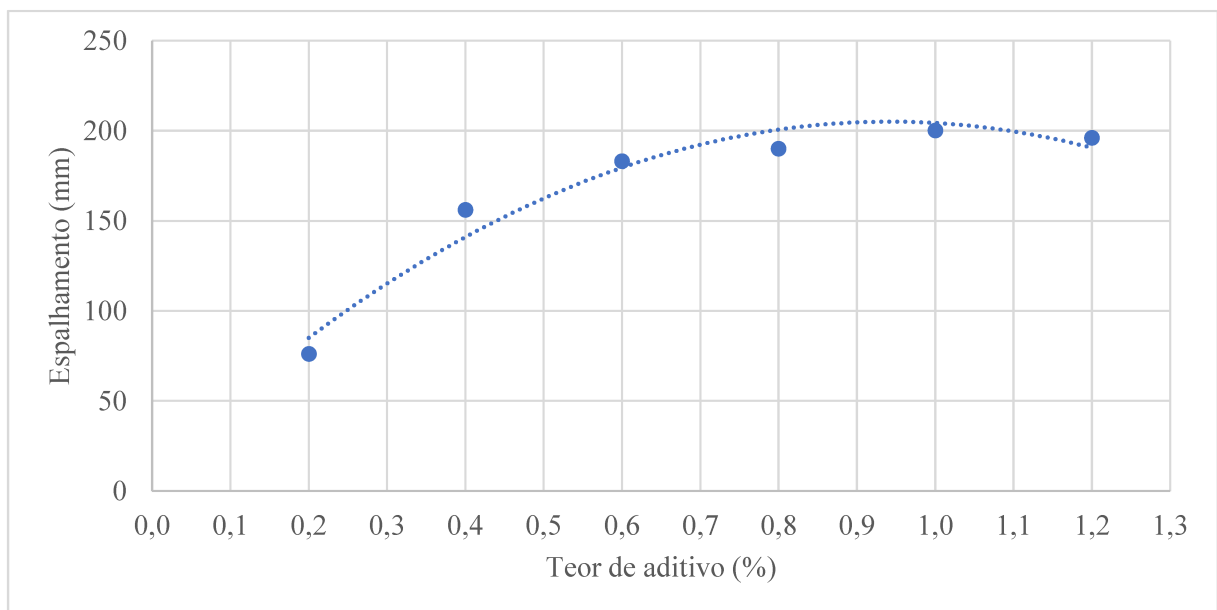
Dessa forma, o teor de aditivo ideal indicado foi de 0,9%. Entretanto, devido às características diferentes das misturas, alguns ajustes foram feitos para assegurar a trabalhabilidade da mistura.

Tabela 13: Resultados do mini abatimento de cone no estudo do teor ótimo de aditivo

Teor de aditivo (%)	Espalhamento (mm)
0,2	76
0,4	156
0,6	183
0,8	190
1,0	200
1,2	196

Fonte: Autor

Gráfico 12: Linha de tendência dos dados com indicação do teor de aditivo ideal



Fonte: Autor

É importante ressaltar que após 1,2% de aditivo, não aconteceu melhora na trabalhabilidade da pasta de cimento, portanto, esse foi determinado o teor máximo a ser utilizado. O uso de teores muito elevados de aditivos superplastificantes tendem a aparecer efeitos negativos sem melhora na trabalhabilidade. Mehta e Monteiro (2006) destaca que os superplastificantes são sensíveis aos aluminatos, sulfatos e íons de álcalis no início da hidratação do cimento, podendo causar aumento no teor de vazios devido suas propriedades.

4.2.4. Determinação do teor de agregados a partir do consumo de cimento definido

Os resultados de massa específica e consumo de cimento para os diferentes teores de agregados testados estão compilados na Tabela 14.

Tabela 14: Massa específica e consumo de cimento de diferentes teores de agregados

Teor de agregados	Massa específica (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)
4,5	2596,5	443,8
5	2570,3	404,8
5,5	2465,7	359,4

Fonte: Autor

A partir desses resultados, utilizando-se o método dos mínimos quadrados, ajustou-se os dados à Equação 4.1, que representa a lei de Priszkulnik & Kirilos (1974) para os materiais estudados, com 50% de substituição de areia natural por areia residual. O Gráfico 13, é a representação da Equação 4.1, obtida para os dados obtidos.

$$X_2 = \frac{1000}{-0,143827 + 0,529152 m} \quad (4.1)$$

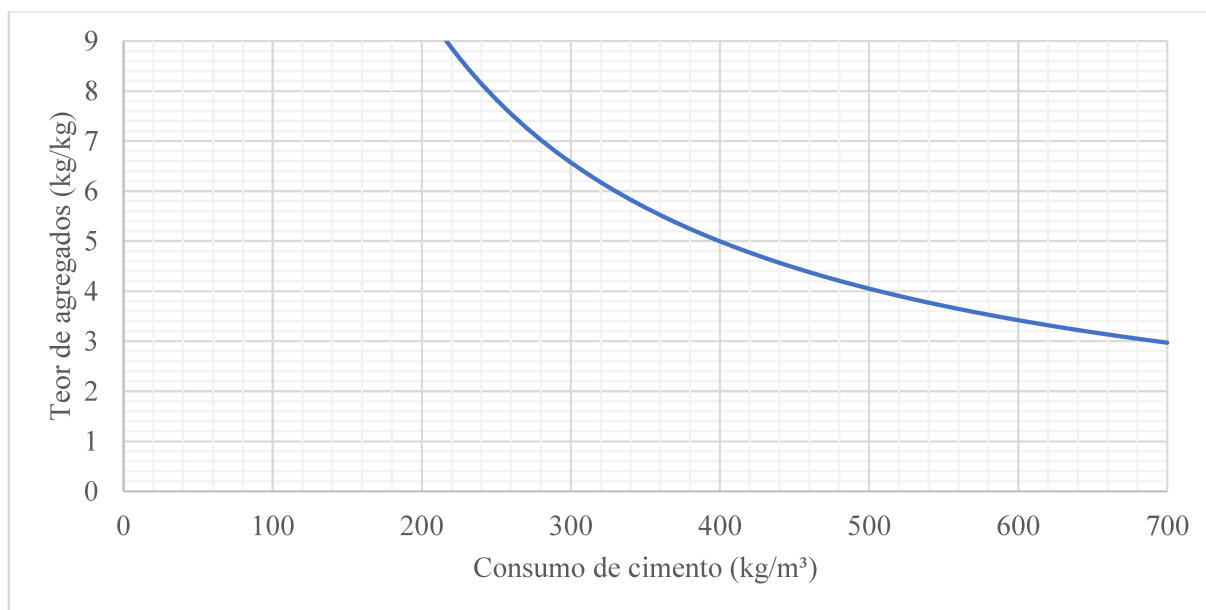
Em que:

X_2 é o consumo de cimento em kg/m³;

m é o teor de agregados.

A lei de Priszkulnik & Kirilos (1974) foi o último parâmetro necessário para definir as quantidades de materiais necessárias para a produção das misturas e moldagem dos corpos de prova dos concretos mostrados na Tabela 7. A partir do consumo de cimento, encontra-se o teor de agregados pela Equação 4.1 e o teor de areia pelo teor de argamassa, Equação 3.4. Sendo assim, é possível definir todas as proporções dos materiais.

Gráfico 13: Lei de Priszkulnik & Kirilos



Fonte: Autor

4.3. MOLDAGEM E TRABALHABILIDADE

As quantidades de cimento, resíduo da extração de minério de ferro, areia média natural, brita 0, brita 1 e água utilizadas para cada um dos traços estão compiladas na Tabela 15. Os traços foram definidos com os consumos do PCC, encontrando-se o teor de agregados pela Equação 4.1, e com esse teor de agregados, encontrou-se o teor de finos pela Equação 3.3.

Tabela 15: Proporções dos concretos produzidos

Traço	Cimento (kg/m³)	Areia residual (kg/m³)	Areia média (kg/m³)	Brita 0 (kg/m³)	Brita 1 (kg/m³)	Água (kg/m³)
14%372C	372	120,5	683,2	364,2	849,8	148,8
14%478C	478	113,8	645,0	383,4	894,7	191,2
86%372C	372	740,3	111,2	364,2	849,8	148,8
86%478C	478	698,9	105,0	383,4	894,7	191,2
0%425C	425	0	772,2	373,8	872,2	170,0
100%425C	425	836,8	0	373,8	872,2	170,0
50%350C	350	435,4	401,8	360,2	840,5	140,0
50%500C	500	401,4	370,4	387,4	904,0	200,0
50%425C	425	418,4	386,1	373,8	872,2	170,0

Fonte: Autor

Para consumos de cimento mais elevados, se via necessária a utilização de superplastificantes em menores percentagens da massa de cimento para atingir trabalhabilidade satisfatória. Os resultados de Zhitkovsky *et al.* (2022) implicaram que, para maiores consumos de cimento, foi necessária menor relação água/cimento para manutenção da trabalhabilidade. Neste estudo, como a relação água/cimento foi mantida constante, reduziu-se o teor de superplastificantes para obtenção de trabalhabilidade adequada em concretos com maior consumo de cimento.

O aumento no teor de areia residual demandou maior consumo de aditivo, pois além do da maior demanda de água para molhagem da elevada área superficial, a areia residual também aumenta muito a coesão da mistura, por causa de sua elevada finura.

4.4. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os valores médios, com respectivos desvios padrões, obtidos para as propriedades de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade, para cada traço, são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade dos traços

Traço	Resistência à compressão (Desvio Padrão) (MPa)	Resistência à tração (Desvio Padrão) (MPa)	Módulo de elasticidade (Desvio Padrão) (GPa)
14%372C35h	28,96 (1,45)	3,16 (0,23)	32,23 (4,76)
14%372C145h	44,62 (2,93)	4,21 (0,51)	37,95 (2,33)
14%478C35h	31,53 (3,02)	3,60 (0,11)	34,23 (1,19)
14%478C145h	45,88 (0,58)	3,95 (0,45)	36,90 (1,76)
86%372C35h	33,56 (1,43)	3,37 (0,35)	37,08 (1,76)
86%372C145h	44,93 (3,30)	4,23 (0,41)	43,80 (2,97)
86%478C35h	36,06 (1,36)	3,89 (0,19)	32,75 (4,76)
86%478C145h	41,05 (2,23)	4,12 (0,33)	43,40 (4,33)
0%425C90h	42,76 (1,42)	3,36 (0,38)	35,13 (2,87)
100%425C90h	35,59 (2,66)	3,79 (0,32)	36,38 (3,17)
50%350C90h	46,75 (1,99)	3,83 (0,37)	39,20 (1,99)
50%500C90h	41,59 (1,97)	3,81 (0,27)	36,80 (0,51)
50%425C12h	13,93 (0,27)	2,23 (0,15)	21,20 (1,50)
50%425C168h	50,39 (1,00)	4,53 (0,27)	41,45 (3,42)
50%425C90h	47,23 (1,78)	4,52 (0,49)	38,53 (0,85)
50%425C90h	45,49 (3,64)	4,30 (0,14)	37,15 (2,23)
50%425C90h	45,43 (2,02)	3,91 (0,41)	35,43 (0,66)
50%425C90h	46,02 (1,84)	3,84 (0,40)	35,83 (1,49)

Fonte: Autor

Os resultados médios, com respectivos desvios padrões, obtidos para as propriedades de absorção e capilaridade, para cada traço, são apresentados na Tabela 17. Os resultados do teste de Chauvenet para todas as propriedades são exibidos no Apêndice A.

Tabela 17: Absorção total e por capilaridade dos traços estudados

Traço	Absorção (Desvio Padrão) (%)	Capilaridade (Desvio Padrão) (g/cm ²)
100%425C	4,95 (0,26)	5,65 (0,10)
0%425C	5,19 (0,42)	6,59 (0,37)
50%425C	3,63 (0,14)	4,23 (0,47)
50%500C	3,48 (0,31)	4,75 (0,99)
50%350C	2,68 (0,13)	4,42 (0,61)
86%372C	3,20 (0,20)	4,35 (0,43)
86%478C	3,66 (0,21)	3,07 (0,36)
14%478C	3,56 (0,07)	4,46 (0,89)
14%372C	3,64 (0,26)	5,52 (0,71)

Fonte: Autor

Os resultados obtidos para as propriedades resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade foram analisados por superfícies de respostas conforme apresentado em seguida no item 4.5.

4.5. ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DE RESPOSTA

As superfícies de resposta obtidas neste trabalho foram geradas a partir da plotagem das equações das variáveis dependentes em relação as variáveis independentes (X_1 : Porcentagem de substituição de areia natural; X_2 : Consumo de cimento; X_3 : Idade). Essas equações são regressões múltiplas polinomiais com análise das variáveis isoladas e de suas interações. O nível de significância adotado para o tratamento foi de 90%, ou seja, as variáveis relevantes para as respostas apresentam um nível de confiança (p) inferior a 0,10. Os termos relevantes foram destacados em **negrito**. E o coeficiente de determinação (R^2) indica o quanto o modelo se adequa aos valores observados.

4.5.1. Resistência à compressão

A partir das médias, foi utilizada regressão múltipla para a determinação da variável dependente resistência à compressão, a equação polinomial quadrática obtida é representada abaixo na Equação 4.2. O coeficiente de determinação da equação (R^2) foi de 0,85.

$$f_c = 9,129906 + 0,382370 (X_1) - 0,039931(X_2) + 0,673394 (X_3) - 0,0017256 (X_1)^2 + 0,000093 (X_2)^2 - 0,001899 (X_3)^2 - 0,000341 (X_1)(X_2) - 0,000862 (X_1)(X_3) - 0,000330 (X_2)(X_3) \quad (4.2)$$

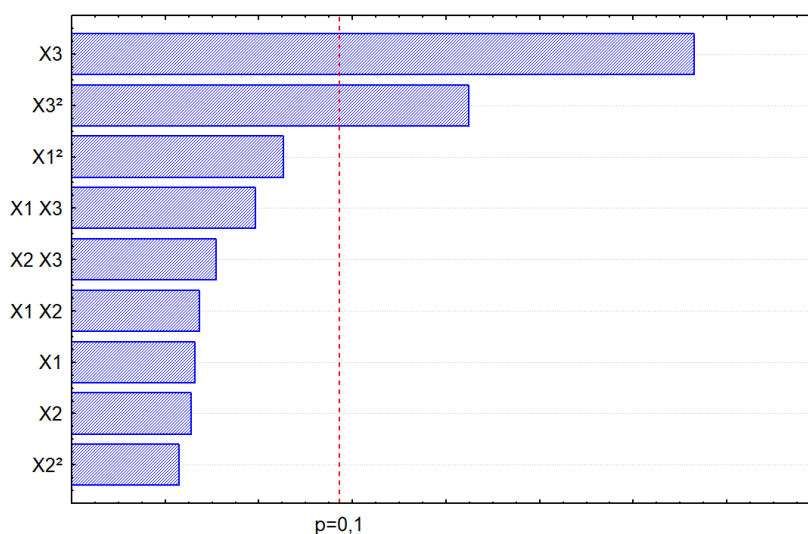
Em que:

f_c é a resistência à compressão em MPa;

X_1 , X_2 e X_3 são as variáveis independentes.

Percebe-se que a resistência à compressão dos concretos produzidos é influenciada apenas pela variável X_3 (idade), como mostrado no Gráfico 14. A Análise de Variância (ANOVA) para o modelo quadrático da superfície de resposta para a resistência à compressão (f_c) está apresentada no Apêndice A.

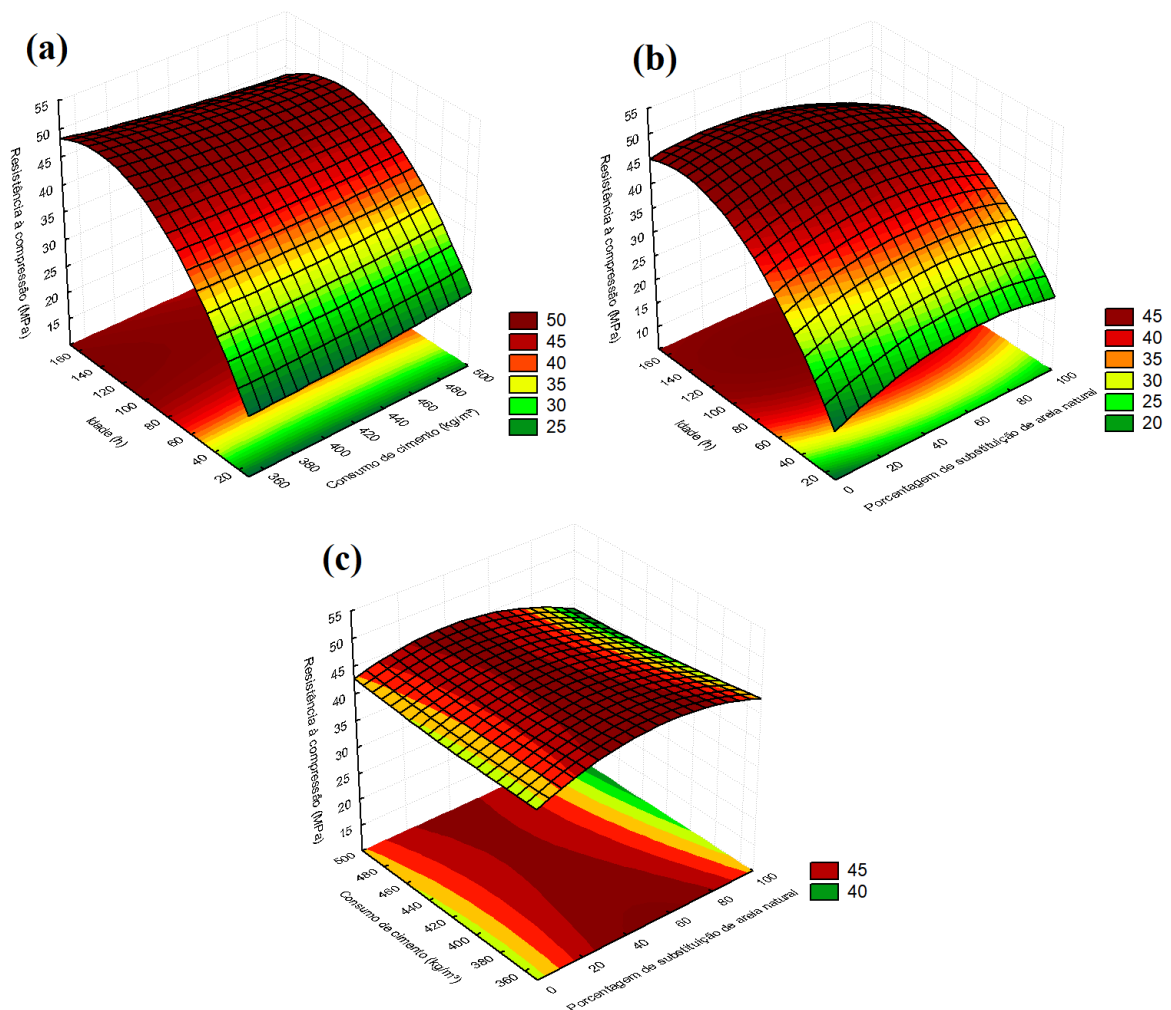
Gráfico 14: Gráfico de Pareto para a resistência à compressão



Fonte: Autor

As Figuras 12a e 12b, com valores de porcentagem de substituição de areia natural e consumo de cimento no ponto central ($X_1=0$; 50%) ($X_2=0$; 425 kg/m³), respectivamente, apontam uma tendência de aumento na resistência à compressão conforme o avanço da idade de hidratação da matriz cimentícia, sendo em ambos os casos um aumento de cerca de 100% entre 12 h e 168 h de hidratação, o que é um efeito normal do processo de hidratação do concreto. Outro ponto notável na projeção dos gráficos no plano cartesiano, é que as zonas de aumento da resistência à compressão estão praticamente paralelas aos eixos do consumo de cimento e porcentagem de substituição de areia natural, dessa forma, em uma mesma idade, a variação de tais parâmetros não se mostrou relevante para o aumento na resistência à compressão.

Figura 12: Superfícies de resposta para a resistência à compressão (f_c): (a) Porcentagem de substituição de areia natural no nível central ($X_1=0$); (b) Consumo de cimento no nível central ($X_2=0$); (c) Idade no nível central ($X_3=0$)



Fonte: Autor

Na Figura 12c, com valor da idade no ponto central ($X_3=0$; 90 h), há uma variação de cerca de 10% entre o menor e o maior valor de resistência à compressão, sendo que a variação na porcentagem de substituição de areia natural mostrou-se mais significativa do que o consumo de cimento do concreto. Nos menores valores de consumo de cimento, as porcentagens que atingem esse valor máximo variam entre 25% e 80% de substituição de agregado natural. Em comparação, dos valores medianos aos maiores valores de consumo de cimento, os melhores teores de substituição estão entre 40% e 60%. Estes valores estão condizentes com os trabalhos estudados na revisão bibliográfica, pode-se notar pela Tabela 3 (p. 12) que o aumento na resistência à compressão é comum nessas faixas de substituição do agregado natural por resíduo da extração de minério de ferro.

Essa diferença nos teores ótimos de substituição de areia natural observada na Figura 12c, pode estar relacionada com o empacotamento da matriz do concreto. Um menor consumo de cimento significa menos partículas finas no concreto, portanto, uma maior quantidade de agregado proveniente da extração de minério de ferro, que possui uma granulometria menor que areia natural (Figura 6, p. 30), melhora o empacotamento da matriz cimentícia. Da mesma forma, observa-se um leve aumento no teor de substituição que alcançou a melhor resistência com consumos de cimento maiores, há uma elevada disponibilidade de partículas finas do cimento, e as partículas do agregado proveniente da extração do minério de ferro são maiores, melhorando a curva granulométrica dos materiais.

Formagini (2005), cita como há métodos de dosagem de concreto que procuram a otimização das partes da fração granular para obter concretos de altíssimo desempenho por meio da redução do índice de vazios, comprovando como a granulometria tem uma grande relevância nas propriedades mecânicas do concreto.

Na Tabela 18, são apresentados os valores de resistência à compressão encontrados por meio dos ensaios realizados e os valores estimados pela Equação 4.2, assim como a porcentagem de variação destes valores. Grande parte dos valores apresentou uma variação máxima de 10% entre as duas resistências à compressão. A maior diferença entre os valores, isso pode ser explicado por ser um valor de extremidade da variável mais significativa ($X_3=-1,41421$; 12 h).

Tabela 18: Comparativo entre resistência à compressão medida e estimada

Traço	Codificação			Resistência medida (MPa)	Resistência estimada (MPa)	Variação
	X ₁	X ₂	X ₃			
14%372C35h	-1	-1	-1	28,96	26,91	7,62%
14%372C145h	-1	-1	1	44,62	48,57	8,13%
14%478C35h	-1	1	-1	31,53	29,33	7,51%
14%478C145h	-1	1	1	45,88	47,14	2,67%
86%372C35h	1	-1	-1	33,56	30,70	9,30%
86%372C145h	1	-1	1	44,93	45,54	1,33%
86%478C35h	1	1	-1	36,06	30,52	18,17%
86%478C145h	1	1	1	41,05	41,50	1,09%
0%425C90h	-1,41421	0	0	42,76	41,57	2,86%
100%425C90h	1,41421	0	0	35,59	40,29	11,67%
50%350C90h	0	-1,41421	0	46,75	46,34	0,89%
50%500C90h	0	1,41421	0	41,59	45,20	7,98%
50%425C12h	0	0	-1,41421	13,93	22,12	37,02%
50%425C168h	0	0	1,41421	50,39	45,27	11,32%
50%425C90h	0	0	0	47,23	45,24	4,39%
50%425C90h	0	0	0	45,49	45,24	0,54%
50%425C90h	0	0	0	45,43	45,24	0,41%
50%425C90h	0	0	0	46,02	45,24	1,71%

Fonte: Autor

4.5.2. Resistência à tração

Analogamente ao que foi feito na seção anterior, foi utilizada regressão múltipla, a partir das médias, para a determinação da variável dependente resistência à tração, a equação polinomial quadrática obtida é representada abaixo na Equação 4.3. O coeficiente de determinação da equação (R^2) foi de 0,71.

$$\begin{aligned}
 f_t = & \mathbf{0,321185} + 0,007397 (X_1) + 0,003624(X_2) + \\
 & \mathbf{0,046687} (X_3) - 0,000090 (X_1)^2 + 0,000002 (X_2)^2 - \\
 & 0,000071 (X_3)^2 + 0,000015 (X_1)(X_2) - \\
 & 0,000020 (X_1)(X_3) - 0,000057 (X_2)(X_3)
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

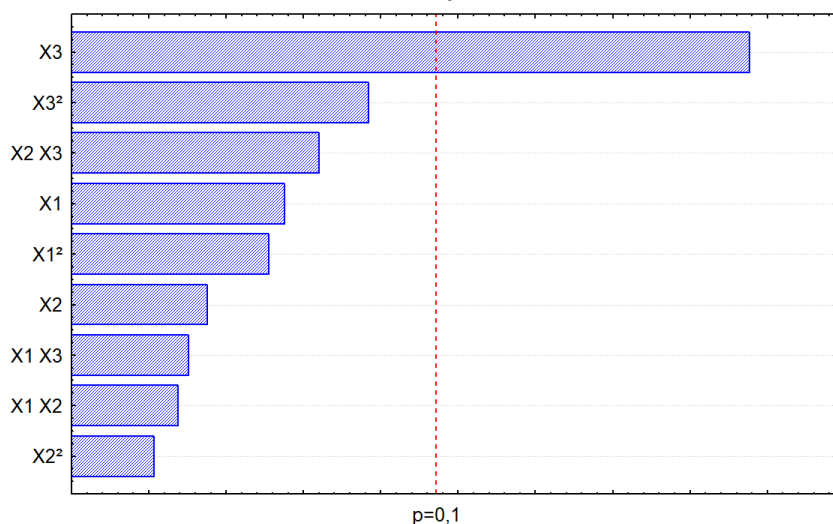
Em que:

f_t é a resistência à tração em MPa;

X_1 , X_2 e X_3 são as variáveis independentes.

Da mesma forma que a resistência à compressão, a única variável independente que tem influência para os valores de resistência à tração é a variável X_3 (idade), como observado no Gráfico 15. A Análise de Variância (ANOVA) para o modelo quadrático da superfície de resposta para a resistência à tração (f_t) está apresentada no Apêndice A.

Gráfico 15: Gráfico de Pareto para a resistência à tração



Fonte: Autor

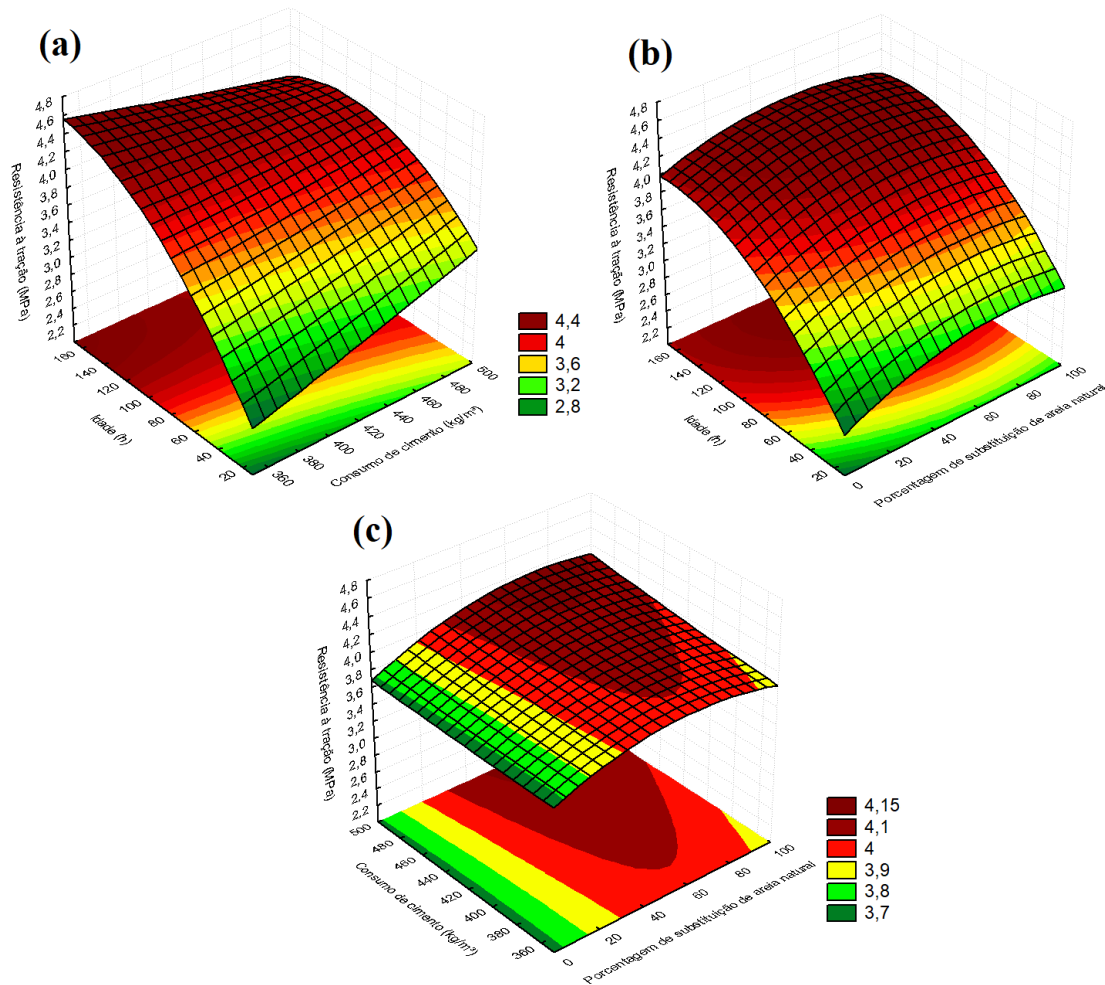
O que é possível de se analisar das Figuras 13a e 13b, a superfície de resposta da resistência à tração se comporta de forma parecida com a superfície de resposta da resistência à compressão. Sendo assim, percebe-se que os planos das variáveis consumo de cimento (X_2) e porcentagem de substituição de areia natural (X_1) estão perpendiculares ao eixo da idade (X_3), comprovando que esta última variável independente apresenta uma influência muito maior na variável resposta. A variação entre a menor resistência à tração e a maior para as Figuras 13a e 13b, no período entre 12 h e 168 h de hidratação, é de cerca de 60%.

Outra questão a ser pontuada, a partir da Figura 13a, observa-se que com o maior consumo de cimento (500 kg/m^3), na idade de 12h, a resistência à tração foi cerca de 14% maior em relação ao menor consumo de cimento (350 kg/m^3).

A maior resistência à tração da superfície de resposta da Figura 13c é, aproximadamente, 12% maior do que a menor resistência à tração averiguada, uma variação bem menor em relação às superfícies anteriores. A porcentagem de substituição de agregado natural parece ser mais influente na resistência à tração em relação ao consumo de cimento, sendo os maiores valores encontrados nas maiores porcentagens. Isso acontece devido ao que foi discutido anteriormente sobre como a forma irregular e superfície rugosa das partículas de resíduo da extração do

minério de ferro melhoram o vínculo entre o agregado e a pasta de cimento (ARBILI *et al.*, 2022).

Figura 13: Superfícies de resposta para a resistência à tração (ft): (a) Porcentagem de substituição de areia natural no nível central ($X_1=0$); (b) Consumo de cimento no nível central ($X_2=0$); (c) Idade no nível central ($X_3=0$)



Fonte: Autor

Analogamente ao que foi feito na Tabela 18, a Tabela 19 compila os dados de resistência à tração encontrados por meio dos ensaios realizados e os valores estimados pela Equação 4.3, assim como a porcentagem de variação destes valores. Grande parte dos valores apresentou uma variação máxima de 10% entre a resistência à tração medida e teorizada. A maior diferença sendo cerca de 20% entre os valores, assim como na resistência à compressão, teoriza-se que isso acontece por ser um valor de extremidade da variável mais significativa ($X_3=-1,41421$; 12 h). Portanto o modelo pode não ser adequado para as extremidades das variáveis estudadas.

Tabela 19: Comparativo entre resistência à tração medida e estimada

Traço	Codificação			Resistência medida (MPa)	Resistência estimada (MPa)	Variação
	X ₁	X ₂	X ₃			
14%372C35h	-1	-1	-1	3,16	2,90	9,14%
14%372C145h	-1	-1	1	4,21	4,26	1,23%
14%478C35h	-1	1	-1	3,60	3,26	10,30%
14%478C145h	-1	1	1	3,95	3,97	0,41%
86%372C35h	1	-1	-1	3,37	3,13	7,61%
86%372C145h	1	-1	1	4,23	4,34	2,62%
86%478C35h	1	1	-1	3,89	3,62	7,60%
86%478C145h	1	1	1	4,12	4,16	1,02%
0%425C90h	-1,41421	0	0	3,36	3,66	8,08%
100%425C90h	1,41421	0	0	3,79	3,96	4,19%
50%350C90h	0	-1,41421	0	3,83	3,98	3,67%
50%500C90h	0	1,41421	0	3,81	4,11	7,26%
50%425C12h	0	0	-1,41421	2,23	2,92	23,66%
50%425C168h	0	0	1,41421	4,53	4,28	5,88%
50%425C90h	0	0	0	4,52	4,03	12,12%
50%425C90h	0	0	0	4,30	4,03	6,66%
50%425C90h	0	0	0	3,91	4,03	3,01%
50%425C90h	0	0	0	3,84	4,03	4,75%

Fonte: Autor

4.5.3. Módulo de elasticidade

O mesmo método utilizado para as resistências à compressão e tração foi aplicado ao módulo de elasticidade, a Equação 4.4 foi encontrada por meio de regressão múltipla, determinando-se a influência das variáveis independentes (X_1 , X_2 e X_3) na propriedade dependente. O coeficiente de determinação da equação (R^2) foi de 0,81.

$$\begin{aligned}
 E_s = & \mathbf{131,628905} + 0,105170 (X_1) - 0,502167 (X_2) - \\
 & \mathbf{0,137112} (X_3) - 0,000424 (X_1)^2 + 0,000595 (X_2)^2 - \\
 & 0,0005504 (X_3)^2 - 0,000372 (X_1)(X_2) + \\
 & 0,000567 (X_1)(X_3) + 0,000038 (X_2)(X_3)
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

Em que:

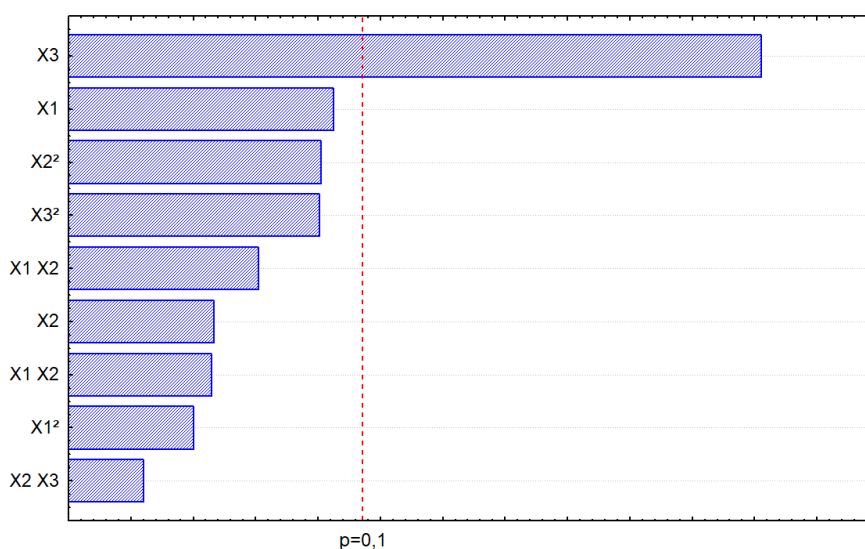
E_s é o módulo de elasticidade estático em GPa;

X_1 , X_2 e X_3 são as variáveis independentes.

Assim como as resistências à tração e compressão, a única variável considerada significativa foi a variável X_3 (idade), como visto no Gráfico 16. A Análise de Variância (ANOVA) para o modelo quadrático da superfície de resposta para a resistência à compressão (fc) está apresentada no Apêndice A.

Com esta última análise, percebe-se que para todas as superfícies de resposta, a única variável independente que influenciou nos valores de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade de forma significativa foi a variável X_3 (idade). O compilado dos trabalhos da literatura, mostra que a variação das propriedades mecânicas para o teor ótimo de substituição de areia natural por areia residual é menor que 30%, e o estudo apresentado conclui que essa não é uma variação significativa. Sendo assim, teoricamente, é possível moldar concretos com quaisquer porcentagens de substituição de agregado natural e consumo de cimento (dentro das faixas definidas), sem grande interferência nas variáveis das superfícies de resposta. Portanto, são outros fatores que se tornam limitantes, como a trabalhabilidade, averigua-se na seção 2.3.1 (p. 20), diminui conforme aumenta-se o teor de areia residual presente nas misturas.

Gráfico 16: Gráfico de Pareto para o módulo de elasticidade

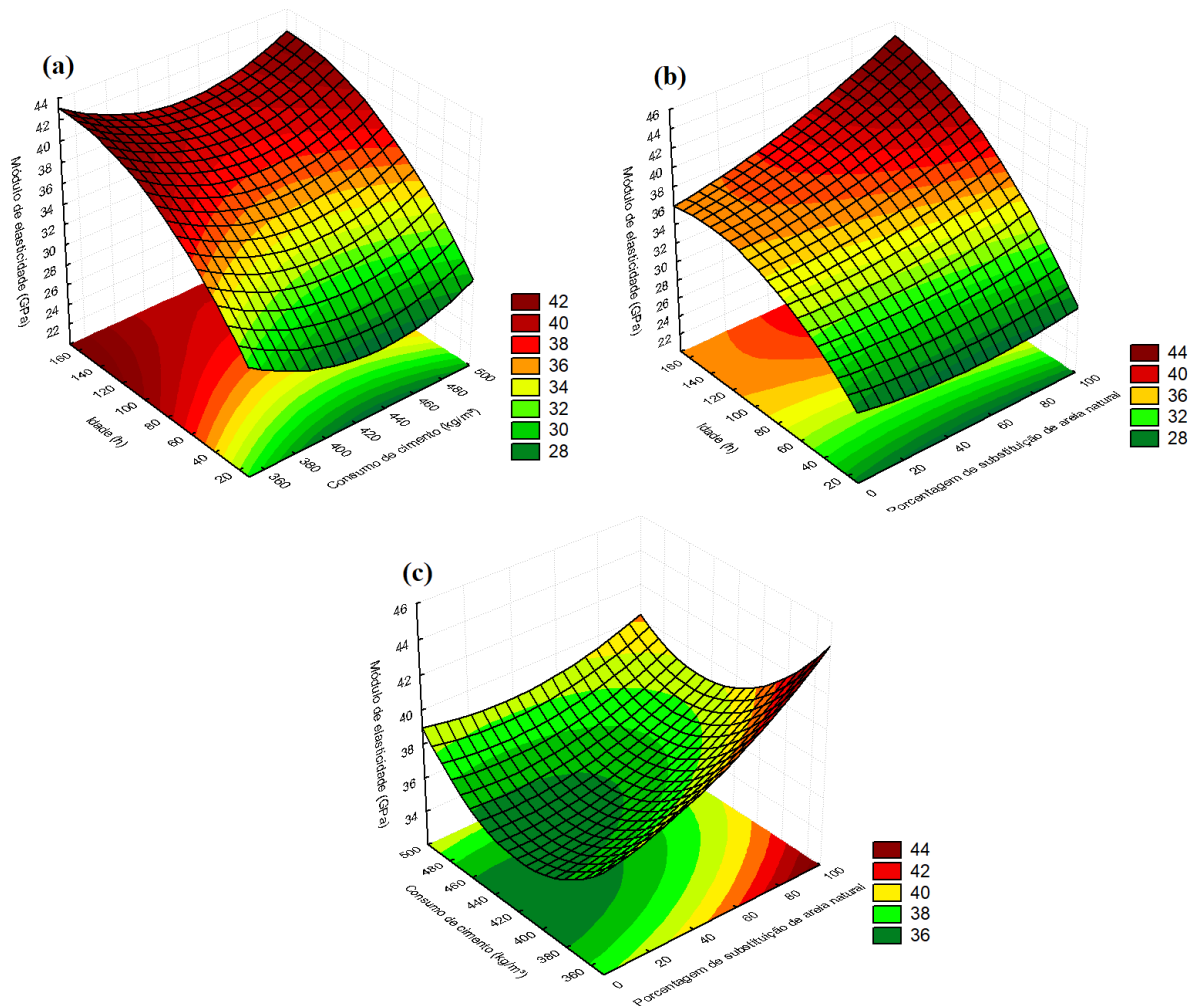


Fonte: Autor

As Figuras 14a e 14b representam um fenômeno que já foi observado para as duas variáveis dependentes anteriores, como a idade (variável X_3) é muito mais influente nas características do concreto em relação à porcentagem de substituição de areia natural (variável

X_1) e ao consumo de cimento (variável X_2). Com a variação sendo maior do que 50% entre o menor e o maior módulo de elasticidade estático registrado.

Figura 14: Superfícies de resposta para o módulo de elasticidade estático (E_s): (a) Porcentagem de substituição de areia natural no nível central ($X_1=0$); (b) Consumo de cimento no nível central ($X_2=0$); (c) Idade no nível central ($X_3=0$)



Fonte: Autor

Na Figura 14c, a taxa de crescimento do maior valor em relação ao menor valor de módulo de elasticidade estático é de 22%. Outro ponto notável é que para o mesmo consumo de cimento, há um aparente aumento no módulo de elasticidade conforme o aumento da substituição de areia natural, como também pontuado por Shettima *et al.* (2016). Entretanto a ANOVA, não apontou significância nessa variação. Comprovando mais uma vez que, as variáveis X_1 (porcentagem de substituição de agregado natural) e X_2 (consumo de cimento),

não apresentaram benefícios ou malefícios para os resultados das variáveis respostas. Assim como não mudaram como essas propriedades físicas do concreto se desenvolvem.

Pode-se, como feito anteriormente, usar-se a Equação 4.4 para comparação entre os valores medidos de módulo de elasticidade estático durante os ensaios realizados e os valores teóricos. Essa comparação é apresentada na Tabela 20. Como aconteceu em todas as análises, o ponto com maior divergência de valores foi o que a variável X_3 (idade) tem valor de extremidade ($X_3 = -\alpha = -1,41421$), sendo o valor teorizado 19% maior que o valor medido por ensaios.

Tabela 20: Comparativo entre módulo de elasticidade estático medido e estimado

Traço	Codificação			Módulo medido (GPa)	Módulo estimado (GPa)	Variação
	X1	X2	X3			
14%372C35h	-1	-1	-1	32,23	31,73	1,58%
14%372C145h	-1	-1	1	37,95	38,33	0,99%
14%478C35h	-1	1	-1	34,23	31,73	7,87%
14%478C145h	-1	1	1	36,9	38,77	4,83%
86%372C35h	1	-1	-1	37,08	33,82	9,64%
86%372C145h	1	-1	1	43,8	44,91	2,47%
86%478C35h	1	1	-1	32,75	30,98	5,70%
86%478C145h	1	1	1	43,4	42,51	2,08%
0%425C90h	-1,41421	0	0	35,13	35,08	0,15%
100%425C90h	1,41421	0	0	36,38	39,13	7,02%
50%350C90h	0	-1,41421	0	39,2	40,24	2,58%
50%500C90h	0	1,41421	0	36,8	38,54	4,53%
50%425C12h	0	0	-1,41421	21,2	26,26	19,28%
50%425C168h	0	0	1,41421	41,45	39,12	5,95%
50%425C90h	0	0	0	38,53	36,04	6,90%
50%425C90h	0	0	0	37,15	36,04	3,08%
50%425C90h	0	0	0	35,43	36,04	1,70%
50%425C90h	0	0	0	35,83	36,04	0,59%

Fonte: Autor

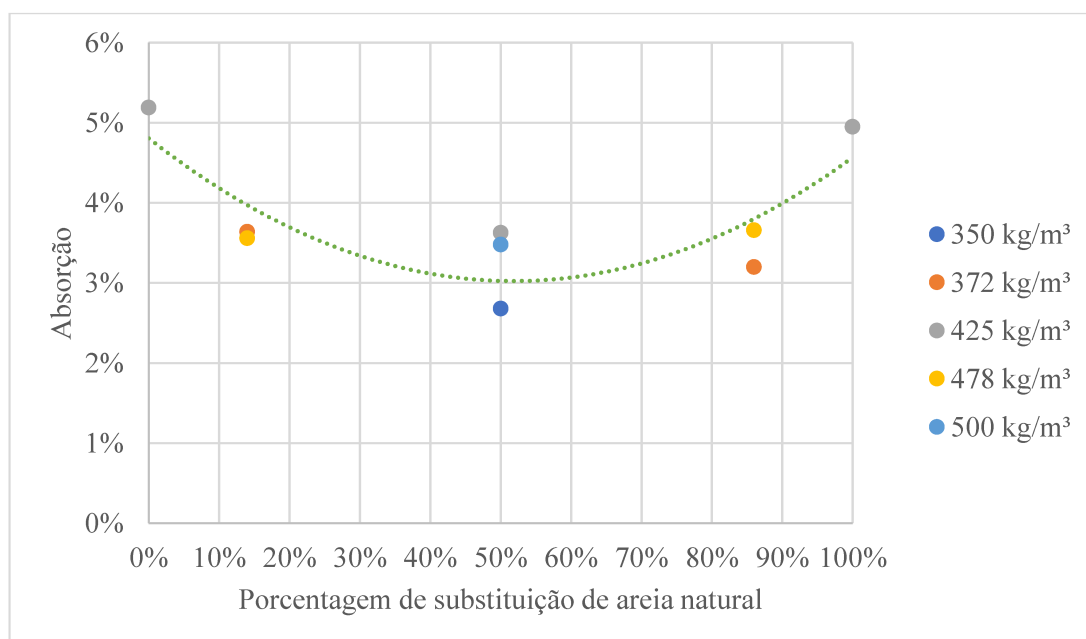
4.6. ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

Os dados de absorção e índice de vazios foram obtidos apenas na idade de 28 dias, dessa forma, não se pode utilizar o método de regressões múltiplas como feito para as propriedades de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Sendo assim, os

resultados médios foram plotados no Gráfico 17, separados para diferentes consumos de cimento.

A primeira análise a ser feita pelo Gráfico 17 será para o consumo de 425 kg/m^3 , as suas extremidades com 0% e 100% de substituição de agregado possuem 5,2% e 5,0% de absorção, respectivamente. Para 50% de substituição, a absorção diminui a 3,6%, comprovando que os teores com as melhores características físicas do concreto estudado estão com substituição do agregado natural entre 40% e 60%, como averiguado nas superfícies de resposta das propriedades mecânicas estudadas anteriormente.

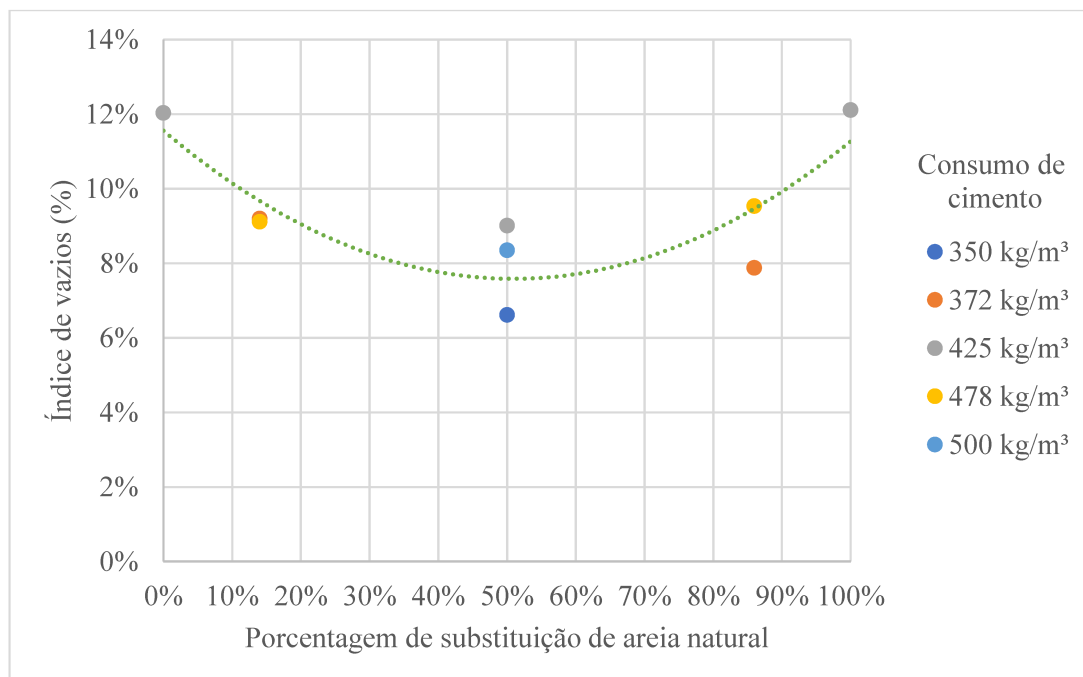
Gráfico 17: Relação entre percentagem de substituição de areia natural e absorção para diferentes consumos de cimento



Fonte: Autor

O concreto com a menor absorção registrada foi confeccionado com consumo de cimento igual a 350 kg/m^3 . Esse concreto também possui a maior resistência à compressão registrada, para a idade de 90 h, em comparação aos concretos com 425 kg/m^3 e 500 kg/m^3 . Como representado no Gráfico 18, o espécime com consumo de cimento igual a 350 kg/m^3 apresentou o menor teor de vazios, sendo comprovado mais uma vez a relação entre o empacotamento das partículas e a melhora das características físicas do concreto.

Gráfico 18: Relação entre porcentagem de substituição de areia natural e teor de vazios para diferentes consumos de cimento



Fonte: Autor

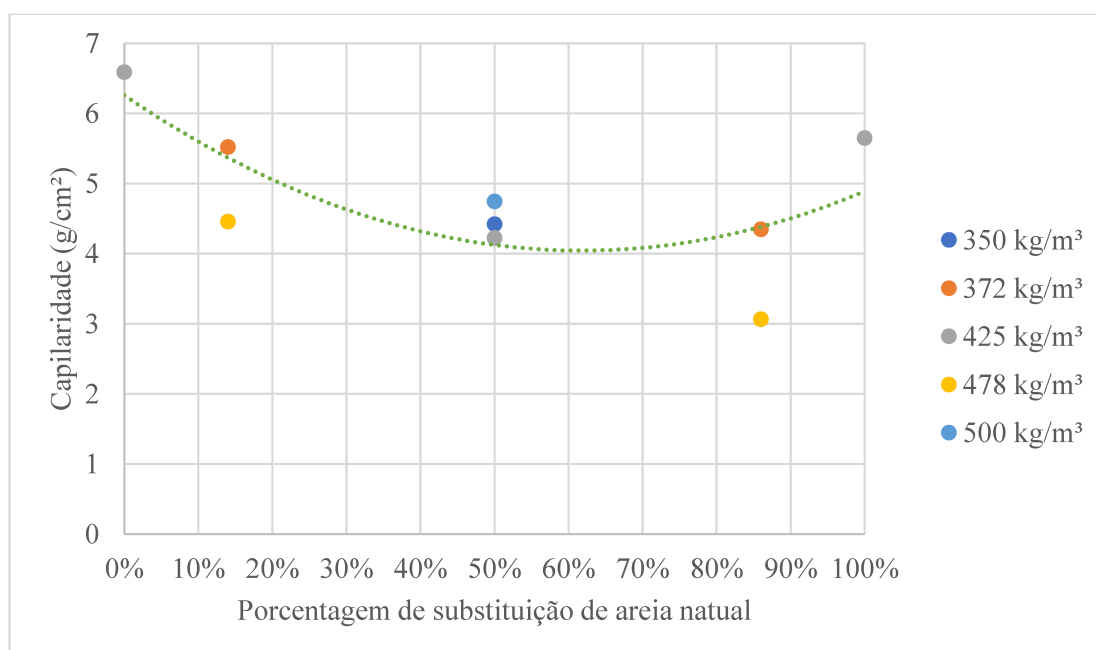
A Análise de Variância dos dados está compilada no Apêndice A17. De acordo com a ANOVA, tanto a variável X_1 (Porcentagem de substituição de areia natural; $p = 0,64227$) quanto a variável X_2 (Consumo de cimento; $p = 0,60962$) não são significativas para a absorção dos espécimes. Isso pode ser um indicativo de que, assim como para as outras propriedades estudadas, a idade é a única contribuinte significativa dessa propriedade.

Ressalta-se, portanto, que, embora os gráficos 17 e 18 apresentem uma tendência de redução da absorção e índice de vazios para teores intermediários de substituição da areia natural pela areia residual, a análise estatística mostra que esta redução não é significativa. Determinando a redução percentual máxima da absorção chega-se ao valor de 30% de redução, mas que não é significativo. Como ressaltado na revisão bibliográfica, as variações das propriedades nos trabalhos apresentados anteriormente ficam abaixo de 30%, o que não se mostrou significativo estatisticamente neste trabalho. Portanto, a indicação de teores ótimos nestes trabalhos deve ser adotada com cautela, a menos que estudos estatísticos mais elaborados comprovem realmente que a variação nas propriedades é verdadeiramente significativa.

4.7. CAPILARIDADE

Os efeitos da capilaridade nos concretos foram discutidos na seção 2.3.5 deste trabalho. O que foi aprendido na análise da bibliografia é que a capilaridade tende a diminuir nas faixas de teor ótimo de substituição de agregado natural por resíduo da extração de minério de ferro. Ao passo que, em dosagens não ótimas, o volume de capilares tende a ser maior (W. ZHANG *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2022; LIU *et al.*, 2022; SAEDI *et al.*, 2022; Y. ZHANG *et al.*, 2023).

Gráfico 19: Relação entre porcentagem de substituição de areia natural e capilaridade para diferentes consumos de cimento



Fonte: Autor

Os resultados médios obtidos no ensaio de capilaridade, obtidos por ensaios conduzidos conforme as especificações da ASTM C1585-2, estão compilados no Gráfico 19. Para o consumo de 425 kg/m³, os efeitos observados na revisão bibliográfica são confirmados, ou seja, em teores tidos como ótimos há uma redução na capilaridade do concreto, o concreto com 100% de substituição obteve um resultado menor de capilaridade em relação ao concreto com 0% de substituição. Esse efeito também pode ser observado nos concretos com consumos de cimento iguais a 372 kg/m³ e 478 kg/m³, em porcentagens menores de substituição, a capilaridade é maior se comparada com a capilaridade nas porcentagens maiores de substituição para o mesmo consumo de cimento. Esse fenômeno pode ser um indicativo de que a incorporação de areia residual em misturas de concreto, ajuda a diminuir a capilaridade.

De acordo com a Análise de Variância apresentada no Apêndice A18, ambas as variáveis X_1 (Porcentagem de substituição de areia natural; $p = 0,053914$) e X_2 (Consumo de cimento; $p = 0,058938$) são significativas para a capilaridade, a significância pode ser explicada por essas duas propriedades interferirem diretamente na quantidade de finos na matriz do concreto. A linha de tendência aparenta mostrar que as porcentagens de substituição com menor capilaridade estão na faixa compreendida entre 50% e 70%, que é a faixa do estudo com os menores resultados de absorção e índice de vazios.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Conclui-se que:

- A composição química do resíduo da extração do minério de ferro é, em sua maior parte, SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 . Sendo estes, compostos químicos já presentes na matriz de concretos comuns e que não representam problemas para a matriz cimentícia.
- Em comparação ao agregado miúdo natural, a areia residual possui maior massa específica. Ou seja, é recomendado que a substituição por este material seja feita em volume, para não ocorrer alteração da proporcionalidade dos materiais da mistura.
- Em comparação ao agregado miúdo natural, a areia residual possui distribuição granulométrica menor. Essa diferença é notada tanto visualmente, quanto por meio de ensaios laboratoriais, uma vez que, a areia residual tem maioria granulométrica de partículas passantes na peneira com abertura de malha 0,15 mm.
- Devido a sua distribuição granulométrica ser menor, ao substituir agregado natural por resíduo da extração de minério de ferro, há um aumento na demanda de água e elevação da coesão da mistura. Esses fenômenos acarretam a diminuição da trabalhabilidade, que pode ser corrigida com a utilização de aditivos apropriados.
- A variável porcentagem de substituição de areia natural não apresentou influência significativa para as propriedades de resistência à compressão-módulo de elasticidade e resistência à tração.
- A variável consumo de cimento não apresentou influência significativa para as propriedades de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração.
- A variável idade de cura apresentou influência significativa nas propriedades de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração.
- Os resultados encontrados para as variáveis porcentagem de substituição de areia natural, consumo de cimento e idade de cura demonstram que quando se trata de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração, pode-se dosar um concreto com qualquer porcentagem de substituição de agregado natural e consumo de cimento sem grande interferência nessas propriedades. Para isso bastam ajustes na

dosagem com uso de aditivos e métodos adequados de mistura e aplicação dos concretos obtidos.

- De acordo com a análise dos resultados das linhas de tendência de absorção, número de vazios e capilaridade. Parece existir uma faixa entre 40% e 80% de substituição de areia natural, na qual esses valores são os mínimos.
- As variáveis porcentagem de substituição de areia natural e consumo de cimento não apresentaram influência significativa para os resultados de absorção aos 28 d.
- As variáveis porcentagem de substituição de areia natural e consumo de cimento apresentaram influência significativa para os resultados de capilaridade aos 28 d.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI Committee. **Report 209R-2: Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures.** ACI Manual of Concrete Practice. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005.

ADIGUZEL, Deniz; TUYLU, Serkan; EKER, Hasan. **Utilization of tailings in concrete products: a review.** Construction And Building Materials, [S.L.], v. 360, p. 129574, dez. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129574>>.

ALMEIDA, Vitor O.; SILVESTRO, Laura; GLEIZE, Philippe J.P.; KIRCHHEIM, Ana P.; SCHNEIDER, Ivo A.H.. **Application of leached iron ore tailings to produce sustainable cements.** Construction And Building Materials, [S.L.], v. 377, p. 131095, maio 2023. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131095>>.

ARBILI, Mohamed Moafak, et al. **Concrete Made with Iron Ore Tailings as a Fine Aggregate: A Step towards Sustainable Concrete.** Materials, vol. 15, no 18, set. 2022, p. 6236. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma15186236>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12644: Concreto leve celular estrutural – Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine).** Rio de Janeiro, 2015.

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

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.

ASTM C127. **Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate**, 2015.

ASTM C128. **Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate**, 2022.

ASTM C136/C136M. **Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**, 2019.

ASTM C150/C150M. **Standard Specification for Portland Cement**, 2022.

ASTM C188. **Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement**, 2017.

ASTM C39/C39M. **Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens**, 2021.

ASTM C469/C469M. **Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression**, 2022.

ASTM C496/C496M. **Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens**, 2017.

ASTM C642. **Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete**, 2021.

AZADI, Mehdi; NORTHEY, Stephen A.; ALI, Saleem H.; EDRAKI, Mansour.

Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation. Nature Geoscience, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 100-104, fev. 2020. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41561-020-0531-3>>.

AZEVEDO, Afonso R.G. de; MARVILA, Markssuel T.; OLIVEIRA, Marco A.B. de; UMBUZEIRO, Carlos E.M.; HUAMAN, Noemi R.C.; MONTEIRO, Sergio N.. **Perspectives for the application of bauxite wastes in the development of alternative building materials**. Journal Of Materials Research And Technology, [S.L.], v. 20, p. 3114-3125, set. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.092>>.

BEZERRA, Carolina Goulart; ROCHA, Camila Aparecida Abelha; SIQUEIRA, Iolanda Scheibe de; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. **Feasibility of iron-rich ore tailing as supplementary cementitious material in cement pastes**. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 303, p. 124496, out. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124496>>.

CAETANO, Carolina. **A poucos dias de completar 3 anos da tragédia da Vale, moradores de Brumadinho sofrem com a chuva**. g1, Minas, Belo Horizonte, Minas Gerais, 12 de jan. de 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2022/01/12/a-poucos-dias-de-completar-3-anos-de-rompimento-de-barragem-moradores-de-brumadinho-sofrem-com-a-chuva.ghml>>.

CALADO, Verônica; MONTGOMERY, Douglas C. **Planejamento de Experimentos usando *Statistica***. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2003.

CHEN, Zhi; CHEN, Sili; ZHOU, Yuwan; ZHANG, Chengyu; MENG, Tiantian; JIANG, Shuangshuang; LIU, Liwen; HU, Guiquan. **Effect of incorporation of rice husk ash and iron ore tailings on properties of concrete**. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 338, p. 127584, jul. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127584>>.

CHENG, Yunhong; HUANG, Fei; QI, Shanshan; LI, Wenchuan; LIU, Rui; LI, Guanglu.

Durability of concrete incorporated with siliceous iron tailings. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 242, p. 118147, maio 2020. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118147>>.

CHINNAPPA, Gayana Bangalore *et al.* **Experimental and Statistical Evaluations of Strength Properties of Concrete with Iron Ore Tailings as Fine Aggregate.** Journal Of Hazardous, Toxic, And Radioactive Waste, [S.L.], v. 24, n. 1, p. 04019038, jan. 2020. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)hz.2153-5515.0000480](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000480)>.

Comite Euro-International du Beton. **CEB-FIB Model Code 1990 – Design Code.** Thomas Telford Services Ltda, Londres, 1993.

COMPARINI, Anaisa *et al.* **Metodologia de superfície de resposta:** Uma introdução nos softwares R e Statistica. USP, São Carlos, São Paulo, mar. de 2012. Disponível em: <<http://repositorio.icmc.usp.br/handle/RIICMC/6666>>.

FORMAGINI, Sidiclei. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho.** [S.L.], p.285, 2005.

GAO, Tianming; SHEN, Lei; SHEN, Ming; CHEN, Fengnan; LIU, Litao; GAO, Li. **Analysis on differences of carbon dioxide emission from cement production and their major determinants.** Journal Of Cleaner Production, [S.L.], v. 103, p. 160-170, set. 2015. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.026>>.

GHAZI, Ahad Barzegar; JAMSHIDI-ZANJANI, Ahmad; NEJATI, Hamidreza. **Utilization of copper mine tailings as a partial substitute for cement in concrete construction.** Construction And Building Materials, [S.L.], v. 317, p. 125921, jan. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125921>>.

GOU, Mifeng; ZHOU, Longfei; THEN, Nathalene Wei Ying. **Utilization of tailings in cement and concrete:** a review. Science And Engineering Of Composite Materials, [S.L.], v.

26, n. 1, p. 449-464, 1 jan. 2019. Walter de Gruyter GmbH. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1515/secm-2019-0029>>.

GUIMARÃES, Roberta N.; MOREIRA, Victor R.; CRUZ, Joyce R.A.; SALIBA, Aloysio P.M.; AMARAL, Míriam C.s.. **History of tailings dam failure: impacts on access to safe water and influence on the legislative framework**. Science Of The Total Environment, [S.L.], v. 852, p. 158536, dez. 2022. Elsevier BV. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158536>>.

HUANG, Lizhen; KRIGSVOLL, Guri; JOHANSEN, Fred; LIU, Yongping; ZHANG, Xiaoling. **Carbon emission of global construction sector**. Renewable And Sustainable Energy Reviews, [S.L.], v. 81, p. 1906-1916, jan. 2018. Elsevier BV. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001>>.

IEA, PNUMA. **2018 Global Status Report: towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector**. Disponível em: <

[https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-](https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-2018?_ga=2.100731393.1823480264.1687725545-545980419.1683067007)

[2018?_ga=2.100731393.1823480264.1687725545-545980419.1683067007](https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-2018?_ga=2.100731393.1823480264.1687725545-545980419.1683067007)>.

IEA. **Direct CO2 emissions from industry in the Net Zero Scenario, 2000-2030**.

Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/direct-co2-emissions-from-industry-in-the-net-zero-scenario-2000-2030>>.

JAYASIMHA, N. *et al.* **A study on durability and strength properties of high strength concrete with partial replacement of iron ore tailings with fine aggregates**. Materials Today: Proceedings, [S.L.], v. 65, p. 1922-1929, 2022. Elsevier BV. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.163>>.

KANTRO, D.I. **Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste: A Miniature Slump Test**. Cement, Concrete, And Aggregates, [S.L.], v. 2, n. 2, p. 95-102, 1 jan. 1980. ASTM International. Disponível em : <<http://dx.doi.org/10.1520/cca10190j>>.

LI, Hua-Wei; WANG, Rong; WEI, Mu-Wang; LEI, Neng-Zhong; SUN, Hao-Xu; FAN, Jia-Jun. **Mechanical properties and hydration mechanism of high-volume ultra-fine iron ore**

tailings cementitious materials. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 353, p. 129100, out. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129100>.

LIU, Kangning; WANG, Sheliang; QUAN, Xiaoyi; JING, Wu; XU, Jin; ZHAO, Nan; LIU, Bo. **Effect of iron ore tailings industrial by-product as eco-friendly aggregate on mechanical properties, pore structure, and sulfate attack and dry-wet cycles resistance of concrete.** Case Studies In Construction Materials, [S.L.], v. 17, dez. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01472>.

LOPES, Diego Faleiros; SILVA, André Carlos; BARROS, Mariana Rezende de; SILVA, Elenice Maria Schons. **Reaproveitamento de estéril de mineração como agregado graúdo para fabricação de concreto.** Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 30-36, 2020. Editora Cubo. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20201777>.

LUO, Tao; YI, Yu; SUN, Qiang; LI, Leo Gu; TANG, Liyun; HUA, Cheng. **The effects of adding molybdenum tailings as cementitious paste replacement on the fluidity, mechanical properties and micro-structure of concrete.** Journal Of Building Engineering, [S.L.], v. 62, p. 105377, dez. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105377>.

LUO, Xiaobao; XING, Guohua; QIAO, Lei; MIAO, Pengyong; YU, Xiaoguang; MA, Kaize. **Multi-objective optimization of the mix proportion for dune sand concrete based on response surface methodology.** Construction And Building Materials, [S.L.], v. 366, p. 129928, fev. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129928>.

MA, Xinxin; SUN, Jianheng; ZHANG, Fengshuang; YUAN, Jing; MENG, Zhiliang. **Experimental studies and analysis on axial compressive properties of full iron tailings concrete columns.** Case Studies In Construction Materials, [S.L.], v. 18, jul. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01881>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais**- 2ª Edição. Ed.: IBRACON, 2014.

NETO, B.B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Como Fazer Experimentos**: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria. Campinas: Editora da Unicamp, 2001.

PEI, Chunng; CHEN, Peiyuan; TAN, Weibo; ZHOU, Tao; LI, Jin. **Effect of wet copper tailings on the performance of high-performance concrete**. Journal Of Building Engineering, [S.L.], v. 74, p. 106931, set. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106931>>.

PELISSER, F. *et al.* **Lightweight concrete production with low Portland cement consumption**. Journal Of Cleaner Production, [S.L.], v. 23, p. 68-75, out. 2011. Elsevier BV. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.010>>.

PELISSER, Fernando; VIEIRA, Alexandre; BERNARDIN, Adriano Michael. **Efficient self-compacting concrete with low cement consumption**. Journal Of Cleaner Production, [S.L.], v. 175, p. 324-332, fev. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.084>>.

PNUMA 2009. **Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Makers**. UNEP DTIE Sustainable Consumption and Production Branch, Programa Ambiental das Nações Unidas, Paris, França. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/28163>>.

PNUMA 2019. **Sand and Sustainability**: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. GRID-Geneva, Programa Ambiental das Nações Unidas, Geneva, Suíça. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/28163>>.

PRISZKULNIK, S.; KIRILOS, J. P. **Considerações sobre a resistência à compressão de concretos preparados com cimentos Portland comuns tipo CP-250, CP-320 e CP-400, e a sua durabilidade**. In: ENCONTRO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO, 2, 8-13 dez. 1974. Rio de Janeiro, J. Anais. Rio de Janeiro: ENC, 1974.

RAHEEL SHAH, Syyed Adnan, *et al.* **Optimization of Fresh and Mechanical Properties of Sustainable Concrete Composite Containing ARGF and Fly Ash: An Application of Response Surface Methodology.** Construction and Building Materials, vol. 362, jan. 2023, p. 129722. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129722>>.

SAEDI, Alieh; JAMSHIDI-ZANJANI, Ahmad; DARBAN, Ahmad Khodadadi; MOHSENI, Mehdi; NEJATI, Hamidreza. **Utilization of lead–zinc mine tailings as cement substitutes in concrete construction: effect of sulfide content.** Journal Of Building Engineering, [S.L.], v. 57, p. 104865, out. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104865>>.

SHETTIMA, Ali Umara *et al.* **Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete.** Construction And Building Materials, [S.L.], v. 120, p. 72-79, set. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095>>.

WU, Ruidong; ZHANG, Yueyue; ZHANG, Guangtian; AN, Shuhao. **Enhancement effect and mechanism of iron tailings powder on concrete strength.** Journal Of Building Engineering, [S.L.], v. 57, p. 104954, out. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104954>>.

XU, Fan; WANG, Sheliang; LI, Tao; LIU, Bo; LI, Binbin; ZHOU, Yuan. **Mechanical properties and pore structure of recycled aggregate concrete made with iron ore tailings and polypropylene fibers.** Journal Of Building Engineering, [S.L.], v. 33, p. 101572, jan. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101572>>.

ZHANG, Weifeng; GU, Xiaowei; QIU, Jingping; LIU, Jianping; ZHAO, Yunqi; LI, Xiaohui. **Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete.** Construction And Building Materials, [S.L.], v. 260, p. 119917, nov. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119917>>.

ZHANG, Yannian; LI, Zhijun; GU, Xiaowei; NEHDI, Moncef L.; MARANI, Afshin; ZHANG, Lei. **Utilization of iron ore tailings with high volume in green concrete.** Journal

Of Building Engineering, [S.L.], v. 72, p. 106585, ago. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106585>>.

ZHAO, Bing; WANG, Guangjin; WU, Bisheng; KONG, Xiangyun. **A study on mechanical properties and permeability of steam-cured mortar with iron-copper tailings**. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 383, p. 131372, jun. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131372>>.

ZHAO, Jiangshan, *et al.* **An Evaluation of Iron Ore Tailings Characteristics and Iron Ore Tailings Concrete Properties**. Construction and Building Materials, vol. 286, jun. 2021, p. 122968. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122968>>.

ZHITKOVSKY, Vadim; DVORKIN, Leonid; RIBAKOV, Yuri. Optimization of Self-Compacting Concrete Containing Blast-Furnace Slag Compositions. **Advances In Materials Science And Engineering**, v. 2022, p. 1-11, 30 jun. 2022. Hindawi Limited. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2022/9674394>>.

ZHOU, Longfei; GOU, Mifeng; LUO, Shuqiong. **Hydration kinetics of a calcination activated bauxite tailings-lime-gypsum ternary system**. Journal Of Building Engineering, [S.L.], v. 38, p. 102189, jun. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102189>>.

ZUCCHERATTE, Ana Cristina Vieira, *et al.* **Synthetic Gravel for Concrete Obtained from Sandy Iron Ore Tailing and Recycled Polyethylthephtalate**. Construction and Building Materials, vol. 151, out. 2017, p. 859–65. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.133>>.

APÊNDICES

APÊNDICE A **ANÁLISES ESTATÍSTICAS**

Apêndice A1: Análise de Variância (ANOVA) para modelo quadrático de superfícies de resposta para a resistência à compressão

	SQ	GL	QM	F	p
X ₁ (Porcentagem de substituição de agregado natural)	2,548	1	2,5483	0,101741	0,757919
X ₁ ²	40,007	1	40,0065	1,597249	0,241875
X ₂ (Consumo de cimento)	1,958	1	1,9581	0,078175	0,786879
X ₂ ²	0,546	1	0,5460	0,021799	0,886275
X ₃ (Idade)	799,227	1	799,2267	31,908899	0,000482
X ₃ ²	263,925	1	263,9253	10,537143	0,011770
X ₁ X ₂	3,393	1	3,3930	0,135465	0,722380
X ₁ X ₃	23,290	1	23,2903	0,929859	0,363139
X ₂ X ₃	7,392	1	7,3920	0,295124	0,601760
Erro	200,377	8	25,0471		
Total	1342,663	17			

Em que: SQ= soma dos quadrados; GL= grau de liberdade; QM= quadrados médios; F e p: testes estatísticos.

Apêndice A2: Análise de Variância (ANOVA) para modelo quadrático de superfícies de resposta para o módulo de elasticidade

	SQ	GL	QM	F	p
X ₁ (Porcentagem de substituição de agregado natural)	25,4852	1	25,48517	2,63891	0,14293
X ₁ ²	2,4200	1	2,42000	0,25058	0,63014
X ₂ (Consumo de cimento)	4,2890	1	4,28899	0,44411	0,52389
X ₂ ²	22,3781	1	22,37805	2,31718	0,16645
X ₃ (Idade)	246,5936	1	246,59361	25,53399	0,00099
X ₃ ²	22,1778	1	22,17780	2,29644	0,16814
X ₁ X ₂	4,0328	1	4,03280	0,41758	0,53624
X ₁ X ₃	10,0801	1	10,08005	1,04376	0,33685
X ₂ X ₃	0,0968	1	0,09680	0,01002	0,92272
Erro	77,2597	8	9,657		
Total	414,8130	17			

Em que: SQ= soma dos quadrados; GL= grau de liberdade; QM= quadrados médios; F e p: testes estatísticos.

Apêndice A3: Análise de Variância (ANOVA) para modelo quadrático de superfícies de resposta para a resistência à tração

	SQ	GL	QM	F	<i>p</i>
X1 (Porcentagem de substituição de agregado natural)	0,140425	1	0,140425	0,77014	0,405757
X1 ²	0,109668	1	0,109668	0,60146	0,460330
X2 (Consumo de cimento)	0,026294	1	0,026294	0,14420	0,714019
X2 ²	0,000235	1	0,000235	0,00129	0,972258
X3 (Idade)	2,748209	1	2,748209	15,07217	0,004660
X3 ²	0,368368	1	0,368368	2,02026	0,193000
X1 X2	0,006612	1	0,006612	0,03627	0,853712
X1 X3	0,012013	1	0,012013	0,06588	0,803909
X2 X3	0,221113	1	0,221113	1,21266	0,302832
Erro	1,458693	8	0,182337		
Total	5,091628	17			

Em que: SQ= soma dos quadrados; GL= grau de liberdade; QM= quadrados médios; F e *p*: testes estatísticos.

Apêndice A4: Resultados e testes de Chauvenet para resistência à compressão

Traço	CP	F _c (MPa)	F _{cméd} (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Z-score	Z-limite
100%425C90h	1	35,967	35,593	2,658	0,141	1,534
	2	37,804			0,832	
	3	31,768			1,439	
	4	36,831			0,466	
0%425C90h	1	44,029	42,758	1,422	0,894	1,534
	2	42,530			0,160	
	3	40,849			1,343	
	4	43,623			0,609	
50%500C90h	1	39,397	41,593	1,971	1,114	1,534
	2	41,070			0,265	
	3	44,149			1,297	
	4	41,756			0,083	
50%350C90h	1	46,418	46,753	1,985	0,169	1,534
	2	48,967			1,115	
	3	44,225			1,273	
	4	47,403			0,327	

Em que: CP= corpo de prova; F_c= resistência à compressão

Apêndice A5: Continuação dos resultados e teste de Chauvenet para resistência à compressão

Traço	CP	F _c (MPa)	F _{cméd} (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Z-score	Z-limite
50%425C90h	1	45,192	47,229	1,780	1,144	1,534
	2	49,035			1,015	
	3	48,361			0,636	
	4	46,328			0,506	
86%372C35h	1	34,990	33,556	1,434	0,999	1,534
	2	32,740			0,569	
	3	31,970			1,106	
	4	34,525			0,675	
86%372C145h	1	44,705	44,932	3,304	0,069	1,645
	2	46,191			0,381	
	3	39,990			1,496	
	4	49,117			1,267	
	5	44,655			0,084	
50%425C12h	1	13,621	13,929	0,269	1,147	1,645
	2	14,115			0,688	
	3	13,962			0,119	
	4	14,253			1,204	
	5	13,697			0,865	
86%478C35h	1	38,071	36,062	1,356	1,481	1,645
	2	34,604			1,075	
	3	36,339			0,204	
	4	35,025			0,764	
	5	36,271			0,154	
14%372C145h	1	43,878	44,619	2,927	0,253	1,534
	2	41,068			1,213	
	3	45,476			0,293	
	4	48,056			1,174	
14%478C145h	1	46,699	45,879	0,577	1,421	1,534
	2	45,426			0,785	
	3	45,532			0,602	
	4	45,859			0,035	
86%478C145h	1	38,656	41,049	2,234	1,071	1,534
	2	41,065			0,007	
	3	40,444			0,271	
	4	44,029			1,334	
50%425C168h	1	49,786	50,386	1,000	0,600	1,645
	2	49,751			0,635	
	3	52,023			1,636	
	4	49,696			0,690	
	5	50,674			0,288	

Apêndice A6: Continuação dos resultados e teste de Chauvenet para resistência à compressão

Traço	CP	F _c (MPa)	F _{cméd} (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Z-score	Z-limite
14%372C35h	1	28,673	28,964	1,451	0,201	1,534
	2	29,647			0,471	
	3	30,455			1,027	
	4	27,082			1,297	
14%478C35h	1	34,723	31,528	3,018	1,059	1,534
	2	32,395			0,287	
	3	31,513			0,005	
	4	27,482			1,341	
50%425C90h	1	40,858	45,486	3,642	1,271	1,534
	2	45,018			0,129	
	3	49,642			1,141	
	4	46,428			0,259	
50%425C90h	1	44,831	45,428	2,023	0,295	1,534
	2	43,366			1,019	
	3	48,194			1,368	
	4	45,320			0,053	
50%425C90h	1	47,922	46,024	1,844	1,029	1,534
	2	45,519			0,274	
	3	46,966			0,511	
	4	43,688			1,267	

Apêndice A7: Resultados e testes de Chauvenet para resistência à tração

Traço	CP	F _t (MPa)	F _{tméd} (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Z-score	Z-limite
100%425C90h	1	3,760	3,790	0,323	0,092	1,534
	2	3,773			0,051	
	3	4,206			1,292	
	4	3,419			1,149	
0%425C90h	1	3,888	3,362	0,378	1,392	1,534
	2	3,098			0,699	
	3	3,077			0,756	
	4	3,386			0,063	
50%500C90h	1	4,103	3,808	0,266	1,109	1,534
	2	3,930			0,458	
	3	3,708			0,377	
	4	3,491			1,191	

Em que: CP= corpo de prova; F_t= resistência à tração

Apêndice A8: Continuação dos resultados e testes de Chauvenet para resistência à tração

Traço	CP	F _t (MPa)	F _{tméd} (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Z-score	Z-limite
50%350C90h	1	4,261	3,835	0,372	1,144	1,534
	2	3,813			0,058	
	3	3,909			0,198	
	4	3,357			1,284	
50%425C90h	1	4,915	4,520	0,489	0,807	1,534
	2	4,451			0,141	
	3	3,856			1,359	
	4	4,859			0,693	
86%372C35h	1	3,800	3,365	0,353	1,232	1,534
	2	3,304			0,173	
	3	2,942			1,198	
	4	3,414			0,139	
86%372C145h	1	4,762	4,230	0,414	1,286	1,534
	2	4,250			0,049	
	3	4,151			0,190	
	4	3,756			1,144	
50%425C12h	1	2,322	2,231	0,154	0,591	1,645
	2	2,109			0,795	
	3	2,199			0,207	
	4	2,078			0,997	
	5	2,448			1,408	
86%478C35h	1	4,161	3,889	0,185	1,466	1,645
	2	3,992			0,554	
	3	3,717			0,928	
	4	3,749			0,755	
	5	3,827			0,337	
14%372C145h	1	4,952	4,206	0,506	1,476	1,534
	2	4,074			0,260	
	3	3,857			0,688	
	4	3,939			0,528	
14%478C145h	1	3,443	3,949	0,450	1,125	1,534
	2	3,968			0,042	
	3	4,533			1,298	
	4	3,852			0,215	
86%478C145h	1	4,455	4,121	0,333	1,003	1,534
	2	3,682			1,318	
	3	4,281			0,480	
	4	4,066			0,165	

Apêndice A9: Continuação dos resultados e testes de Chauvenet para resistência à tração

Traço	CP	F _t (MPa)	F _{tméd} (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Z-score	Z-limite
50%425C168h	1	4,574	4,533	0,274	0,153	1,534
	2	4,707			0,637	
	3	4,715			0,667	
	4	4,133			1,458	
14%372C35h	1	3,210	3,159	0,233	0,216	1,534
	2	2,878			1,210	
	3	3,439			1,202	
	4	3,111			0,208	
14%478C35h	1	3,743	3,599	0,112	1,284	1,534
	2	3,554			0,407	
	3	3,621			0,195	
	4	3,479			1,072	
50%425C90h	1	4,488	4,299	0,136	1,393	1,534
	2	4,232			0,493	
	3	4,176			0,903	
	4	4,299			0,003	
50%425C90h	1	4,496	3,910	0,412	1,422	1,534
	2	3,886			0,057	
	3	3,567			0,833	
	4	3,691			0,531	
50%425C90h	1	4,019	3,836	0,400	0,458	1,534
	2	3,245			1,476	
	3	3,952			0,291	
	4	4,127			0,727	

Apêndice A10: Resultados e testes de Chauvenet para módulo de elasticidade

Traço	CP	E _c (GPa)	E _{cméd} (GPa)	Desv. Padrão (GPa)	Z-score	Z-limite
100%425C90h	1	35,700	36,375	3,170	0,213	1,534
	2	39,700			1,049	
	3	32,300			1,285	
	4	37,800			0,450	
0%425C90h	1	35,300	35,125	2,871	0,061	1,534
	2	38,900			1,315	
	3	32,000			1,088	
	4	34,300			0,287	

Em que: CP= corpo de prova; E_c= módulo de elasticidade

Apêndice A11: Continuação dos resultados e testes de Chauvenet para módulo de elasticidade

Traço	CP	E_c (GPa)	$E_{cméd}$ (GPa)	Desv. Padrão (GPa)	Z-score	Z-limite
50%500C90h	1	36,300	36,800	0,510	0,981	1,534
	2	36,800			0,000	
	3	36,600			0,392	
	4	37,500			1,373	
50%350C90h	1	40,100	39,200	1,992	0,452	1,534
	2	38,500			0,351	
	3	36,800			1,205	
	4	41,400			1,105	
50%425C90h	1	38,000	38,525	0,854	0,615	1,534
	2	39,300			0,908	
	3	39,200			0,790	
	4	37,600			1,083	
86%372C35h	1	35,300	37,075	1,759	1,009	1,534
	2	39,500			1,378	
	3	36,600			0,270	
	4	36,900			0,099	
86%372C145h	1	44,800	43,800	2,965	0,337	1,534
	2	44,600			0,270	
	3	39,500			1,450	
	4	46,300			0,843	
50%425C12h	1	20,400	21,200	1,503	0,532	1,534
	2	19,500			1,131	
	3	22,200			0,665	
	4	22,700			0,998	
86%478C35h	1	33,800	32,750	1,682	0,624	1,534
	2	34,500			1,040	
	3	31,800			0,565	
	4	30,900			1,100	
14%372C145h	1	41,300	37,950	2,336	1,434	1,534
	2	36,400			0,664	
	3	37,800			0,064	
	4	36,300			0,706	
14%478C145h	1	37,600	36,900	1,764	0,397	1,534
	2	34,400			1,417	
	3	37,100			0,113	
	4	38,500			0,907	
86%478C145h	1	40,000	43,400	4,334	0,785	1,534
	2	43,100			0,069	
	3	49,600			1,431	
	4	40,900			0,577	

Apêndice A12: Continuação dos resultados e testes de Chauvenet para módulo de elasticidade

Traço	CP	E_c (GPa)	$E_{cméd}$ (GPa)	Desv. Padrão (GPa)	Z-score	Z-limite
50%425C168h	1	42,900	41,450	3,422	0,424	1,534
	2	40,500			0,278	
	3	45,200			1,096	
	4	37,200			1,242	
14%372C35h	1	39,100	32,225	4,755	1,446	1,534
	2	28,800			0,720	
	3	31,700			0,110	
	4	29,300			0,615	
14%478C35h	1	34,000	34,225	1,187	0,190	1,534
	2	35,900			1,411	
	3	33,900			0,274	
	4	33,100			0,948	
50%425C90h	1	35,900	37,150	2,234	0,560	1,534
	2	40,400			1,455	
	3	36,800			0,157	
	4	35,500			0,739	
50%425C90h	1	35,400	35,425	0,660	0,038	1,534
	2	35,300			0,189	
	3	36,300			1,325	
	4	34,700			1,098	
50%425C90h	1	37,000	35,825	1,489	0,789	1,534
	2	34,800			0,689	
	3	34,300			1,024	
	4	37,200			0,924	

Apêndice A13: Resultados e testes de Chauvenet para absorção

Traço	CP	Massa seca (g)	Massa saturada superfície seca (g)	Massa fervida (g)	Massa do conjunto (g)	Massa cesto (g)	Massa submersa (g)	Absorção (%)	Absorção média (%)	Desv. Padrão (%)	Desvio parametrizado	Z-score
100%425C	1	3776,1	3967,7	3976,2	3119,5		2427,5	5,30%			1,314	1,534
	2	3780,5	3963,7	3968,3	3110,5	692	2418,5	4,97%	4,95%	0,26%	0,049	
	3	3787,9	3966,1	3972,9	3114		2422	4,88%			0,270	
	4	3813,2	3985,3	3991,2	3132,5		2440,5	4,67%			1,094	
0%425C	1	3750,8	3959,5	3959,7	3060		2368	5,57%			0,897	1,534
	2	3762,9	3767,1	3967,3	2924	692	2232	5,43%	5,19%	0,42%	0,569	
	3	3755,1	3928,8	3928,6	3040,5		2348,5	4,62%			1,364	
	4	3714,5	3905,8	3905,8	3037		2345	5,15%			0,102	
50%425C	1	3889,9	4039,3	4038,4	3176		2478	3,82%			1,318	1,534
	2	3809,2	3947,2	3946,4	3110	698	2412	3,60%	3,63%	0,14%	0,211	
	3	3863,9	4004,3	4004,2	3137		2439	3,63%			0,004	
	4	3901,3	4038,4	4036,9	3163		2465	3,48%			1,104	
50%500C	1	3763,1	3914,2	3910,7	3059		2361	3,92%			1,393	1,534
	2	3798,1	3935	3931,1	3029	698	2331	3,50%	3,48%	0,31%	0,055	
	3	3800,8	3927,1	3923,8	3030		2332	3,24%			0,789	
	4	3832,6	3960,9	3958,2	3050		2352	3,28%			0,659	
50%350C	1	3828,8	3939,8	3938,2	3067		2379	2,86%			1,316	1,534
	2	3915,2	4016,4	4015	3126	688	2438	2,55%	2,68%	0,13%	0,989	
	3	3975,4	4080,3	4079,3	3152		2464	2,61%			0,506	
	4	3829,6	3935,1	3933,2	3073		2385	2,71%			0,179	

Apêndice A14: Continuação dos resultados e testes de Chauvenet para absorção

Traço	CP	Massa seca (g)	Massa saturada superfície seca (g)	Massa fervida (g)	Massa do conjunto (g)	Massa cesto (g)	Massa submersa (g)	Absorção (%)	Absorção média (%)	Desv. Padrão (%)	Desvio parametrizado	Z-score
86%372C	1	3829,6	3960,4	3962,6	3090		2402	3,47%			1,415	
	2	3855,6	3975,6	3977,6	3102	693	2414	3,16%	3,20%	0,20%	0,159	1,534
	3	3953,4	4070,6	4072,5	3160		2472	3,01%			0,932	
	4	3905,1	4025,1	4027,4	3140		2452	3,13%			0,324	
86%478C	1	3884,22	4021,07	4029,31	3233,2		2545,2	3,74%			0,386	
	2	3860,37	4002,37	4010,45	3201	753,1	2513	3,89%	3,66%	0,21%	1,124	1,534
	3	3914,04	4046,65	4054,83	3245		2557	3,60%			0,283	
	4	3916,65	4043,04	4049,9	3248		2560	3,40%			1,227	
14%478C	1	3819,33	3952,29	3952,62	3135,5		2447,5	3,49%			0,919	
	2	3858,07	3994,35	3998,42	3188	751,5	2500	3,64%	3,56%	0,07%	1,065	1,383
	3	3792,46	3926,15	3927	3144		2456	3,55%			0,146	
14%372C	1	3828,67	3956,91	3956,15	3131,5		2443,5	3,33%			1,185	
	2	3763,38	3904,04	3904,12	3097	751,5	2409	3,74%	3,64%	0,26%	0,383	1,534
	3	3793,62	3942,01	3943,12	3130		2442	3,94%			1,152	
	4	3824,52	3955,54	3960,21	3140		2452	3,55%			0,350	

Apêndice A15: Resultados e testes de Chauvenet para capilaridade após 72 h

Traço	CP	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d _{méd} (mm)	Área (cm ²)	Massa seca (g)	Massa após 72h (g)	Capilaridade após 72h (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Desv. Padrão (g/cm ²)	Desvio parametrizado	Z-score
100%425C	1	100,2	99,7	99,95	7,8461	3757,6	3803,09	5,7978	5,6507	0,1030	1,4270	1,534
	2	100,6	100	100,3	7,9012	3769,6	3813,9	5,6068			0,4269	
	3	99,6	100,6	100,1	7,8697	3761,3	3805,06	5,5606			0,8752	
	4	100,2	98,6	99,4	7,7600	3720,7	3764,45	5,6379			0,1249	
0%425C	1	99,5	98,8	99,15	7,7210	3758	3812,81	7,0988	6,5917	0,3674	1,3801	1,534
	2	99,25	99,8	99,525	7,7795	3763,1	3814,58	6,6174			0,0699	
	3	98,8	99,45	99,125	7,7171	3772,6	3821,81	6,3767			0,5850	
	4	100,5	99,45	99,975	7,8501	3809,9	3859,15	6,2738			0,8650	
50%425C	1	100	99,75	99,875	7,8344	3890	3926,6	4,6717	4,2256	0,4651	0,9593	1,534
	2	98,25	101,3	99,775	7,8187	3912,7	3942,4	3,7986			0,9182	
	3	99	100,2	99,6	7,7913	3904,5	3934,5	3,8505			0,8066	
	4	101,2	99,4	100,3	7,9012	3957,4	3993,6	4,5816			0,7655	
50%500C	1	99,1	99,4	99,25	7,7366	3823,3	3854,4	4,0198	4,7464	0,9854	0,7374	1,534
	2	99,6	100,75	100,175	7,8815	3814,8	3863,4	6,1663			1,4410	
	3	101,35	98,25	99,8	7,8226	3838	3874,4	4,6532			0,0946	
	4	101,1	98,7	99,9	7,8383	3814,5	3847	4,1463			0,6090	
50%350C	1	101,3	101,2	101,25	8,0516	3755,31	3792,25	4,5879	4,4210	0,6101	0,2736	1,534
	2	100,6	99	99,8	7,8226	3865,77	3893,36	3,5270			1,4653	
	3	98,7	101,7	100,2	7,8854	3848,32	3885,16	4,6719			0,4112	
	4	100,5	99	99,75	7,8148	3903,81	3942,08	4,8971			0,7804	

Apêndice A16: Continuação dos resultados e testes de Chauvenet para capilaridade após 72 h

Traço	CP	d1 (mm)	d2 (mm)	dméd (mm)	Área (cm ²)	Massa seca (g)	Massa após 72h (g)	Capilaridade após 72h (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Desv. Padrão (g/cm ²)	Desvio parametrizado	Z-score
86%372C	1	98,8	100,85	99,825	7,8265	3906,66	3939,59	4,2075	4,3488	0,4342	0,3255	1,534
	2	99,4	100,75	100,075	7,8658	3900,26	3930,13	3,7975			1,2699	
	3	100,6	102	101,3	8,0595	3853,09	3890,7	4,6665			0,7317	
	4	99,3	100,4	99,85	7,8304	3918,67	3955,66	4,7239			0,8637	
86%478C	1	100,9	98,9	99,9	7,8383	3875,77	3897,71	2,7991	3,0662	0,3622	0,7375	1,383
	2	100,35	98,9	99,625	7,7952	3941,39	3964,16	2,9210			0,4008	
	3	100,6	98,3	99,45	7,7678	3882,68	3909,7	3,4785			1,1382	
14%478C	1	100,65	99,6	100,125	7,8736	3827,36	3866,83	5,0129	4,4588	0,8921	0,6211	1,383
	2	101	99,9	100,45	7,9248	3700,35	3727,53	3,4297			1,1536	
	3	99,4	99,85	99,625	7,7952	3799,54	3838	4,9338			0,5324	
14%372C	1	100,55	101,2	100,875	7,9920	3781,74	3828,7	5,8759	5,5237	0,7112	0,4951	1,534
	2	99	100,5	99,75	7,8148	3811,2	3851,28	5,1288			0,5554	
	3	101,15	99,5	100,325	7,9051	3702,2	3739,82	4,7589			1,0754	
	4	100,3	102,7	101,5	8,0914	3801,99	3853,22	6,3314			1,1357	

Apêndice A17: Análise de Variância (ANOVA) para absorção

	SQ	GL	QM	F	p
X2 (Consumo de cimento)	0,00000361	1	3,61E-06	0,495199	0,60962
X1 (Porcentagem de substituição de agregado natural)	0,00000289	1	2,89E-06	0,396433	0,64227
Erro	7,29E-06	1	7,29E-06		
Total	0,00001379	3			

Apêndice A18: Análise de Variância (ANOVA) para capilaridade

	SQ	GL	QM	F	<i>p</i>
X2 (Consumo de cimento)	1,378276	1	1,378276	116,0067	0,058938
X1 (Porcentagem de substituição de agregado natural)	1,648656	1	1,648656	138,7641	0,053914
Erro	0,011881	1	0,011881		
Total	3,038813	3			