

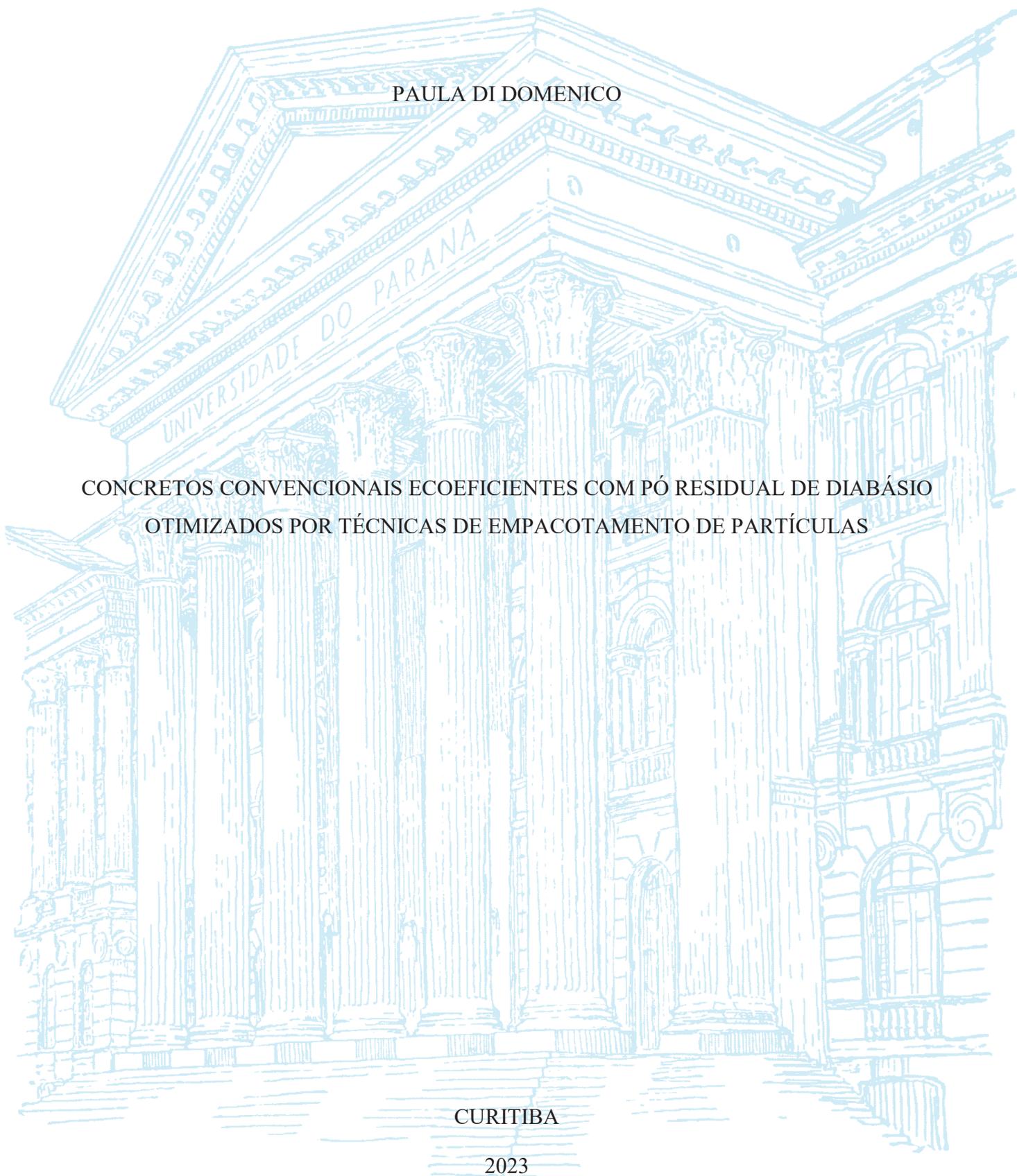
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAULA DI DOMENICO

CONCRETOS CONVENCIONAIS ECOEFICIENTES COM PÓ RESIDUAL DE DIABÁSIO  
OTIMIZADOS POR TÉCNICAS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

CURITIBA

2023



PAULA DI DOMENICO

CONCRETOS CONVENCIONAIS ECOEFICIENTES COM PÓ RESIDUAL DE DIABÁSIO  
OTIMIZADOS POR TÉCNICAS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Dra. Heloisa Fuganti Campos

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Di Domenico, Paula

Concretos convencionais ecoeficientes com pó residual de diabásio otimizados por técnicas de empacotamento de partículas / Paula Di Domenico. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Heloisa Fuganti Campos

1. Concreto – Mistura. 2. Concreto – Testes. 3. Pó de pedra. 4. Partículas - Empacotamento. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Campos, Heloisa Fuganti. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **PAULA DI DOMENICO** intitulada: **Concretos convencionais ecoeficientes com pó residual de diabásio otimizados por técnicas de empacotamento de partículas**, sob orientação da Profa. Dra. HELOISA FUGANTI CAMPOS, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 15 de Agosto de 2023.

Assinatura Eletrônica

15/08/2023 11:54:09.0

HELOISA FUGANTI CAMPOS

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

17/08/2023 09:49:22.0

NAYARA SOARES KLEIN

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

15/08/2023 12:58:32.0

EDNA POSSAN

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO AMERICANA)

## AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, a Deus e minha família.

Agradeço imensamente à minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Heloisa Fuganti Campos pelos ensinamentos e considerações durante todo o desenvolvimento da pesquisa. Sua dedicação e sua habilidade para lidar com o campo científico é realmente admirável.

Às empresas Companhia de Cimentos Itambé, Votorantim Cimentos, Concrebrás e GCP *Applied Technologies* que prontamente forneceram os materiais necessários para a realização do programa experimental.

À empresa Votorantim Cimentos que gentilmente ofereceu a realização dos ensaios de distribuição granulométrica dos materiais finos utilizados na pesquisa.

À empresa Engemix que atenciosamente realizou a retificação de todos os corpos de prova produzidos nesta pesquisa.

À empresa Hobimix e ao DAHER/IDD que prontamente atenderam às necessidades de realização dos ensaios de propagação de onda ultrassônica e de resistência à tração dos corpos de prova.

A todos os técnicos de laboratório que auxiliaram na execução dos ensaios, em especial aos técnicos presentes no LAME/DCC – Laboratório de Materiais e Estruturas do Departamento de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, que sempre estiveram aptos e dispostos a me atender.

Aos colegas de profissão Daniel e Thiago que não mediram esforços em me ajudar na execução das dosagens dos concretos.

Aos professores deste programa, que ministraram suas disciplinas de forma motivadora e com extrema qualidade, me incentivando a continuar pesquisando.

A todos os professores que tive o prazer de conhecer ao longo da minha vida acadêmica, honro e agradeço por todos aqueles que antecederam a minha chegada até este momento.

Aos amigos que fiz ao longo dessa caminhada, que me ajudaram e motivaram a chegar até aqui. Vocês são incríveis.

## RESUMO

A indústria do cimento é responsável por cerca de 8% da emissão total de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Além disso, o setor da construção civil produz e descarta resíduos diariamente, entre eles o pó de pedra, resíduo da britagem de matéria prima para produção de agregado artificial. A utilização de técnicas de empacotamento de partículas, buscando a diminuição do consumo de cimento e a substituição parcial pelo pó de pedra, permite a produção de concreto ecoeficiente. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é a comparação entre o Modelo de Alfred e o Modelo de Empacotamento Compressível (CPM, do inglês, *Compressible Packing Model*) utilizados para dosagem de concreto convencional por técnicas de empacotamento de partículas, buscando ecoeficiência e a utilização do pó de pedra. Foram produzidos traços de concreto com a relação água/finos entre 0,45 e 0,60 com a composição dos materiais definida pelos dois modelos de empacotamento de partículas (modelo de Alfred e modelo CPM). As propriedades dos concretos foram avaliadas no estado fresco e no estado endurecido, com os ensaios de massa específica, *slump test*, resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, e com ensaios de resistividade elétrica e propagação de onda ultrassônica para avaliações iniciais de durabilidade. Também foram avaliados os parâmetros de sustentabilidade dos concretos pelos índices de intensidade de ligante, intensidade de CO<sub>2</sub> e custos relativos para obtenção de uma unidade de resistência mecânica. Para validação da utilização do pó de diabásio como substituto parcial do cimento Portland na pesquisa, concretos foram dosados e analisados previamente. Como resultado, o pó de diabásio se mostrou viável para ser utilizado como substituição parcial do cimento no teor de 20%. Os resultados iniciais do estudo dos materiais finos apontaram a densidade de empacotamento experimental do cimento de 0,641 e do pó de pedra de 0,629 pelo método úmido de Wong e Kwan. Para aplicação do método de dosagem pelo modelo CPM, o teor de pasta de 26% foi definido como o teor ideal por ter apresentado os melhores índices de ecoeficiência. Os concretos dosados a partir de ambos os modelos de empacotamento apresentaram valores similares de massa específica no estado fresco. Para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias, o maior resultado de 40,86 MPa ocorreu para o concreto dosado pelo modelo CPM na menor relação água/finos analisada. Nas demais relações água/finos os concretos dosados a partir do modelo de Alfred apresentaram melhores resultados de resistência à compressão. Os resultados de módulo de elasticidade e resistência à tração aos 28 dias apontaram que o modelo de Alfred obteve melhores valores nas relações água/finos mais altas, enquanto que o modelo CPM nas relações mais baixas. Os resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica apontaram classificação excelente para todos os concretos analisados, com valores superiores a 4500 m/s. Como principal resultado, os concretos dosados com a composição dos materiais pelo modelo de Alfred apresentaram os melhores índices de ecoeficiência, obtendo o valor mínimo de 6,37 kg/m<sup>3</sup>/MPa para a intensidade de ligante e de 5,75 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa para a intensidade de CO<sub>2</sub>. Também os concretos dosados a partir do modelo de Alfred apresentaram menores custos relativos em todas as relações água/finos analisadas. Por fim, como conclusão geral, a utilização de ambos os modelos de empacotamento permitiu a dosagem de concretos ecoeficientes.

Palavras-chave: Empacotamento de partículas. Modelo de Alfred. Modelo CPM. Pó de pedra. Concreto ecoeficiente.

## ABSTRACT

The cement industry is responsible for about 8% of the total CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere. In addition, the civil construction sector produces and discards waste daily, including stone powder, which is a waste from crushing raw material for the production of artificial sand. The use of the particle packing method, with a reduction in cement consumption and partial replacement by stone powder, allows meeting the needs of urban development with the production of eco-efficient concrete. In this context, the objective of the present work is to compare the Alfred Model and the Compressive Packing Model (CPM) used for conventional concrete mix design by particle packing techniques, seeking eco-efficiency and the use of stone powder. Concrete mixes were produced with a water/fine ratio between 0.45 and 0.60, with the composition of the materials defined by the two particle packing models (Alfred model and CPM model). The properties of the concrete were evaluated in the fresh and hardened state, with tests of specific mass, slump test, compressive strength, tensile strength, elastic modulus and with tests of electrical resistivity and ultrasonic test for the initial durability evaluations. Concrete sustainability parameters were also evaluated by the indices of binder intensity, CO<sub>2</sub> intensity and relative costs for obtaining a unit of mechanical strength. To validate the use of diabase powder as a stone powder partial substitute for Portland cement in the research, concretes were dosed and previously analyzed. As a result, diabase powder proved to be viable to be used as a partial replacement of cement at a 20% content. The initial results of the study of fine materials indicated the experimental packing density of 0.641 for cement and 0.629 for stone powder by Wong and Kwan's wet method. For application of the dosage method by the CPM model, the paste content of 26% was defined as the ideal content for having presented the best eco-efficiency indices. The concretes dosed from both packing models showed similar values of specific mass in the fresh state. For the compressive strength results at 28 days, the highest result of 40.86 MPa occurred for concrete dosed by the CPM model at the lowest water/fines ratio analyzed. In the other water/fines ratios, the concrete dosed from the Alfred model showed better compressive strength results. The results of elastic modulus and tensile strength at 28 days showed that the Alfred model obtained better values in the highest water/fines ratios, while the CPM model in the lowest ratios. The ultrasonic wave propagation velocity results indicated an excellent classification for all analyzed concretes, with values greater than 4500 m/s. As a main results, the concrete dosed with the composition of materials according to the Alfred model showed the best eco-efficiency indices, obtaining a minimum value of 6.37 kg/m<sup>3</sup>/MPa for binder intensity and 5.75 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa for CO<sub>2</sub> intensity. The concretes dosed from Alfred's model also presented lower relative costs in all the analyzed water/fines ratios. Finally, as a general conclusion, the use of both packing models allowed the dosage of eco-efficient concrete.

Keywords: Particle packing. Alfred model. CPM model. Cement replacement. Eco-efficient concrete.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DÉFICIT HABITACIONAL DAS CINCO REGIÕES BRASILEIRAS COMO FRAÇÃO DO TOTAL .....	27
FIGURA 2 - POPULAÇÃO BRASILEIRA TOTAL CONFORME ESTIMATIVAS DA ONU E DO IBGE .....	28
FIGURA 3 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA PESQUISA .....	30
FIGURA 4 - DIABÁSIO NA MINERAÇÃO DE CALCÁRIO .....	40
FIGURA 5 - TEORIA DA ÁGUA ENVOLTA NA SUPERFÍCIE DE CADA PARTÍCULA (A) E TEORIA DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EM QUE A ÁGUA PREENCHE OS VAZIOS RESTANTES E ENVOLVE AS PARTÍCULAS (B).....	45
FIGURA 6 - DIFERENTES PROPORÇÕES DE PARTÍCULAS NA MISTURA.....	46
FIGURA 7 - CURVAS TÍPICAS DA RELAÇÃO DE VAZIOS E DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS DE UMA MISTURA .....	51
FIGURA 8 - POSICIONAMENTO DAS PARTÍCULAS UMA A UMA (A) E ARRANJO ALEATÓRIO (B) .....	55
FIGURA 9 - INTERAÇÕES EXISTENTES ENTRE AS PARTÍCULAS NA MISTURA .....	56
FIGURA 10 – MÉTODO DE WENNER DOS QUATRO ELETRODOS .....	59
FIGURA 11 - TIPOS DE TRANSMISSÃO DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA .....	60
FIGURA 12 – EXEMPLO DE CURVA IDEAL E COMBINAÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	62
FIGURA 13 - GRÁFICO PARA DEFINIÇÃO DA RELAÇÃO A/C DE ACORDO COM AS CURVAS DE RESISTÊNCIA DO CIMENTO E DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO AOS 28 DIAS .....	62
FIGURA 14 - MÉTODO DE DOSAGEM CÍCLICO PARA CONCRETO ECOEFICIENTE.....	65
FIGURA 15 - ESQUEMA DO MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO.....	66
FIGURA 16 - PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DA PESQUISA .....	71
FIGURA 17 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS E DAS ZONAS RECOMENDADAS PELA NBR 7211 (ABNT, 2009) PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO .....	73
FIGURA 18 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS MATERIAIS FINOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO .....	74
FIGURA 19 - IMAGENS DO PÓ DE CALCÁRIO E DO PÓ DE DIABÁSIO.....	75

FIGURA 20 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS E DAS ZONAS RECOMENDADAS PELA NBR 7211 (ABNT, 2009) .....	77
FIGURA 21 – IMAGENS DO MEV DO PÓ DE PEDRA .....	80
FIGURA 22 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DO CIMENTO E DO PÓ DE PEDRA.....	81
FIGURA 23 - CURVA IDEAL E CURVAS DOS TRAÇOS OBTIDAS PELO MODELO DE ALFRED PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO.....	83
FIGURA 24 - PRODUÇÃO DOS CONCRETOS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO .....	84
FIGURA 25 - ENSAIO DO MINI CONE DE KANTRO.....	86
FIGURA 26 - MISTURAS PELO MÉTODO EXPERIMENTAL COM DIFERENTES RELAÇÕES ÁGUA/FINOS .....	87
FIGURA 27 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS, CURVA IDEAL E CURVA DE COMBINAÇÃO DOS MATERIAIS PELO MODELO DE ALFRED.....	89
FIGURA 28 - CONCRETOS SEM CONSISTÊNCIA SUFICIENTE PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE.....	96
FIGURA 29 – PRODUÇÃO DOS CONCRETOS.....	97
FIGURA 30 - CURA E RETIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	97
FIGURA 31 - CORPOS DE PROVA DOS CONCRETOS DOSADOS A PARTIR DO MODELO DE ALFRED.....	98
FIGURA 32 - CORPOS DE PROVA DOS CONCRETOS DOSADOS A PARTIR DO MODELO CPM.....	98
FIGURA 33 - MASSA ESPECÍFICA DOS CONCRETOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO, NO ESTADO FRESCO.....	101
FIGURA 34 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO, AOS 28 DIAS.....	102
FIGURA 35 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO DOS CONCRETOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO, AOS 28 DIAS .....	103
FIGURA 36 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CONCRETOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO .....	104
FIGURA 37 - INTENSIDADE DE LIGANTE DOS CONCRETOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO .....	105
FIGURA 38 - INTENSIDADE DE CO <sub>2</sub> DOS CONCRETOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO .....	106

FIGURA 39 - COMPATIBILIDADE DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE COM O CIMENTO PELO CONE DE KANTRO (KANTRO, 1980) .....	107
FIGURA 40 - COMPORTAMENTO DA PASTA DE CIMENTO COM DIFERENTES TEORES DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	107
FIGURA 41 - COMPATIBILIDADE DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE COM O PÓ DE PEDRA PELO CONE DE KANTRO (KANTRO, 1980) .....	108
FIGURA 42 - CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E RELAÇÃO DE VAZIOS DO CIMENTO.....	109
FIGURA 43 - CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E RELAÇÃO DE VAZIOS DO PÓ DE PEDRA.....	110
FIGURA 44 - MASSA ESPECÍFICA DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA.....	112
FIGURA 45 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA .....	113
FIGURA 46 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA.....	114
FIGURA 47 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA.....	115
FIGURA 48 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA.....	115
FIGURA 49 - VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA .....	116
FIGURA 50 - INTENSIDADE DE LIGANTE DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA.....	117
FIGURA 51 - INTENSIDADE DE CO <sub>2</sub> DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA.....	118
FIGURA 52 - CUSTOS PARA PRODUÇÃO DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA.....	118
FIGURA 53 - CUSTOS RELATIVOS DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA.....	119
FIGURA 54 - MASSA ESPECÍFICA DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS .....	120
FIGURA 55 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, AOS 7 DIAS .....	122

FIGURA 56 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, AOS 28 DIAS .....	123
FIGURA 57 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	125
FIGURA 58 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, AOS 7 DIAS .....	127
FIGURA 59 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, AOS 28 DIAS .....	128
FIGURA 60 - CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS PELO MODELO DE ALFRED .....	130
FIGURA 61 - CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS PELO MODELO CPM .....	130
FIGURA 62 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULA, AOS 7 DIAS.....	131
FIGURA 63 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULA, AOS 28 DIAS.....	132
FIGURA 64 - PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULA, AOS 7 DIAS.....	134
FIGURA 65 - PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, AOS 28 DIAS.....	135
FIGURA 66 - INTENSIDADE DE LIGANTE DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS .....	137
FIGURA 67 - INTENSIDADE DE CO <sub>2</sub> DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS .....	138
FIGURA 68 - CUSTOS DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS .....	139
FIGURA 69 - CUSTOS RELATIVOS DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS .....	140
FIGURA 70 - IMAGEM DE ELÉTRONS DO PÓ DE PEDRA.....	159
FIGURA 71 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 1 .....	159
FIGURA 72 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 2 .....	160
FIGURA 73 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 3 .....	160
FIGURA 74 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 4 .....	161

FIGURA 75 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 5 .....	161
FIGURA 76 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 6 .....	162
FIGURA 77 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 7 .....	162
FIGURA 78 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 9 .....	163
FIGURA 79 - IMAGEM EM CAMADA 1 EDS PÓ DE PEDRA.....	163
FIGURA 80 IMAGEM EM CAMADA 2 EDS PÓ DE PEDRA .....	164

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - FATORES DE EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> CONFORME O TIPO DE MATERIAL UTILIZADO PARA PRODUZIR CONCRETO.....	32
TABELA 2 - NORMAS BRASILEIRAS PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DOS AGREGADOS.....	47
TABELA 3 - MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DE FINOS.....	48
TABELA 4 - VALORES DO FATOR DE COMPACTAÇÃO K.....	57
TABELA 5 - QUALIDADE DO CONCRETO DE ACORDO COM A VELOCIDADE DA ONDA ULTRASSÔNICA.....	60
TABELA 6 - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS UTILIZADOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO.....	72
TABELA 7 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS FINOS UTILIZADOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO.....	74
TABELA 8 - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	76
TABELA 9 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DO CIMENTO.....	78
TABELA 10 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO PÓ DE PEDRA.....	79
TABELA 11 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO ADITIVO.....	81
TABELA 12 - TRAÇOS DEFINIDOS PELO MODELO DE ALFRED PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO.....	83
TABELA 13 - ENSAIOS DA MATRIZ EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO.....	85
TABELA 14 - FATORES DE EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> DOS MATERIAIS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO.....	85
TABELA 15 - PROPORÇÕES DOS MATERIAIS CALCULADAS PELO MODELO DE ALFRED COM A UTILIZAÇÃO DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PHYTON.....	90
TABELA 16 - TRAÇOS DEFINIDOS PELO MODELO DE ALFRED.....	91
TABELA 17 - DADOS DE ENTRADA DOS MATERIAIS FINOS PARA O MODELO CPM.....	92
TABELA 18 - PROPORÇÕES DOS MATERIAIS FINOS CALCULADAS PELO MODELO CPM.....	92
TABELA 19 - DADOS DE ENTRADA DOS AGREGADOS PARA O MODELO CPM.....	93
TABELA 20 - PROPORÇÕES DOS AGREGADOS CALCULADAS PELO MODELO CPM.....	93
TABELA 21 - VARIAÇÕES DO VOLUME DE PASTA PARA O MODELO CPM.....	94

TABELA 22 - TRAÇOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA PELO CPM.....	94
TABELA 23 - TRAÇOS DEFINIDOS PELO MODELO CPM.....	95
TABELA 24 – MATRIZ EXPERIMENTAL DO ESTUDO DOS CONCRETOS .....	99
TABELA 25 - FATORES DE EMISSÃO DE CO2 E CUSTOS DOS MATERIAIS DOS CONCRETOS ECOEFICIENTES .....	100
TABELA 26 - DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DO CIMENTO.....	108
TABELA 27 - DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DO PÓ DE PEDRA.....	110
TABELA 28 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO TEÓRICO E EXPERIMENTAL, AOS 28 DIAS.....	129
TABELA 29 - ANOVA DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO .....	165
TABELA 30 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO .....	165
TABELA 31 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO.....	165
TABELA 32 - ANOVA DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO.....	166
TABELA 33 - ANOVA DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA.....	166
TABELA 34 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA .....	166
TABELA 35 - ANOVA DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA.....	166
TABELA 36 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA .....	167
TABELA 37 - ANOVA DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA .....	167
TABELA 38 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA .....	167
TABELA 39 - ANOVA DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM .....	167
TABELA 40 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA AOS 7 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM .....	168

TABELA 41 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA AOS 28 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM .....	168
TABELA 42 - ANOVA DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA AOS 7 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM .....	168
TABELA 43 - ANOVA DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA AOS 28 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM .....	169
TABELA 44 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM .....	169
TABELA 45 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM .....	169
TABELA 46 - ANOVA DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE AOS 28 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM .....	170
TABELA 47 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO AOS 7 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM .....	170
TABELA 48 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO AOS 28 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM .....	170

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

°C – Graus Celsius

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – *American Concrete Institute*

ANOVA – Análise de Variância

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

a/c – Relação água/cimento

a/finos – Relação água/materiais finos

CIPM – *Compaction-interaction Packing Model*

CPE – Centro de Microscopia Eletrônica

CPM – *Compressible Packing Model*

CSF – *Cement Spacing Factor*

CP V ARI – Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial

D50 – Diâmetro pelo qual passam 50% das partículas

EDS – Espectroscopia por Dispersão de Elétrons

GPa – Gigapascal

kΩ.cm – kilohm centímetro

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LAME – Laboratório de Materiais e Estruturas

LCT – Laboratório de Caracterização Tecnológica

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MPa – Megapascal

NBR – Norma Brasileira

PR - Paraná

ONU – Organização das Nações Unidas

UFPR – Universidade Federal do Paraná

USP – Universidade de São Paulo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA .....	22
1.2 OBJETIVO .....	29
1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO .....	29
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	30
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>31</b>
2.1 CONCRETOS ECOEFICIENTES .....	31
2.2 AGREGADO MIÚDO DE BRITAGEM .....	38
2.2.1 Areia artificial.....	38
2.2.2 Pó de pedra.....	39
2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS .....	44
2.3.1 Métodos experimentais .....	47
2.3.2 Modelos de empacotamento de partículas .....	52
2.3.2.1 Modelo de Alfred.....	53
2.3.2.2 Modelo CPM (Modelo de Empacotamento Compressível).....	54
2.3.3 Durabilidade do concreto .....	57
2.4 DOSAGEM OTIMIZADA POR TÉCNICAS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS ...	61
<b>3 MATERIAIS E MÉTODO.....</b>	<b>71</b>
3.1 MATERIAIS.....	72
3.1.1 Avaliação do potencial de utilização do pó de diabásio .....	72
3.1.1.1 Agregados .....	72
3.1.1.2 Materiais Finos .....	73
3.1.1.3 Aditivo superplastificante.....	75
3.1.2 Concreto ecoeficiente.....	75

3.1.2.1	Agregados .....	76
3.1.2.2	Materiais Finos .....	77
3.1.2.3	Aditivo superplastificante .....	81
3.2	MÉTODO .....	82
3.2.1	Avaliação do potencial de utilização do pó de diabásio .....	82
3.2.2	Materiais finos .....	86
3.2.3	Dosagem dos concretos.....	88
3.2.3.1	Dosagem com a composição dos materiais definida pelo modelo de Alfred .....	88
3.2.3.2	Dosagem com a composição dos materiais definida pelo modelo CPM.....	91
3.2.3.3	Produção e caracterização dos concretos ecoeficientes.....	95
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>101</b>
4.1	CONCRETOS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO .....	101
4.1.1	Ensaio no estado fresco dos concretos para avaliação do potencial do pó de diabásio .....	101
4.1.2	Ensaio no estado endurecido dos concretos para avaliação do potencial do pó de diabásio ...	102
4.1.2.1	Resistência à compressão .....	102
4.1.2.2	Módulo de elasticidade .....	103
4.1.3	Ensaio de durabilidade dos concretos para avaliação do potencial do pó de diabásio .....	103
4.1.4	Parâmetros de sustentabilidade dos concretos para avaliação do potencial do pó de diabásio .	104
4.1.4.1	Intensidade de ligante .....	104
4.1.4.2	Intensidade de CO <sub>2</sub> .....	105
4.2	MATERIAIS FINOS .....	106
4.2.1	Ponto de saturação do aditivo superplastificante .....	106
4.2.2	Densidade de empacotamento experimental.....	108
4.3	CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA PELO CPM.....	111
4.3.1	Ensaio no estado fresco dos concretos para definição do teor de pasta pelo CPM .....	111

4.3.2	Ensaio no estado endurecido dos concretos para definição do teor de pasta pelo CPM.....	112
4.3.2.1	Resistência à compressão .....	112
4.3.2.2	Módulo de elasticidade .....	113
4.3.2.3	Resistência à tração.....	114
4.3.3	Ensaio de durabilidade dos concretos para definição do teor de pasta pelo CPM .....	115
4.3.3.1	Resistividade elétrica .....	115
4.3.3.2	Propagação de onda ultrassônica .....	116
4.3.4	Parâmetros de sustentabilidade dos concretos para definição do teor de pasta pelo CPM.....	117
4.3.4.1	Intensidade de ligante .....	117
4.3.4.2	Intensidade de CO <sub>2</sub> .....	118
4.3.4.3	Custos.....	118
4.4	CONCRETOS DOSADOS COM COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS PELOS MODELOS DE ALFRED E CPM .....	120
4.4.1	Ensaio no estado fresco dos concretos pelos modelos de Alfred e CPM .....	120
4.4.2	Ensaio no estado endurecido dos concretos pelos modelos de Alfred e CPM.....	122
4.4.2.1	Resistência à compressão .....	122
4.4.2.2	Módulo de elasticidade .....	125
4.4.2.3	Resistência à tração.....	127
4.4.3	Ensaio de durabilidade dos concretos pelos modelos de Alfred e CPM.....	131
4.4.3.1	Resistividade elétrica .....	131
4.4.3.2	Propagação de onda ultrassônica .....	133
4.4.4	Parâmetros de sustentabilidade dos concretos pelos modelos de Alfred e CPM.....	136
4.4.4.1	Intensidade de ligante .....	136
4.4.4.2	Intensidade de CO <sub>2</sub> .....	138
4.4.4.3	Custos	139
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>142</b>

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>147</b>
<b>ANEXO A – EDS DO PÓ DE PEDRA.....</b>	<b>159</b>
<b>ANEXO B – ANOVAS.....</b>	<b>165</b>
<b>APÊNDICE A – ROTEIRO DE CÁLCULO: EMPACOTAMENTO EXPERIMENTAL DOS MATERIAIS FINOS INDIVIDUAIS PELO MÉTODO DE WONG E KWAN (2008) .....</b>	<b>171</b>
<b>APÊNDICE B – ROTEIRO DE CÁLCULO: MODELO CPM.....</b>	<b>174</b>
<b>APÊNDICE C – ROTEIRO DE CÁLCULO: MODELO DE ALFRED.....</b>	<b>178</b>
<b>APÊNDICE D – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NOS CONCRETOS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO.....</b>	<b>182</b>
<b>APÊNDICE E – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA PELO MODELO CPM .....</b>	<b>184</b>
<b>APÊNDICE F – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NOS CONCRETOS COM A COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS PELOS MODELOS DE ALFRED E CPM.....</b>	<b>186</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O cimento é um dos principais materiais utilizados na indústria da construção civil sendo amplamente produzido. Sua produção, porém, causa um enorme impacto ambiental devido à grande quantidade de CO<sub>2</sub> (gás carbônico) que é emitida na atmosfera (LARUCCIA, 2014; MOHAMAD, N. et al., 2022). Por esse motivo, materiais cimentícios suplementares estão sendo utilizados como substitutos parciais do cimento na produção de concreto na tentativa de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> causados pela indústria do cimento (YOUSUF, SANCHEZ e SHAMMEH, 2019). O pó de pedra, por exemplo, é um resíduo do processo de britagem dos agregados artificiais que, assim como outros rejeitos industriais, pode ser utilizado como substituto parcial do cimento e, dependendo do teor utilizado, pode beneficiar o ganho de resistência mecânica do concreto (MENOSSI et al., 2010). O concreto que é produzido com redução do consumo de cimento e, conseqüentemente, com redução das emissões de CO<sub>2</sub> é considerado ecoeficiente (FENNIS, 2011).

Diversas pesquisas têm usado o pó de pedra para substituir parcialmente o cimento Portland na dosagem de concreto (POLUCHA, 2016; CAMPOS, 2019; YANG et al., 2020; ZHENG et al., 2020; CAMPOS et al., 2021; DING et al., 2021; KUMAR, 2021). Dentre os diferentes tipos de pós de pedra, o de origem calcária é geralmente o mais utilizado (DI DOMENICO et al., 2022). A utilização do pó de calcário é amplamente difundida por proporcionar um concreto com microestrutura mais densa e homogênea, resultando em benefícios na reologia e no ganho de resistência à compressão (MATOS et al., 2020). O pó de diabásio, entretanto, ainda é pouco difundido na utilização da produção de concreto. Isso porque sua rocha de origem, por ser mais dura quando comparado à rocha calcária, dificulta o processo de britagem para a produção de agregados artificiais, resultando em uma menor quantidade de pó de diabásio para comercialização. Apesar disso, investimentos em melhoria na mineração e processamento têm sido realizados pelo setor regional por observarem o potencial de utilização do material na dosagem de concretos (FORNECEDOR, 2023).

Além do uso de materiais cimentícios suplementares para substituição parcial do cimento, técnicas de empacotamento de partículas propõem uma redução do consumo do cimento, já que suas aplicações consistem em maximizar a densidade da mistura, melhorando o esqueleto granular do concreto (LONDERO, 2016). O empacotamento de partículas é uma técnica em que, ao utilizar frações de partículas de diferentes tamanhos, as partículas menores preenchem os vazios deixados pelas partículas maiores, acarretando em um aumento da densidade do material com a diminuição significativa do volume de vazios (VANDERLEI, 2004; DAMINELI, PILEGGI e JOHN, 2017).

Além do aumento da densidade, a distribuição de tamanhos das partículas no concreto causa influência nas propriedades no estado endurecido, como porosidade e resistência à compressão, e no estado fresco, como moldagem, taxa de secagem e viscosidade plástica (FUNK e DINGER, 1993).

Os finos, mesmo que inertes, podem influenciar positivamente as propriedades do concreto. Fisicamente, os finos conseguem preencher os espaços vazios deixados pelas partículas de maior tamanho, aumentando a densidade da mistura e por esse motivo reduzindo a demanda de água necessária para preencher o vazio restante. Além disso, os finos possuem influência na formação e orientação dos cristais de hidratação do cimento, uma vez que atuam como locais de nucleação onde o gel do cimento pode se assentar e criar uma melhor ligação com os agregados. Dessa forma, a matriz de cimento ganha um aumento de resistência, principalmente na zona de transição dos agregados (FENNIS, 2011). Segundo a mesma autora, a quantidade ideal de finos substituindo o cimento pode ser testada avaliando a densidade de empacotamento e a demanda de água necessária para envolver as partículas da mistura. Assim, a redução do consumo de cimento, por meio da otimização da composição do concreto por técnicas de empacotamento de partículas e da utilização de adições compostas por partículas de diferentes diâmetros, pode manter ou melhorar o desempenho das propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido (FENNIS, 2011).

Kwan e Li (2014) explicam que com os agregados empacotados de maneira mais densa possível, o volume necessário de pasta para preencher os vazios será conseqüentemente diminuído. Da mesma forma, se os materiais cimentícios tiverem uma maior densidade de empacotamento, o consumo de água para preencher os vazios será menor, acarretando em uma menor relação água/materiais cimentícios e em maiores resultados de resistência mecânica e durabilidade. Em contrapartida, a maior densidade de empacotamento dos agregados, mantendo um volume de pasta fixo, resultaria em excesso de pasta para envolvê-los. E, para uma relação água/materiais cimentícios constante, considerando uma maior densidade de empacotamento dos materiais cimentícios, resultaria em excesso de água para envolver as partículas da mistura. O excesso de pasta e o excesso de água aumentam a trabalhabilidade do concreto. Nessa lógica, o empacotamento de partículas interfere no desempenho das propriedades tanto no estado fresco como no estado endurecido.

A literatura apresenta diversos modelos para otimização da proporção dos materiais por técnicas de empacotamento de partículas que podem ser classificados em três grupos principais: (I) distribuição granulométrica ótima, (II) modelos analíticos e (III) modelos de elementos discretos. O grupo III é relacionado aos modelos computacionais que são ainda pouco utilizados. No grupo I encontra-se o conhecido modelo de Alfred e no grupo II um dos modelos mais utilizados é o chamado Modelo de Empacotamento Compressível (CPM, do inglês, *Compressible Packing Model*).

Os modelos de cada grupo apresentam características diversas para execução do cálculo da densidade de empacotamento de partículas (CAMPOS, 2019). Os modelos de Alfred e CPM possuem características diferentes e, por isso, suas aplicações podem ser investigadas por meio de comparações que verifiquem suas influências no concreto fresco e endurecido.

Muitos estudos de dosagem com utilização do empacotamento de partículas visam concretos de resistências à compressão elevadas. Entretanto, o concreto convencional ainda segue sendo o mais utilizado. Um levantamento realizado com concreteiras brasileiras apontou que concretos de resistências entre 25 MPa e 30 MPa são os mais comercializados (ABCP, 2013). Já um estudo realizado em âmbito mundial indicou que 64% dos concretos produzidos estão na faixa de 25 MPa a 37 MPa, enquanto que resistências superiores a 45 MPa representam 14% do total (ERMCO, 2020). Dessa forma, a proposta deste trabalho é dosar concreto de resistência convencional para que a técnica de empacotamento de partículas seja colocada em prática nas obras do dia a dia, buscando um material ecoeficiente e que permita avaliar os benefícios e dificuldades de cada modelo.

## 1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

A construção civil é um dos setores da economia que mais contribuem para a ocorrência de impactos negativos ao meio ambiente. O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2022) destaca que entre os anos de 1990 e 2019 as emissões globais dos gases causadores de efeito estufa pelo setor da construção aumentaram em 50%. Somente no ano de 2019, o setor foi responsável por emitir diretamente 5,6% das emissões totais globais de gases do efeito estufa. Se consideradas as emissões diretas e indiretas do uso de energia, o setor atingiu o valor de 9,7 GtCO<sub>2</sub>e/ano, ou 16% do total das emissões globais.

O cimento é o material feito pelo homem mais utilizado no planeta e sua produção contribui para a emissão de gases tidos como causadores do efeito estufa. Somente a indústria do cimento é responsável por cerca de 8% de toda a emissão de gás carbônico na atmosfera (IPCC, 2022). No contexto brasileiro, especificamente a indústria cimentícia no ano de 2020 emitiu em média 565 kg CO<sub>2</sub>/t cimento, tendo produzido um total de 60,7 milhões de toneladas de cimento no mesmo ano, o que resultou em aproximadamente 34,3 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> (SNIC, 2015; SNIC, 2021). Sua aplicação é diversa e são vários os produtos gerados, dentre eles o concreto.

O concreto é um material básico para a construção civil que atende características como resistência mecânica, durabilidade, versatilidade, resistência contra o fogo e baixo custo, sendo que seu uso continuará sendo promissor (IMBABI, CARRIGAN e MCKENNA, 2012). É considerado o

material da construção civil de maior importância por ser de fácil produção, apresentar resistência mecânica similar às rochas naturais e apresentar um bom custo benefício (LOPES, 2019). Sua utilização continuará sendo necessária ao longo dos próximos anos (IMBABI, CARRIGAN e MCKENNA, 2012). Somente no Brasil, a expectativa é de que o consumo de cimento cresça até o ano de 2050 entre 60% e 120% dependendo de baixa ou alta demanda, conforme o crescimento populacional e avanço econômico (SNIC, 2019). Por isso, o aumento de adições na produção de concreto e a redução da quantidade de clínquer são alternativas a serem consideradas pela indústria cimentícia, tendo em vista a redução das emissões de CO<sub>2</sub> que essas ações podem ocasionar (SNIC, 2019). Aliado ao combate às emissões de CO<sub>2</sub>, a substituição de cimento por subprodutos que originalmente seriam descartados torna-se uma maneira de produzir concretos mais sustentáveis.

Paralelamente às emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, em razão da indústria do cimento, a construção civil causa outros danos ao meio ambiente, dentre eles o consumo diário de recursos naturais não renováveis. Segundo Ferreira (2017) os agregados naturais representam uma parcela significativa da composição de concretos e argamassas, sendo necessárias atividades de extração e produção desse material, tornando sua utilização responsável por um enorme impacto ambiental. A areia natural, um dos principais constituintes do concreto, é extraída de rios, praias, cavas, restingas e depósitos arenosos (RAMADON, 2018). Campos (2019) destaca que a areia natural foi excessivamente explorada em algumas regiões, ocasionando riscos às margens de rios e a segurança de pontes. De acordo com Ferreira e Fonseca Junior (2012) 90% da areia brasileira é proveniente do leito dos rios. O maior problema, porém, está em sua extração ilegal, sendo considerado o terceiro maior crime no mundo, com um faturamento anual estimado entre US\$ 181,96 bilhões e US\$ 215,14 bilhões, ficando atrás apenas da pirataria e do tráfico de drogas. Sua extração ilegal é responsável por alterações dos cursos hídricos, degradação de praias, rios e lagoas, descaracterização do relevo com erosão do solo, destruição de áreas de preservação permanente, aumento de assoreamento, destruição da fauna e da flora e aumento da quantidade de poeira na atmosfera (RAMADON, 2018; RAMADON, 2021).

Além dos impactos ambientais, o consumo em larga escala da areia natural ocasiona a escassez do material próximo aos centros urbanos, em algumas regiões, o que acaba por encarecer seus custos, principalmente relacionado ao transporte (NEVILLE, 2016). Empresas mineradoras precisam percorrer distâncias cada vez mais longas para executar a extração de agregados, fato este causador de aumento considerável no preço bruto do produto final (CAMPOS, 2019). De acordo com Serna e Rezende (2009) o custo do agregado está relacionado com legislação mais ou menos

restritiva, uso de tecnologia, inviabilização de reservas e de jazidas pelos centros urbanos, sistema de transporte e demanda do produto.

Uma alternativa para reduzir os problemas que são associados à extração da areia natural é a utilização de areia artificial (também conhecida como areia industrial). Conforme Neville (2016) a areia artificial é obtida do processo de britagem para a produção de agregado graúdo. Seu consumo apresenta considerável potencial de crescimento e incentiva que estudos verifiquem sua viabilidade na produção de concreto (DRAGO, VERNEY e PEREIRA, 2009). Além disso, por não utilizar areia natural de locais cada vez mais afastados dos centros urbanos, a utilização da areia artificial diminui o custo com o frete da matéria prima (CAMPOS, 2019).

Somando os impactos negativos que as extrações de matérias primas ocasionam, diversas indústrias geram resíduos que normalmente são descartados e que certamente prejudicam o meio ambiente. Dentre os diversos tipos de resíduos, pode-se destacar: cinzas volantes (subproduto derivado da queima de carvão nas usinas termelétricas), escória de alto-forno (subproduto da produção de ferro gusa), sílica ativa (subproduto da fabricação de ferro-silício), filer calcário (subproduto de minas de calcário) e pó de pedra (subproduto da produção de areia artificial) (SONG, LEE e KIM, 2014; SHIN et al., 2019; SNIC, 2019). O pó de pedra, por exemplo, é um resíduo oriundo de britagem de rochas que fica estocado em grande volume nos pátios das pedreiras sem uma destinação de uso final (MENOSSI, 2004). Este e outros resíduos estão sendo usados como substituição de parte do cimento na produção de concretos e pesquisas neste âmbito já foram elaboradas ao longo dos anos por diversos autores (GOZI, DO COUTO e MORALES, 2018; CASAGRANDE et al., 2019; CAMPOS et al., 2020; DIAS et al., 2020; BHAT, 2021).

Há muitos anos, o pó de calcário (resíduo proveniente da extração de pedreiras de calcário) tem sido empregado em materiais cimentícios (WANG et al., 2018). Formado a partir de material depositado e compactado por processos orgânicos e químicos, o calcário é classificado como uma rocha sedimentar, tendo o carbonato de cálcio como seu maior constituinte mineralógico (SAMPAIO e ALMEIDA, 2005). Já o diabásio é formado pelo processo de resfriamento de material rochoso fundido em profundidade, sendo categorizado como uma rocha ígnea intrusiva (NOGUEIRA, 2004; SILVA E CRISPIM, 2019). Rochas ígneas podem liberar elementos tóxicos ao meio ambiente em quantidades significativas, o que inviabiliza, por exemplo, sua utilização em aplicações agrícolas e ambientais (LEPCHAK, 2021). Dessa forma, do ponto de vista ambiental, a utilização do pó de diabásio como material cimentício suplementar torna-se uma opção interessante para a produção de concreto ecoeficiente.

A utilização do pó de pedra em somatório com a areia artificial pode acarretar em diminuição de problemas com a estocagem e o impacto no meio ambiente, transformando um resíduo em produto com potencial comercialização (CAMPOS, 2019). Este tipo de utilização pode ser considerado como logística reversa, ou seja, o resíduo de um processo de britagem, que antes seria descartado, passa a ser reutilizado. Silva et al. (2019) observam que esta prática vem crescendo ao longo dos anos e que a reutilização de resíduos industriais permite, além de redução de custos, uma ação positiva quanto à sustentabilidade. A utilização do pó de pedra, rejeito da britagem de areia artificial, pode trazer benefícios, entre eles o aproveitamento integral das pedreiras, utilização total de matéria-prima não renovável, valorização econômica de um produto residual, redução de problemas ambientais e um menor consumo de cimento na produção de concreto (ALMEIDA e SILVA, 2005; MACEDO et al., 2023). Campos (2019) afirma ainda que a substituição parcial de cimento por pó de pedra é verificada como promissora quando otimizada com técnicas de empacotamento de partículas, a fim de se obter um maior fechamento granular e maior densidade da mistura.

Do ponto de vista técnico, os autores Lopes, Peçanha e Castro (2020) afirmam que os métodos tradicionais de dosagem utilizados no Brasil normalmente buscam uma distribuição granulométrica ideal dos agregados de forma individual, não levando em consideração a interação entre os diferentes materiais e a composição granulométrica da mistura como um todo. Como o comportamento do concreto é influenciado pelas propriedades dos materiais que o compõem, estes métodos acabam não contemplando a relação entre os diferentes materiais granulares constituintes da mistura e suas variações morfológicas (visto que a forma das partículas desses materiais não é esférica), tampouco apresentam uma preocupação maior quanto à distribuição granulométrica ótima dessas partículas (LOPES, PEÇANHA e CASTRO, 2020). Além disso, os métodos de dosagem empíricos, muito práticos e de fácil aplicação, levam a uma superestimação do traço em favor da segurança, acarretando em um aumento desnecessário do consumo de cimento, o que encarece o custo do produto final (RECENA, 2011), além do impacto ambiental.

Considerando que o concreto é constituído de materiais granulares de diferentes tamanhos com curvas de distribuição granulométricas distintas, e que seu comportamento é dependente das propriedades destes materiais, surge a importância da utilização de modelos de empacotamento de partículas (LOPES, PEÇANHA e CASTRO, 2020). A aplicação de técnicas de empacotamento de partículas torna-se necessária a fim de auxiliar na composição de misturas ótimas, considerando os agregados e as partículas mais finas, com o objetivo de melhorar seu esqueleto granular e, conseqüentemente, permitir a redução do consumo de cimento. Essa redução do consumo de cimento

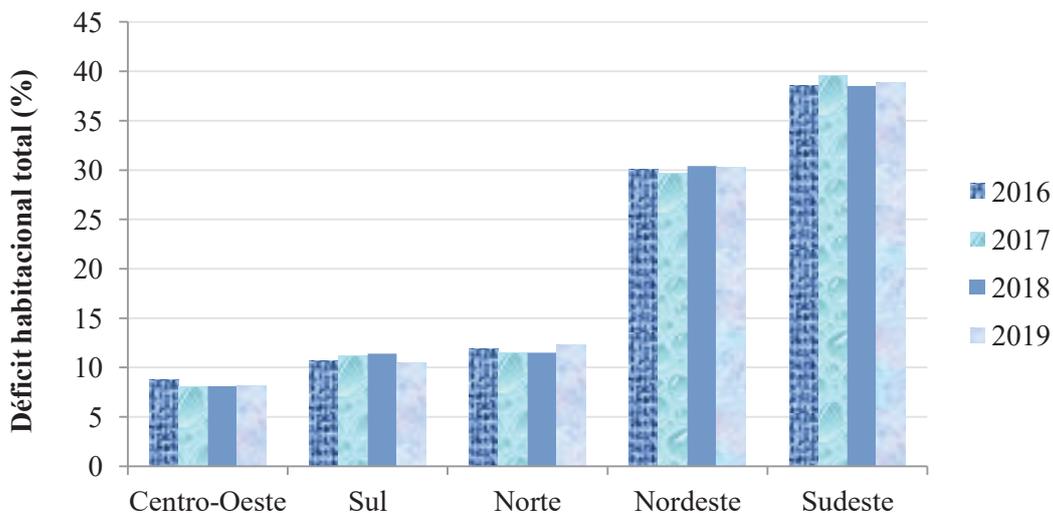
propõe benefícios nos pontos de vista ecológicos e ambientais (LONDERO, 2016). Outros autores já utilizaram técnicas de empacotamento de partículas objetivando a produção de concretos ecoeficientes, com uma redução do consumo de cimento, material causador de grande parte das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, conforme já comentado (LONDERO, 2016, CAMPOS, 2019, GRAZIA et al., 2019, LOPES, 2019). O estudo para aperfeiçoamento dos métodos de dosagem visando a produção de concretos mais sustentáveis e duráveis é de extrema importância (REBMANN, 2011 e RECENA, 2011).

Os modelos de Alfred e CPM estão entre os mais utilizados para a dosagem de concretos por técnicas de empacotamento de partículas (WANG et al., 2021). Porém, conceitualmente, os modelos são bem diferentes um do outro. O modelo de Alfred é conhecido como um modelo contínuo, em que é considerado que qualquer material atende a um sistema de distribuição granulométrica contínuo, no qual todos os tamanhos de partículas são possíveis de existir e que o empacotamento é obtido após a obtenção de uma mistura de proporção ideal (WANG et al., 2021). O modelo CPM, por sua vez, é conhecido como um modelo de empacotamento discreto, que originalmente leva em consideração a individualidade de cada partícula (LOPES, 2019). Nesse modelo, assume-se que cada material da mistura é constituído por partículas de um único tamanho específico e o empacotamento é obtido pelo preenchimento de diferentes arranjos de partículas com um mesmo tamanho. Dependendo do número de tamanhos específicos levados em consideração (também denominados de classes de tamanhos de grãos) o modelo discreto pode ser distribuído em sistemas binários, ternários e múltiplos (DE LARRARD, 1999; YOUSUF, SANCHEZ e SHAMMEH, 2019; WANG et al., 2021). Dessa forma, têm-se o desafio e a motivação em comparar os dois modelos aplicando na prática, visto que, teoricamente, se comportam diferente um do outro.

Fatores como tamanho, porosidade, dispersão e densidade das partículas, granulometria, morfologia e modo de inserção dos materiais à mistura influenciam no empacotamento (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009; SOHAIL et al., 2018; GOES et al., 2020). Como os modelos de empacotamento são diferentes entre si, suas influências na composição dos materiais de determinada dosagem também vão ser consideradas de acordo com as características próprias dos modelos. O modelo de Alfred considera toda a curva contínua de partículas dos materiais e combina a mistura mais próxima da curva ideal para o máximo empacotamento (YU, SPIESZ e BROUWERS, 2015). Já o modelo CPM considera não só o tamanho dos grãos, mas o índice de compactação conforme a aplicação do material e o posicionamento geométrico das partículas no arranjo da mistura (WANG et al., 2021).

Por fim, partindo para o âmbito social, no Brasil, o déficit habitacional é ainda um problema relacionado à grande instabilidade social a ser solucionado. Um aumento da densidade populacional nas grandes cidades acarreta em falta de infraestrutura básica que, por consequência, pode ocasionar o desenvolvimento de favelas, cortiços e ocupações irregulares, tirando o direito a moradia e dignidade humana das pessoas (CARDOSO e SANJUAN, 2019). Esse processo iniciou-se no século passado quando trabalhadores migraram do campo para os grandes centros em busca de melhores condições de vida e oportunidades de trabalho. Na década de 1960 o número de pessoas que moravam na zona urbana ultrapassou o da zona rural e, no ano 2000, a população urbana já representava 80% da população brasileira total (CAIXA, 2012). O déficit habitacional engloba não só a diferença entre a quantidade existente de habitações e a quantidade necessária de novas habitações conforme a demanda, mas também os domicílios inadequados que precisam de melhoria em sua infraestrutura (FJP, 2021). A Figura 1 apresenta o déficit habitacional do Brasil, sendo o Nordeste e o Sudeste as regiões com índices maiores.

Figura 1 - DÉFICIT HABITACIONAL DAS CINCO REGIÕES BRASILEIRAS COMO FRAÇÃO DO TOTAL

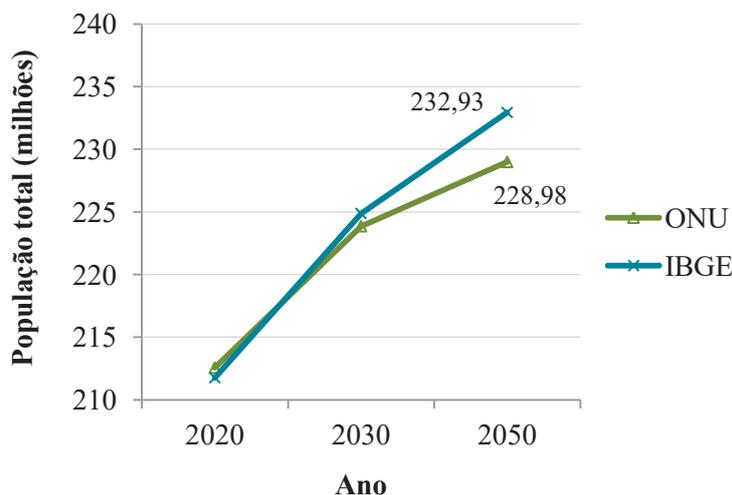


FONTE: Elaborado a partir de FJP (2023).

Nota-se, na Figura 1, que todo o território brasileiro teve um déficit habitacional relativamente constante entre os anos de 2016 a 2019, sendo que, no último ano do levantamento, aproximadamente 5,96 milhões de domicílios estavam em déficit no país (FJP, 2023). Além do déficit atual, é preciso pensar na demanda de novos domicílios, de infraestrutura, de saneamento básico e de energia que a população futura irá exigir do setor da construção civil. De acordo com o levantamento elaborado pela ONU (2022), atualmente o número de habitantes de todo o planeta é de 7,94 bilhões, e para o ano de 2050, estima-se que esse número chegue a 9,69 bilhões. No cenário

brasileiro, hoje a população está em torno de 214,33 milhões e a previsão é de que chegue a 228,98 milhões de habitantes em 2050 (ONU, 2022). Em contrapartida, de acordo com o IBGE (2018), o número atual de habitantes brasileiros está em 211,76 milhões e a expectativa é que atinja a marca de 232,93 milhões de habitantes no ano de 2050, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - POPULAÇÃO BRASILEIRA TOTAL CONFORME ESTIMATIVAS DA ONU E DO IBGE



FONTE: Elaborado a partir de IBGE (2018) e ONU (2019).

Portanto, analisando o déficit habitacional e o crescimento populacional, percebe-se uma demanda do consumo de cimento nos próximos anos, principal material utilizado na construção civil, setor responsável pela garantia de infraestrutura, energia, água e moradia à população. A utilização do conceito de empacotamento de partículas nas dosagens do concreto permite a redução do consumo de cimento, e em consequência, redução das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Além disso, a utilização de areia artificial em 100% da produção de concreto reduz a utilização de areia natural, recurso que já se encontra em escassez em diversas regiões e que pode encarecer o produto final. A utilização de pó de pedra como substituição do cimento na produção de concreto, além de reduzir o consumo de cimento também pode diminuir o custo do material.

Assim, têm-se a importância da continuidade da produção de concretos aliado à tecnologia para garantir novas construções sem prejudicar o meio ambiente, atendendo a demanda social e reduzindo custos de produção. Aplicando técnicas de empacotamento de partículas é possível a dosagem de concreto ecoeficiente, reduzindo o consumo de cimento, diminuindo as emissões de CO<sub>2</sub>, utilizando pó de pedra como material suplementar e utilizando areia artificial em substituição da areia natural. E, aliado a isso, usa-se a comparação de duas das mais utilizadas técnicas de empacotamento de partículas para buscar aquela em que, a partir da composição dos materiais na dosagem, proporciona melhores resultados nas propriedades do concreto.

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo da pesquisa é dosar concretos convencionais com a aplicação dos modelos de empacotamento de partículas de Alfred e CPM buscando ecoeficiência, a partir da avaliação do potencial de utilização do pó de diabásio como substituto parcial do cimento, em comparação ao pó de calcário. Serão avaliadas propriedades nos estados fresco e endurecido com a realização dos ensaios de massa específica, abatimento do tronco de cone, resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Também serão avaliados parâmetros iniciais de durabilidade com os ensaios de resistividade elétrica e de propagação de onda ultrassônica. Os parâmetros de sustentabilidade serão verificados por meio dos índices de ecoeficiência (consumo de cimento, emissões de CO<sub>2</sub> e custos por metro cúbico para a produção de uma unidade de MPa de resistência à compressão).

## 1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho limita-se à análise de alguns ensaios de laboratório devido à disponibilidade de equipamentos e ao prazo destinado para sua execução. A comparação da aplicação dos modelos de empacotamento de partículas será estritamente para concretos com relações água/finos entre 0,45 e 0,60.

A durabilidade terá uma pré-verificação de porosidade dos concretos pela propagação de onda ultrassônica e pela resistividade elétrica, mas não serão aprofundados ensaios específicos de durabilidade (como penetração de cloretos e carbonatação). Para a dosagem do concreto, limita-se à utilização de um tipo de aditivo superplastificante. Além disso, todos os materiais utilizados serão provenientes da região metropolitana de Curitiba/PR.

Cabe salientar que os resultados são referentes aos modelos de empacotamento de partículas de Alfred (pertencente ao grupo de distribuição granulométrica ótima ou modelos contínuos) e CPM (pertencente ao grupo de modelos analíticos ou modelos discretos), e que para outros modelos é necessário que se faça um estudo prévio, pois a análise dos resultados dos concretos dosados com diferentes modelos pode sofrer alterações mesmo fazendo uso dos mesmos materiais empregados nesta pesquisa.

## 1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

A estrutura da pesquisa está dividida em cinco capítulos e terá início com a introdução sobre o tema, com a apresentação de seus problemas, justificativa, objetivos e delimitações, no Capítulo 1.

Em seguida é apresentada a revisão da literatura para abordar os principais aspectos do tema e principalmente para tomar conhecimento sobre o que outros autores já elaboraram, no Capítulo 2. Dessa forma, será possível verificar quais os principais parâmetros adotados nos últimos estudos a respeito do empacotamento de partículas e como estes modelos estão sendo aplicados, de modo a se obter embasamento para verificar os resultados que serão obtidos desta pesquisa.

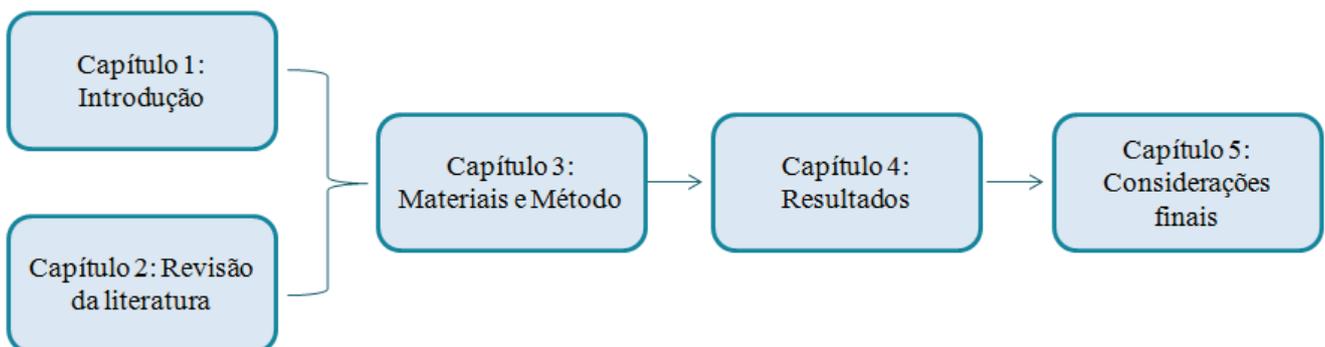
No Capítulo 3 são apresentados os materiais e método. O estudo dos materiais a serem utilizados tem o objetivo de tomar conhecimento sobre suas características e delimitar suas propriedades para a produção dos concretos. O método apresenta a sequência executada dos estudos dos materiais até as dosagens do concreto.

Posteriormente, com os concretos produzidos, é realizado o estudo de suas propriedades para avaliações nos estados fresco e endurecido, em durabilidade e sustentabilidade, com a análise dos resultados no Capítulo 4.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

Para complementar o entendimento da estrutura da pesquisa, está representado um fluxograma conforme Figura 3.

Figura 3 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA PESQUISA



FONTE: A autora (2023).

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo será apresentada a revisão da literatura. Primeiro serão apresentados conceitos referentes ao concreto ecoeficiente e sua contextualização. Em seguida serão apresentados os métodos de dosagem destacando aqueles que serão utilizados na pesquisa. Será abordado sobre os agregados miúdos artificiais aplicados na dosagem e suas características. Na sequência será conceituado sobre técnicas de empacotamento de partículas, principalmente os modelos de Alfred e CPM. Por fim, será descrita a dosagem otimizada do concreto com a utilização do conceito de empacotamento e da aplicação dos modelos.

### 2.1 CONCRETOS ECOEFICIENTES

Concreto ecológico, concreto sustentável ou concreto ecoeficiente deve ser projetado com teor de cimento reduzido quando comparado com o concreto convencional, já que o cimento é considerado o material com maior impacto ambiental, devido às emissões de CO<sub>2</sub> e o consumo de energia durante sua produção. Logo, um concreto produzido com redução do consumo de cimento e que mantém suas propriedades é considerado ecoeficiente (FENNIS, 2011). E, além de atender suas propriedades mecânicas e de durabilidade, Oliveira (2023) afirma que um concreto ecoeficiente é aquele que otimiza a geração de resíduos, utilização de água, energia, custos e emissão de CO<sub>2</sub>.

A ecoeficiência é a produção e colocação de bens e serviços no mercado consumidor de forma a satisfazer as necessidades humanas, melhorando a qualidade de vida da população, minimizando os impactos ambientais e reduzindo o consumo de recursos naturais, considerando todo o ciclo de vida da produção (VERFAILLIE e BIDWELL, 2000). A ecoeficiência está relacionada aos conceitos e aos princípios do desenvolvimento sustentável e baseia-se na avaliação de ecoindicadores, sejam estes ecoindicadores globais ou não (PEREIRA et al., 2014).

O termo CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e) é utilizado para relacionar a emissão de vários gases causadores do efeito estufa comparados a nocividade do CO<sub>2</sub>, baseando-se no seu potencial de aquecimento global. Os materiais constituintes do concreto apresentam diferentes fatores de emissão de CO<sub>2</sub>e conforme é apresentado na Tabela 1. É possível observar que os cimentos contendo adições minerais possuem fator de emissão menores, devido à redução do teor de clínquer, e que a areia artificial e o pó de pedra possuem fator de emissão equivalente e que este valor é menor que o fator de emissão apresentado pela areia natural (CAMPOS, 2019).

Tabela 1 - FATORES DE EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> CONFORME O TIPO DE MATERIAL UTILIZADO PARA PRODUZIR CONCRETO

Material	Fator de Emissão (kgCO <sub>2</sub> e/kg)	Referência
CP II - E	0,398 - 0,771	Possan (2019)
	0,443 - 0,935	SIDAC (2022)
CP II - F	0,606 - 0,727	Possan (2019)
	0,652 - 0,873	SIDAC (2022)
CP II - Z	0,572 - 0,771	Possan (2019)
	0,628 - 0,926	SIDAC (2022)
CP III	0,173 - 0,779	Possan (2019)
	0,235 - 0,682	SIDAC (2022)
CP IV	0,346 - 0,693	Possan (2019)
	0,406 - 0,863	SIDAC (2022)
CP V ARI	0,736 - 0,823	Possan (2019)
	0,406 - 0,863	SIDAC (2022)
Areia natural	0,0125	SIDAC (2022)
Areia artificial	0,0047	SIDAC (2022)
	0,0048	Sinkhonde (2022)
Pó de pedra	0,0030	Scolaro et al. (2022)
	0,0047	SIDAC (2022)
Agregado graúdo	0,0047	SIDAC (2022)
	0,0048	Sinkhonde (2022)

FONTE: A autora (2023).

Para reduzir os impactos ambientais causados pela produção de concreto, Damtoft et al. (2008) propõem que se utilize o concreto certo para a obra certa (como exemplo, utilizar concreto de traço pobre para fins não estruturais e um de traço rico para fins estruturais). Os autores também sugerem que se utilizem materiais reciclados, que haja otimização do consumo de cimento por meio da utilização de aditivos e do empacotamento de partículas, e que se produzam concretos com cimentos de baixo impacto ambiental (por exemplo, cimentos contendo adições minerais).

De acordo com Damineli (2013) o aumento da ecoeficiência na produção de concreto está relacionado à redução do consumo de cimento, responsável pelos gases causadores do efeito estufa e pelo aumento da eficiência dos ligantes na mistura. Além disso, Miller, Monteiro e Ostertag (2016) e Van Damme (2018) afirmam que a execução de estruturas com o teor de ligante otimizado é uma estratégia dentro da produção do concreto para redução do consumo de cimento.

A utilização de técnicas de empacotamento de partículas permite a redução do consumo de pasta pela combinação granulométrica de diversos tamanhos de partículas, no qual a alta eficiência do uso de ligantes diminui o número de vazios da mistura (DAMINELI, 2013). Conforme Damineli et al. (2010) uma maneira de definir um concreto ecoeficiente é por seu consumo de cimento, sua

emissão de CO<sub>2</sub> e seus custos para produzir uma unidade de desempenho funcional. Os autores propuseram indicadores capazes de medir a eficiência do uso do cimento por meio de índices de intensidade de aglomerante (*bi*, do inglês *binder intensity*) e intensidade de CO<sub>2</sub> (*ci*, do inglês *CO<sub>2</sub> intensity*) como estratégia para diminuir as emissões de CO<sub>2</sub>. A intensidade de aglomerante (Equação 1) mede o consumo total de material ligante necessário para entregar uma unidade de um requisito de desempenho, como por exemplo, uma unidade de MPa. No presente trabalho, para o cálculo do *bi*, será considerado o consumo apenas de cimento.

$$bi = \frac{b}{p} \quad (1)$$

Onde:

*bi*: intensidade de ligante (kg/m<sup>3</sup>/MPa);

*b*: consumo total de ligantes (kg/m<sup>3</sup>);

*p*: resistência à compressão do concreto aos 28 dias (MPa).

O índice de intensidade de CO<sub>2</sub> mede a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido para produzir uma unidade de um requisito de desempenho conforme apresentada pela Equação 2.

$$ci = \frac{c}{p} \quad (2)$$

Onde:

*ci*: intensidade de CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>/MPa);

*c*: emissões totais de CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>);

*p*: resistência à compressão do concreto aos 28 dias (MPa).

A intensidade de ligante (*bi*) representa a eficiência do uso de clínquer e substitutos do clínquer no cimento. A intensidade de CO<sub>2</sub> (*ci*) permite fazer uma estimativa do potencial de aquecimento global de uma determinada dosagem. Por isso, a combinação dos dois índices, *bi* e *ci*, permite estimar a eficiência do uso do cimento na produção de concreto, por meio de alguns fatores possíveis de avaliação, como a eficiência da produção do cimento, a dosagem do concreto e a natureza e qualidade dos materiais utilizados. Além disso, utilizando a resistência como parâmetro *p* é possível avaliar a eficiência de todo o processo de produção do concreto, ao contrário de outros indicadores como o teor de substituição do clínquer ou a intensidade de energia da produção do cimento (DAMINELI et al., 2010).

No mesmo sentido, Campos (2019) e Campos et al. (2020) avaliaram a ecoeficiência dos concretos considerando o consumo de cimento, a emissão de CO<sub>2</sub> e os custos necessários para produção de uma unidade de MPa de resistência mecânica. Os autores observaram que as emissões de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de concreto e os custos/m<sup>3</sup> de concreto diminuem com o aumento da relação água/finos. Porém, em termos de eficiência, os valores de consumo de cimento, emissões de CO<sub>2</sub> e custos por MPa diminuem com o aumento da resistência.

Por meio de levantamento bibliográfico e aplicação dos cálculos, Damineli et al. (2010) concluíram que o *bi* mínimo fica em torno de 5 kg/m<sup>3</sup>/MPa para concretos superiores a 60 MPa e que, à medida que a resistência diminui, o *bi* mínimo aumenta, encontrando o valor de *bi* mínimo de 13 kg/m<sup>3</sup>/MPa para concreto de 20 MPa. Já o *ci* mínimo permaneceu em torno de 1,5 kg/m<sup>3</sup>/MPa para todas as faixas de resistência. Apesar de ainda ser considerado um valor baixo, o *ci* mínimo subiu para 4,3 kg/m<sup>3</sup>/MPa para concretos sem substituição do clínquer, concluindo que para baixas emissões de CO<sub>2</sub> a substituição de clínquer é necessária. Tanto que, dependendo da dosagem e da escolha dos materiais, é possível reduzir o índice *ci* em até 10 vezes, passando de um valor de 15 kg/m<sup>3</sup>/MPa para 1,5 kg/m<sup>3</sup>/MPa.

Para uma contextualização do concreto ecoeficiente uma revisão da literatura foi realizada buscando trabalhos publicados nos últimos cinco anos com utilização dos termos: concreto verde, concreto sustentável, concreto ecológico e concreto ecoeficiente. Alguns dos trabalhos recentes que buscaram produzir concretos ecoeficientes estão apresentados na sequência.

Campos (2019) e Campos et al. (2020) elaboraram concretos ecoeficientes de alta resistência com técnicas de empacotamento de partículas, utilizando teores de sílica ativa entre 0% e 16% e teores de pó de pedra entre 0% e 20%. Inicialmente os autores buscaram obter a composição de finos ideal pela densidade de empacotamento, com utilização dos modelos: CPM (De Larrard, 1999), CIPM (Fennis, 2011), pelo método experimental úmido de Wong e Kwan (2008) e pelo grau de hidratação das pastas. Os traços foram estudados conforme sua eficiência e sustentabilidade, ou seja, obtiveram-se o consumo de cimento, emissões de CO<sub>2</sub> e custos de produção. Observou-se que o pó de pedra apresenta empacotamento superior quando comparado à sílica e ao cimento e que, independentemente do teor de sílica ativa, misturas contendo 20% de substituição do cimento por pó de pedra apresentaram maior densidade de empacotamento pelos modelos analíticos e pelo método experimental. Os concretos produzidos apresentaram alta trabalhabilidade e, após ensaios normativos, alguns traços foram classificados como autoadensáveis. Devido à redução do consumo de cimento e otimização do fechamento granular, produziu-se concreto de 105 MPa com 287,65

kg/m<sup>3</sup> de consumo de cimento, o que equivale ao consumo de cimento mínimo de 2,77 kg/m<sup>3</sup> por MPa, o menor valor encontrado até então.

Campos, Klein e Marques Filho (2020) tiveram o objetivo de desenvolver um concreto de alta resistência sustentável com menor consumo de clínquer para minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> através do desenvolvimento de um novo método de dosagem com empacotamento de partículas. Todos os concretos dosados pelo método desenvolvido pelos autores obtiveram trabalhabilidade elevada (> 200mm) e o excesso de pasta proporcionou aumento do fluxo do concreto e capacidade de passagem. A maior resistência à compressão obtida foi de 104 MPa com volume de pasta de 33% na mistura, com consumo de cimento de 3,2 kg/m<sup>3</sup>/MPa e emissão de CO<sub>2</sub>/MPa de 2,9 kgCO<sub>2</sub>e/MPa.

Os autores Zhang et al. (2019) buscaram verificar de forma combinada a durabilidade e a resistência à compressão com as emissões de CO<sub>2</sub> para concretos com materiais cimentícios suplementares. Foram produzidos quatro traços de concreto (um traço referência, um contendo cinzas volantes, um contendo sílica ativa e um contendo as duas adições juntas) que passaram por ensaios de difusão de cloretos, resistência à compressão e quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> com o objetivo de verificar a contribuição dos materiais cimentícios suplementares na eficiência do concreto. Os autores enfatizam que a substituição do cimento por sílica ativa e por cinzas volantes contribuíram para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, visto que o cimento é o principal responsável pelas emissões dos concretos. O concreto contendo 5% de sílica ativa em substituição do cimento obteve o maior valor de resistência à compressão (25,45 MPa) e o concreto contendo as duas adições em combinação obteve o menor valor de emissão de CO<sub>2</sub> (124,77 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de concreto). Porém, o concreto com sílica ativa, mesmo com um valor de emissão de CO<sub>2</sub> mais alto, foi o que obteve a maior eficiência, no valor de 5,58 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa. No parâmetro de durabilidade o concreto com 20% de cinzas volantes substituindo o cimento foi o que obteve o melhor índice de eficiência, resultando um valor de difusão de cloretos igual a  $5,043 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s e um valor de emissão de CO<sub>2</sub> de 124,92 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de concreto. Dessa forma, os autores concluíram que os concretos contendo a sílica ativa e aquele que utilizou a combinação das duas adições apresentaram desempenho ecoeficiente superior ao concreto referência (sem nenhum tipo de substituição do cimento), e atribuíram os resultados principalmente à sílica ativa por ter capacidade de melhorar as propriedades do concreto enquanto reduz a quantidade de cimento e de emissões de CO<sub>2</sub>.

Voltados para uma pesquisa no âmbito sustentável, Brito e Kurda (2021) fizeram uma revisão global para analisar as alternativas usadas na produção de concreto visando minimizar os impactos ambientais. O levantamento encontrou diversas estratégias: reduzir a quantidade total de aglomerante, reduzir os impactos ambientais do uso de aglomerantes, agregados, água, aumentar a

durabilidade das estruturas, captura e armazenamento de carbono, fabricação de materiais, melhoria da condutividade térmica e economia de energia.

O estudo de Lopes (2019), utilizando dosagem otimizada pelo modelo de Alfred, encontrou resultados de 9,27 kg/m<sup>3</sup>/MPa para classe de resistência de 25 MPa e de 10,19 kg/m<sup>3</sup>/MPa para classe de resistência de 40 MPa. Em comparação aos traços de referência elaborados pelo estudo, houve uma redução de 22% e de 10% do índice de intensidade de ligante para os concretos dosados a partir da aplicação do modelo de Alfred, respectivamente. O empacotamento de partículas ocasionou a melhoria da eficiência do ligante, mesmo com redução de seu consumo.

O levantamento realizado pelos autores Sivakrishna et al. (2020) sobre os recentes desenvolvimentos do concreto mais ecológico apontaram que não só existe o benefício de obtenção de infraestrutura mais sustentável, mas também um caminho de urbanização favorável à futura demanda do concreto. Analisando algumas alternativas para produção de concreto que busca a ecoeficiência (utilização de materiais suplementares ao cimento, utilização de resíduos como agregado e utilização de água residual) os autores concluíram que o concreto (por eles chamado de concreto verde) é uma opção mais barata que pode impulsionar o desenvolvimento de países emergentes; a utilização de resíduos na produção de novos materiais diminui o que seria descartado e preserva terrenos destinados a isto; a substituição do cimento por outros materiais em proporções adequadas auxilia na redução das emissões de dióxido de carbono que a produção do cimento é responsável. Por fim é salientada a importância de mais pesquisas serem elaboradas sobre o tema para que a população ganhe confiança a respeito do material e passe a aplicá-lo em diferentes infraestruturas.

Durante a produção do cimento Shukla, Gupta e Gupta (2020) substituíram o clínquer por pó residual de mármore, resíduo muito comum na Índia, país dos autores. O pó de mármore foi moído com o clínquer e com o gesso e seus teores de substituição foram de 0%, 2,5%, 7,5% e 10%. Os autores produziram concreto com o cimento contendo o pó de mármore e observaram que, conforme a proporção de pó aumentava, as resistências à tração e à compressão cresciam continuamente. Para a resistência à compressão, aos 28 dias, o traço de referência contendo 0% de pó de mármore atingiu 25 MPa, enquanto que o traço contendo 10% foi o que atingiu um maior valor de resistência à compressão, de 40 MPa. Para a resistência à tração, o traço contendo 0% de pó de mármore atingiu 3,3 MPa e, novamente, o traço contendo 10% de substituição obteve o maior resultado, de 4,1 MPa. A conclusão é de que o desempenho do concreto apresentou resultados satisfatórios mesmo substituindo o clínquer por pó residual de mármore para teores de até 10%.

O trabalho de Zhang et al. (2022) propôs a dosagem de concreto de alto desempenho com utilização de areia eólica, também conhecida como areia de deserto. Além da areia eólica, os autores utilizaram sílica ativa e cinza volante como materiais cimentícios suplementares. Para a dosagem foi utilizado o modelo de empacotamento de partículas de Alfred, fixando as frações da areia eólica e da sílica ativa, variando as relações água/cimento, cinza volante e teor do aditivo superplastificante. O cimento foi substituído por cinza volante nas proporções de 10%, 20% e 30%, com relações água/finos de 0,18, 0,20 e 0,33. Nesta composição de materiais não foi utilizado agregado graúdo. Os resultados de resistência à compressão mostraram que todos os concretos ficaram acima de 80 MPa, sendo o maior valor encontrado de 104,43 MPa aos 28 dias, para o traço contendo 10% de cinza volante e relação água/finos 0,18. Com base nos resultados do trabalho, os autores concluíram que é possível a substituição dos agregados pela areia eólica, juntamente com as adições e o empacotamento de partículas, para a dosagem de concreto de alto desempenho sustentável.

Os autores Khan et al. (2020) produziram concreto verde e concreto convencional para fins comparativos. Foram utilizados para a produção do concreto verde os materiais: cinza volante, pó de vidro e resíduos de demolição (resíduo de concreto e tijolo de demolição). O traço do concreto convencional foi de 1:1,37:2,98:0,5 (cimento, areia, brita e água) e o traço do concreto verde foi de 1:1:2,1:2,49:5,96:0,5 (cimento, cinza volante, pó de vidro, resíduo de demolição, brita e água). Os autores compararam os ensaios de abatimento do tronco de cone para o estado fresco, absorção de água e resistência à compressão para o estado endurecido e fizeram uma comparação de custos entre os dois tipos de concreto. Aos 28 dias de idade, a resistência média à compressão do concreto convencional foi de 21,3 MPa e a do concreto verde foi de 20,2 MPa. O custo do concreto verde foi 10,9% menor que o custo do concreto convencional. De modo geral, concluiu-se que os resultados do concreto verde permitem sua utilização no lugar do concreto convencional e, embora as diferenças dos resultados sejam bem próximas, o concreto verde foi o mais econômico.

Para concluir, Di Domenico et al. (2022) levantaram dados sobre a utilização de diferentes adições para substituição parcial do cimento, visando a produção de concreto ecoeficiente de alto desempenho. Sílica ativa, pó de calcário, cinzas volantes e metacaulim foram as principais adições utilizadas, com teores de substituição variando de 2% até 78%. Adições menos usuais, como argila marinha, pó de perlita, resíduo de polimento de porcelana, sedimento marinho tratado e argila calcinada também foram encontradas como opções de substituição parcial do cimento Portland. Neste estudo foram aplicadas as Equações 1 e 2 para cálculo dos índices de intensidade dos aglomerantes e de eficiência do CO<sub>2</sub>. Valores de consumo de aglomerantes por unidade de MPa variaram de 4,81 kg/m<sup>3</sup>/MPa até 10,09 kg/m<sup>3</sup>/MPa. Enquanto que valores de eficiência do CO<sub>2</sub>

ficaram entre 2,88 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa e 8,75 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa. A partir do estudo foi observada uma tendência em substituir o cimento por diferentes tipos de adições, uma vez que os concretos produzidos estão apresentando resistências maiores com menores consumos de cimento.

## 2.2 AGREGADO MIÚDO DE BRITAGEM

O agregado miúdo de britagem passa pelos estágios da britagem do agregado graúdo e por outras etapas pertinentes para que suas características sejam melhoradas a fim de ser utilizado na produção de concretos. Já o pó de pedra é o último material separado no processo de britagem, possui a particularidade de apresentar pouca variação em sua composição granulométrica e, geralmente, é tratado como resíduo pelas pedreiras (WEIDMANN, 2008). Neste item serão abordados os conceitos sobre areia artificial e pó de pedra, materiais oriundos da britagem de agregados graúdos.

### 2.2.1 Areia artificial

Como já mencionado, com o esgotamento de areia natural próxima aos centros urbanos e com o aumento do preço de transporte e da entrega do material o mercado passou a investir na areia de brita (também conhecida como areia artificial) (ANEPAC, 2019). A partir da cominuição de rochas se obtém o agregado artificial sendo o processo de britagem responsável pela redução do material até que se atinja o tamanho especificado. Posteriormente é realizado o peneiramento para separação do agregado conforme sua dimensão granulométrica (SBRIGHI NETO, 2000).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) a escolha do britador e a natureza da rocha possuem influência na forma do agregado. Cabral (2007) afirma que, com o desenvolvimento de novos equipamentos, os agregados de britagem são produzidos de maneira que pareçam próximos daqueles encontrados na natureza, pelo uso de tecnologias para arredondar o agregado ou deixá-lo mais cúbico e até mesmo equipamentos imitando a correnteza de água de um rio para manter em suspensão partículas que seriam prejudiciais ao concreto.

O processo de cominuição se inicia com o britador primário que reduz o tamanho das rochas para que possam ser transportadas em correias transportadoras, passando por um peneiramento prévio para retirada de material argiloso. Posteriormente, o britador intermediário reduz o tamanho dos grãos para que atinjam as granulometrias desejadas. As britagens secundária, terciária e, em

alguns casos, quaternária são utilizadas para reduzir ainda mais o tamanho das partículas e/ou para produzir grãos com formato mais cúbico (WEIDMANN, 2008).

A areia artificial possui benefícios como granulometria uniforme, homogeneidade, otimização do uso de mão de obra, isenção de elementos contaminantes, controle sistemático de produção, redução de custo com transporte e redução do impacto ambiental (ANEPAC, 2019). Em contrapartida, devido a sua composição granulométrica, a areia artificial tende a apresentar maior quantidade de finos, e devido ao processo de beneficiamento, morfologia mais angulosa e lamelar, além de apresentar maior rugosidade quando comparada a areia natural (LANG, 2006; WEIDMANN, 2008; FORNECEDOR, 2023). Todos estes fatores influenciam no estado fresco, demandando uma maior quantidade de água para manter a mesma trabalhabilidade, especialmente a alta porcentagem de partículas finas, por requerem uma maior quantidade de água de amassamento para envolver sua maior superfície específica (MENOSSI, 2004; DRAGO, VERNEY e PEREIRA, 2009).

Quanto à rugosidade, esta pode influenciar positivamente as propriedades no estado endurecido, como observado por Cabral (2007), a areia artificial pode proporcionar maior aderência mecânica na mistura de concreto, resultando em um aumento da resistência. Isso porque a areia artificial adere melhor à pasta de cimento quando comparada a areia natural (SHEN, 2018). De acordo com Guimarães e Gomes (2020) estudos mostram que os finos da areia artificial influenciam na zona de transição da interface entre a pasta e o agregado deixando a microestrutura mais densa, possivelmente devido à colmatação dos poros, podendo resultar em um aumento de sua espessura.

A presença dos finos da areia artificial, apesar de interferir na trabalhabilidade, pode ser benéfica para a resistência à compressão e durabilidade. Trabalhos realizados mostram que concretos dosados com areia artificial chegam a superar os valores de resistência a compressão daqueles dosados com areia natural, até mesmo para traços com um mesmo teor de aditivo e relações água/cimento elevados. Além disso, há redução na absorção de água por imersão e menor migração de íons cloreto em concretos contendo areia artificial. Isso porque a presença dos finos diminui o volume de vazios preenchendo os poros, deixando a matriz mais densa e conseqüentemente aumentando a resistência mecânica e melhorando a durabilidade (GUIMARÃES e GOMES, 2020).

### 2.2.2 Pó de pedra

O pó de pedra é o resíduo da exploração de pedreiras e representa de 15% a 20% da britagem de rochas para a produção de agregado artificial. A literatura pode utilizar diferentes

nomenclaturas para o pó de pedra (pó de brita, finos de pedreira, finos de pedra britada e finos de britagem) e suas propriedades são variáveis de acordo com a rocha que o origina (DUARTE, 2013).

Por ser um rejeito, o pó de pedra não possui destinação definida e acaba ficando armazenado nos pátios das pedreiras, causando impactos ao meio ambiente como propagação de poeira, obstrução de canais de drenagem e até mesmo assoreamento de rios quando carregado pela água da chuva (MENOSSI et al., 2010).

O início da utilização do pó de pedra na produção de concretos data de 1979 em países como o Canadá e os Estados Unidos. No Brasil, seu uso começou a ser difundido com os estudos técnicos realizados na construção da usina de Itaipu, na década de 1980 (ANDRIOLO, 2005).

A variabilidade na produção de agregado miúdo artificial depende do britador utilizado. A finura *Blaine* dos pós de pedra produzidos nos equipamentos brasileiros para obtenção de areia fica entre 2.000 cm<sup>2</sup>/g e 2.500 cm<sup>2</sup>/g, próximo de um “cimento grosso” (ANDRIOLO, 2005).

De acordo com Menossi (2004) a utilização do pó de pedra em grande escala na produção de concreto pode resultar em diversos benefícios para as pedreiras, as concreteiras e o consumidor, como o aproveitamento integral das pedreiras sem descarte de resíduos, a obtenção de um material com características físicas e químicas constantes, a redução do consumo de cimento, a mitigação de problemas ambientais e a diminuição do custo final do concreto.

O pó de diabásio não é comumente comercializado e utilizado na produção de concreto, justamente por ser um resíduo do processo de britagem de rochas para a produção de agregados. A rocha diabásio é indesejada no campo de mineração de calcário (material utilizado na produção de cimento Portland) (FORNECEDOR, 2023). Na Figura 4 é possível observar a faixa de diabásio pela sua coloração mais escura quando comparado ao calcário.

Figura 4 - DIABÁSIO NA MINERAÇÃO DE CALCÁRIO



FONTE: FORNECEDOR (2023).

Conforme o Fornecedor (2023), do ponto de vista dos processos envolvidos, o custo de beneficiamento do diabásio (por meio de moagem) é significativamente mais alto em comparação ao calcário, tanto em termos de consumo energético quanto no desgaste dos equipamentos, especialmente para produção de agregados miúdos. Isso ocorre devido à dureza do diabásio, que é consideravelmente maior que a do calcário.

Durante o beneficiamento, foi observado que, por conta de sua dureza, o material rompe formando lascas, mantendo uma morfologia mais lamelar, além de desgastar os equipamentos. Apesar disso, estudos de viabilidade e de ajuste do material para o mercado foram realizados no intuito de aproveitar o diabásio presente na mineração de calcário. Ao utilizar os agregados de diabásio na dosagem de concretos, percebeu-se que os resultados foram satisfatórios, com índices de eficiência dentro do estimado, viabilizando o aperfeiçoamento e investimento em britador capaz de fazer o processamento do material. Dessa forma, passou-se a comercializar o material como agregado e o mercado regional o tem aderido para confecção de concreto com boa aceitação. Por esse motivo, a utilização do diabásio se mostrou viável na produção de agregados graúdos, sobrando o pó como resíduo (FORNECEDOR, 2023).

Para verificação da utilização do pó de pedra como substituto parcial do cimento Portland na produção de concretos foi feito um levantamento bibliográfico dos trabalhos publicados nos últimos cinco anos e os principais resultados são apresentados a seguir.

Zheng et al. (2020) utilizaram o pó de pedra de calcário para formular um sistema binário, por meio da aplicação do empacotamento de partículas a fim de melhorar a eficiência do uso do cimento, o qual deram o nome de material cimentício de enchimento reverso. No sistema de enchimento reverso proposto pelos autores os grãos inertes (como calcário e quartzo), que permanecem pós a hidratação do cimento, formam uma estrutura de grãos maiores, e o cimento Portland, por ser mais fino, preenche os vazios dessa estrutura, aumentando então a densidade do material. Os autores afirmam que o uso do cimento pode ser mais eficiente por causa de três fatores: primeiro, uma vez que as partículas finas do cimento irão preencher os vazios das partículas maiores, o consumo de cimento diminui; segundo, a quantidade de água necessária para preencher os grãos é menor que no concreto comum; e terceiro, a utilização de partículas mais finas de cimento permitem uma reação de hidratação mais rápida, acarretando em ganho de resistência mecânica nas primeiras idades. Foi realizado cálculo teórico para fins de comparação com o programa experimental, e ambos indicaram que a densidade máxima de empacotamento pode ser alcançada com um teor de cimento superfino de aproximadamente 25% da mistura. Além disso, os autores observaram que o grau de hidratação do material cimentício pelo enchimento reverso atingiu 93%.

A substituição de areia por pó de pedra na produção de concreto para observar sua influência na resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade, energia de impacto, resistência à abrasão e permeabilidade foi objeto de estudo dos autores Gupta et al. (2019), que realizaram a ação filler do pó de pedra devido à sua quantidade de finos. O teor de substituição da areia por pó de pedra foi de 0% a 100% (incrementos de 10%). Como resultado, para a resistência à compressão, os concretos com até 70% de substituição tiveram desempenho superior ao concreto de referência. Em todas as idades analisadas (7, 28 e 90 dias) o concreto com substituição de 30% da areia pelo pó de pedra teve os maiores resultados de resistência à compressão. Os valores de resistência à flexão, resistência ao impacto e módulo de elasticidade foram superiores para os concretos com teor de substituição de 30% e são justificados pela ação filler do pó de pedra, que empacota a mistura. Para a resistência à abrasão verificou-se que a substituição de até 20% mantém valores próximos ao concreto de referência. A permeabilidade da mistura com 30% de teor de substituição apresentou os melhores resultados e para as substituições de 40% a 90% os resultados foram melhores que os de referência. Para concluir, os autores calcularam os valores de energia incorporada e emissão de dióxido de carbono incorporado para cada metro cúbico de concreto e observaram que a mistura com 30% de substituição permitiu uma redução de energia incorporada de 18,103 MJ/m<sup>3</sup> e que seu valor de emissão de CO<sub>2</sub> foi ligeiramente menor que os demais. Além disso, o custo do concreto reduzia conforme o aumento do teor de substituição da areia pelo pó de pedra.

Os autores Yang et al. (2020) substituíram de 22,2% e 44,4% do cimento pelos pós de pedra de basalto e de calcário na produção de concretos ecológicos de ultra-alto desempenho, utilizando o modelo de Alfred para otimização da dosagem. Os autores observaram aumento da fluidez dos concretos contendo pó de pedra em comparação ao concreto referência, chegando a ser 86,2% mais fluido para o concreto contendo pó de basalto e 58,6% mais fluido para o concreto contendo pó de calcário. Quanto a resistência à compressão, foi observado que os concretos contendo pó de pedra tiveram valores menores em relação ao concreto referência aos 7 dias, melhorando o desempenho nas idades de 28 e 56 dias. Conforme o aumento do teor de substituição do cimento por pó de pedra houve uma redução do ganho de resistência para todas as idades analisadas. Ainda assim, todos os concretos atingiram cerca de 120 MPa aos 28 dias. Quanto à resistividade elétrica, os autores observaram um aumento dos valores em comparação ao concreto referência. Enquanto o traço sem pó de pedra obteve 2,12  $\Omega$ .m os concretos contendo pó de basalto obtiveram 3,49  $\Omega$ .m e 4,66  $\Omega$ .m para 22,2% e 44,4% de substituição, respectivamente, e os concretos contendo pó de calcário obtiveram 2,35  $\Omega$ .m e 3,09  $\Omega$ .m para os teores de 22,2% e 44,4% de substituição, respectivamente. De modo geral, os autores concluíram que, sem alteração da composição de baixas relações

água/cimento, com diminuição do consumo de cimento por substituição de pó de pedra para garantia de concretos mais sustentáveis. Por fim, os autores concluíram que as emissões de CO<sub>2</sub> reduziram significativamente, comprovando que o concreto ecológico de ultra-alto desempenho pode ser considerado um material de construção sustentável.

Kumar (2021) estudou os efeitos da substituição parcial do cimento por pó de pedra nas propriedades do concreto (para teores de substituição de 0%, 10%, 20%, 30% e 40%) com o objetivo de encontrar a porcentagem ótima de pó de pedra como material de enchimento. Os resultados de *slump test* para o concreto no estado fresco diminuíram conforme o teor de substituição aumentava e o autor atribuiu estes resultados à forma, textura e tamanho das partículas. Na resistência à compressão obtiveram-se resultados satisfatórios, sendo a mistura de 40% de substituição com valores próximos da referência e as demais com valores superiores. A incorporação do pó de pedra mostrou um aumento significativo na resistência à flexão de todos os concretos, sendo o maior valor de 5,51 MPa para o teor de 20% de substituição. O autor relaciona o aumento da resistência à flexão e da resistência à compressão à capacidade de micro enchimento do pó de pedra na mistura de concreto e ao aumento da formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), visto que, além da contribuição física, o pó de pedra, neste caso, também apresentou reatividade pozolânica. Ensaios de velocidade da propagação de onda ultrassônica e de módulo de elasticidade verificaram que os concretos com teores de 10%, 20% e 30% de substituição tiveram valores melhores que o de referência. O concreto com 40% de teor de substituição atingiu 99,57% do valor da propagação de onda ultrassônica e 97,21% do valor de módulo de elasticidade quando comparado com a referência. Dessa forma, observando os resultados de todos os ensaios realizados, o autor concluiu que o pó de pedra pode ser utilizado em até 20% como substituto do cimento, sendo esse o teor de substituição ideal.

O estudo de Ding et al., (2021) visou esclarecer a possibilidade e as vantagens de se produzir concreto de ultra-alto desempenho com baixíssimo teor de cimento, substituindo-o por pó de pedra em teores de 33%, 39%, 44%, 50%, 56% e 61%. Conforme os teores de substituição subiram a resistência à compressão teve lenta tendência de queda, resultando nos valores de 109 MPa, 108 MPa, 106 MPa, 104 MPa e 100 MPa para as cinco primeiras misturas, respectivamente. Os autores observaram que, quando a quantidade de cimento foi reduzida para cerca de 245 kg/m<sup>3</sup> a porosidade aumentou de tal maneira que prejudicou as propriedades reológicas do material e conseqüentemente suas propriedades mecânicas, tendo o teor de 61% de substituição o que apresentou resultado de resistência à compressão de cerca de 80 MPa. Como conclusão do estudo, mesmo com a queda de resistência das misturas de até 56% de substituição, os valores de resistência

à compressão mantiveram-se dentro de uma faixa aceitável para o tipo de concreto estudado. Além disso, o estudo concluiu que o teor ótimo de consumo de cimento de 280 kg/m<sup>3</sup> é o mínimo recomendado para garantia do comportamento do concreto no estado fresco.

Ainda sobre a utilização de pó de pedra na produção de concretos, Campos (2019) e Campos, Klein e Marques Filho (2020) elaboraram 36 diferentes composições de materiais finos com teores de sílica ativa variando de 6% a 16% e teores de pó de pedra variando de 10% a 20%, ambos como substituição parcial do cimento, em massa, e em intervalos que variavam de 2% em 2%. A partir do modelo CPM de De Larrard (1999) foram calculadas as densidades de empacotamento para cada combinação e observou-se que a combinação contendo 66% de cimento, 14% de sílica ativa e 20% de pó de pedra foi a que resultou na maior densidade de empacotamento.

Além disso, Campos et al (2020) utilizaram os modelos CPM de De Larrard (1999) e Modelo de Empacotamento de Compactação-Interação (CIPM, do inglês *Compaction-Interaction Packing Model*) da Fennis (2011) para calcular a densidade de empacotamento de pastas de cimento, sílica ativa e pó de pedra, com a sílica variando de 0 a 16% e o pó de pedra de 0 a 20%, ambos também com intervalos de 2% em 2% na substituição do cimento por peso. Com validação do método úmido de Wong e Kwan (2008), foi observado que o teor de 20% da substituição de cimento por pó de pedra, em massa, garantiu o maior valor de densidade de empacotamento da mistura.

Por fim, Campos et al. (2022) dosaram concreto ecoeficiente a partir do modelo de Alfred com o mesmo teor de substituição do cimento por pó de pedra em 20% e concluíram que a mistura com este teor de substituição apresentou maior densidade de empacotamento quando comparada ao traço sem a presença do pó de pedra.

### 2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

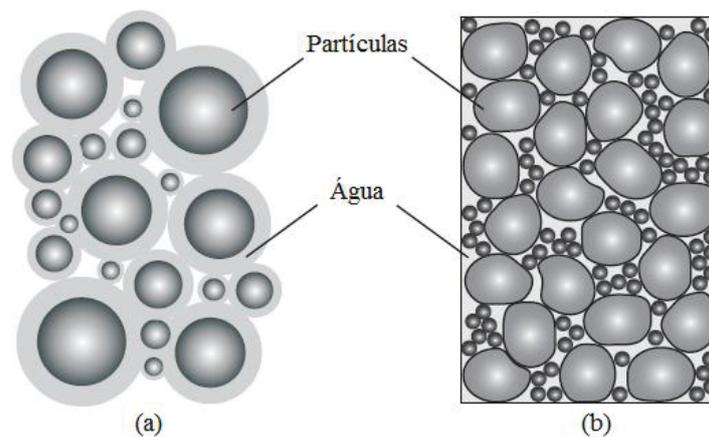
O empacotamento de partículas permite melhorar o esqueleto granular da mistura de concreto com uma adequada proporção de agregados e materiais finos, ocasionando um menor consumo de cimento e menor porosidade, melhorando a resistência e durabilidade do material (LONDERO, 2016). A densidade do empacotamento depende da forma dos grãos, da distribuição granulométrica e dos métodos de compactação, portanto, para melhorar o adensamento da mistura é importante diminuir o volume de vazios (KWAN e MORA, 2001).

A otimização do adensamento dos materiais finos ocorre com a adição de materiais que complementam a granulometria do cimento, dessa forma, as partículas menores ocupam os vazios

deixados pelas partículas maiores (NELSON e GUILLOT, 2006). Mehta e Monteiro (2014) explicam que a maior parte da água utilizada na mistura do concreto é evaporável, deixando poros vazios na pasta endurecida. Para diminuir o consumo de água faz sentido melhorar o empacotamento dos grãos, assim, os poros que antes deveriam ser preenchidos pela água estarão preenchidos por materiais mais finos.

De forma geral, Fennis (2011) explica que existem duas teorias sobre o consumo de água na mistura. A primeira delas diz que o consumo de água depende da área superficial das partículas, ou seja, quanto menor a partícula, maior é a área superficial e maior é o consumo de água. A segunda pressupõe que, quando as partículas menores preenchem o máximo de vazios possíveis na mistura, a quantidade de água necessária é reduzida. Apesar de parecerem contraditórias, existem modelos que suportam ambas as teorias. Os modelos se baseiam em um sistema que, devido à utilização de diferentes materiais finos na mistura e da função do aditivo superplastificante de repelir as partículas e evitar a aglomeração, a água preenche os vazios que ainda restam na mistura e um excesso de água é suficiente para envolver as superfícies das partículas, conforme apresentado na Figura 5. As duas situações são passíveis de acontecer e são observadas em momentos diferentes. Inicialmente ocorre um preenchimento dos vazios pelas partículas mais finas, liberando mais água; posteriormente, a área superficial demandará uma quantidade maior de água.

Figura 5 - TEORIA DA ÁGUA ENVOLTA NA SUPERFÍCIE DE CADA PARTÍCULA (A) E TEORIA DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EM QUE A ÁGUA PREENCHE OS VAZIOS RESTANTES E ENVOLVE AS PARTÍCULAS (B)



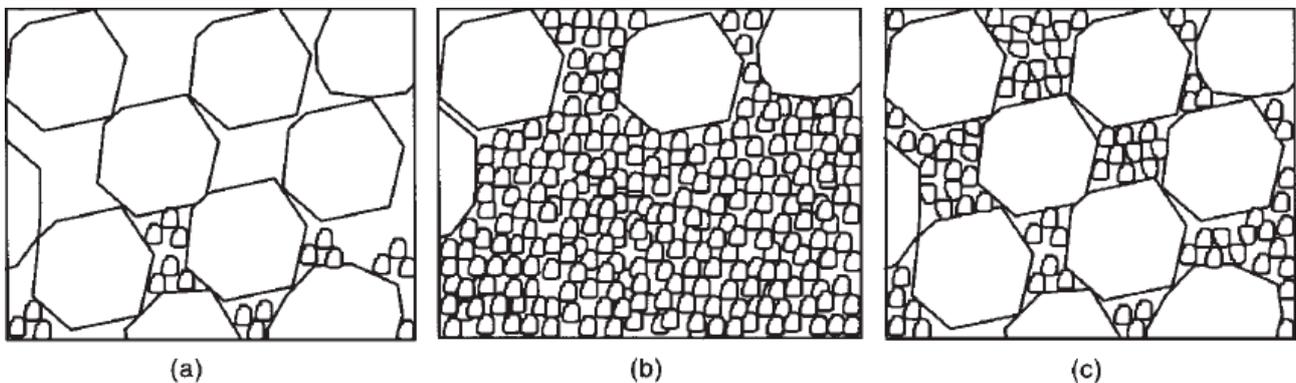
FONTE: Traduzido de FENNIS (2011).

Existem alguns fatores que influenciam o empacotamento de um conjunto de partículas de acordo com Oliveira et al. (2000). O primeiro fator é quanto aos diferentes formatos das partículas, quanto menos esférica a partícula for, menor será a densidade de empacotamento da mistura que a contenha devido à existência de atrito no contato entre as partículas de superfícies irregulares. O

segundo fator é a existência de partículas com distribuições granulométricas variadas que alteram a condição de dispersão inicial. Outro fator é que partículas porosas e irregulares, geralmente, resultam em misturas com densidade de empacotamento menor, portanto, para obter empacotamentos mais densos é necessário que se utilize partículas com porosidade interna fechada. A distribuição granulométrica determina o aumento ou não da densidade, para menor porosidade os grãos menores preenchem os grãos maiores. Por fim, a compactação interfere na acomodação das partículas; quando realizada com energia adequada é possível uma redução dos vazios sem ocorrência de segregação.

O empacotamento de partículas, de acordo com De Larrard (1999), além de melhorar o adensamento da mistura, faz com que o arranjo das partículas no sistema esteja mais homogêneo quando aplicado um conjunto de partículas de diferentes diâmetros e uma determinada compactação. O concreto, quando no estado fresco, é submetido à força da gravidade, choques externos e/ou vibrações. Estas movimentações podem resultar em separação das partículas na mistura, propiciando a segregação. A segregação do concreto pode reduzir parâmetros de durabilidade e prejudicar os resultados de suas propriedades finais, como a resistência à compressão, módulo de elasticidade e retração. A compactação, ao distribuir as partículas de maneira otimizada pela mistura empacotada, evita que ocorra a segregação do concreto. Para melhor compreensão, a Figura 6 apresenta três misturas granulares sujeitas à força gravitacional.

Figura 6 - DIFERENTES PROPORÇÕES DE PARTÍCULAS NA MISTURA



a) Excesso de partículas maiores b) Excesso de partículas menores c) Matriz homogênea

FONTE: DE LARRARD (1999).

É possível observar que quando as partículas maiores são dominantes, as partículas menores preenchem os espaços deixados pelas maiores, mas não o suficiente para preencher todo o vazio da matriz (a) e que, quando as partículas menores são dominantes, as partículas maiores tendem a permanecer acumuladas em uma região da mistura (b). Quando há um adensamento teórico ótimo da mistura, observa-se que nenhuma partícula fica solta ou se acumula (c), impedindo assim o fenômeno da segregação (DE LARRARD, 1999).

Segundo Daminieli (2013), devido ao empacotamento de partículas, a quantidade de poros intergranulares é reduzida e, conseqüentemente, a porosidade do concreto no estado endurecido tende a diminuir. O autor afirma que, para o mesmo consumo de cimento, o acréscimo de finos inertes pode variar o resultado da resistência mecânica. Dessa forma, para uma relação água/cimento que permanecerá constante, as características físico-químicas das partículas finas terão influência nas propriedades do concreto.

### 2.3.1 Métodos experimentais

Os métodos experimentais para determinar a densidade de empacotamento são distintos quando se comparam agregados graúdos e miúdos dos materiais finos. Para os agregados miúdos, graúdos ou uma mistura dos dois, a densidade de empacotamento é definida pela determinação da massa unitária e do índice de vazios, em estado compactado ou solto (ABNT, 2021). A Tabela 2 apresenta as normas utilizadas para determinar a densidade de empacotamento dos agregados.

Tabela 2 - NORMAS BRASILEIRAS PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DOS AGREGADOS

Densidade de empacotamento de agregados		
NBR 16916	Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água	ABNT (2021a)
NBR 16917	Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água	ABNT (2021b)
NBR 16972	Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios	ABNT (2021c)

FONTE: ABNT (2021a), ABNT (2021b) e ABNT (2021c).

Com a determinação da massa unitária e da massa específica dos agregados, calcula-se a densidade de empacotamento pela Equação 3, representada pelo total menos o índice de vazios.

$$\beta = 1 - \frac{ME - MU}{ME} \quad (3)$$

Onde:

$\beta$ : densidade de empacotamento;

ME: massa específica;

MU: massa unitária.

Entretanto, para os materiais finos, a determinação da densidade de empacotamento não é tão simples quanto a dos agregados. O maior desafio se dá pela atração de diversos tipos de forças existentes entre as partículas mais finas. Forças de origem coloidal surgem de interações entre partículas e são afetadas pela polarizabilidade da água. Os grãos menores se atraem e tendem a

flocular quando a atração de Van der Waals entre as partículas é dominante ou quando as superfícies das partículas possuem atração eletrostática entre cargas diferentes (FELEKOĞLU, 2007).

De acordo com Wong e Kwan (2008) existem diferentes métodos na literatura que permitem a medição da densidade de empacotamento que são classificados em métodos diretos e indiretos. O método de empacotamento a seco é um método direto que mede a densidade aparente dos agregados para determinar o teor de vazios e a densidade de empacotamento. Este método pode ser feito para agregados graúdos em situação compactada ou não compactada e para finos em condição compactada. Porém, a densidade aparente de um pó depende muito do seu estado de compactação e do tratamento aplicado na amostra. Em geral, o método de empacotamento a seco tende a superestimar o conteúdo de vazios e a subestimar a densidade de empacotamento de partículas finas. Já os métodos indiretos consideram o conteúdo mínimo de água necessária para formar uma pasta com os materiais cimentícios, medindo a densidade de empacotamento de forma indireta por meio da consistência. Porém, nos métodos indiretos, não é possível provar que aquela demanda de água para a consistência especificada seja realmente suficiente para preenchimento dos vazios. A floculação é um fator que não é levado em consideração, e, como ela ocasiona a formação de vazios internos, não é possível confirmar que a quantidade de água demandada foi suficiente para preencher todos estes vazios. Além disso, o conteúdo de ar presente na pasta é quase sempre negligenciado, resultando em subestimação do conteúdo de vazios e superestimação da densidade de empacotamento. A Tabela 3 apresenta alguns métodos úmidos para determinação da densidade de empacotamento de partículas finas.

Tabela 3 - MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DE FINOS

Autores	Método	Tipo
De Larrard (1999)	Demanda de água - França	Direto
Puntke (2002)	Demanda de água - Alemanha	Direto
Marquardt (2001)	Energia de mistura	Direto
NEN-EN 13286-2	Teste Proctor	Direto
Miller (1996)	Consolidação centrífuga	Direto
Okamura (1995)	Demanda de água - Japão	Indireto
Krieger e Dougherty (Mansoutre, 1999)	Reologia	Indireto

FONTE: FENNIS (2011).

Fennis (2011) realizou uma comparação dos métodos apresentados na Tabela 3 e observou que alguns testes obtiveram melhores resultados que outros. Dentre os testes, os mais indicados são os que conseguem minimizar ao máximo a presença de ar na mistura, sendo os testes de demanda de água da França e o de energia de mistura os que mais se aproximam deste objetivo. O teste de consolidação centrífuga consegue tirar o máximo de ar da mistura, porém não é o que apresenta

maior resultado de densidade de empacotamento com apenas uma aplicação. Para que sua utilização seja considerada uma alternativa eficaz são necessárias no mínimo três medições e uma análise indireta da densidade de empacotamento. Já os testes indiretos apresentaram maior imprecisão e não são recomendados para fazer uma estimativa precisa da densidade máxima de empacotamento de um pó. Por fim, o teste de energia de mistura apresentou um dos melhores resultados, além de não depender do técnico que executa o teste e de ser necessária apenas uma única medição, resultando em um método mais rápido e preciso.

A fim de minimizar os erros causados pelos diversos métodos secos e úmidos disponíveis, Wong e Kwan (2008) propuseram um método úmido para determinar a densidade de empacotamento de partículas finas. O método leva em consideração que a água e o aditivo influenciam na interação entre as partículas finas da mistura e na formação de coagulação e, portanto, na densidade de empacotamento que mais se aproxima da realidade. O método consiste na produção de pastas com diferentes relações água/finos que terão suas massas e volumes conhecidos e que serão misturadas de forma metódica para que se mantenham saturadas.

Seguem os passos do método úmido: definir a relação água/finos e pesar a quantidade de água, materiais finos e superplastificante; se forem vários os materiais finos, pré misturá-los a seco por 2 minutos; adicionar toda a água no recipiente de mistura; adicionar metade dos materiais finos e do superplastificante no recipiente e misturar em velocidade baixa por 3 minutos; dividir o restante dos materiais finos e do superplastificante em quatro partes iguais, adicionar uma porção de cada vez no recipiente e misturar em velocidade baixa por 3 minutos cada; transferir a mistura em um molde cilíndrico preenchendo em excesso (caso haja compactação, aplicar nesta etapa), retirar o excesso com uma régua e pesar o material; nesta fase é opcional medir a consistência usando o aparelho de Vicat; repetir todas as etapas utilizando valores de água/finos menores até que a densidade de empacotamento seja encontrada; a partir disso a relação de vazios (Equação 6), a relação de ar (Equação 7) e a concentração de sólidos (Equação 8) podem ser determinadas (WONG e KWAN; 2008).

Inicialmente, pelas Equações 4 e 5 encontram-se os volumes de sólidos dos materiais finos e os volumes de água das pastas, utilizando a densidade de cada material constituinte, bem como sua proporção na mistura. Observa-se que na Equação 4 podem ter acréscimos ou não de mais tipos de materiais sólidos para compor o volume total.

$$V_c = \frac{M}{\rho_w u_w + \rho_\alpha R_\alpha + \rho_\beta R_\beta + \rho_Y R_Y} \quad (4)$$

Onde:

$V_c$ : volume dos sólidos dos materiais finos ( $m^3$ );

$M$ : massa de pasta que preenche o recipiente (kg);

$\rho_w$ : densidade da água ( $kg/m^3$ );

$u_w$ : relação água/finos, em volume;

$\rho_\alpha$ ,  $\rho_\beta$  e  $\rho_Y$ : densidade dos demais materiais sólidos ( $kg/m^3$ );

$R_\alpha$ ,  $R_\beta$  e  $R_Y$ : volume do material  $\alpha$ ,  $\beta$  ou  $Y$  pelo volume total de sólidos (-).

$$V_w = u_w \times V_c \quad (5)$$

Onde:

$V_w$ : volume de água ( $m^3$ );

$u_w$ : relação água/finos, em volume;

$V_c$ : volume dos sólidos dos materiais finos ( $m^3$ ).

$$u = \frac{(V - V_c)}{V_c} \quad (6)$$

$$u_a = \frac{(V - V_c - V_w)}{V_c} \quad (7)$$

Onde:

$u$ : relação de vazios (-);

$V$ : volume do recipiente ( $m^3$ );

$V_c$ : volume dos sólidos dos materiais finos ( $m^3$ );

$u_a$ : relação de ar (-);

$V_w$ : volume de água ( $m^3$ ).

A densidade de empacotamento é determinada pelo maior valor de concentração de sólidos encontrado pela Equação 8.

$$\phi = \frac{V_c}{V} \quad (8)$$

Onde:

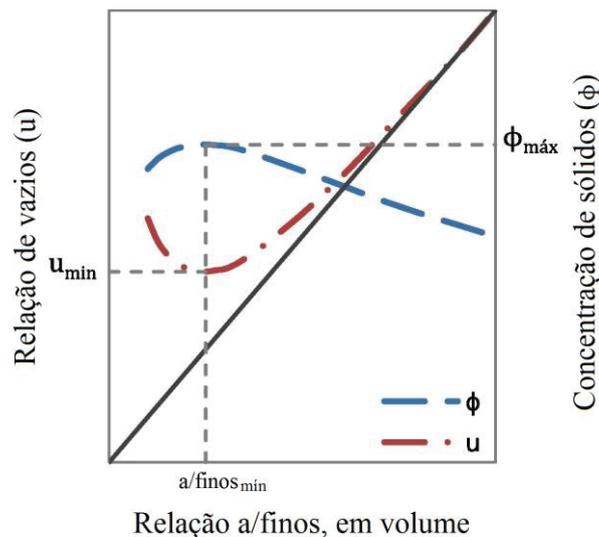
$\phi$ : concentração de sólidos (-);

$V_c$ : volume dos sólidos dos materiais finos ( $m^3$ );

$V$ : volume do recipiente ( $m^3$ ).

Observa-se que a Equação 6 está relacionada com o volume total do recipiente sem os sólidos. Na Equação 8 nota-se que a concentração de sólidos é a razão entre o volume total de sólidos pelo volume do recipiente. Ambos os resultados, tanto para a relação de vazios quanto para a concentração de sólidos possuem relação com a condição de dispersão das partículas na mistura. A Figura 7 ilustra um gráfico usual dos resultados obtidos com o método.

Figura 7 - CURVAS TÍPICAS DA RELAÇÃO DE VAZIOS E DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS DE UMA MISTURA



FONTE: Traduzido de KLEIN et al. (2016).

Nota-se, na Figura 7, que com o método é possível obter a máxima concentração de sólidos ( $\phi_{máx}$ ) e a mínima relação de vazios ( $u$ ) pela correspondente proporção da relação água/finos. Observa-se que para altas relações água/finos a concentração de sólidos diminui e a relação de vazios aumenta. Isso mostra que uma certa quantidade de água nas misturas é suficiente para preencher os vazios entre as partículas e que um excesso de água acaba dispersando uma partícula da outra. Quando a relação água/finos é reduzida, o excesso de água ao redor dos grãos é diminuído e as partículas se aproximam, aumentando a concentração de sólidos e diminuindo a relação de vazios.

Isso ocorre até que as partículas se aproximem a ponto de ficarem em contato umas com as outras, mantendo o sistema empacotado (KLEIN et al., 2016).

### 2.3.2 Modelos de empacotamento de partículas

Os modelos de empacotamento de partículas são comumente categorizados em três diferentes grupos, sendo estes o grupo da distribuição granulométrica ótima, o de modelos analíticos e o de modelos de elementos discretos. Este último grupo, de modelos de elementos discretos, engloba os modelos que calculam a densidade de empacotamento máxima por meio de programas computacionais, e, como as pessoas que produzem concreto preferem contar com a experiência prática e diretrizes já familiares, tais modelos ainda não são muito utilizados (FENNIS, 2011; CAMPOS, 2019).

O grupo de distribuição granulométrica ótima busca uma combinação da curva ideal para minimizar os vazios, sendo Feret um dos primeiros a publicar sobre empacotamento de partículas em 1892. Depois dele, autores como Fuller e Thompson em 1907, Bolomey em 1935, Caquot em 1937 e Faury em 1953 deram continuidade nas publicações sobre o tema. Posteriormente, vieram os modelos de Fuller e Thompson (1907) e Andreasen e Andersen (1930), precursor do modelo de Alfred. O modelo de Alfred, ou modelo de Andreasen e Andersen modificado, foi elaborado por Funk e Dinger em 1980 (FENNIS, 2011).

Por fim, os modelos analíticos calculam analiticamente a densidade de empacotamento de um conjunto de partículas, baseados em equações matemáticas que mostram a interação geométrica entre partículas de diferentes tamanhos. O modelo de Furnas, por exemplo, surgiu em 1929 e foi precursor da maioria dos modelos que surgiram depois. Na sequência surgiram os modelos desenvolvidos por Westman e Hugill (1930), Bem Mirar e Le Goff (1967), Toufar et al. (1976), Stovall et al. (1986) e Yu e Standish (1987). O modelo de Toufar et al. (1976) foi descrito para calcular o empacotamento de misturas com limitações de diâmetros. Já Dewar em 1999 utilizou a relação de vazios para calcular o empacotamento. Paralelamente, em 1999, surgiu o CPM, criado por De Larrard, e um dos principais modelos utilizados atualmente (FENNIS, 2011 e CAMPOS, 2019).

O modelo de Alfred do grupo de distribuição granulométrica ótima e o modelo CPM do grupo de modelos analíticos são os utilizados na pesquisa e, portanto, estão mais detalhados nos itens a seguir.

### 2.3.2.1 Modelo de Alfred

O modelo de Alfred é uma evolução de modelos anteriores, que se deu início com Fuller e Thompson em 1907, no qual foi proposta uma curva de distribuição contínua de partículas, representada pela Equação 9 (FUNK e DINGER, 1980 apud CAMPOS, 2019).

$$\frac{CPFT}{100} = \left( \frac{D}{D_{m\acute{a}x}} \right)^q \quad (9)$$

Onde:

CPFT: percentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a d;

D: diâmetro da partícula, igual a abertura da peneira (mm);

D<sub>máx</sub>: diâmetro da maior partícula (mm);

q: módulo de distribuição (fator de ajuste).

Posteriormente, alguns pesquisadores propuseram melhorar a curva apresentada. Andreasen e Andersen em 1930 tentaram utilizar um fator de ajuste entre 0,33-0,50, valores obtidos de forma experimental e que por isso existe variabilidade conforme as características das partículas. Cinquenta anos depois, em 1980, Funk e Dinger introduziram na equação um tamanho finito para a menor partícula, dado que nas distribuições reais existe sempre um diâmetro mínimo para as partículas. Além disso, definiram o fator de ajuste em 0,37, valor que proporciona o melhor empacotamento teórico possível de acordo com simulações feitas em computador, e assim chegaram a Equação 10 apresentada a seguir (FUNK e DINGER, 1980 apud CAMPOS, 2019).

$$\frac{CPFT}{100} = \frac{D^q - D_{m\acute{i}n}^q}{D_{m\acute{a}x}^q - D_{m\acute{i}n}^q} \quad (10)$$

Onde:

CPFT: percentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a d;

D: diâmetro da partícula, igual a abertura da peneira (mm);

D<sub>máx</sub>: diâmetro da maior partícula (mm);

D<sub>mín</sub>: diâmetro da menor partícula (mm);

q: módulo de distribuição (fator de ajuste).

Nota-se que a Equação 9 não leva em consideração o diâmetro mínimo das partículas, admitindo assim que exista um tamanho infinito de partículas cada vez mais finas, o que não condiz com a realidade. Fato este que foi corrigido pela Equação 10. Além disso, em todos estes modelos é

importante observar que, para determinação da curva granulométrica ideal, é levado em consideração apenas o diâmetro das partículas e não a sua morfologia (LONDERO et al., 2017).

Diferentes valores do módulo de distribuição resultam em diferentes resultados de empacotamento visto que há alteração nas proporções entre partículas menores e maiores (YU, SPIESZ e BROUWERS, 2014). Valores de  $q$  mais altos, como 0,50, aumentam a proporção de agregados graúdos e valores de  $q$  mais baixos, como 0,25, aumentam a proporção de finos na mistura (HÜSKEN e BROUWERS, 2008). Valores de  $q$  menores que 0,37 proporcionam maior distanciamento entre as partículas dos agregados, aumentando a fluidez da mistura. Valores de  $q$  próximos a 0,20 favorecem a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, aumentando a fluidez de faixas granulométricas de partículas finas. E valores de  $q$  inferiores a 0,20 podem aumentar tanto o volume de partículas menores que acaba excedendo o índice de vazios existente entre as partículas maiores, diminuindo a fluidez da mistura (OLIVEIRA et al., 2000).

### 2.3.2.2 Modelo CPM (Modelo de Empacotamento Compressível)

Em 1999, De Larrard propôs um modelo que, levando em consideração o tipo de compactação da mistura, determina a interpolação com a densidade real. Este modelo é definido por meio da compactação virtual, que é definida como a máxima densidade de empacotamento potencial de uma mistura, considerando que as partículas tivessem sido colocadas uma por uma de forma a preencher os vazios e ocupassem o menor espaço possível (DE LARRARD, 1999).

O Modelo de Empacotamento Compressível, CPM (*Compressible Packing Model*) utiliza três parâmetros para prever a densidade de empacotamento polidispersa: a dimensão dos grãos, conforme descrição das curvas granulométricas; a forma dos grãos, considerada a partir da densidade de empacotamento de cada uma das classes; e o método de execução do empacotamento. Por meio da Equação 11, o modelo CPM consiste em obter o menor valor para a densidade de empacotamento virtual e posteriormente obter a densidade de empacotamento efetiva.

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[ 1 - \beta_i + b_{ij} \times \beta_i \left( 1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \times y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[ 1 - a_{ij} \times \frac{\beta_i}{\beta_j} \right] \times y_j} \quad (11)$$

Sendo:

$\gamma_i$ : empacotamento virtual;

$\beta_i$  e  $\beta_j$ : densidade de empacotamento para cada classe;

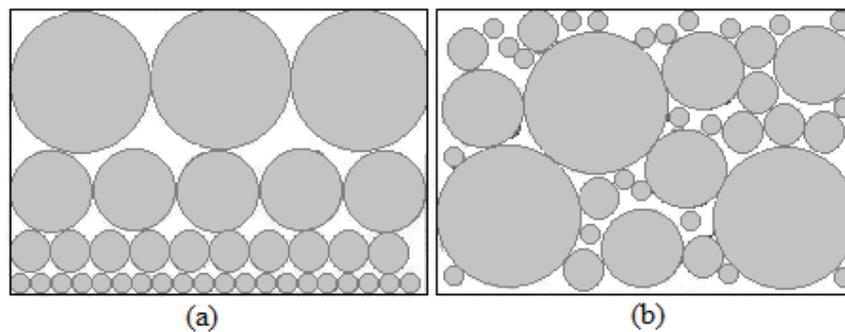
$\gamma_j$ : volume de material de cada classe;

$a_{ij}$ : efeito de afastamento;

$b_{ij}$ : efeito parede.

Para o cálculo da densidade de empacotamento virtual é considerado que cada partícula do sistema se posicione uma a uma em um arranjo ideal que permaneça em sua forma original para atingir a maior densidade possível. Porém, não é o que acontece na prática, sendo na verdade um arranjo de partículas bastante aleatório. Por isso, o modelo também calcula a densidade de empacotamento real. Esse sistema de arranjos pode ser visto na Figura 8 (DE LARRARD, 1999).

Figura 8 - POSICIONAMENTO DAS PARTÍCULAS UMA A UMA (A) E ARRANJO ALEATÓRIO (B)

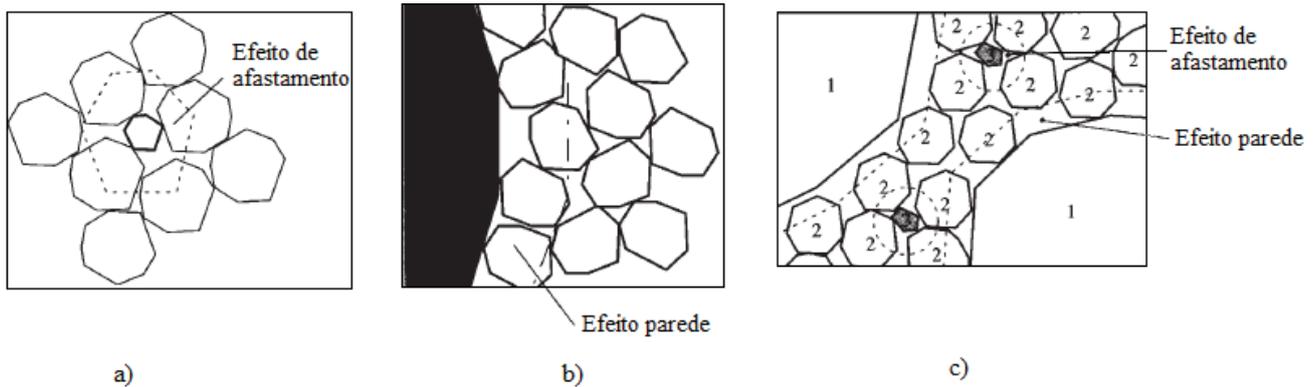


FONTE: Adaptado de OLIVEIRA et al. (2000).

Com o modelo CPM determina-se a densidade de empacotamento de conjuntos granulares polidispersos compostos por diferentes classes de tamanhos de partículas. Primeiramente, determina-se a densidade de empacotamento experimental de todas as partículas presentes na mistura, pois estes valores serão alguns dos dados de entrada no modelo (DE LARRARD, 1999). Como já visto, para os agregados, a densidade de empacotamento experimental pode ser obtida pela NBR 16972 (ABNT, 2021c) e, para os finos, a densidade de empacotamento experimental pode ser obtida pelo método úmido de Wong e Kwan.

Os demais dados de entrada do modelo CPM desenvolvido por De Larrard (1999) são o número de classes, o diâmetro de cada classe e a proporção em volume dos materiais. Com os dados de entrada, o modelo CPM leva em consideração os efeitos de interação existentes entre as partículas, sendo eles o efeito de afastamento e o efeito parede. Estes efeitos podem ser observados na Figura 9.

Figura 9 - INTERAÇÕES EXISTENTES ENTRE AS PARTÍCULAS NA MISTURA



a) Efeito de afastamento b) Efeito parede c) Interação de efeitos

FONTE: Traduzido de DE LARRARD (1999).

A Figura 9 mostra a interação entre as partículas consideradas pelo modelo CPM. O efeito de afastamento (a) é caracterizado quando uma determinada classe de partículas é maior que a dimensão dos vazios deixados pela classe de tamanho imediatamente superior. Já o efeito parede (b) ocorre quando o diâmetro de partículas de uma classe é tão superior a um diâmetro de outra classe a ponto de formar uma barreira contra as partículas menores, aumentando o número de vazios na região de contato entre a partícula superior e as partículas menores. Por fim, a interação entre os efeitos (c) pode ocorrer em um conjunto granular polidisperso. Para calcular estes efeitos, utilizam-se as Equações 12 e 13 apresentadas na sequência.

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1,02}} \quad (12)$$

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1,50} \quad (13)$$

Onde:

$a_{ij}$ : efeito de afastamento;

$b_{ij}$ : efeito parede;

$d$ : abertura da peneira ( $\mu\text{m}$ );

$d_i$ : menor dimensão ( $\mu\text{m}$ );

$d_j$ : dimensão seguinte de  $d_i$  ( $\mu\text{m}$ ).

Pela Equação 14, por fim, obtém-se a densidade de empacotamento real ( $\phi$ ) que é calculada de acordo com o método de compactação utilizado na mistura (compactações secas ou úmidas).

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{Y_i}} \quad (14)$$

Onde:

K: valor referente ao processo de compactação;

$y_j$ : volume de material de cada classe;

$\beta_i$ : densidade de empacotamento da classe;

$Y_i$ : empacotamento virtual;

$\phi$ : densidade de empacotamento real.

De Larrard (1999) apresenta diversos tipos de energia de compactação que foram medidos experimentalmente, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - VALORES DO FATOR DE COMPACTAÇÃO K

Empacotamento seco				Empacotamento úmido	
Lançamento simples	Apiloamento	Vibração	Vibração e compressão de 10 kPa	Demanda de água para uma pasta lisa	Proctor teste
(Cintré, 1988)	(Kantha Rao e Krishnamoorthy, 1993)	(Joisel, 1952)	(De Larrard et al., 1994)	(De Larrard, 1999)	(Fennis, 2011)
4,1	4,5	4,75	9	6,7	12

FONTE: Adaptado de DE LARRARD (1999) e de FENNIS (2011).

É possível observar dentro do grupo de empacotamento seco que o valor atribuído ao fator de compactação (K) é lógico, mostrando que, quanto mais energia é dada à mistura, maior é o valor do índice de compactação. Além disso, para o empacotamento virtual é considerado que o valor de K tende ao infinito, uma vez que não há limitação de tamanho mínimo de partículas finas e que dessa forma os vazios vão ser preenchidos infinitamente (DE LARRARD, 1999).

### 2.3.3 Durabilidade do concreto

Fennis (2011) afirma que as propriedades da durabilidade dos concretos precisam ser analisadas para cada mistura de forma independente, uma vez que os ligantes e finos de enchimento influenciam diretamente na densidade da matriz. A aglomeração das partículas mais finas pode ocasionar aprisionamento da água nos vazios internos que são formados e assim prejudicar o grau de hidratação do cimento (GRAZIA et al., 2019). Por outro lado, Damineli (2013) afirma que, na

existência de uma alta densidade de empacotamento, as partículas ficam mais próximas e os poros intragranulares diminuem, reduzindo o teor de água necessário para preencher os vazios. Dessa forma, quando houver redução do consumo de água, o concreto poderá ser menos poroso e mais resistente.

Segundo Mehta e Monteiro (2014) a água é um dos principais fatores que interfere na deterioração do material por ter moléculas pequenas que conseguem penetrar facilmente nos poros mais finos e por transportar os mais variados agentes agressivos para o interior do concreto. Efeitos físicos como desgaste da superfície, fissuração devido à cristalização de sais nos poros do concreto e exposição a temperaturas extremas são os que interferem negativamente na durabilidade. Além desses, os efeitos químicos que também contribuem negativamente são as reações expansivas de ataque por sulfato, a reação álcali agregado, a lixiviação da pasta de cimento e a corrosão das armaduras. Os problemas se agravam quando o concreto está exposto em ambiente agressivo e a importância da análise das manifestações físicas e químicas é essencial para entendimento da durabilidade.

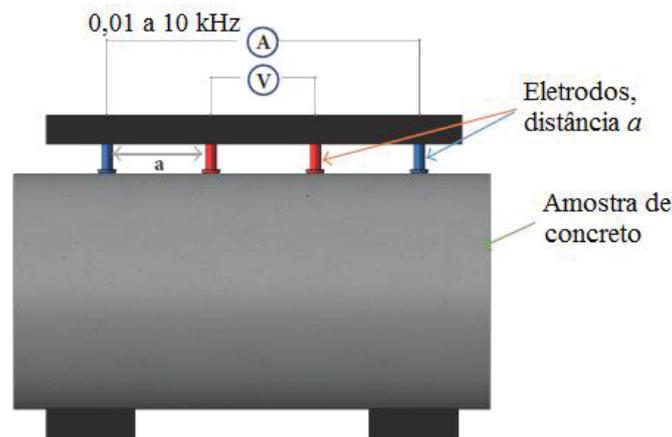
Londero (2016) reforça que a verificação dos parâmetros de durabilidade se torna mais importante quando existem alterações significativas na composição do concreto, como por exemplo a redução do consumo de cimento. Ensaio não destrutivo são uma forma simples de verificar se o concreto sofre algum tipo de manifestação patológica sem que haja danos à peça ou ao corpo de prova ensaiado.

Dentre esses ensaios, a resistividade elétrica é a capacidade do concreto de resistir à passagem de corrente elétrica. Seu princípio de medição da corrente resultante baseia-se na aplicação de uma diferença de potencial entre eletrodos posicionados em duas faces do concreto. Fatores como relação água/cimento, tipo e quantidade de agregados, consumo de cimento, adições minerais, aditivos químicos, grau de hidratação do cimento, temperatura, umidade relativa, presença de armadura, camadas superficiais e ações de agentes agressivos podem influenciar na resistividade elétrica do concreto (JESUS, 2018).

O ensaio de resistividade elétrica é realizado para identificar o quanto o concreto resiste à passagem de corrente elétrica no seu interior. Quanto maior o resultado do ensaio, maior é a capacidade do concreto de resistir à passagem de corrente, e dessa forma, pode-se presumir que menos poroso é o material. Além disso, o ensaio de resistividade elétrica é uma técnica que permite avaliar se o concreto está mais ou menos sujeito à corrosão de armaduras. Se a resistividade elétrica do concreto for baixa o potencial de corrosão é alto (LAGE, 2018).

O método de Wenner, ou método dos quatro eletrodos, é o mais utilizado para a determinação da resistividade elétrica (ZAGO, 2019). Por meio dele, uma corrente elétrica alternada é aplicada por dois eletrodos externos enquanto que o potencial elétrico é medido por dois eletrodos internos, sendo todos os eletrodos lineares e igualmente espaçados pela superfície do concreto, conforme ilustrado na Figura 10 (AZARSA e GUPTA, 2017).

Figura 10 – MÉTODO DE WENNER DOS QUATRO ELETRODOS



FONTE: Traduzido de AZARSA e GUPTA (2017).

A resistividade elétrica é uma propriedade que independe da geometria do material, podendo ser calculada como a razão entre a tensão aplicada (V) e a corrente resultante (I) multiplicada por um fator dependente do tamanho e da forma da amostra bem como da distância entre os eletrodos conforme apresentado na Equação 15 (POLDER et al, 2000; LAYSSI et al, 2015; AZARSA e GUPTA, 2017).

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \left( \frac{V}{I} \right) \quad (15)$$

Onde:

$\rho$ : resistividade elétrica ( $\Omega \cdot m$ );

$a$ : distância entre os eletrodos (m);

$V$ : diferença de potencial (Volts - V);

$I$ : corrente elétrica (Ampère - A).

Outra maneira de verificação preliminar da durabilidade é por meio do ensaio não destrutivo de propagação de onda ultrassônica. O ensaio consiste em medir a velocidade que ondas longitudinais levam para atravessar a seção do concreto. Por meio deste ensaio é possível verificar a homogeneidade do material, detectar eventuais falhas na mistura, conhecer a profundidade de

fissuras e monitorar as variações do concreto decorrentes de agentes agressivos que penetram em seu interior ao longo do tempo (ABNT, 2019).

Pela diferença de velocidade de propagação das ondas, que podem variar entre 20 kHz e 150 kHz, é possível estipular a uniformidade da matriz e a porosidade do material. Para concretos convencionais o valor da velocidade do pulso ultrassônico, para transdutores com distância variando de 10 cm a 30 cm, fica entre 3700 m/s e 4200 m/s (SILVA, FERREIRA e DIAS, 2013; LONDERO, 2016). Já Whitehurst (1966) apud Ramírez (2015) estabelece critérios de avaliação da qualidade do concreto de acordo com o valor da velocidade de propagação de onda ultrassônica, conforme visto na Tabela 5.

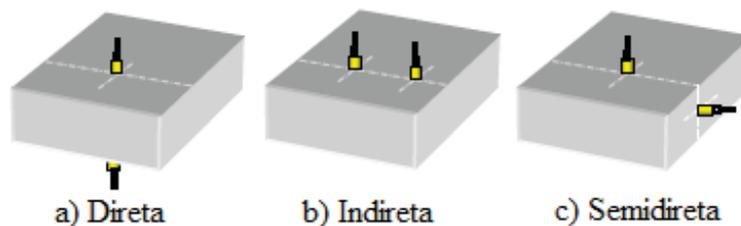
Tabela 5 - QUALIDADE DO CONCRETO DE ACORDO COM A VELOCIDADE DA ONDA ULTRASSÔNICA

Velocidade de onda ultrassônica (m/s)	Qualidade do concreto
> 4500	Excelente
3500 a 4500	Bom
3000 a 3500	Regular
2000 a 3000	Ruim
< 2000	Péssimo

FONTE: WHITEHURST (1966) apud RAMÍREZ (2015).

O ensaio de propagação de onda ultrassônica pode ser realizado conforme orientações da NBR 8802 (ABNT, 2019). A norma prescreve três tipos de transmissão para realização do ensaio que dependem da precisão requerida, da variabilidade e das dimensões do material. Os três tipos de transmissão podem ser observados na Figura 11, sendo recomendada pela norma a transmissão direta, somente utilizando as outras duas opções quando a mesma não puder ser aplicada.

Figura 11 - TIPOS DE TRANSMISSÃO DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA



FONTE: SILVA, FERREIRA e DIAS (2013).

Após a realização do ensaio, calcula-se a velocidade de propagação de onda conforme a Equação 16 (ABNT, 2019).

$$V = \frac{L}{t} \quad (16)$$

Onde:

V: velocidade de propagação da onda ultrassônica (m/s);

L: distância entre os eixos e/ou as faces dos transdutores (m);

t: tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção (s).

## 2.4 DOSAGEM OTIMIZADA POR TÉCNICAS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Métodos de dosagem foram elaborados a partir da aplicação dos modelos de empacotamento de partículas, tanto para modelos do grupo de distribuição granulométrica ótima quanto para modelos analíticos. Iniciando com o grupo de distribuição granulométrica ótima, diferentes tipos de concretos podem ser dosados utilizando a Equação 10 do modelo de Alfred, também conhecido como modelo de Andreasen e Andersen modificado (FUNK e DINGER, 1980 apud CAMPOS, 2019).

O modelo de Alfred otimiza a composição granular da mistura atuando como uma função alvo, ou seja, uma curva ideal. As proporções de cada material utilizado na mistura podem ser calculadas de forma a encontrar um ajuste ótimo que fique o mais próximo possível da curva ideal, usando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), por exemplo, conforme apresentada na Equação 18 (YU, SPIESZ e BROUWERS, 2015).

$$RSS = \sum_{i=1}^n \left( P_{mix} (D_i^{i+1}) - P_{tar} (D_i^{i+1}) \right)^2 \quad (18)$$

Onde:

RSS: soma dos quadrados dos resíduos;

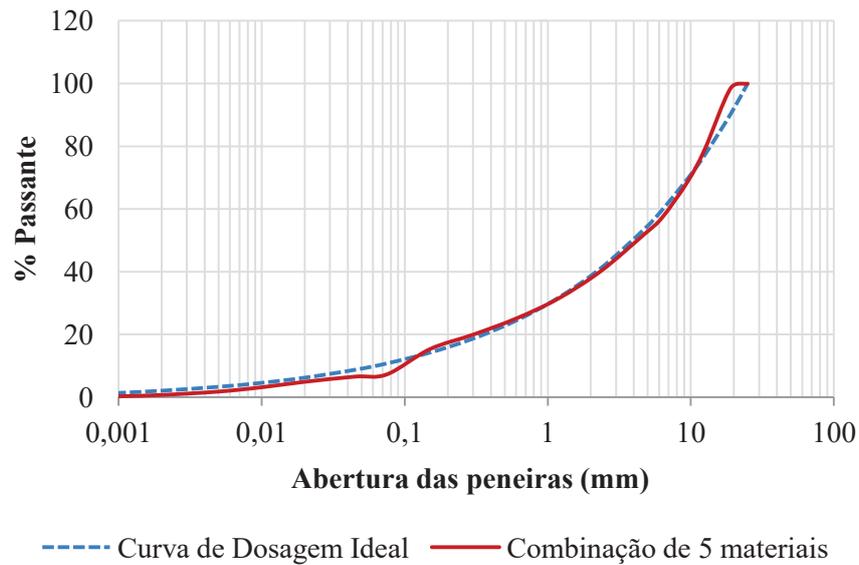
$P_{mix}$ : composição da mistura;

$P_{tar}$ : curva ideal calculada pelo modelo de Alfred;

D: diâmetro da partícula (mm);

Pela Equação 18, encontra-se o menor valor da Soma dos Quadrados dos Resíduos (RSS), que indica o menor desvio entre a curva ideal e a curva da mistura otimizada (YU, SPIESZ e BROUWERS, 2015). A Figura 12 exemplifica as curvas granulométricas de uma mistura composta por cinco materiais diferentes e da curva ideal calculada pelo modelo de Alfred.

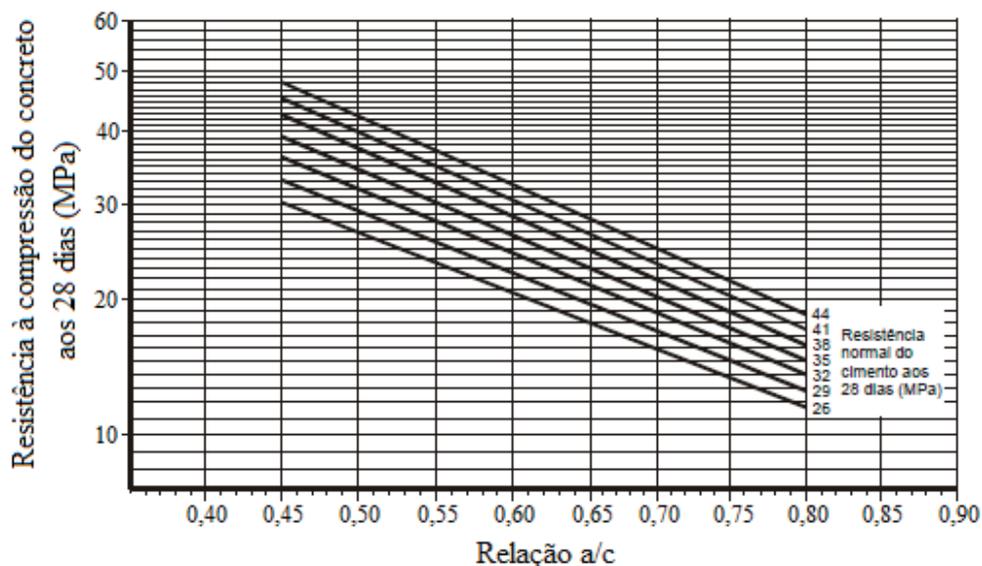
Figura 12 – EXEMPLO DE CURVA IDEAL E COMBINAÇÃO GRANULOMÉTRICA



FONTE: A autora (2023).

Conhecendo a proporção ideal de cada material seco constituinte na mistura de forma a se obter a curva de otimização que mais se aproxima da curva ideal, como apresentado na Figura 12, estima-se a relação água/cimento ( $a/c$ ). A relação  $a/c$  pode ser definida de acordo com a NBR 6118 (2014a) que relaciona a relação  $a/c$  conforme a classe de agressividade do ambiente e a classe de resistência mecânica do concreto. Outra maneira de fazer essa estimativa seria pela utilização das curvas de Walz, ilustradas na Figura 13, em que também se relacionam diferentes relações  $a/c$  com classes de resistência à compressão.

Figura 13 - GRÁFICO PARA DEFINIÇÃO DA RELAÇÃO A/C DE ACORDO COM AS CURVAS DE RESISTÊNCIA DO CIMENTO E DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO AOS 28 DIAS



FONTE: RODRIGUES (1998).

Dessa maneira, pela curva de otimização do modelo de Alfred, é possível encontrar o traço do concreto desejado, com a proporção ideal dos materiais, finalizando assim o processo de dosagem.

Campos et al. (2022) propuseram a dosagem com o modelo de Alfred de forma simplificada. Com a curva granulométrica dos diferentes materiais, são definidos os diâmetros para a otimização da curva teórica ideal. No estudo os autores escolheram o D50 do pó de pedra como sendo o menor diâmetro (10  $\mu\text{m}$ ) e o D50 do agregado graúdo como sendo o maior diâmetro para o cálculo da curva teórica (19000  $\mu\text{m}$ ). Para a definição dos teores de partículas dentro desse intervalo (entre 10  $\mu\text{m}$  e 19000  $\mu\text{m}$ ) utiliza-se a Equação 10 do modelo de Alfred, em que é calculada a porcentagem acumulada de partículas para cada um dos diâmetros da série.

Com as porcentagens retidas de cada diâmetro projeta-se a curva do modelo (assim como na Figura 12) e separam-se as partículas em três grupos: finos (com partículas entre o menor diâmetro e 100  $\mu\text{m}$ ), agregados miúdos (de 100  $\mu\text{m}$  a 4800  $\mu\text{m}$ ) e agregados graúdos (partículas entre 4800  $\mu\text{m}$  até 19000  $\mu\text{m}$ ), sendo o somatório de cada grupo sua proporção em volume. Com a massa específica, calcula-se a proporção dos materiais em massa, em relação ao teor de cimento, conforme Equação 19 (CAMPOS et al., 2022).

$$\text{Traço unitário}_i = \frac{\%_{\text{volume}} \cdot \gamma_i}{\%_{\text{volumeCP}} \cdot \gamma_{\text{CP}}} \quad (19)$$

Onde:

Traço unitário<sub>i</sub>: proporção do material em relação ao cimento;

%<sub>volume</sub>: proporção do material i em volume;

$\gamma_i$ : massa específica do material i ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

%<sub>volumeCP</sub>: proporção do cimento Portland, em volume;

$\gamma_{\text{CP}}$ : massa específica do cimento Portland ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Após o cálculo do traço em massa, calcula-se o consumo de cimento e dos demais materiais pela Equação 20, encontrando, por fim, a quantidade de cada material para a dosagem do concreto pelo modelo de Alfred.

$$C = \frac{1000 - (ar\% \cdot 10)}{\frac{1}{\gamma_{\text{CP}}} + \frac{a/c}{\gamma_{\text{água}}} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b}} \quad (20)$$

Onde:

C: consumo de cimento ( $\text{kg/m}^3$ );

ar%: teor de ar;

$\gamma$ : massa específica ( $\text{kg/m}^3$ );

a/c: relação água/cimento;

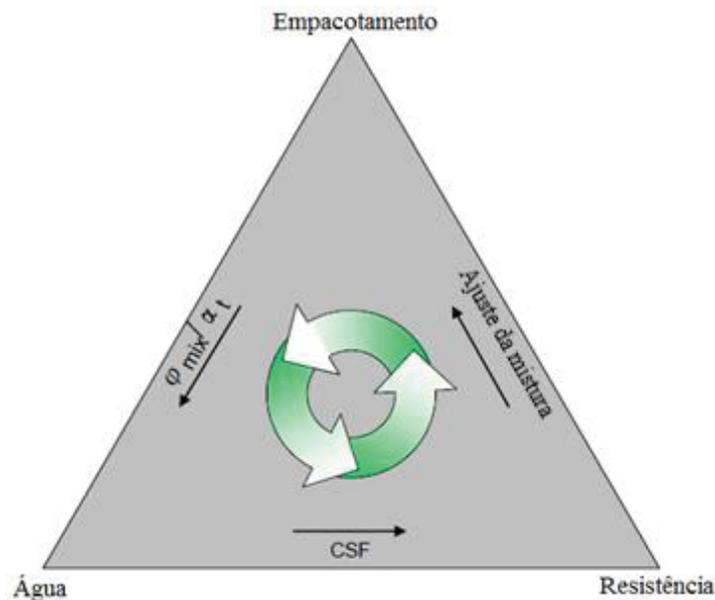
a: teor de areia, em massa;

b: teor de brita, em massa.

A partir dessa dosagem otimizada pelo modelo de Alfred, Campos et al. (2022) obtiveram concreto com bom desempenho em termos de eficiência, atingindo  $3,5 \text{ kg/m}^3/\text{MPa}$  de intensidade de ligante. O mesmo traço obteve uma intensidade de  $\text{CO}_2$  igual a  $3,15 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3/\text{MPa}$ , ambos os valores sendo inferiores aos observados na literatura (intensidade de ligante de 10 a  $12 \text{ kg/m}^3/\text{Mpa}$  para concretos convencionais e intensidade de  $\text{CO}_2$  de 7,1 para dados internacionais e  $9,1 \text{ CO}_2/\text{MPa}$  para dados brasileiros (DAMINELI et al., 2010).

Partindo para os modelos analíticos, Fennis (2011) desenvolveu uma metodologia de que, prevendo as propriedades dos materiais, é possível produzir um concreto convencional durável, resistente e sustentável, ou seja, um concreto ecoeficiente. Neste método de dosagem é considerada a composição de cimento e das adições minerais que o substituem, visto que a relação total de pó influencia na proporção de cimento e na quantidade de água. Também se leva em consideração a resistência mecânica, que é o parâmetro de projeto regente das demais propriedades do concreto e, por isso, deve ser estudada durante a dosagem. A proporção de cimento, a quantidade de água e a resistência mecânica são fatores importantes no desenvolvimento do concreto ecoeficiente e que são influenciados fortemente pela densidade de empacotamento da mistura. Devido a isso, um procedimento cíclico de três etapas foi desenvolvido, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 - MÉTODO DE DOSAGEM CÍCLICO PARA CONCRETO ECOEFICIENTE



FONTE: Traduzido de FENNIS (2011).

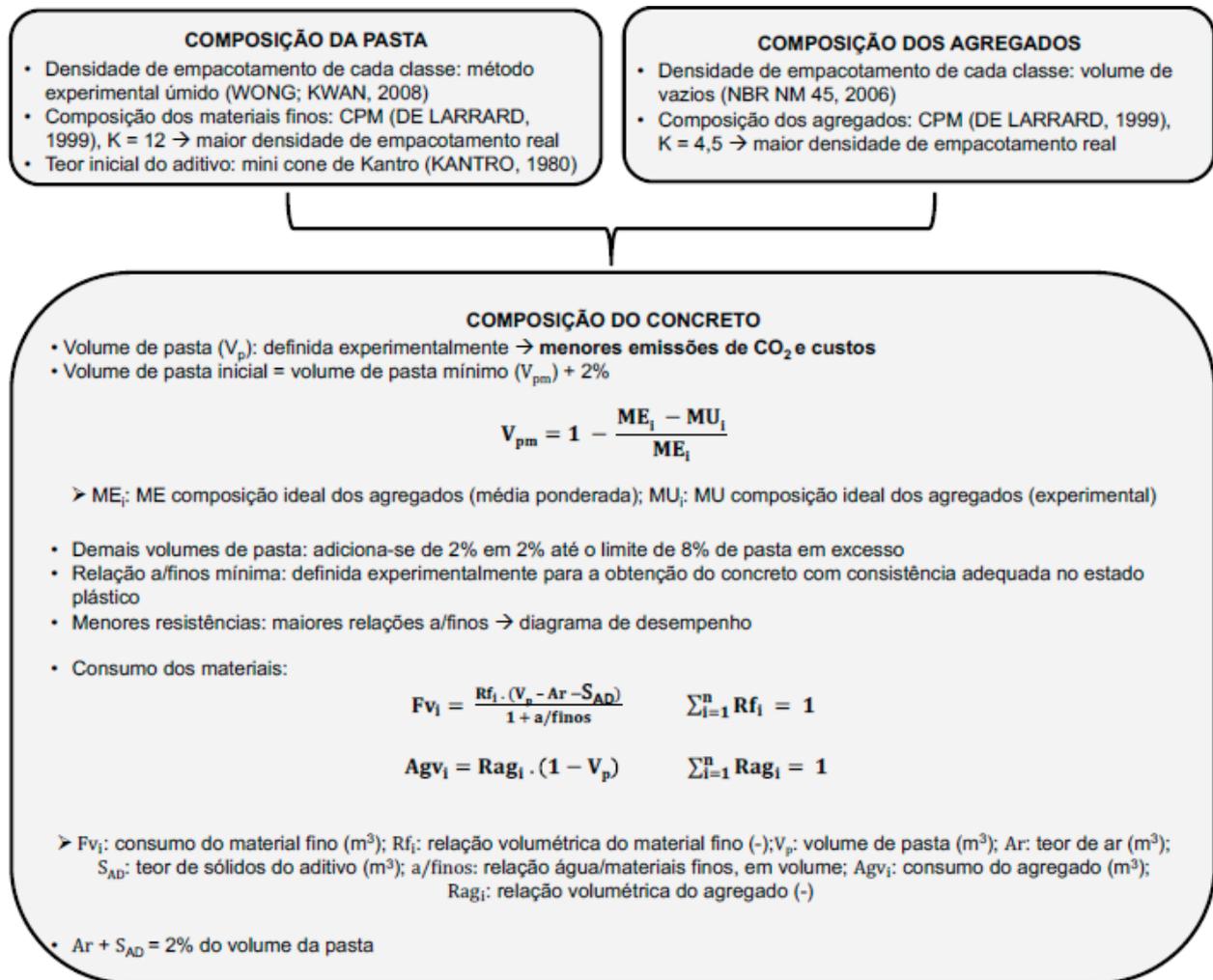
A Figura 14 apresenta a proposta de método de dosagem de concreto convencional e ecoeficiente de Fennis (2011). Pode-se iniciar o procedimento pelo topo da pirâmide, com o cálculo da densidade de empacotamento de uma nova mistura. Porém, como visto no canto inferior direito, é possível iniciar o processo pelo ajuste de uma mistura zero, ou seja, o ajuste de uma mistura de referência pré-estabelecida e dosada tradicionalmente com base em sua resistência. Também se pode dar início ao procedimento tendo uma base de materiais disponíveis para a produção do concreto. Assim, o método é dividido em três etapas: densidade de empacotamento, demanda de água e resistência mecânica.

Com a mistura zero, faz-se o cálculo da densidade de empacotamento. O método propõe a utilização do Modelo de Empacotamento de Compactação-Interação (CIPM, do inglês *Compaction-interaction Packing Model*), que é um modelo adaptado do CPM, considerando diferentes interações entre as partículas. Com a densidade de empacotamento calculada, encontra-se a demanda de água exigida pela mistura e na sequência faz-se uma previsão da resistência que o concreto irá atingir, por meio do Fator de Espaçamento do Cimento (CSF, do inglês *Cement Spacing Factor*). Por fim, é comparado o valor da resistência prevista com a resistência calculada em projeto. Caso a resistência prevista pelo método tenha sido menor que a resistência de projeto, inicia-se novamente o procedimento desde o cálculo da densidade de empacotamento, na tentativa de melhorar a variação de partículas de diferentes tamanhos. E, caso a resistência prevista tenha sido muito maior que a resistência de projeto, é possível ajustar a mistura para reduzir o consumo de cimento, iniciando o ciclo novamente desde a etapa da densidade de empacotamento. Dessa forma, repete-se o ciclo

quantas vezes sejam necessárias até que a resistência prevista seja igual ou levemente superior a resistência de projeto, otimizando a mistura e produzindo um concreto ecoeficiente (FENNIS, 2011).

Também como proposta de dosagem para modelos analíticos, Campos (2019) e Campos, Klein e Marques Filho (2020) desenvolveram uma metodologia que sugere um estudo para determinar a proporção ideal de agregados e de pasta, de forma individual e paralela, para posterior determinação do consumo de cada material na produção do concreto. Para melhor entendimento, a Figura 15 ilustra o esquema de dosagem elaborado pelos autores.

Figura 15 - ESQUEMA DO MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO



FONTE: CAMPOS (2019) e CAMPOS, KLEIN e MARQUES FILHO (2020).

O método inicia-se com a determinação da densidade de empacotamento dos materiais finos pelo método experimental proposto por Wong e Kwan (2008). Posteriormente, é feita a composição dos materiais finos pelo modelo CPM, com o volume de cada material sendo determinado de maneira aleatória e tendo seus teores variando em intervalos de 2%, com a possibilidade de ajustar o intervalo em 1% para uma maior precisão, quando este se aproximar do teor ideal. O valor do índice

de compactação K deve ser igual a 12, conforme proposto por Fennis (2011), para densidades de empacotamento obtidas pelo método úmido de Wong e Kwan (2008). Para terminar essa primeira etapa, a determinação da quantidade inicial de aditivo superplastificante é realizada pelo mini cone de Kantro (Kantro, 1980), com possibilidade de reajuste do teor durante a dosagem do concreto, respeitando a dosagem máxima recomendada pelo fabricante (CAMPOS, KLEIN e MARQUES FILHO, 2020).

A etapa da composição dos agregados começa com a determinação da densidade de empacotamento de cada classe pelo ensaio de determinação do índice de vazios conforme NBR 16972 (ABNT, 2021c). Pelo modelo CPM é definida a composição dos agregados visando obter o menor índice de vazios, utilizando o índice de compactação K de acordo com o método de compactação a ser utilizado. O volume de grãos de cada classe é definido aleatoriamente para formar composições. Cada composição inicia com o mesmo volume de material para cada classe de agregado e alterações podem ser realizadas aumentando 5% da classe com maior densidade de empacotamento individual e reduzindo 5% da classe com menor densidade de empacotamento individual. As variações podem ser realizadas em intervalos de 1% conforme ocorrer uma aproximação do teor ideal (CAMPOS, KLEIN e MARQUES FILHO, 2020).

A terceira e última etapa refere-se à dosagem do concreto em si, que se inicia com a determinação do volume ideal de pasta para preencher os vazios existentes entre os grãos de agregados, além de conter um excesso mínimo de pasta para garantia da trabalhabilidade desejada. O volume de pasta mínimo é equivalente ao índice de vazios calculado na etapa de composição dos agregados. Com o volume de pasta mínimo calcula-se o volume de pasta inicial, com acréscimo de 2%. A partir disso, acrescenta-se pasta em intervalos de 2% em 2% até que se atinja o limite máximo de 8% de excesso de pasta, pois valores ultrapassantes a este prejudicam as propriedades do concreto no estado endurecido (CAMPOS, KLEIN e MARQUES FILHO, 2020).

A relação água/finos mínima é definida experimentalmente de acordo com a consistência e resistência à compressão desejadas, além de depender da composição dos materiais finos. Para menores valores de resistência à compressão, basta ajustar a relação água/finos em valores maiores. Conforme o método, o volume de pasta se dá pela junção da água, do ar, do aditivo e dos materiais finos, conforme apresentado na Equação 21 (CAMPOS, 2019; CAMPOS, KLEIN e MARQUES FILHO, 2020).

$$V_p = Fv_t + \text{água} + Ar + Sad \quad (21)$$

Onde:

$V_p$ : volume de pasta ( $m^3$ );

$Fv_i$ : total de materiais finos que compõem a pasta ( $m^3$ );

Água: quantidade de água, considerando o teor de água do aditivo ( $m^3$ );

Ar: teor de ar ( $m^3$ );

$S_{AD}$ : teor de sólidos do aditivo ( $m^3$ ).

Por fim, o consumo de cada material para a produção do concreto é obtido conforme a Equação 22 e a Equação 23 (CAMPOS, 2019; CAMPOS, KLEIN e MARQUES FILHO, 2020).

$$Fv_i = \frac{Rf_i \cdot (V_p - Ar - S_{ad})}{1 + a/\text{finos}} \quad \sum_{i=1}^n Rf_i = 1 \quad (22)$$

$$Agv_i = Rag_i \cdot (1 - V_p) \quad \sum_{i=1}^n Rag_i = 1 \quad (23)$$

Onde:

$Fv_i$ : consumo do material fino ( $m^3$ );

$Rf_i$ : relação volumétrica do material fino;

$V_p$ : volume de pasta ( $m^3$ );

Ar: teor de ar ( $m^3$ );

$S_{ad}$ : teor de sólidos do aditivo ( $m^3$ );

$a/\text{finos}$ : relação água/materiais finos, em volume;

$Agv_i$ : consumo do agregado ( $m^3$ );

$Rag_i$ : relação volumétrica do agregado.

Seguindo o método de dosagem proposto a partir do modelo CPM, Campos (2019) e Campos et al. (2020) obtiveram um valor de intensidade de ligante igual a 2,8 kg/ $m^3$ /MPa e um valor de intensidade de  $CO_2$  de 2,5 kg/ $CO_2$ / $m^3$ /MPa, sendo ambos os valores bem abaixo daqueles encontrados na literatura, indicando que o método proposto propõe resultados eficientes em termos de sustentabilidade.

A fim de exemplificar a aplicabilidade do empacotamento de partículas em dosagem de concretos, alguns trabalhos serão apresentados na sequência. Iniciando por Londero (2016), que utilizou o método de dosagem apresentado por Fennis (2011) e por Fennis, Walraven e den Uijl (2013), o modelo CIPM. O método considerada o excesso de água, a interação das partículas e a energia de compactação para buscar uma otimização da mistura, com o intuito de dosar um concreto ecológico e avaliar suas propriedades nos estados fresco, endurecido e quanto à durabilidade. Após caracterização dos materiais, foi realizado o estudo da proporção ideal de finos para otimização da pasta e posteriormente definição dos traços dos concretos ecológicos, tendo também um traço de referência pelo método tradicional de dosagem do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). Os dois concretos dosados pelo método de empacotamento de partículas apresentaram absorção de água menor que o concreto de referência, devido à densificação ter causado caminhos mais longos e tortuosos de percolação de água. Os resultados de resistividade elétrica e de ultrassom foram superiores nos concretos ecológicos em relação ao de referência. Por fim, ao fazer um comparativo de custos, ambos concretos ecológicos tiveram economia no consumo de cimento, porém, a utilização de adições minerais e de aditivos superplastificantes elevaram o custo final.

Oliveira (2013) dosou concretos de alto desempenho (CAD) e concretos autoadensáveis (CAA) caracterizando-os reologicamente nos estados fresco e endurecido, além de ter avaliado suas resistências à compressão e o custo da aplicação do método de empacotamento de partículas com uso do modelo de Alfred. O concreto de alto desempenho apresentou uma resistência de 73,4 MPa aos 28 dias, os teores ótimos de sílica ativa e de aditivo superplastificante foram satisfatórios, não necessitando realização de ajustes para obtenção do abatimento proposto inicialmente. Já para o concreto autoadensável houve necessidade de correção nos teores de aditivo superplastificante e de agregado miúdo, pois teve segregação na mistura. O CAD dosado pelo modelo de Alfred apresentou maior resistência aos 28 dias quando comparado ao CAD dosado com base nos conceitos da reologia, relacionando a uma menor porosidade devido à melhor distribuição granulométrica. O CAA dosado pelo modelo de Alfred apresentou valor de resistência próxima a do CAA dosado pelos conceitos da reologia por conta falta de materiais mais finos na granulometria. Quanto ao custo, foi concluído que os concretos dosados pelos conceitos da reologia foram mais baratos do que aqueles dosados pelo conceito de empacotamento de partículas, uma vez que para estes foram necessárias quantidades maiores de adição mineral e aditivo superplastificante.

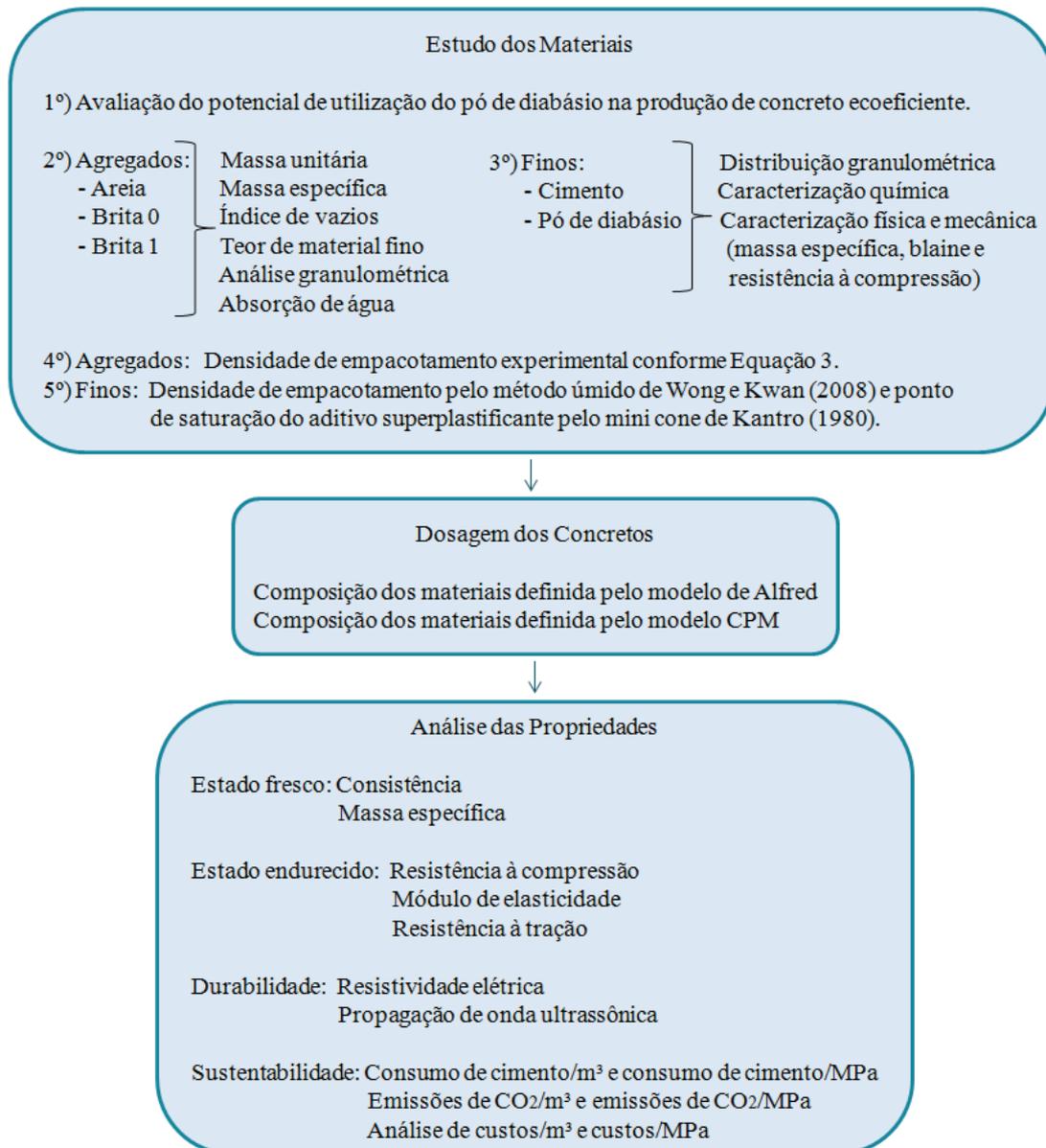
Com o objetivo de otimizar misturas de concreto convencionais e de alta resistência, Lopes (2019) utilizou as dosagens IPT/EPUSP e o modelo de Alfred como método de empacotamento de partículas. Após caracterização dos materiais, foram elaborados traços de referência de concretos

convencionais e de alta resistência na dosagem tradicional e posteriormente pelo modelo de empacotamento. Os concretos otimizados apresentaram perda na trabalhabilidade sendo necessário aumento do consumo de aditivo superplastificante. Houve também uma redução no consumo de agregados e aumento no consumo de adições. A resistência à compressão dos concretos otimizados apresentaram valores superiores aos concretos de referência em todas as idades analisadas (7, 28 e 91 dias). Nos ensaios de durabilidade, a absorção de água dos concretos otimizados foi menor que das referências, acarretando em menor porosidade devido à densificação da mistura. Com a realização de ensaios não destrutivos, observou-se que a velocidade do pulso ultrassônico e o módulo de elasticidade dinâmico possuem a mesma tendência de crescimento, porém o mesmo não ocorreu com a resistência média à compressão, concluindo que a velocidade ultrassônica não depende exclusivamente dessa propriedade mecânica. Pelo modelo de empacotamento de partículas utilizado foi possível obter concretos sustentáveis e que atenderam de forma satisfatória as propriedades propostas, podendo seu uso ser aplicado em obras de construção civil.

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

O programa experimental foi realizado majoritariamente no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) do Departamento de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Também foram realizados ensaios no laboratório da empresa Votorantim, no Centro de Microscopia Eletrônica (CME), no laboratório central da concreteira Hobimix e no laboratório de materiais DAHER/IDD. A pesquisa foi dividida em três etapas principais: estudo dos materiais, dosagem dos concretos e análise das propriedades no estado fresco, endurecido, parâmetros iniciais de durabilidade e parâmetros de sustentabilidade. Cada etapa possui ramificações próprias e a Figura 16 apresenta o fluxograma do planejamento experimental utilizado na pesquisa.

Figura 16 - PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DA PESQUISA



FONTE: A autora (2023).

### 3.1 MATERIAIS

Nos itens a seguir apresentam-se os materiais utilizados na pesquisa e seus ensaios de caracterização. Este item está dividido em duas etapas. A primeira se refere aos materiais utilizados na produção dos concretos para avaliação do potencial de utilização do pó de diabásio. E a segunda se refere aos materiais utilizados na produção dos concretos ecoeficientes com a composição dos materiais definida pelos modelos de empacotamento de partículas. As duas etapas foram realizadas em momentos distintos, por isso foi realizada a caracterização dos materiais para cada uma.

#### 3.1.1 Avaliação do potencial de utilização do pó de diabásio

Neste item serão apresentados os materiais utilizados na produção dos concretos para avaliação do potencial de utilização do pó de diabásio como substituto parcial do cimento Portland.

##### 3.1.1.1 Agregados

Os agregados utilizados foram de origem calcária, provenientes da região metropolitana de Curitiba/PR. Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Foram realizados os ensaios de massa específica e absorção de água conforme NBR 16916 (ABNT, 2021a) e distribuição granulométrica dos materiais conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os resultados podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS UTILIZADOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO

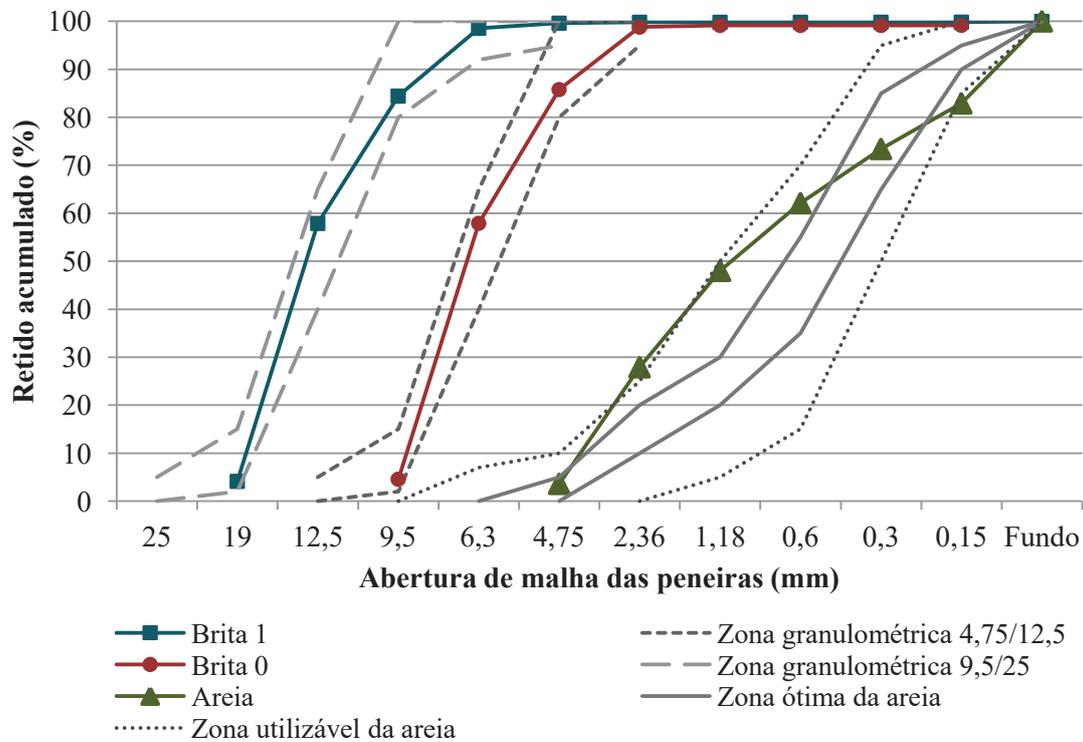
Propriedade	Areia	Brita 0	Brita 1
Diâmetro máximo característico (mm)	4,75	9,50	19,00
Módulo de finura (-)	2,98	5,86	6,87
Diâmetro pelo qual passam 50% das partículas (mm)	1,18	6,30	12,50
Massa específica na condição seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,55	2,66	2,67
Massa específica na condição SSS (g/cm <sup>3</sup> )	2,60	2,67	2,68
Absorção de água (%)	1,78	0,50	0,40
Massa unitária na condição seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,86	1,55	1,55
Massa unitária na condição SSS (g/cm <sup>3</sup> )	1,89	1,55	1,55
Índice de vazios (%)	27,12	41,84	41,90
Material pulverulento (%)	12,24	0,40	0,22
Densidade de empacotamento* (-)	0,729	0,582	0,581

\*Calculada conforme Equação 3

FONTE: A autora (2023).

As curvas granulométricas da areia, brita 0 e brita 1 e das respectivas zonas recomendadas pela NBR 7211 (ABNT, 2009) são apresentadas na Figura 17 a seguir.

Figura 17 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS E DAS ZONAS RECOMENDADAS PELA NBR 7211 (ABNT, 2009) PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO



FONTE: A autora (2023).

Observa-se na Figura 17 que tanto a brita 0 quanto a brita 1 estão dentro das zonas recomendadas pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Já a areia, mesmo transitando pela zona ótima, permanece dentro da zona utilizável recomendada pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Além disso, nota-se que a curva da areia é mais contínua, ao contrário das curvas da brita 0 e da brita 1 que possuem um crescimento mais vertical, indicando uma menor variabilidade no tamanho das partículas.

### 3.1.1.2 Materiais Finos

Para a avaliação do potencial de utilização do pó de diabásio foram utilizados três materiais finos, cimento, pó de calcário e pó de diabásio. Os ensaios para caracterização dos materiais finos foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Foram realizados os ensaios de massa específica conforme NBR 16605 (ABNT, 2017) e distribuição granulométrica a laser. Para o cimento e o pó de diabásio o

ensaio de granulometria a laser foi realizado com equipamento da marca SympaTEC modelo HELOS/BR, RODOS/L e VIBRI/L, de difração a laser de feixe paralelo. Já para o pó de calcário foi utilizado um equipamento de marca Malvern 2000, com álcool propílico como dispersor e 1 minuto de ultrassom na potência de 240 watts. Os resultados podem ser observados na Tabela 7.

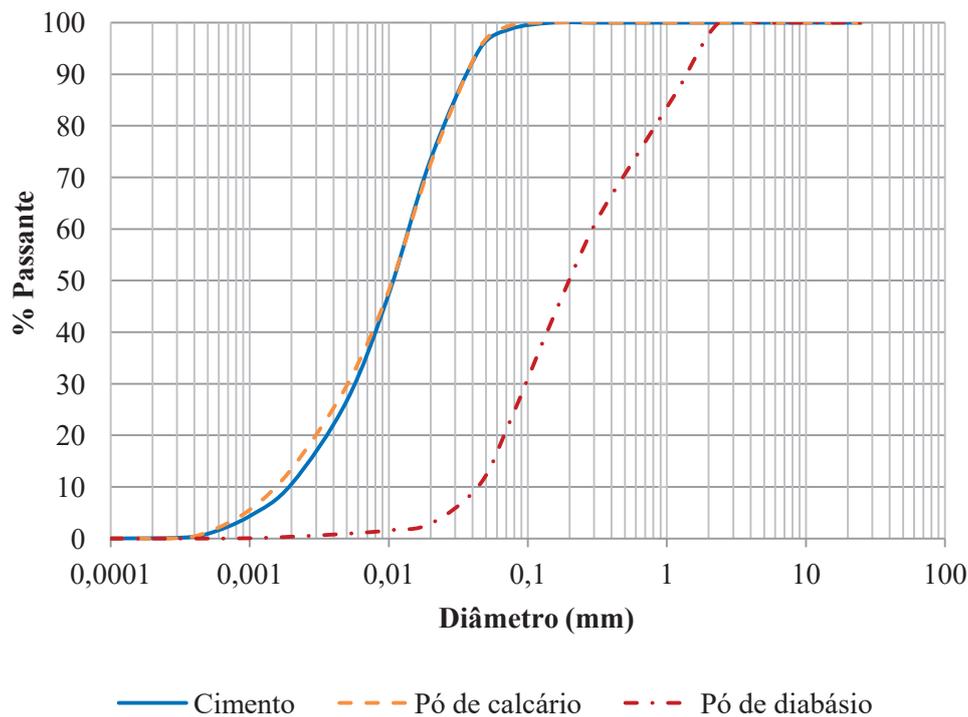
Tabela 7 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS FINOS UTILIZADOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO

Propriedade	Finos (kg/m <sup>3</sup> )		
	Cimento	Pó de calcário	Pó de diabásio
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,09	2,67	2,95
D50 (mm)	0,01076	0,010649	0,15

FONTE: A autora (2023).

O cimento utilizado foi o CPV – ARI e sua curva granulométrica, juntamente com as curvas dos pós de calcário e de diabásio são apresentadas na Figura 18.

Figura 18 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS MATERIAIS FINOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO



FONTE: A autora (2023).

Nota-se, pela Figura 18, que o pó de calcário possui curva granulométrica bem próxima à curva do cimento, enquanto que o pó de diabásio possui partículas maiores. A Figura 19 apresenta imagens do pó de calcário e do pó de diabásio utilizados.

Figura 19 - IMAGENS DO PÓ DE CALCÁRIO E DO PÓ DE DIABÁSIO



a) Pó de calcário vista frontal b) Pó de diabásio vista frontal c) Pó de calcário visto de cima d) Pó de diabásio visto de cima

FONTE: A autora (2023).

Observa-se na Figura 19 que o pó de diabásio possui coloração mais escura e partículas maiores (b) e (d), enquanto que o pó de calcário (a) e (c), além da coloração mais clara, é caracterizado por partículas mais finas.

### 3.1.1.3 Aditivo superplastificante

Foi utilizado aditivo superplastificante de terceira geração de massa específica  $1,10 \text{ g/cm}^3$ , de pH 6, com dosagem máxima recomendada de 1,2% e teor de sólidos de  $44,0\% \pm 2\%$ . Seus requisitos estão em conformidade com a NBR 14725 (ABNT, 2014b).

### 3.1.2 Concreto ecoeficiente

Neste item estão apresentados os materiais utilizados na produção dos concretos ecoeficientes com a dosagem otimizada pelos modelos de Alfred e CPM.

### 3.1.2.1 Agregados

Todos os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). O agregado miúdo utilizado na pesquisa foi areia artificial proveniente da região de Curitiba/PR, de origem granítica. Para sua caracterização foram realizados os ensaios de teor de material fino conforme a NBR 16973 (ABNT, 2021d), massa unitária e índice de vazios conforme NBR 16972 (ABNT, 2021c), massa específica e absorção de água conforme NBR 16916 (ABNT, 2021a) e distribuição granulométrica conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). A realização dos ensaios seguiu as recomendações normativas e seus resultados são apresentados na Tabela 8.

A pesquisa utilizou dois tipos de agregado graúdo, brita 0 e brita 1, ambas de origem granítica, provenientes da região metropolitana de Curitiba/PR. Para suas caracterizações foram realizados os ensaios de teor de material fino conforme a NBR 16973 (ABNT, 2021d), massa unitária e índice de vazios conforme NBR 16972 (ABNT, 2021c), massa específica e absorção de água conforme NBR 16917 (ABNT, 2021b) e distribuição granulométrica conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os resultados dos ensaios são apresentados também na Tabela 8.

Tabela 8 - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Propriedade	Areia	Brita 0	Brita 1
Diâmetro máximo característico (mm)	4,75	9,50	19,00
Módulo de finura (-)	2,43	5,94	6,96
Diâmetro pelo qual passam 50% das partículas (mm)	0,60	6,30	12,50
Massa específica na condição seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,47	2,76	2,67
Massa específica na condição SSS (g/cm <sup>3</sup> )	2,51	2,78	2,68
Absorção de água (%)	1,63	0,60	0,30
Massa unitária na condição seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,86	1,60	1,60
Massa unitária na condição SSS (g/cm <sup>3</sup> )	1,89	1,61	1,60
Índice de vazios (%)	24,63	42,14	40,19
Material pulverulento (%)	12,61	0,30	0,12
Densidade de empacotamento* (-)	0,754	0,579	0,598

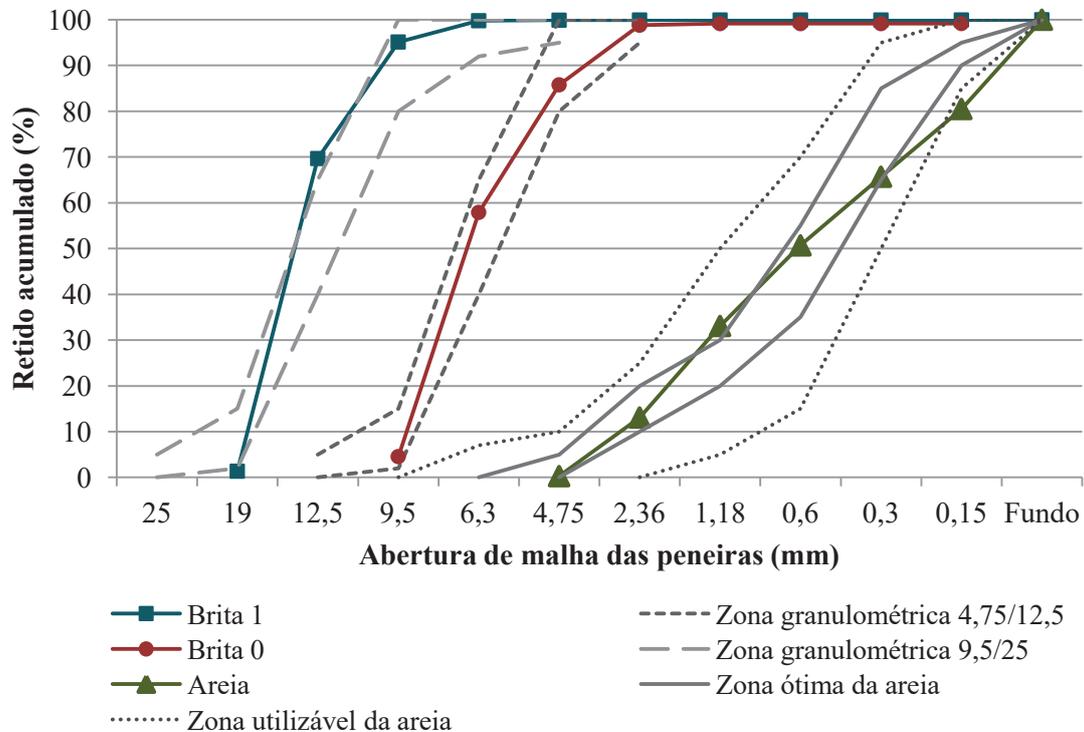
\*Calculada conforme Equação 3

FONTE: A autora (2023).

É possível notar na Tabela 8 que o teor de material pulverulento da brita 0 e da brita 1 é inferior ao da areia, como era esperado devido à presença de finos na areia artificial. Além disso, nota-se que o valor de densidade de empacotamento da areia (0,754) é superior aos da brita 0 (0,579) e brita 1 (0,598), o que pode ser justificado pela curva granulométrica mais contínua da areia e pela sua quantidade superior de material pulverulento.

As curvas granulométricas da areia, brita 0 e brita 1 e das respectivas zonas recomendadas pela NBR 7211 (ABNT, 2009) são apresentadas na Figura 20 a seguir.

Figura 20 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS E DAS ZONAS RECOMENDADAS PELA NBR 7211 (ABNT, 2009)



FONTE: A autora (2023).

Observa-se na Figura 20 que a brita 1 passa ligeiramente por fora da sua zona recomendada enquanto que a brita 0 se mantém dentro da faixa indicada pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Por sua vez, a areia transita pela zona ótima e permanece em sua maior parte dentro da zona utilizável recomendada pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Além disso, nota-se que a curva da areia é mais contínua, ao contrário das curvas da brita 0 e da brita 1 que possuem um crescimento mais vertical, indicando uma menor variabilidade no tamanho das partículas.

### 3.1.2.2 Materiais Finos

Para a pesquisa foram utilizados dois materiais finos, cimento e pó de pedra. Os ensaios para caracterização dos materiais finos foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) e no Centro de Microscopia Eletrônica (CME), ambos da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Também foram realizados ensaios no laboratório de materiais da Votorantim, além dos dados informados pelo fabricante.

O cimento Portland usado foi o CP V – ARI, por ter o menor teor de adições em sua composição, visto que o pó de pedra será utilizado como único substituto parcial do cimento durante a dosagem dos concretos. Além disso, a escolha do tipo de cimento baseia-se na extensa variação da quantidade de adições permitidas pela normatização brasileira, podendo ocasionar variabilidade e dificuldade na análise dos resultados. A Tabela 9 apresenta suas principais características químicas e físicas conforme informações do fabricante.

Tabela 9 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DO CIMENTO

Características químicas			Características físicas		
Elemento	Teor	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018b)	Propriedade	Valor	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018b)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,45	-	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,09	-
SiO <sub>2</sub> (%)	18,43	-	Início de pega (min)	180	≥ 60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,61	-	Fim de pega (min)	241	-
CaO (%)	63,37	-	Consistência normal (%)	29,4	-
MgO (%)	2,74	≤ 6,5	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4,388	-
SO <sub>3</sub> (%)	2,71	≤ 4,5	Finura #200 (%)	0,11	-
Perda ao fogo (%)	3,48	≤ 6,5	Finura #325 (%)	0,75	-
CaO livre (%)	1,26	≤ 3,5	Res. à compressão 3 dias (MPa)	38,3	≥ 24
Resíduo insolúvel (%)	0,66	-	Res. à compressão 7 dias (MPa)	44,6	≥ 34
Equivalente alcalino (%)	0,71	-	Res. à compressão 28 dias (MPa)	52,5	-

FONTE: Fabricante (2023).

O pó de pedra utilizado na pesquisa é de diabásio, obtido a partir da produção de areia artificial e proveniente da região de Rio Branco do Sul/PR. Após ser coletado, o material foi seco em estufa em temperatura de 80 °C durante o período de 24 horas para possibilitar a realização dos ensaios de caracterização. O pó foi peneirado na peneira de abertura de malha 2,36 mm com o objetivo de eliminar o material retido neste diâmetro.

Para o pó de pedra foram realizados os ensaios de determinação da massa específica conforme diretrizes da NBR 16605 (ABNT, 2017), determinação da atividade pozolânica conforme NBR 5751 (ABNT, 2015a) e determinação do índice de desempenho com cimento para materiais pozolânicos conforme NBR 5752 (ABNT, 2014c). O ensaio de massa específica foi repetido três vezes, sendo utilizada a média dos resultados. Os dois últimos ensaios foram realizados para verificar a inatividade do pó de pedra. Para o ensaio de determinação do índice de desempenho do pó em relação ao cimento foram feitas as médias de resistência à compressão de três corpos de prova de argamassa com cimento e de outros três corpos de prova de argamassa com o cimento sendo

substituído parcialmente pelo pó de pedra conforme NBR 5752 (ABNT, 2014c). As propriedades físicas do pó de pedra são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO PÓ DE PEDRA

Características físicas		
Propriedade	Valor	Material pozzolânico NBR 12653 (ABNT, 2014d)
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,95	-
Atividade pozzolânica com cal aos 7 dias (MPa) (NBR 5751)	0,9	≥ 6
Índice de desempenho do pó com cimento aos 28 dias (%) (NBR 5752)	61	≥ 90

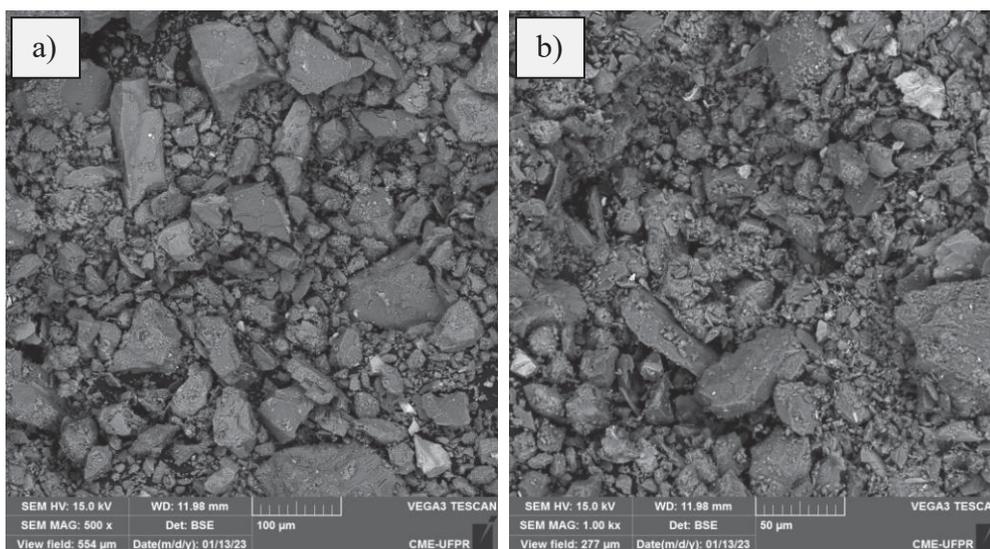
FONTE: A autora (2023).

Conforme observado na Tabela 10 o pó de pedra obteve um resultado de resistência à compressão médio de 0,9 MPa aos 7 dias, ficando abaixo do valor mínimo de 6 MPa, que é o estipulado pela NBR 12653 (ABNT, 2014d) para ser considerado material pozzolânico, indicando que não houve interação química significativa entre o pó de pedra e o hidróxido de cálcio durante a realização do ensaio pela NBR 5751 (ABNT, 2015a).

A média de resistências obtidas foram de 36,9 MPa para os corpos de prova sem pó de pedra e de 22,5 MPa para os corpos de prova contendo pó de pedra, indicando que os corpos de prova com pó de pedra tiveram índice de desempenho de 61% em relação aos corpos de prova sem pó de pedra conforme NBR 5752 (ABNT, 2014c). Conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014d) o material pozzolânico obtém um índice de desempenho maior ou igual a 90%, não sendo o caso para o pó de pedra utilizado nesta pesquisa.

Além disso, foram realizados a microscopia por MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) e a EDS (Espectroscopia por Dispersão de Elétrons) do pó de pedra. Os resultados da EDS estão apresentados no Anexo A. As imagens com aproximação de (a) 500 vezes e (b) 1000 vezes do ensaio de MEV estão apresentadas na Figura 21.

Figura 21 – IMAGENS DO MEV DO PÓ DE PEDRA



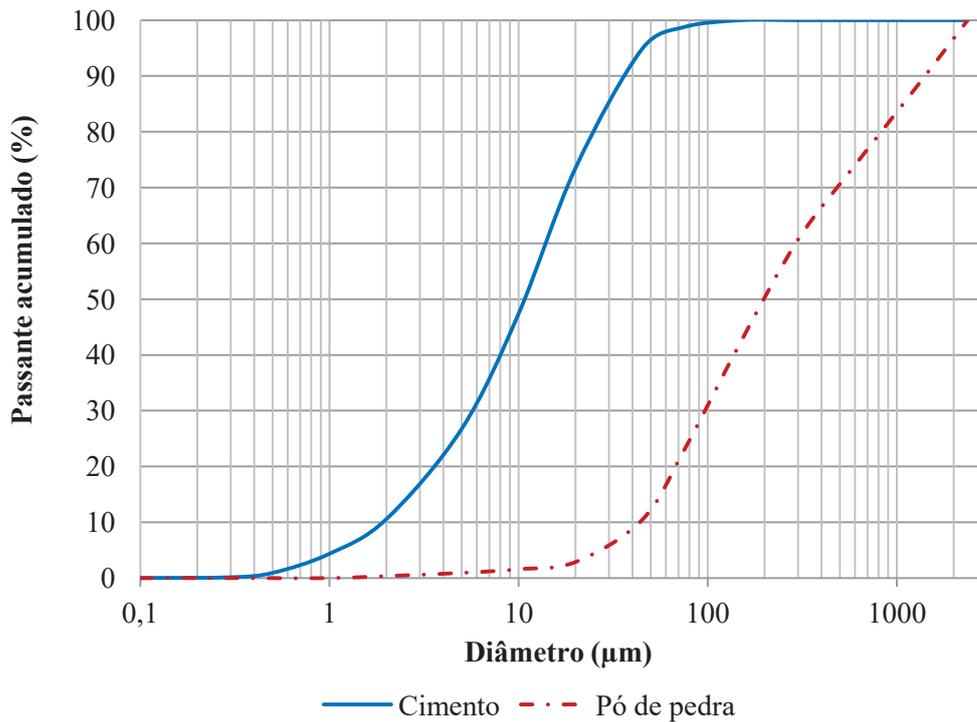
a) Pó de diabásio aproximado 500 vezes b) Pó de diabásio aproximado 1000 vezes

FONTE: A autora (2023).

É possível observar na Figura 21, tanto em (a) quanto em (b), que as partículas do pó de diabásio são irregulares, apresentando morfologia com grãos angulosos, lamelares e alguns próximos a esféricos.

Para os dois materiais finos foi realizado o ensaio de granulometria a laser com equipamento da marca SympaTEC modelo HELOS/BR, RODOS/L e VIBRI/L, de difração a laser de feixe paralelo, que analisa o tamanho das partículas individualmente por dispersão a seco com ar comprimido e aceleração de até 100 m/s. Os resultados estão apresentados na Figura 22.

Figura 22 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DO CIMENTO E DO PÓ DE PEDRA



FONTE: A autora (2023).

É possível observar na Figura 22 que ambas as curvas são contínuas, no entanto, as partículas presentes no pó de pedra são maiores em relação ao cimento, tendo um D50 de 150  $\mu\text{m}$  em comparação com o D50 de 10,76  $\mu\text{m}$  do cimento.

### 3.1.2.3 Aditivo superplastificante

Foi utilizado aditivo de terceira geração, com característica superplastificante e de aspecto líquido. Sua utilização acarreta na redução do consumo de água, aumento da fluidez e da coesão do concreto e seus requisitos estão em conformidade com a NBR 14725 (ABNT, 2014b). Suas especificações técnicas estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO ADITIVO

PH em 20 °C	Massa específica	Dosagem recomendada	Teor de sólidos
6	1,10 g/cm <sup>3</sup>	0,3 a 1,2 %	44,0% $\pm$ 2%

FONTE: Fabricante (2023).

## 3.2 MÉTODO

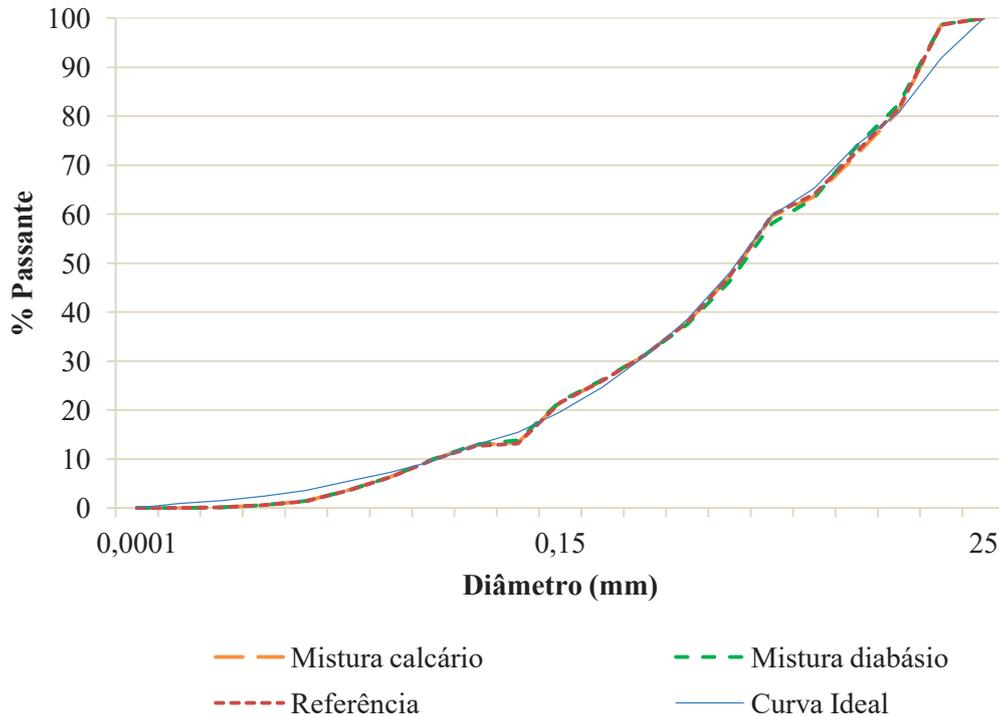
A seguir será apresentado o método aplicado no estudo de avaliação do potencial de utilização do pó de diabásio, estudo dos materiais finos, dosagem dos concretos e análise de suas propriedades nos estados fresco, endurecido e nos parâmetros de durabilidade e de sustentabilidade.

### 3.2.1 Avaliação do potencial de utilização do pó de diabásio

Antes da dosagem dos concretos do programa experimental fez-se uma verificação da validação de utilização do pó de diabásio como substituto parcial do cimento Portland. Para analisar a viabilidade do pó de diabásio foram feitos traços comparando com o pó de calcário, que é bastante utilizado como substituto parcial do cimento na produção de concreto, e com um traço de referência. Os traços foram dosados utilizando o modelo de Alfred para otimização da composição das misturas.

Com as curvas granulométricas dos materiais aplicou-se o modelo de Alfred (Equação 10) para encontrar a curva ideal e as proporções dos materiais para atingir a máxima densidade de empacotamento. Para os três traços (com pó de diabásio, com pó de calcário e de referência) foram considerados um fator de ajuste  $q$  de 0,3 para garantia de misturas com trabalhabilidade adequada para a moldagem (VARHEN et al, 2016; GRAZIA et al., 2018; LOPES, PEÇANHA e CASTRO, 2020). A soma dos quadrados dos resíduos e os menores erros em relação à curva ideal encontrados foram de 0,0079 para o traço com pó de calcário, de 0,0086 para o traço com pó de diabásio e de 0,0078 para o traço referência. A curva ideal e as curvas de cada traço encontradas pelo modelo podem ser observadas na Figura 23.

Figura 23 - CURVA IDEAL E CURVAS DOS TRAÇOS OBTIDAS PELO MODELO DE ALFRED PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO



FONTE: A autora (2023).

Os três traços foram dosados com a composição dos materiais definida pelo modelo de Alfred utilizando uma relação água/cimento padrão de 0,50. A Tabela 12 mostra o consumo dos materiais, sendo REF o traço referência, PC o traço contendo pó de calcário e PD o traço contendo pó de diabásio.

Tabela 12 - TRAÇOS DEFINIDOS PELO MODELO DE ALFRED PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO

Traço	Relação água/cimento	Finos (kg/m <sup>3</sup> )			Agregados (kg/m <sup>3</sup> )			Água (kg/m <sup>3</sup> )
		Cimento	Pó de calcário	Pó de diabásio	Areia	Brita 0	Brita 1	
REF	0,50	264,46	-	-	1124,42	180,74	729,28	132,23
PC	0,50	230,76	47,13	-	1132,89	169,70	758,46	115,38
PD	0,50	266,89	-	54,51	1009,91	273,93	695,78	133,45

FONTE: A autora (2023).

Os traços de validação da utilização do pó de diabásio foram dosados com contribuição de concreiteira da região metropolitana de Curitiba/PR, com apoio técnico de um laboratório móvel instalado na Universidade Federal do Paraná (UFPR). Para a produção dos concretos foi utilizado um misturador com capacidade de 20 litros que pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 - PRODUÇÃO DOS CONCRETOS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO



a) Misturador de 20 litros b) Corpos de prova recém-produzidos

FONTE: A autora (2023).

O procedimento de mistura dos materiais para produção dos concretos para validação do pó de diabásio seguiu os seguintes passos, adaptado de acordo com testes prévios para melhor homogeneização conforme a capacidade e velocidade do misturador:

- (1) Com o misturador ligado, inserção dos materiais finos e do agregado miúdo por aproximadamente 30 segundos;
- (2) Mistura prévia do aditivo com a quantidade total de água;
- (3) Inserção da água e do aditivo de maneira contínua pelo tempo de 30 segundos;
- (4) Colocação dos agregados graúdos por um tempo aproximado de 30 segundos;
- (5) Após incorporação dos últimos agregados, contaram-se mais 6 minutos de mistura, totalizando 7 minutos desde a colocação da água e 7 minutos e 30 segundos desde o início do procedimento de mistura.

Após a preparação dos concretos foram moldados corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm com adensamento mecânico em mesa vibratória, moldando cada corpo de prova em 4 camadas de altura iguais. Para homogeneização e compactação, cada camada permaneceu na mesa vibratória por 20 segundos. Os corpos de prova recém-produzidos e compactados ficaram armazenados em local abrigado. As amostras foram desformadas após 24h e mantidas em cura em câmara úmida com temperatura e umidade controladas (temperatura de  $22 \pm 2$  °C e umidade relativa de 95%) até a data de realização dos ensaios. A Tabela 13 apresenta a matriz experimental dos concretos.

Tabela 13 – ENSAIOS DA MATRIZ EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO

Ensaio		Idade	CPs
Estado fresco	NBR 16889 Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT, 2020)	-	-
	NBR 9833 Concreto fresco - determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico (ABNT, 2008)		
Estado endurecido	NBR 5739 Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2018a)	28	3
	NBR 8522-1 Concreto endurecido - determinação do módulo estático à compressão (ABNT, 2021e)	28	3
Durabilidade*	Método de Wenner (método dos quatro pontos) - Resistividade elétrica do concreto	28	-
Sustentabilidade	Consumo de cimento por m <sup>3</sup> e por MPa	-	-
	Emissões de CO <sub>2</sub> por m <sup>3</sup> e por MPa	-	-
	Custos por m <sup>3</sup> e por MPa	-	-
Total de corpos de prova por traço =			6
Quantidade de traços	Traço referência (REF)	-	6
	Traço com pó de calcário (PC)	-	6
	Traço com pó de diabásio (PD)	-	6
Total de traços da matriz experimental =			3
Total de corpos de prova da matriz experimental para validação do pó de diabásio =			18

\*Ensaio não destrutivo.

FONTE: A autora (2023).

Apesar da tentativa de realização do ensaio, em todos os traços produzidos não foi possível determinar a consistência pelo abatimento do tronco de cone pela NBR 16889 (ABNT, 2020) por causa da alta compactidade adquirida nas misturas. Para a realização dos ensaios no estado endurecido todos os corpos de prova foram retificados. Foram separados 3 corpos de prova de cada traço para realização dos ensaios destrutivos e todos os ensaios do programa experimental foram realizados aos 28 dias. Os índices de ecoeficiência dos concretos para validação do pó de diabásio foram calculados conforme proposto por Damineli et al. (2010) a partir das equações 1 e 2. A Tabela 14 apresenta os fatores de emissão dos materiais utilizados para validação do pó de diabásio.

Tabela 14 - FATORES DE EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DOS MATERIAIS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO

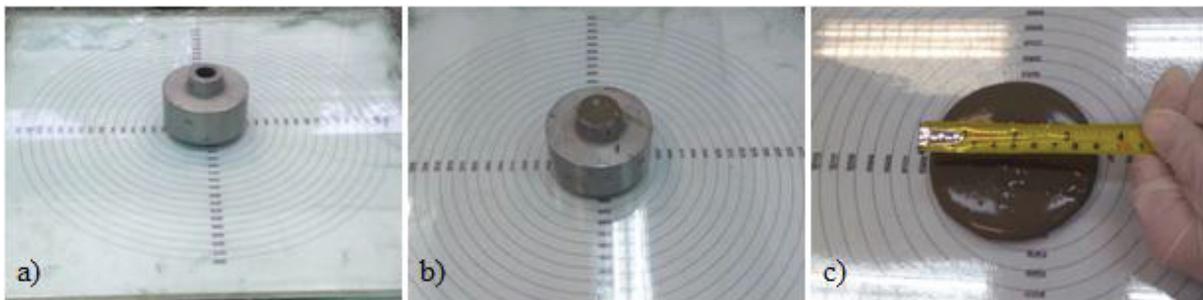
Material	Emissões CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> e/kg)	Fonte
Cimento	0,8630	SIDAC (2022)
Pó de pedra	0,0047	SIDAC (2022)
Areia	0,0048	Sinkhonde (2022)
Brita 0	0,0048	Sinkhonde (2022)
Brita 1	0,0048	Sinkhonde (2022)

FONTE: A autora (2023).

### 3.2.2 Materiais finos

O estudo dos materiais finos foi realizado para obtenção dos valores de densidade de empacotamento necessários como dados de entrada para a dosagem dos concretos a partir do modelo CPM. Inicialmente, encontrou-se o ponto de saturação do aditivo superplastificante pelo ensaio do mini cone de Kantro (KANTRO, 1980) para o cimento e para o pó de pedra. O ensaio é realizado com um tronco de cone metálico contendo uma abertura em seu centro transpassando de uma extremidade à outra, que é colocado sobre uma placa de vidro onde será medido o diâmetro de espalhamento da pasta ensaiada. A pasta foi inserida no cone, rasada na superfície e logo em seguida levantou-se o tronco de cone verticalmente, fazendo com que a pasta espalhasse sobre a placa de vidro. Imediatamente após esse processo, fez-se a leitura de dois diâmetros com a utilização de trena com precisão de uma casa decimal. Os detalhes do ensaio podem ser observados na Figura 25.

Figura 25 - ENSAIO DO MINI CONE DE KANTRO



a) Equipamento de ensaio montado b) Pasta dentro do tronco de cone c) Leitura do espalhamento

FONTE: A autora (2023).

Para a realização deste ensaio, a relação água/finos foi mantida constante e os teores de superplastificante variaram de 0,3% a 1,5%, com incrementos de 0,3% em 0,3% em ambos os materiais. O fabricante recomenda a utilização mínima de 0,3% e máxima de 1,2%, mas optou-se por fazer até um teor acima do recomendado para observar o comportamento do material. A quantidade de água do superplastificante foi corrigida da quantidade de água total da mistura.

Em seguida, foi realizada a determinação da densidade de empacotamento pelo método úmido de Wong e Kwan (2008) para cada um dos materiais finos. Para diferentes relações água/finos cada material, de maneira individual, foi misturado com a água e com o aditivo superplastificante para realização do procedimento. A sequência do método úmido de Wong e Kwan (2008) utilizada é discriminada a seguir: pesagem da quantidade de material fino, da quantidade de água e da quantidade de superplastificante; adição de 80% da água no recipiente de mistura; adição da metade do material fino e do superplastificante no recipiente, misturando em velocidade baixa por 3 minutos; divisão do restante dos materiais em quatro partes iguais, adicionando uma porção de cada

vez no recipiente e misturando em velocidade baixa por 3 minutos cada; transferência da mistura em um molde cilíndrico com volume conhecido preenchendo-o em duas camadas (sendo a segunda com material em excesso) e aplicação de compactação pela mesa de consistência com 30 golpes cada camada, a fim de manter a mesma aplicação de energia de compactação em todos os ensaios; retirada do excesso com auxílio de régua e pesagem do material.

É importante observar que o método experimental úmido de Wong e Kwan (2008) adiciona 100% da água na primeira mistura. A adaptação dos 80% de água para a primeira mistura e a divisão do restante em 4 parcelas iguais de 5% cada é recomendada por Campos (2019) a fim de melhorar a qualidade da mistura dos materiais. A utilização da água nas demais porções auxilia na diluição do aditivo superplastificante que, por ter maior viscosidade, quando utilizado sozinho pode acarretar em perdas maiores.

O processo de mistura pelo método experimental tem como objetivo atingir a proporção de materiais para uma consistência ideal, ou seja, a proporção em que resultará na máxima densidade de empacotamento. Isso implica que a quantidade de água na mistura será o suficiente para envolver as partículas, não havendo água em excesso para aumento de fluidez. A Figura 26 mostra a diferença entre as consistências durante a realização do ensaio.

Figura 26 - MISTURAS PELO MÉTODO EXPERIMENTAL COM DIFERENTES RELAÇÕES ÁGUA/FINOS



a) Pasta com quantidade de água insuficiente b) Pasta com consistência ideal para a densidade de empacotamento máxima

FONTE: A autora (2023).

Este procedimento foi repetido para diferentes relações água/finos, que variaram de 0,14 a 0,17 para o cimento e de 0,15 a 0,18 para o pó de pedra. Estas relações foram definidas a partir de ensaios prévios já realizados por Campos (2019) e pela observação do comportamento dos materiais conforme os ensaios foram sendo realizados. Assim, pôde-se definir a densidade de empacotamento máxima de cada um dos materiais. E, a partir das densidades medidas, o índice de vazios e a concentração de sólidos foram calculados conforme Equações 7 e 8, apresentadas anteriormente no item 2.3.1. O teor de aditivo utilizado foi mantido constante, com os teores definidos previamente

pelo ensaio de saturação do aditivo pelo mini tronco de cone. A quantidade de água do superplastificante foi corrigida da quantidade de água total dos traços. Um exemplo de cálculo pelo método experimental úmido de Wong e Kwan (2008) está apresentado no Apêndice A.

### 3.2.3 Dosagem dos concretos

Para a dosagem dos concretos foram determinadas quatro diferentes relações água/finos: 0,45, 0,50, 0,55 e 0,60. As relações água/finos foram definidas por estudos prévios buscando concretos de resistência convencional e com consistência adequada para moldagem. A composição dos materiais granulares foi definida conforme os modelos de Alfred e CPM. Sendo que, para o modelo de Alfred, foram compostos os materiais de quatro traços, um para cada relação água/finos. Já para o modelo CPM, foram produzidos oito traços, visto que, para este modelo, primeiro foi necessário definir o teor de pasta ideal, de acordo com o método proposto por Campos (2019) e Campos, Klein e Marques Filho (2020).

Os fatores mantidos constantes na pesquisa foram: o teor de aditivo superplastificante em 1,2% (resultado do item 3.2.1 que será apresentado mais adiante), idades de ensaio (7 e 28 dias), tempo e tipo de cura dos corpos de prova (cura em câmara úmida em 7 e 28 dias) e o teor de substituição do cimento pelo pó de pedra de 20%. O teor de pó de pedra foi inserido nos modelos, permanecendo em 20% porque, de acordo com o método proposto por Campos (2019), teores acima desse valor apresentam perdas de desempenho mecânico, de eficiência e de empacotamento das partículas, sendo este o máximo teor recomendado. Os procedimentos de ensaio seguiram o mesmo padrão de execução, respeitando as normativas pertinentes, utilizando os mesmos equipamentos e mesmos operadores. O método para definição dos materiais pelos modelos de empacotamento e a composição dos traços por cada modelo estão apresentados nos itens a seguir.

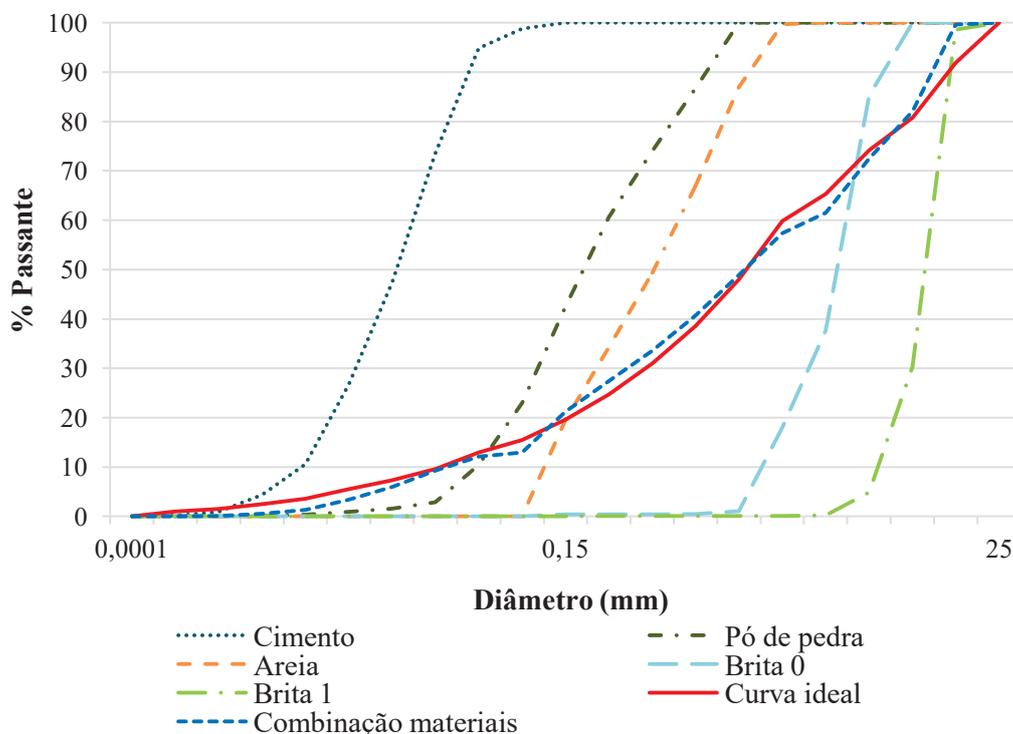
#### 3.2.3.1 Dosagem com a composição dos materiais definida pelo modelo de Alfred

Partindo para o procedimento de dosagem, tendo a caracterização dos materiais e suas curvas granulométricas definidas, iniciou-se a composição dos materiais pelo modelo de Alfred. A partir da Equação 10 do modelo, foi calculada a porcentagem passante e acumulada de partículas para cada diâmetro, sendo estes definidos de acordo com a junção da granulometria dos finos e dos agregados, conforme curvas granulométricas de cada material. Inicialmente seria usado o fator de ajuste  $q = 0,37$ , pois Campos et al. (2022), utilizando materiais da Região Metropolitana de Curitiba, demonstraram que o valor de 0,37 resultou na mistura com o máximo empacotamento das partículas.

Porém, para o presente estudo, ensaios preliminares demonstraram que o valor de  $q = 0,37$  resultou em concreto seco e difícil de moldar. Então, reduziu-se o fator de ajuste para 0,30, a fim de melhorar a trabalhabilidade. Quanto menor o módulo de distribuição  $q$ , maior tende a ser a trabalhabilidade do concreto (YOUSUF, SANCHEZ e SHAMMEH, 2019; CAMPOS et al., 2022).

A combinação dos diferentes materiais e suas granulometrias foi calculada pelas equações do modelo inseridas no Python, uma ferramenta de linguagem de programação, em que, por meio de milhares de combinações aleatórias geradas com o método de Monte Carlo, indicou a curva que mais se aproximou da curva ideal definida pelo modelo de Alfred. Dessa forma, as curvas granulométricas dos materiais foram mantidas constantes, mudando apenas a proporção de cada material na mistura, onde a soma das proporções entre os materiais fosse igual a um, com os 20% de substituição do cimento pelo pó de pedra pré-definido. Para melhor compreensão da aplicação do modelo de Alfred, um roteiro de cálculo está apresentado no Apêndice C. A Figura 27 apresenta as curvas granulométricas individuais dos materiais, a curva ideal calculada pelo modelo e a curva de combinação dos materiais que mais se aproximou da ideal.

Figura 27 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS, CURVA IDEAL E CURVA DE COMBINAÇÃO DOS MATERIAIS PELO MODELO DE ALFRED



FONTE: A autora (2023).

Pelo Python, calculou-se o erro utilizando a Equação 18 da soma dos quadrados dos resíduos. Onde, de todas as combinações aleatórias geradas, o programa mostrou aquela com o

menor valor para o erro (RSS = 0,0132), sendo essa a mistura com proporções combinadas que mais se aproximou da curva ideal, observada na Figura 27. As proporções dos materiais geradas pelo modelo de Alfred estão apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - PROPORÇÕES DOS MATERIAIS CALCULADAS PELO MODELO DE ALFRED COM A UTILIZAÇÃO DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON

Materiais	Cimento	Pó de pedra	Areia	Brita 0	Brita 1
Proporção	12,50%	2,56%	38,68%	20,51%	25,75%

FONTE: A autora (2023).

Após o cálculo da proporção de cada material para atingir a curva mais próxima da curva ideal, tem-se o traço em volume. Com a utilização da massa específica dos materiais, definiu-se o traço em massa, sendo possível assim iniciar a dosagem. Para cada relação água/finos estipulada inicialmente foram calculados o consumo de cimento e dos demais materiais com a Equação 24.

$$C = \frac{1 - (V_{ar} \times 10)}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{p}{\rho_p} + \frac{a}{\rho_a} + \frac{b_0}{\rho_{b_0}} + \frac{b_1}{\rho_{b_1}} + \frac{a/c}{\rho_{\text{água}}}} \quad (24)$$

Onde:

C: consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>);

V<sub>ar</sub>: volume de ar (%);

p: proporção do pó de pedra em relação à massa de cimento;

a: proporção da areia em relação à massa de cimento;

b<sub>0</sub>: proporção da brita 0 em relação à massa de cimento;

b<sub>1</sub>: proporção da brita 1 em relação à massa de cimento;

a/c: relação água/cimento;

ρ<sub>c</sub>: massa específica do cimento (kg/m<sup>3</sup>);

ρ<sub>p</sub>: massa específica do pó de pedra (kg/m<sup>3</sup>);

ρ<sub>a</sub>: massa específica da areia (kg/m<sup>3</sup>);

ρ<sub>b<sub>0</sub></sub>: massa específica da brita 0 (kg/m<sup>3</sup>);

ρ<sub>b<sub>1</sub></sub>: massa específica da brita 1 (kg/m<sup>3</sup>);

ρ<sub>água</sub>: massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>).

Para o volume de vazios foi utilizado o teor de 1,5% conforme proposto por Campos (2019) para a aplicação de técnicas de empacotamento. A Tabela 16 apresenta os traços dos concretos definidos pelo modelo de Alfred.

Tabela 16 - TRAÇOS DEFINIDOS PELO MODELO DE ALFRED

Traço	Relação água/finos	Relação água/cimento	Finos (kg/m <sup>3</sup> )		Agregados (kg/m <sup>3</sup> )			Água (kg/m <sup>3</sup> )
			Cimento	Pó de pedra	Areia	Brita 0	Brita 1	
Alfred 1	0,45	0,55	245,62	52,70	950,45	451,01	585,25	135,09
Alfred 2	0,50	0,61	242,06	51,93	936,64	444,46	576,75	147,65
Alfred 3	0,55	0,67	238,59	51,19	923,23	438,10	568,49	159,86
Alfred 4	0,60	0,73	235,22	50,46	910,20	431,91	560,47	171,71

FONTE: A autora (2023).

### 3.2.3.2 Dosagem com a composição dos materiais definida pelo modelo CPM

A dosagem dos concretos pela composição dos materiais a partir do modelo CPM é dividida em duas etapas principais. Primeiro foram realizados quatro traços de uma mesma relação água/finos para definição do teor de pasta ideal conforme método proposto por Campos (2019) e Campos, Klein e Marques Filho (2020). Posteriormente, após a definição do teor de pasta ideal, foram produzidos os concretos com a variação das relações água/finos definidas em 0,45, 0,50, 0,55 e 0,60, as mesmas dos traços otimizados pelo modelo de Alfred. A seguir está apresentado o passo a passo do método de dosagem pelo modelo CPM:

- (1) Composição ideal dos materiais finos em função da ecoeficiência;
- (2) Composição ideal dos agregados para menor índice de vazios;
- (3) Dosagem de traços com variação do teor de pasta. Foram definidos quatro teores de pasta em excesso a partir do teor de pasta mínimo calculado conforme Figura 15 no item 2.4. Os demais teores de pasta foram definidos para verificação do comportamento dos concretos contendo 2%, 4%, 6% e 8% de pasta em excesso. Dos quatro traços foi escolhido o teor de pasta em que o concreto apresentou melhor ecoeficiência;
- (4) Foram definidas as quatro relações água/finos de 0,45, 0,50, 0,55 e 0,60 para dosagem dos concretos com o teor de pasta constante, conforme definição anterior pelo método proposto, utilizando o modelo CPM.

Para melhor compreensão da aplicação do modelo CPM, um roteiro de cálculo está apresentado no Apêndice B. A dosagem utilizando a composição dos materiais pelo modelo CPM iniciou com a composição do teor de pasta ideal como afirmado anteriormente. Para isso, foi determinada a composição dos materiais finos e dos agregados pelo modelo CPM, utilizando um índice de compactação K igual a 12 para os finos e igual a 4,5 para os agregados, como explanado no item 2.4 e na Tabela 4.

Os dados de entrada para composição dos materiais finos do método foram as densidades de empacotamento encontradas pelo método úmido experimental de Wong e Kwan (2008) (resultados do item 3.2.2), o diâmetro D50 de cada classe de tamanho dos grãos definido a partir do ensaio de granulometria a laser e as proporções em volume dos materiais que foram testadas de maneira aleatória. A Tabela 17 apresenta os dados de entrada dos materiais finos.

Tabela 17 - DADOS DE ENTRADA DOS MATERIAIS FINOS PARA O MODELO CPM

Dados de entrada dos materiais finos		
Característica	Cimento	Pó de pedra
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,09	2,95
D50 (µm)	10,76	150
Densidade de empacotamento (-)	0,641	0,629

FONTE: A autora (2023).

A proporção ideal dos materiais finos foi definida como aquela que proporcionou o maior valor de densidade de empacotamento real, de acordo com o modelo CPM. Para os materiais finos, foi observado que conforme se aumentava o teor de pó de pedra, maior era o valor da densidade de empacotamento real. Como a literatura sugere o teor de substituição máximo de 20%, este foi o valor em que ficou limitado o uso do pó de pedra, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - PROPORÇÕES DOS MATERIAIS FINOS CALCULADAS PELO MODELO CPM

Materiais	Cimento	Pó de pedra
Proporção	80%	20%

FONTE: A autora (2023).

Já os dados de entrada para a composição dos agregados foram o diâmetro D50 de cada classe de tamanho dos grãos e a densidade de empacotamento experimental de cada material, definidas pela Equação 3. A proporção ideal dos agregados foi encontrada por combinações aleatórias, considerando cada agregado como uma classe de tamanho de grãos para feito de utilização prática. Os dados de entrada dos agregados podem ser observados na Tabela 19.

Tabela 19 - DADOS DE ENTRADA DOS AGREGADOS PARA O MODELO CPM

Dados de entrada dos agregados			
Característica	Areia	Brita 0	Brita 1
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,47	2,76	2,67
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,86	1,60	1,60
D50* (mm)	0,60	6,30	12,50
Densidade de empacotamento (-)	0,754	0,579	0,598

FONTE: A autora (2023).

Pelo modelo CPM, tendo os dados de entrada dos agregados, fez-se a variação das proporções para calcular o maior valor de densidade de empacotamento real, conforme Equação 14. As variações de proporções das classes de cada agregado seguiram de 5% em 5% e, ao se aproximar do teor ideal, com variações de 1% para melhor combinação, conforme proposto pelo método de dosagem de Campos (2019) e Campos, Klein e Marques Filho (2020), apresentado no item 2.4. A Tabela 20 apresenta as proporções em volume dos agregados definidas pelo modelo CPM que resultou no maior valor de densidade de empacotamento real.

Tabela 20 - PROPORÇÕES DOS AGREGADOS CALCULADAS PELO MODELO CPM

Materiais	Areia	Brita 0	Brita 1
Proporção	49%	10%	41%

FONTE: A autora (2023).

Com a composição ideal dos materiais finos e dos agregados, calculou-se o volume de pasta mínimo para preencher os vazios deixados pelos agregados e para garantir a trabalhabilidade da mistura, de acordo com a Equação 25 e o esquema apresentado na Figura 15 do método de dosagem utilizado.

$$V_{pm} = 1 - \frac{ME_i - MU_i}{ME_i} \quad (25)$$

Onde:

$V_{pm}$ : volume de pasta mínimo (m<sup>3</sup>);

$ME_i$ : massa específica da composição ideal dos agregados (média ponderada);

$MU_i$ : massa unitária da composição ideal dos agregados (experimental).

Após aplicação da Equação 25, o volume de pasta mínimo calculado foi de 24%. Tendo o volume de pasta mínimo foi calculado o volume de pasta inicial conforme Equação 26 proposta pelo método de Campos (2019) e Campos, Klein e Marques Filho (2020).

$$V_{pi} = V_{pm} + 2\% \quad (26)$$

Onde:

$V_{pi}$ : volume de pasta inicial (m<sup>3</sup>);

$V_{pm}$ : volume de pasta mínimo (m<sup>3</sup>).

Posteriormente, o volume de pasta inicial, calculado em 26% com a Equação 26, teve acréscimos de 2% em 2% até o limite máximo de 8% de excesso de pasta, conforme explanado no item 2.4 proposto pelo método de dosagem de Campos (2019) e de Campos, Klein e Marques Filho (2020). Assim, foram realizados quatro traços de uma mesma relação água/finos (a relação 0,45 foi escolhida) para definição do teor de pasta ideal, com variação do volume de pasta entre 26% e 32%, conforme apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - VARIAÇÕES DO VOLUME DE PASTA PARA O MODELO CPM

Relação a/finos, em massa (pré-definida para teste)	Volume de pasta (m <sup>3</sup> )
0,45	0,26
	0,28
	0,30
	0,32

FONTE: A autora (2023).

Utilizando as equações 21 a 23 do método de dosagem proposto por Campos (2019) e por Campos, Klein e Marques Filho (2020), obteve-se o consumo dos materiais para a dosagem dos concretos para definição do teor de pasta ideal, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - TRAÇOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA PELO CPM

Traço	Relação água/finos	Volume de pasta (m <sup>3</sup> )	Finos (kg/m <sup>3</sup> )		Agregados (kg/m <sup>3</sup> )			Água (kg/m <sup>3</sup> )
			Cimento	Pó de pedra	Areia	Brita 0	Brita 1	
Teor Pasta 1	0,45	0,26	264,87	63,13	896,91	204,36	810,98	147,65
Teor Pasta 2	0,45	0,28	285,24	67,99	872,66	198,84	789,06	159,01
Teor Pasta 3	0,45	0,30	305,62	72,84	848,42	193,31	767,14	170,37
Teor Pasta 4	0,45	0,32	325,99	77,70	824,18	187,79	745,22	181,73

FONTE: A autora (2023).

A partir dos resultados das propriedades dos concretos dosados com diferentes teores de pasta, definiu-se aquele com a melhor ecoeficiência em termos de resistência mecânica e redução das emissões de CO<sub>2</sub>. O teor de pasta de 26% foi o que ficou definido conforme resultados obtidos da

dosagem inicial do modelo CPM, e seus resultados são apresentados mais adiante no item 4.3. Com o teor de pasta definido em 26%, fez-se a composição dos quatro traços estipulados pelas diferentes relações água/finos 0,45, 0,50, 0,55 e 0,60.

Novamente, utilizando as equações 21 a 23 do método de dosagem proposto por Campos (2019) definiu-se a composição dos materiais para a produção dos concretos, dessa vez com o teor de pasta fixo em 26% e variação da relação água/finos. As equações propostas pelo método definem o consumo de materiais em volume, posteriormente, com a utilização da massa específica, foi realizado o cálculo dos traços em massa. Os consumos dos materiais definidos pelo modelo CPM são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - TRAÇOS DEFINIDOS PELO MODELO CPM

Traço	Relação água/finos	Relação água/cimento	Finos (kg/m <sup>3</sup> )		Agregados (kg/m <sup>3</sup> )			Água (kg/m <sup>3</sup> )
			Cimento	Pó de pedra	Areia	Brita 0	Brita 1	
CPM 1	0,45	0,56	264,87	63,13	896,91	204,36	810,98	147,65
CPM 2	0,50	0,62	248,85	59,31	896,91	204,36	810,98	154,13
CPM 3	0,55	0,68	234,65	55,93	896,91	204,36	810,98	159,88
CPM 4	0,60	0,74	221,99	52,91	896,91	204,36	810,98	165,00

FONTE: A autora (2023).

### 3.2.3.3 Produção e caracterização dos concretos ecoeficientes

Todos os concretos foram produzidos no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) com utilização de betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros. Para o procedimento de mistura dos concretos seguiram-se os seguintes passos, adaptados a partir de Daminieli (2013), conforme observação e realização de teste in loco para melhor homogeneização dos materiais:

- (1) Homogeneização dos materiais finos em recipiente separado, ainda secos, para evitar possíveis separações dos grãos com maior área superficial;
- (2) Imprimação da betoneira e colocação dos agregados graúdos;
- (3) Com a betoneira ligada, colocação da metade da água e metade do aditivo de forma contínua, por aproximadamente 30 segundos;
- (4) Colocação dos materiais finos de forma contínua, por aproximadamente 1 minuto;
- (5) Mistura dos materiais continuamente por 1 minuto e meio;

- (6) Colocação do agregado miúdo continuamente, por aproximadamente 2 minutos e meio;
- (7) Colocação do restante da água e do aditivo de forma contínua, por aproximadamente 30 segundos;
- (8) Continuação da mistura por mais 10 minutos, podendo parar a betoneira em intervalos curtos de tempo para raspagem das paredes. A mistura finaliza com o total de 16 minutos.

Logo após a produção dos concretos foram realizados os ensaios de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone para todos os traços produzidos de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020). Entretanto, nenhuma das amostras apresentou coesão suficiente para manter o concreto em formato cônico e realizar a leitura do abatimento, possivelmente acarretada pela falta de finos na composição das misturas. Na Figura 28 é possível observar que o ensaio de consistência não foi concluído devido à queda inadequada do tronco de cone.

Figura 28 - CONCRETOS SEM CONSISTÊNCIA SUFICIENTE PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE



a) Traço CPM 3 b) Traço Teor de Pasta 1 c) Traço CPM 1 d) Traço Alfred 3

FONTE: A autora (2023).

Na sequência, os corpos de prova foram moldados em formas metálicas cilíndricas de dimensões 10 x 20 cm, dividindo em 4 camadas de altura iguais, com aplicação de 12 golpes de adensamento manual utilizando a haste metálica padronizada para cada camada. Os corpos de prova foram identificados e permaneceram protegidos contra intempéries em local abrigado por 24h até o momento da desforma, como observado na Figura 29.

Figura 29 – PRODUÇÃO DOS CONCRETOS



a) Betoneira com capacidade de 120 litros b) Corpos de prova recém moldados

FONTE: A autora (2023).

Após a desforma os corpos de prova permaneceram em cura na câmara úmida com temperatura controlada de  $22 \pm 2$  °C e umidade relativa acima de 95% até a data de seus ensaios não destrutivos e de suas rupturas. Todos os corpos de prova foram retificados um dia antes da realização dos ensaios. A Figura 30 apresenta os corpos de prova em cura no interior da câmara úmida e a retífica utilizada para retificação dos corpos de prova da matriz experimental.

Figura 30 - CURA E RETIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA



a) Corpos de prova na câmara úmida b) Retífica utilizada para retificação dos corpos de prova

FONTE: A autora (2023).

Para visualização da aparência dos corpos de prova produzidos, a Figura 31 apresenta imagens dos corpos de prova moldados a partir do modelo de Alfred e, na sequência, a Figura 32 apresenta as imagens dos corpos de prova moldados a partir da composição dos materiais pelo modelo CPM.

Figura 31 - CORPOS DE PROVA DOS CONCRETOS DOSADOS A PARTIR DO MODELO DE ALFRED



a) Alfred a/finos 0,45 b) Alfred a/finos 0,50 c) Alfred a/finos 0,55 d) Alfred a/finos 0,60

FONTE: A autora (2023).

Figura 32 - CORPOS DE PROVA DOS CONCRETOS DOSADOS A PARTIR DO MODELO CPM



a) CPM a/finos 0,45 b) CPM a/finos 0,50 c) CPM a/finos 0,55 d) CPM a/finos 0,60

FONTE: A autora (2023).

Observando a Figura 31 e a Figura 32, quando comparados os corpos de prova do modelo de Alfred com os do modelo CPM, observa-se que, em relações a/finos menores, os concretos

dosados a partir do modelo de Alfred apresentaram menor uniformidade na moldagem, devido à dificuldade de manuseio no estado fresco.

Para os ensaios de resistência à compressão e de resistência à tração foram definidas rupturas aos 7 e 28 dias, com 3 corpos de prova para cada idade. Para os ensaios de módulo de elasticidade foram utilizados 4 corpos de prova na idade de 28 dias. Para os ensaios não destrutivos os corpos de prova utilizados foram os mesmos dos ensaios mecânicos. Os ensaios dos traços de definição do teor de pasta foram realizados somente aos 28 dias, conforme orienta o método de dosagem proposto por Campos (2019). A Tabela 24 apresenta a matriz experimental do estudo dos concretos.

Tabela 24 – MATRIZ EXPERIMENTAL DO ESTUDO DOS CONCRETOS

Ensaio		Idade	CPs Alfred	CPs CPM
Estado fresco	NBR 16889 Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT, 2020)	-	-	-
	NBR 9833 Concreto fresco - determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico (ABNT, 2008)	-	-	-
Estado endurecido	NBR 5739 Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2018a)	7	3	3
		28	3	6
	NBR 7222 Concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2011)	7	3	3
		28	3	6
NBR 8522-1 Concreto endurecido – determinação do módulo estático à compressão (ABNT, 2021e)		28	4	8
Durabilidade*	NBR 8802 Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (ABNT, 2019)	7	-	-
		28	-	-
	Método de Wenner (método dos quatro pontos) - Resistividade elétrica do concreto	7	-	-
		28	-	-
Sustentabilidade	Consumo de cimento por m <sup>3</sup> e por MPa	-	-	-
	Emissões de CO <sub>2</sub> por m <sup>3</sup> e por MPa	-	-	-
	Custos por m <sup>3</sup> e por MPa	-	-	-
Total de corpos de prova por modelo =			16	26
Quantidade de traços	Composição dos materiais pelo modelo Alfred	-	4	-
	Composição do teor de pasta pelo modelo CPM	-	-	4
	Composição dos materiais pelo modelo CPM	-	-	4
Total de traços da matriz experimental =			12	
Total de corpos de prova da matriz experimental =			168	

\*Ensaio não destrutivo.

FONTE: A autora (2023).

Todos os ensaios foram realizados conforme normas e recomendações apresentadas na Tabela 24. O teor de pasta para o método de dosagem pelo CPM proposto por Campos (2019) é verificado a partir do consumo de cimento por unidade de resistência mecânica. Os demais ensaios foram realizados para verificação do comportamento dos concretos com variação dos teores de pasta.

Por fim, todos os concretos passaram por análise em termos de sustentabilidade, considerando as emissões de CO<sub>2</sub> e os custos para produção do concreto a partir dos materiais utilizados. A Tabela 25 apresenta os fatores de emissão e os custos dos materiais utilizados. Os valores dos custos foram obtidos diretamente com os fornecedores.

Tabela 25 - FATORES DE EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> E CUSTOS DOS MATERIAIS DOS CONCRETOS ECOEFICIENTES

Material	Custo (R\$/kg)	Emissões CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> e/kg)	Fonte
Cimento	0,9953	0,8630	SIDAC (2022)
Pó de diabásio	0,0275	0,0047	SIDAC (2022)
Areia	0,0252	0,0048	Sinkhonde (2022)
Brita 0	0,0257	0,0048	Sinkhonde (2022)
Brita 1	0,0261	0,0048	Sinkhonde (2022)
Aditivo	5,0740	-	-

FONTE: A autora (2023).

Os fatores de emissão apresentados na Tabela 25 foram retirados da literatura e as análises de emissões são aproximadas para efeito comparativo. Os custos dos materiais foram obtidos com os respectivos fornecedores. Custos com processos de produção, adensamento, transporte, cura e execução de ensaios não foram considerados por serem os mesmos em todos os concretos. Além disso, conforme proposto por Damineli et al. (2010), foram calculados os índices de intensidade de ligante (Equação 1) e intensidade de CO<sub>2</sub> (Equação 2) para todos os traços estudados.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados de acordo com o programa experimental bem como suas respectivas análises.

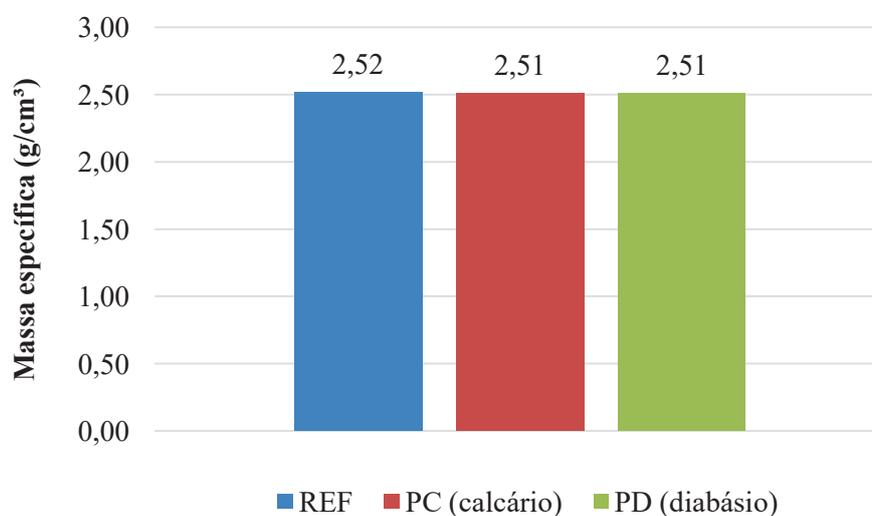
### 4.1 CONCRETOS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO

Neste item serão apresentados os resultados referentes aos ensaios realizados nos três traços de concretos dosados para validação da utilização do pó de diabásio.

#### 4.1.1 Ensaio no estado fresco dos concretos para avaliação do potencial do pó de diabásio

Para o estado fresco foi realizado apenas o ensaio de massa específica e os resultados do ensaio nos concretos para validação do pó de diabásio são observados na Figura 33.

Figura 33 - MASSA ESPECÍFICA DOS CONCRETOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO, NO ESTADO FRESCO



FONTE: A autora (2023).

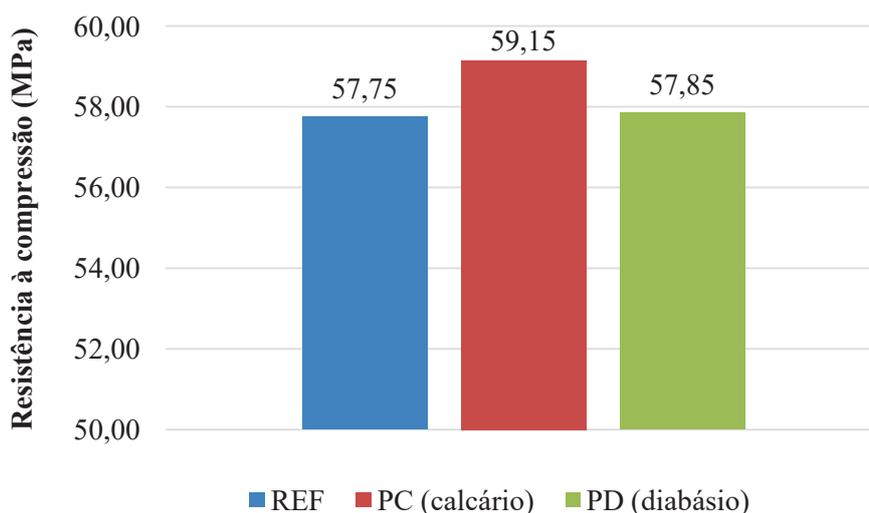
De acordo com os resultados da Figura 33, os três concretos apresentaram valores médios de massa específica no estado fresco estatisticamente equivalentes entre si conforme Análise de Variância (ANOVA), apresentada no Anexo B. Observa-se que o valor do traço referência é ligeiramente mais alto enquanto que os traços contendo pó de pedra tiveram o mesmo valor de massa específica, independentemente da origem mineralógica.

#### 4.1.2 Ensaio no estado endurecido dos concretos para avaliação do potencial do pó de diabásio

##### 4.1.2.1 Resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos concretos são apresentados na Figura 34.

Figura 34 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO, AOS 28 DIAS



FONTE: A autora (2023).

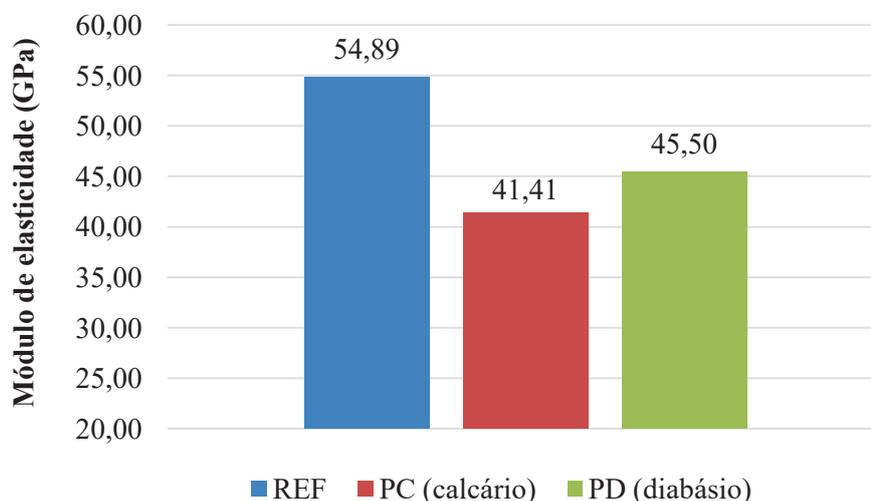
Na Figura 34 observa-se que ambos os concretos contendo pó de pedra obtiveram resistência à compressão superior ao concreto de referência e que o concreto contendo pó de calcário foi o que obteve o maior valor. Além disso, todos os concretos apresentaram resistência à compressão superior a 50 MPa, resultando em concretos de alta resistência conforme classificação da NBR 12655 (ABNT, 2022).

Com a aplicação da ANOVA (Anexo B), dentro do intervalo de 95% de confiança, todos os traços são estatisticamente equivalentes, ou seja, a substituição parcial do cimento pelo pó de pedra, independentemente de sua origem mineralógica, possibilita a produção de concretos mais ecoeficientes sem afetar sua resistência à compressão. O trabalho de Viera et al. (2020) produziu concretos com substituições parciais do cimento por adição mineral em teores de até 10% que chegaram a resistências similares, entre 50 e 60 MPa, com um consumo de cimento na faixa de 400 kg/m<sup>3</sup>. Enquanto que, neste estudo, o consumo de cimento entre 230 e 270 kg/m<sup>3</sup> garantiu a mesma faixa de resistência à compressão.

#### 4.1.2.2 Módulo de elasticidade

A Figura 35 apresenta os valores de módulo de elasticidade estático dos concretos.

Figura 35 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO DOS CONCRETOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO, AOS 28 DIAS



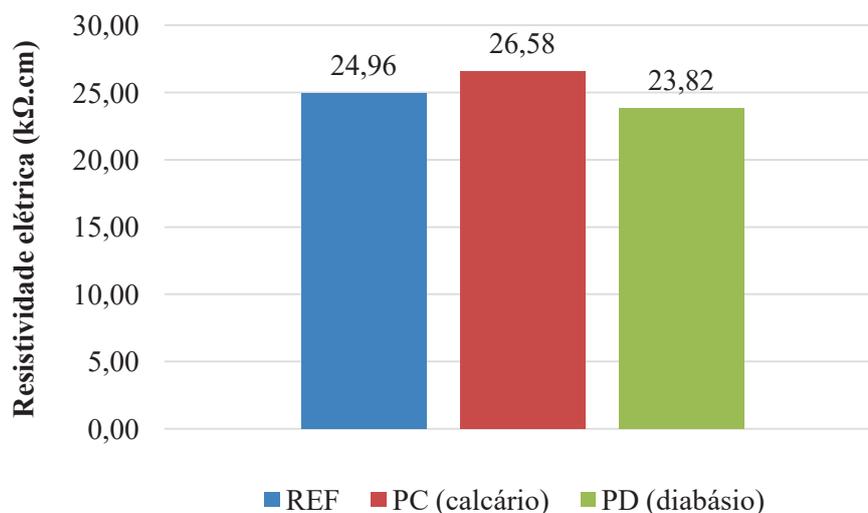
FONTE: A autora (2023).

Observa-se pela Figura 35 que o maior valor de módulo de elasticidade foi do traço de referência, tendo uma diferença de 24,56% em relação ao concreto contendo pó de calcário e uma diferença de 17,11% em relação ao concreto contendo pó de diabásio. A diferença do concreto referência em relação aos concretos contendo pó de pedra foram comprovadas pela Comparação Múltipla das Médias em complementação da ANOVA (Anexo B), com 95% de confiança. Esse comportamento pode estar relacionado a uma maior deformação sob a ação de cargas em concretos contendo pós, assim como observado também por Bueno et al. (2020).

#### 4.1.3 Ensaio de durabilidade dos concretos para avaliação do potencial do pó de diabásio

Na Figura 36 são apresentados os resultados do ensaio de resistividade elétrica realizados nos três concretos aos 28 dias de idade.

Figura 36 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CONCRETOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO



FONTE: A autora (2023).

Na Figura 36 observa-se que o concreto contendo pó de calcário obteve o maior valor de resistividade elétrica, indicando uma matriz com menor porosidade e conseqüentemente mais densa, conforme indicado por Wang et al. (2018). Estatisticamente os dois pós não possuem diferença significativa com relação ao traço referência (Anexo B), entretanto, a diferença é significativa entre os dois concretos contendo pós de pedra (com uma diferença de 11,57% entre eles).

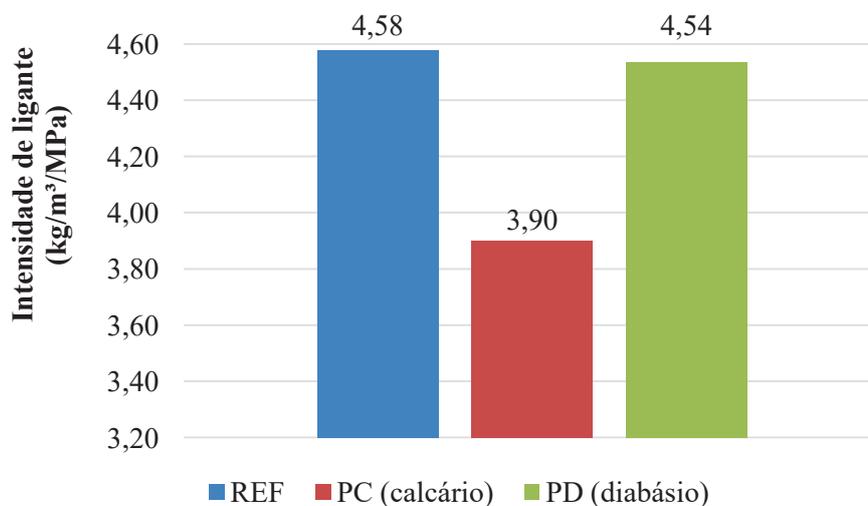
O resultado inferior do concreto contendo pó de diabásio pode estar relacionado à granulometria do material. Devido à presença de partículas maiores o empacotamento da mistura pode ter sido inferior, aumentando sua porosidade. Seus grãos maiores podem ser justificados pela dureza da rocha matriz, classificado como 7 na escala de Mohs (CATTANA e IWANA, 2019), que, como mencionado anteriormente, dificulta o processamento do material para produção de uma curva granulométrica mais fina, que é o que ocorre com o pó de calcário, tendo uma dureza entre 3 e 4 na escala de Mohs (SAMPAIO e ALMEIDA, 2005).

#### 4.1.4 Parâmetros de sustentabilidade dos concretos para avaliação do potencial do pó de diabásio

##### 4.1.4.1 Intensidade de ligante

A Figura 37 apresenta os valores de intensidade de ligante dos concretos produzidos para validação do pó de diabásio.

Figura 37 - INTENSIDADE DE LIGANTE DOS CONCRETOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO

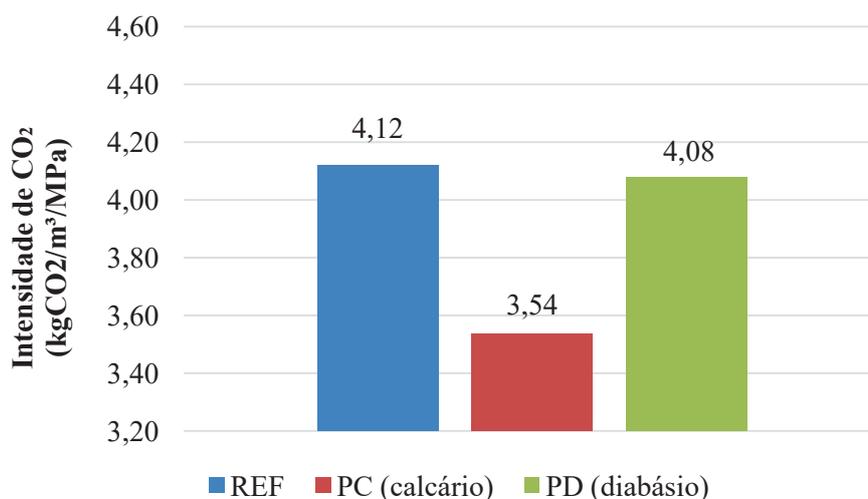


FONTE: A autora (2023).

Pela Figura 37 nota-se que o concreto de referência obteve o maior valor de intensidade de ligante e que o pó de diabásio obteve resultado bem próximo. Os três traços apresentaram índices de ligante inferiores aos encontrados na literatura (concretos convencionais ficam em torno de 10 a 15 kg/m³/MPa e concretos de alta resistência em torno de 5 kg/m³/MPa (DAMINELI et al., 2010; GRAZIA et al., 2018)), demonstrando que a dosagem otimizada pelo modelo de Alfred foi eficiente na produção de concretos mais ecoeficientes.

#### 4.1.4.2 Intensidade de CO<sub>2</sub>

A Figura 38 apresenta os valores de intensidade de CO<sub>2</sub> dos concretos para validação da utilização do pó de diabásio.

Figura 38 - INTENSIDADE DE CO<sub>2</sub> DOS CONCRETOS PARA VALIDAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO

FONTE: A autora (2023).

Observa-se na Figura 38 que ambos os concretos contendo pó de pedra obtiveram valores de intensidade de CO<sub>2</sub> menores que o traço referência. E, mesmo assim, os três traços apresentaram valores inferiores à média de 9,1 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>/MPa proposta pela literatura para concretos produzidos no país (DAMINELI et al., 2010).

Como conclusão, as propriedades de massa específica, resistividade elétrica e resistência à compressão dos concretos contendo pó não foram afetadas quando comparadas ao traço referência. A utilização do pó de diabásio mostrou-se eficaz para substituir parcialmente o cimento Portland na produção de concretos ecoeficientes.

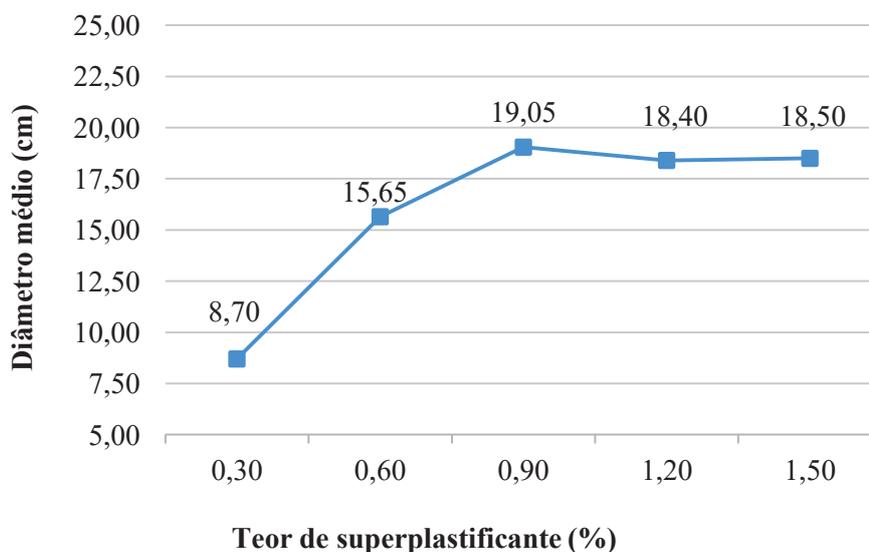
## 4.2 MATERIAIS FINOS

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios realizados com o cimento e o pó de diabásio, pó de pedra definido para utilização no programa experimental.

### 4.2.1 Ponto de saturação do aditivo superplastificante

A Figura 39 mostra os resultados dos ensaios de compatibilidade do aditivo com o cimento pelo mini cone de Kantro (KANTRO, 1980).

Figura 39 - COMPATIBILIDADE DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE COM O CIMENTO PELO CONE DE KANTRO (KANTRO, 1980)

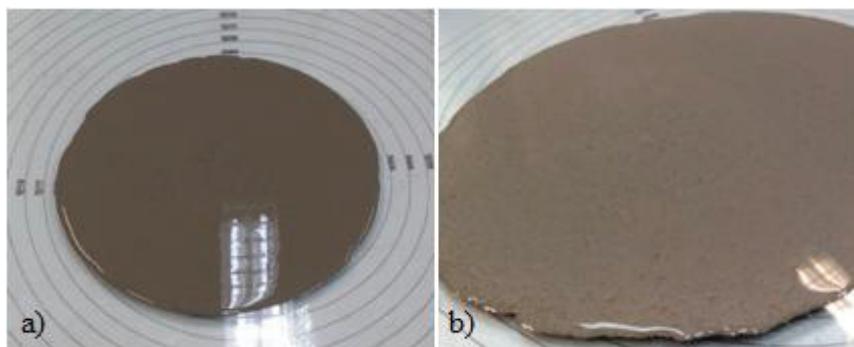


FONTE: A autora (2023).

Observa-se na Figura 39 que o teor de 0,9% de aditivo foi o que atingiu o maior diâmetro médio (19,05 cm) e que, após esse ponto, o espalhamento foi decrescendo. Por esse motivo, o teor de 0,9% foi considerado o ponto de saturação do aditivo para o cimento. Campos (2019) utilizando o mesmo tipo de cimento e um aditivo com propriedades semelhantes também encontrou 0,9% como ponto de saturação.

O ponto de saturação indica que a partir daquele teor o aditivo não trará benefícios para a mistura. De acordo com o fabricante, inclusive, teores fora do recomendado podem provocar segregação e exsudação excessivas. O fenômeno da exsudação, por exemplo, pôde ser observado durante a realização do ensaio quando utilizado o teor de 1,5%, conforme mostrado na Figura 40.

Figura 40 - COMPORTAMENTO DA PASTA DE CIMENTO COM DIFERENTES TEORES DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

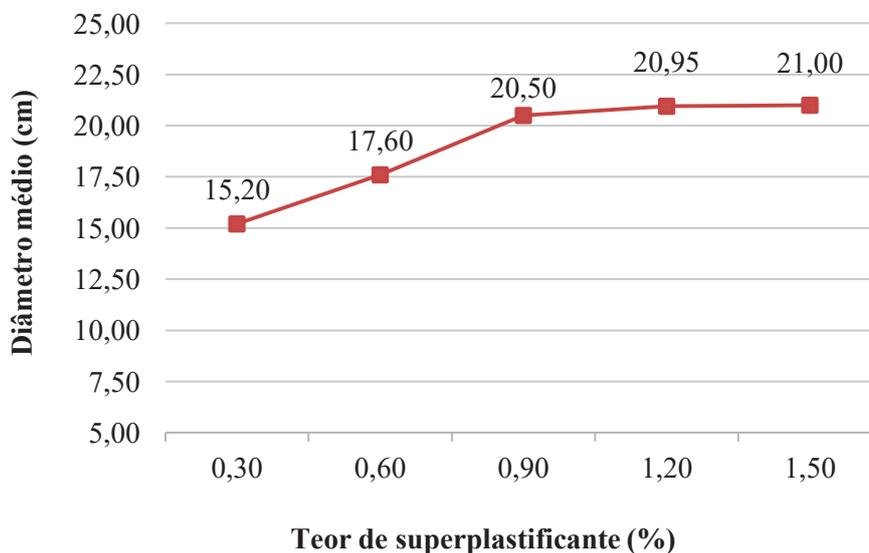


a) Pasta de cimento com 1,2% de aditivo b) Pasta de cimento com 1,5% de aditivo

FONTE: A autora (2023).

Os resultados dos ensaios de compatibilidade do aditivo com o pó de pedra pelo ensaio do mini cone de Kantro (KANTRO, 1980) são apresentados na Figura 41.

Figura 41 - COMPATIBILIDADE DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE COM O PÓ DE PEDRA PELO CONE DE KANTRO (KANTRO, 1980)



FONTE: A autora (2023).

Observa-se pela Figura 41 que o maior valor de abertura do diâmetro médio foi para o teor de 1,5%. Porém, a variação entre os teores de 1,2% e 1,5% é pequena, mostrando que houve uma tendência de estabilidade, sendo o teor de 1,2% com uma abertura de diâmetro de 20,95 cm e o teor de 1,5% com um diâmetro de 21,00 cm. Além disso, o teor máximo recomendado pelo fabricante é de 1,2%. Dessa forma, 1,2% foi considerado o ponto de saturação do aditivo com o pó de pedra. Campos (2019) utilizando aditivo com propriedades semelhantes, e a partir do mesmo ensaio, encontrou um teor de 0,9% de saturação do aditivo com um pó de pedra de origem calcária.

#### 4.2.2 Densidade de empacotamento experimental

A Tabela 26 apresenta os resultados do ensaio de densidade de empacotamento experimental pelo método úmido de Wong e Kwan (2008) para o cimento.

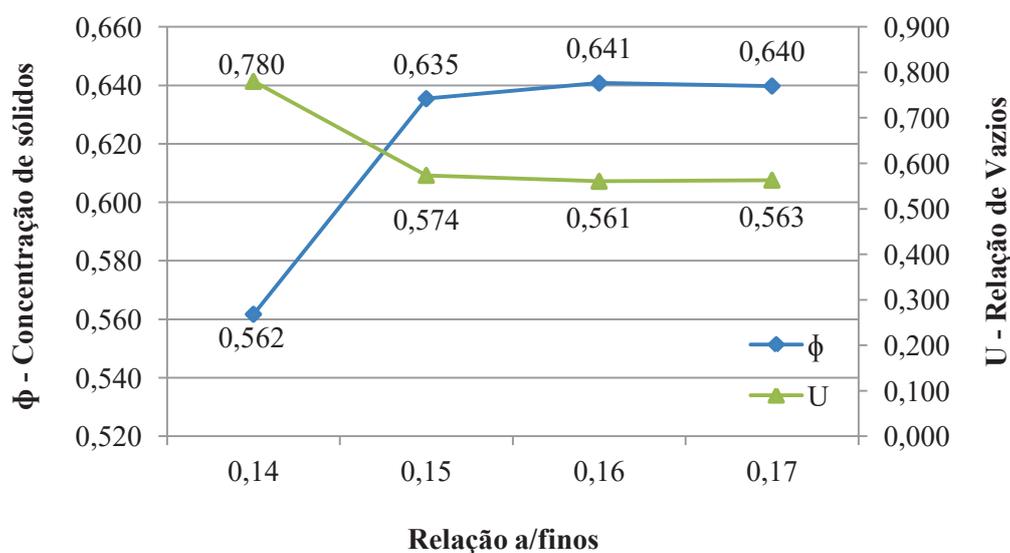
Tabela 26 - DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DO CIMENTO

Água/finos	Massa (g)	Concentração de sólidos ( $\phi$ )	Relação de vazios (U)
0,14	790,05	0,562	0,780
0,15	901,60	0,635	0,574
0,16	917,06	0,641	0,561
0,17	923,52	0,640	0,563

FONTE: A autora (2023).

Pela Tabela 26 observa-se que a maior massa da pasta foi de 923,52 g, a maior concentração de sólidos foi de 0,641 e a menor relação de vazios foi de 0,561. Percebe-se que a maior massa (923,52 g) não ocasionou na maior densidade de empacotamento (0,641). Isso ocorreu porque a densidade da pasta sofre interferência da relação água/finos da mistura, não tendo relação direta com a concentração de sólidos e nem com a relação de vazios, mas apenas com a massa específica dos materiais. A Figura 42 apresenta os valores da concentração de sólidos e da relação de vazios do cimento.

Figura 42 - CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E RELAÇÃO DE VAZIOS DO CIMENTO



FONTE: A autora (2023).

Conforme o gráfico apresentado na Figura 42 a relação água/finos de 0,16 foi a que resultou na maior concentração de sólidos (0,641) e na menor relação de vazios (0,561) para o cimento. Valores parecidos para a densidade experimental do cimento foram encontrados na literatura. Campos (2019) encontrou uma densidade de empacotamento do cimento de 0,653 também utilizando um teor de aditivo superplastificante de 0,9%. Wong e Kwan (2008), utilizando 3,0% de teor de aditivo, obtiveram o valor de 0,622 para a densidade de empacotamento do cimento, sem a utilização de compactação. Klein et al. (2016) encontraram uma densidade de empacotamento experimental máxima do cimento de 0,599 com a utilização de 1,0% de aditivo.

A Tabela 27 apresenta os resultados dos ensaios de densidade de empacotamento experimental para o pó de pedra.

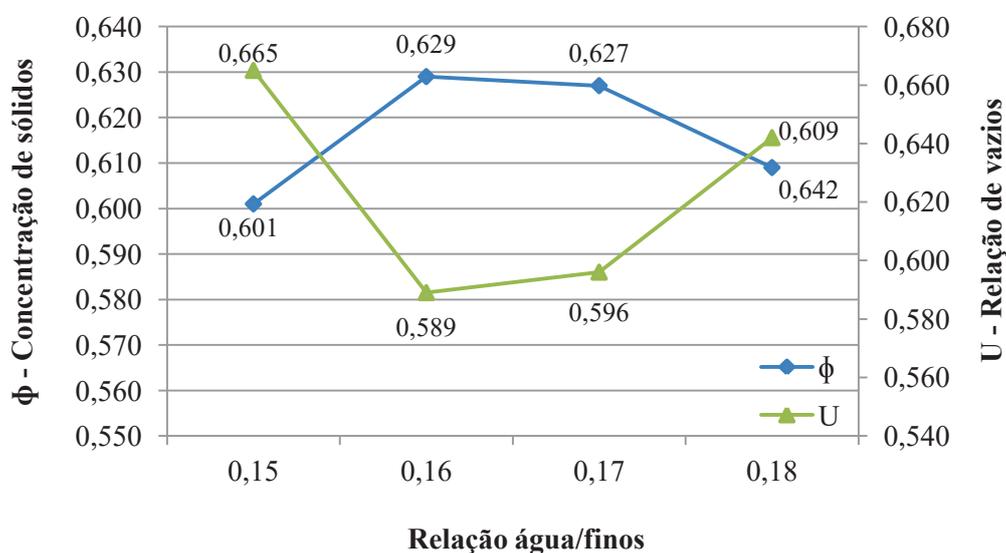
Tabela 27 - DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DO PÓ DE PEDRA

Água/finos	Massa (g)	Concentração de sólidos ( $\phi$ )	Relação de vazios (U)
0,15	812,39	0,601	0,665
0,16	858,52	0,629	0,589
0,17	862,28	0,627	0,596
0,18	845,06	0,609	0,642

FONTE: A autora (2023).

É possível observar pela Tabela 27 que a maior concentração de sólidos (0,629) resultou na menor relação de vazios (0,589). Na mesma ideia do cimento, nota-se que uma propriedade é sempre inversa da outra. Para melhor visualização, a Figura 43 apresenta os resultados em forma de gráfico.

Figura 43 - CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E RELAÇÃO DE VAZIOS DO PÓ DE PEDRA



FONTE: A autora (2023).

Como pode ser observado na Figura 43, assim como para o cimento, a relação água/finos de 0,16 foi a que apresentou a densidade de empacotamento máxima (0,629). E mais uma vez é possível observar que o maior valor de massa da pasta (858,52 g) não ocasionou a maior concentração de sólidos e a menor relação de vazios, justamente por causa da interferência que a relação água/finos ocasiona na mistura.

Campos (2019) realizou o mesmo ensaio para dois diferentes pós de pedra, ambos de origem calcária. O primeiro pó de pedra, com um D50 de 10,65  $\mu\text{m}$ , obteve uma densidade de empacotamento de 0,664 para uma relação água/finos de 0,17. O segundo pó de pedra, com um D50 maior, no valor de 18,68  $\mu\text{m}$ , obteve uma densidade de empacotamento de 0,693 para uma relação água/finos de 0,13. Segundo a autora, o pó de pedra com o D50 maior apresentou uma curva granulométrica mais contínua, justificando a concentração de sólidos ter sido maior. Já outro estudo,

de Campos et al. (2019) obteve a densidade de empacotamento para o pó de pedra de 0,655 para uma relação água/finos de 0,17. Dos três materiais ensaiados no estudo (sílica ativa, cimento e pó de pedra), o pó de pedra foi o que atingiu a maior densidade de empacotamento. Também no estudo de Campos et al. (2019), o pó apresentou faixa granulométrica mais ampla que os demais materiais, diminuindo os vazios existentes entre os grãos e proporcionando uma maior concentração de sólidos.

Wong e Kwan (2008) explicam que há uma relação água/finos ótima em que a relação de vazios da mistura é mínima. Quando a relação água/finos é menor, a relação de vazios de ar da mistura é aumentada, fazendo com que as partículas se afastem umas das outras. E quando a relação água/finos é superior que a ótima, a quantidade de vazios de ar da mistura se torna insignificante. Dessa forma, tanto para o pó de pedra quanto para o cimento, valores abaixo de 0,16 apresentaram um teor maior de vazios com uma quantidade de água insuficiente para preenchê-los e valores acima de 0,16 apresentaram água em excesso, deixando a mistura saturada.

Fazendo um comparativo entre os valores de densidade de empacotamento experimental encontrados para o cimento (0,641) e para pó de pedra (0,629), observa-se que os resultados dos dois ficaram bem próximos. Provavelmente a densidade de empacotamento do cimento foi superior porque as partículas pertencentes ao pó de pedra são maiores, com uma curva granulométrica que, apesar de ser contínua, apresenta leve tendência à linearidade quando compara a curva granulométrica do cimento.

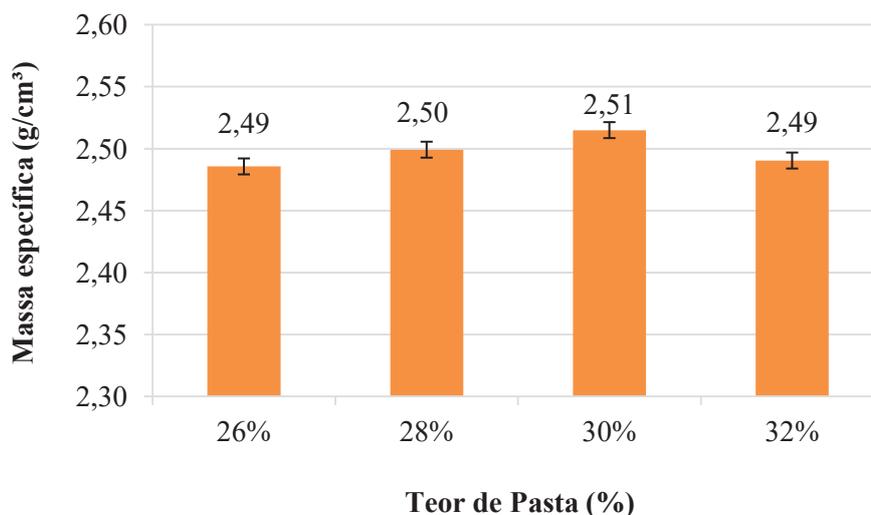
### 4.3 CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA PELO CPM

Neste item serão apresentados os resultados referentes aos ensaios realizados nos concretos dosados pelo modelo CPM para definição do teor de pasta ideal conforme método proposto por Campos (2019) e Campos, Klein e Marques Filho (2020).

#### 4.3.1 Ensaio no estado fresco dos concretos para definição do teor de pasta pelo CPM

Para o estado fresco dos concretos dosados para definição do teor de pasta foi realizado apenas o ensaio de massa específica. Os resultados do ensaio de massa específica são apresentados na Figura 44.

Figura 44 - MASSA ESPECÍFICA DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA



FONTE: A autora (2023).

Pela Figura 44 observa-se que o traço com teor de pasta de 30% obteve o maior valor médio de massa específica, de 2,51 g/cm<sup>3</sup>. Os traços de 26% e 28% podem ter faltado pasta para envolver os agregados, reduzindo os valores de massa específica. Já no teor de pasta de 32% observa-se que reduziu o valor de massa específica. Campos (2019) observou que a massa específica no estado fresco tende a reduzir com o aumento do teor de pasta.

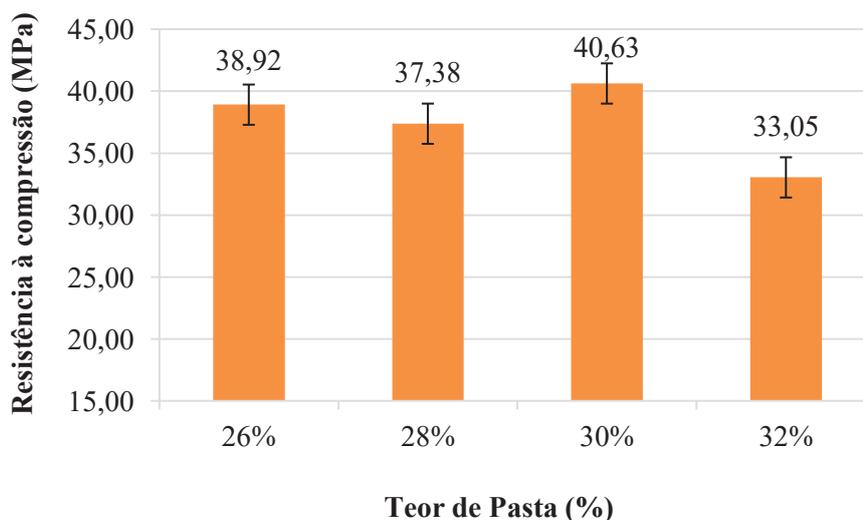
A partir da análise estatística feita pela ANOVA, apresentada no Anexo B, e da Comparação Múltipla das Médias os resultados mostram que há influência do teor de pasta na massa específica e que os teores de pasta de 26% e 28% não possuem diferença significativa entre si, com nível de confiança de 95%.

#### 4.3.2 Ensaio no estado endurecido dos concretos para definição do teor de pasta pelo CPM

##### 4.3.2.1 Resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial para os concretos produzidos com variação do teor de pasta são apresentados na Figura 45.

Figura 45 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA



FONTE: A autora (2023).

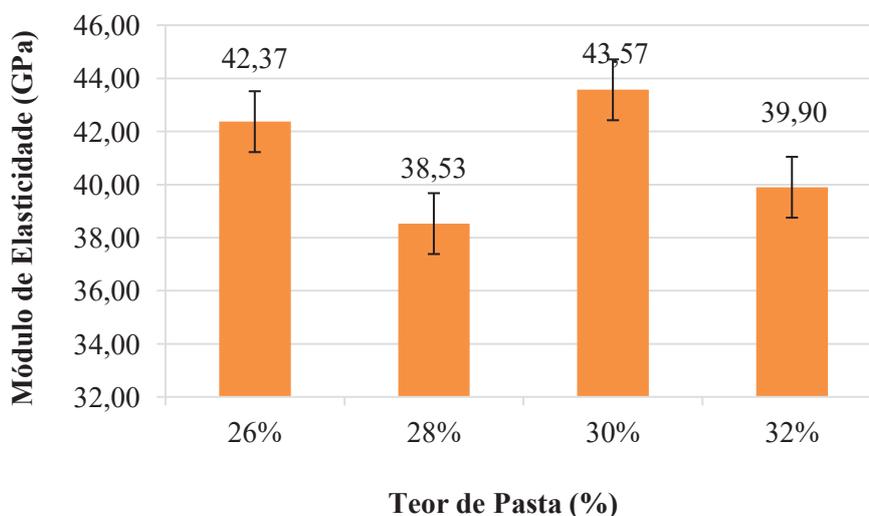
Conforme apresentado na Figura 45 o teor de pasta de 30% obteve o maior valor médio de resistência à compressão aos 28 dias, de 40,63 MPa. Este também foi o teor de pasta que resultou no maior valor de massa específica. Campos (2019) observou que, após 6% de excesso do teor de pasta, há uma tendência de redução dos valores de resistência à compressão. Isso porque o aumento do teor de pasta resulta no aumento da quantidade de água na mistura, na diminuição do volume de agregados e na diminuição da área superficial externa do agregado em contato com a pasta. Dessa forma, a água adsorvida pelos agregados diminui e a área superficial do filme de água separada da pasta fresca forma uma película sobre uma menor área superficial de agregado. Com isso, há um aumento da quantidade de água na pasta, aumentando a relação água/cimento real da mistura (PIASTA e ZARZYCKI, 2017).

Conforme ANOVA, apresentada no Anexo B, e a Comparação Múltipla das Médias os teores de pasta de 26%, 28% e 30% são estatisticamente equivalentes. Como mencionado, observa-se uma tendência de crescimento de resistência até o teor de pasta de 30%, reduzindo consideravelmente com o teor de 32%, validado pela análise estatística.

#### 4.3.2.2 Módulo de elasticidade

A Figura 46 apresenta os resultados de módulo de elasticidade dos concretos para definição do teor de pasta.

Figura 46 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA



FONTE: A autora (2023).

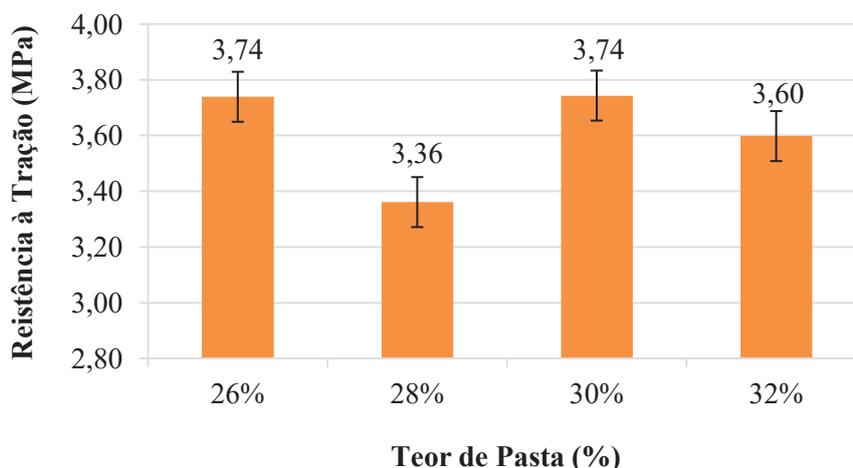
Observa-se na Figura 46 que o maior valor de módulo de elasticidade, de 43,57 GPa, ocorre no teor de pasta de 30%, da mesma forma que os resultados anteriores. O aumento do teor de pasta resulta em mais finos na composição granulométrica da mistura e, de acordo com Campos (2019), pode acarretar em aglomeração das partículas a partir do teor ideal, aumentando assim a porosidade e diminuindo os valores das propriedades mecânicas. O valor de 38,53 GPa, menor resultado para o ensaio de módulo, ocorreu no teor de pasta 28%. Possivelmente, faltou pasta para envolver os agregados, resultando em um concreto mais poroso.

De acordo com a ANOVA, apresentada no Anexo B, todos os teores de pasta são estatisticamente equivalentes, indicando que o teor de pasta não possui influência significativa nos resultados de módulo de elasticidade estático. As características dos agregados afetam diretamente o módulo de elasticidade do concreto bem como a matriz da pasta de cimento. Fatores como porosidade dos agregados e da pasta, relação água/finos, teor de ar, adições minerais e grau de hidratação do cimento também afetam o módulo de elasticidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

#### 4.3.2.3 Resistência à tração

Os resultados de resistência à tração dos concretos para definição do teor de pasta podem ser conferidos na Figura 47.

Figura 47 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA



FONTE: A autora (2023).

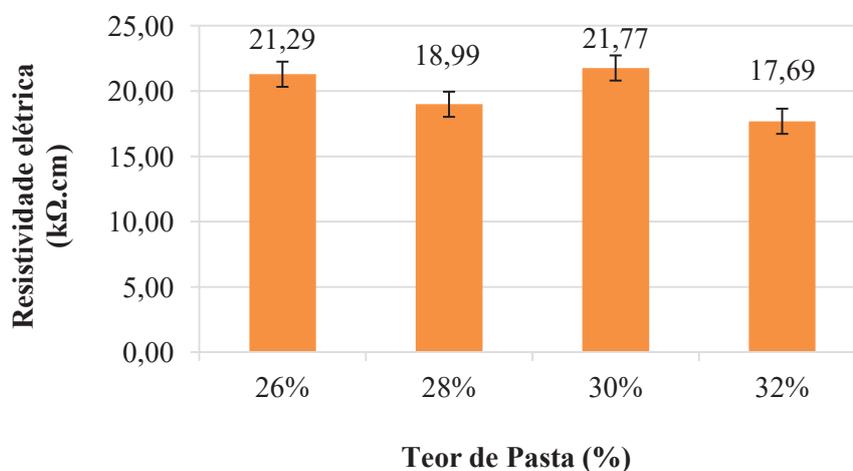
Nota-se pela Figura 47 que os teores de 26% e 30% obtiveram o mesmo valor médio de resistência à tração, de 3,74 MPa, sendo este o maior entre os quatro traços produzidos. Também como no ensaio de módulo, o teor de 28% de pasta resultou no menor valor de resistência à tração, de 3,36 MPa. Assim como no ensaio de módulo de elasticidade, a ANOVA, apresentada no Anexo B, apontou que não há influência do teor de pasta na resistência à tração dos concretos.

#### 4.3.3 Ensaio de durabilidade dos concretos para definição do teor de pasta pelo CPM

##### 4.3.3.1 Resistividade elétrica

Na Figura 48 estão os resultados do ensaio de resistividade elétrica dos concretos para definição do teor de pasta.

Figura 48 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA



FONTE: A autora (2023).

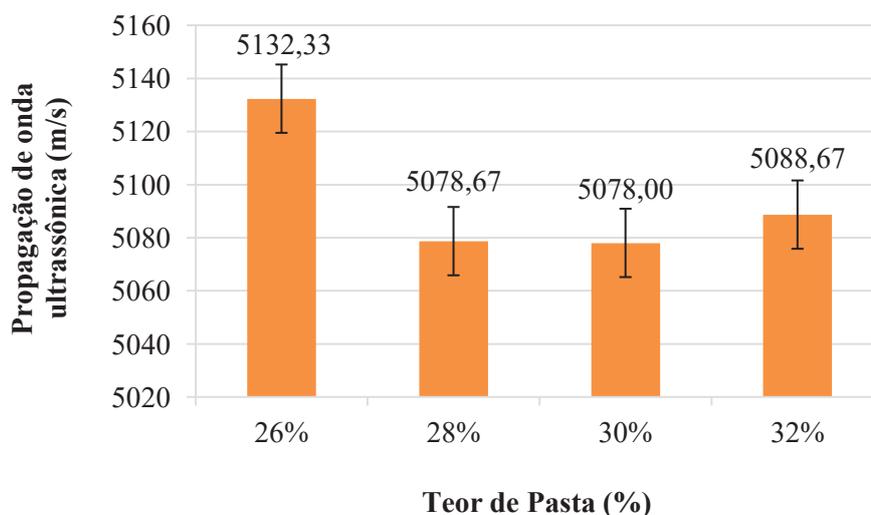
Observa-se na Figura 48 que o traço com teor de pasta de 30% obteve o maior valor médio de resistividade elétrica, de 21,77 kΩ.cm, o que coincide com o resultado de massa específica. Mais uma vez, constata-se que 6% foi o valor de pasta em excesso ideal entre as misturas, visto que a partir de 8% de pasta em excesso, os resultados tendem a diminuir (CAMPOS, 2019).

Conforme a ANOVA mostrada no Anexo B, os resultados mostram que há influência do teor de pasta na resistividade do concreto e há diferença significativa entre todos os teores de pasta. Todos os teores de pasta apresentaram risco de corrosão moderado de acordo com a classificação de Azarsa e Gupta (2017) para valores de resistividade entre 10 e 50 kΩ.cm.

#### 4.3.3.2 Propagação de onda ultrassônica

A Figura 49 apresenta os valores de velocidade de propagação do pulso ultrassônico dos concretos para definição do teor de pasta.

Figura 49 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA



FONTE: A autora (2023).

O traço com teor de pasta de 26% obteve o maior valor médio de velocidade de propagação de onda, conforme observado na Figura 49. Como nos resultados no estado endurecido, o teor de pasta de 26% também apresentou um dos valores mais elevados, indicando uma menor porosidade desses concretos, mesmo com o menor teor de pasta. Quanto menor o índice de vazios da mistura, maior é a velocidade de propagação de onda ultrassônica no interior do concreto (HERNÁNDEZ et al., 2000).

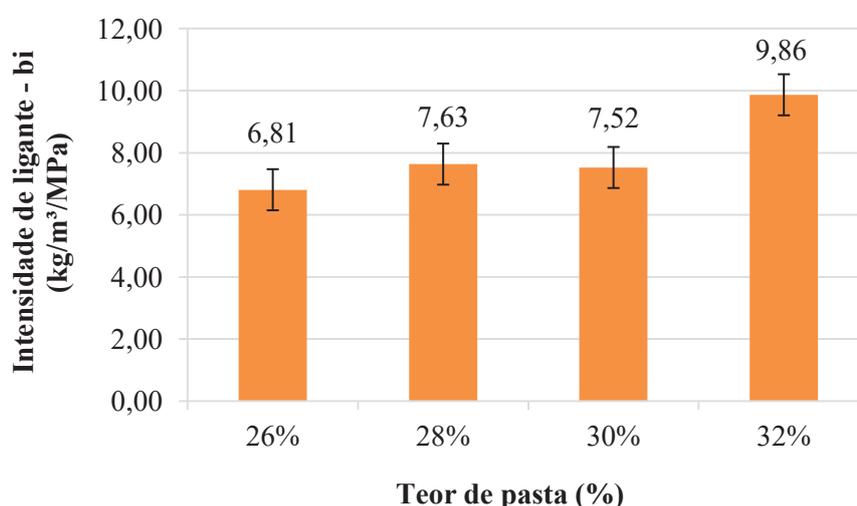
Pela a ANOVA (Anexo B), não há diferença estatística entre os diferentes teores de pasta nos resultados da velocidade da propagação de onda dos concretos. Nota-se que todos os concretos apresentaram valores superiores a 4500 m/s, valor mínimo para que a qualidade do concreto seja considerada excelente (RINCÓN et al., 1998; WHITEHURST, 1966 apud RAMÍREZ, 2015).

#### 4.3.4 Parâmetros de sustentabilidade dos concretos para definição do teor de pasta pelo CPM

##### 4.3.4.1 Intensidade de ligante

Os resultados da intensidade de ligante dos concretos para definição do teor de pasta são apresentados na Figura 50.

Figura 50 - INTENSIDADE DE LIGANTE DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA



FONTE: A autora (2023).

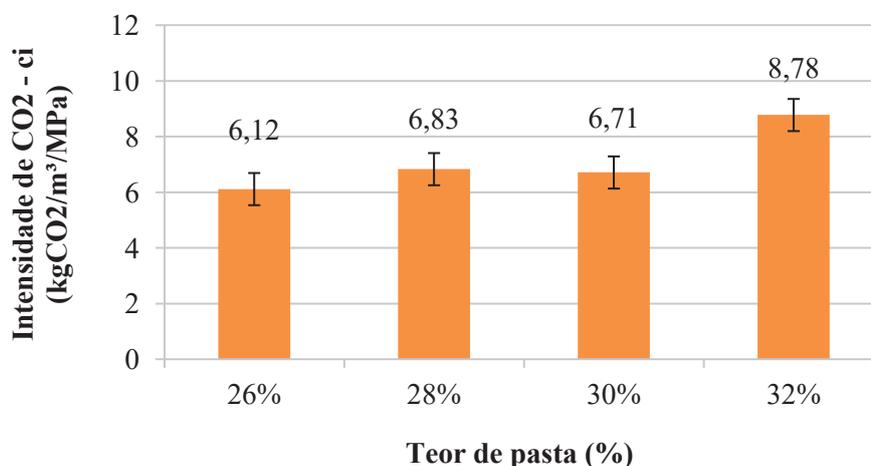
Conforme Figura 50, o menor valor de intensidade de ligante foi para o teor de pasta de 26%, com o valor de 6,81 kg/m³/MPa, indicando que para produzir uma unidade de resistência à compressão este traço utilizou uma menor quantidade de cimento quando comparado aos demais. Observa-se que todos os traços apresentaram valores de intensidade de ligante inferiores ao valor mínimo de 10 kg/m³/MPa estipulado pela literatura para concreto convencional (DAMINELI et al., 2010).

Conforme método de dosagem proposto por Campos (2019) e Campos, Klein e Marques Filho (2020), e de acordo com os resultados obtidos, pensando em consumo de cimento por unidade de resistência, o teor de 26% foi definido como teor de pasta ideal para a produção dos concretos pelo modelo CPM, conforme apresentado no item 3.2.3.2.

#### 4.3.4.2 Intensidade de CO<sub>2</sub>

Na Figura 51 estão as intensidades de CO<sub>2</sub> dos concretos para definição do teor de pasta.

Figura 51 - INTENSIDADE DE CO<sub>2</sub> DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA



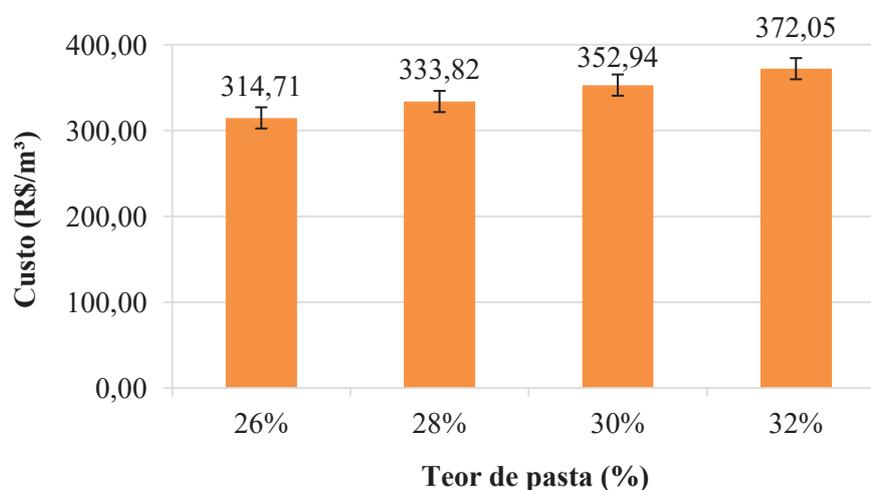
FONTE: A autora (2023).

Pela Figura 51 observa-se que, assim como no resultado de intensidade de ligante, o menor valor para a intensidade de CO<sub>2</sub> entre os concretos é o de teor de pasta de 26%, indicando que para produzir uma unidade de resistência à compressão, este foi o traço que emitiu uma menor quantidade de CO<sub>2</sub>. Por fim, nota-se que todos os traços apresentaram valores inferiores à média de 9,1 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>/MPa proposta pela literatura (DAMINELI et al., 2010).

#### 4.3.4.3 Custos

Os custos dos concretos para definição do teor de pasta estão apresentados na Figura 52.

Figura 52 - CUSTOS PARA PRODUÇÃO DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA

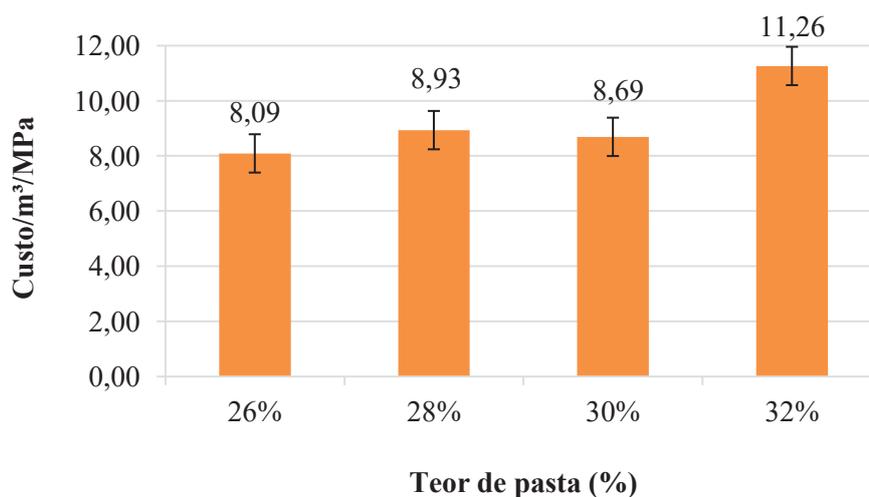


FONTE: A autora (2023).

Nota-se na Figura 52 nota-se que conforme se aumentou o teor de pasta maior se tornou o custo para produzir os concretos. Isso porque ao aumentar o teor de pasta, aumenta-se o consumo de cimento e conseqüentemente o custo do material. O teor de 32% de pasta acarretou no valor de 372,05 R\$/m<sup>3</sup> e o teor de 26% acarretou em 314,71 R\$/m<sup>3</sup>, uma diferença de 15,41%.

A partir dos custos por metro cúbico e da resistência à compressão aos 28 dias, a Figura 53 apresenta os custos relativos dos concretos produzidos para definição do teor de pasta.

Figura 53 - CUSTOS RELATIVOS DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA



FONTE: A autora (2023).

Observa-se na Figura 53 que o concreto de maior custo relativo foi para o teor de pasta de 32%, isso porque foi o traço que teve o menor valor de resistência mecânica (33,05 MPa). Em contrapartida, o traço contendo 26% de teor de pasta obteve o menor custo relativo, no valor de 8,09 R\$/m<sup>3</sup>/MPa. Essa relação apresentou resistência à compressão elevada (38,92 MPa) e o menor consumo de cimento (264,87 kg/m<sup>3</sup>), justificando o menor índice, visto que o cimento é o principal fator para determinar o custo do concreto.

Sendo assim, de acordo com a análise dos resultados, ficou definido que a partir do método de dosagem proposto por Campos (2019) e Campos, Klein e Marques Filho (2020) o teor de pasta de 26% é o ideal para a dosagem dos concretos ecoeficientes a partir do modelo CPM. Isso porque foi o teor que apresentou melhores resultados de intensidade de ligante, intensidade de CO<sub>2</sub> e custos, sendo, portanto, o mais ecoeficiente.

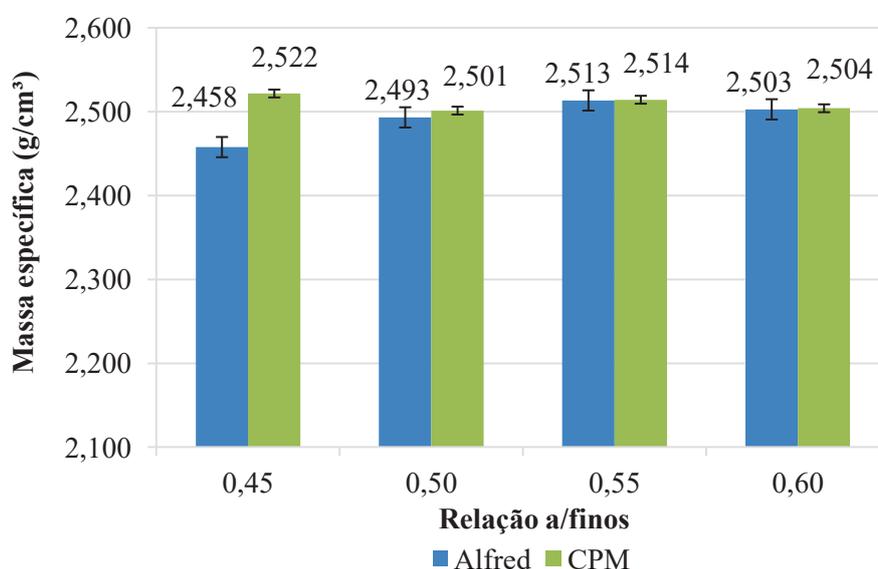
#### 4.4 CONCRETOS DOSADOS COM COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS PELOS MODELOS DE ALFRED E CPM

Neste item serão apresentados os resultados referentes aos ensaios realizados nos concretos ecoeficientes dosados com a composição dos materiais a partir dos modelos de Alfred e CPM.

##### 4.4.1 Ensaio no estado fresco dos concretos pelos modelos de Alfred e CPM

Os resultados do ensaio de massa específica dos concretos produzidos utilizando ambos os modelos de empacotamento são observados na Figura 54.

Figura 54 - MASSA ESPECÍFICA DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS



FONTE: A autora (2023).

Inicialmente, analisando os concretos dosados pelo modelo de Alfred, observando a Figura 54, as duas menores relações água/finos acarretaram em concretos com menores valores de massa específica, diferente do esperado. Isso pode ser justificado pela dificuldade de moldagem no estado fresco das relações 0,45 e 0,50, devido à compactidade que o empacotamento ocasionou nas misturas. Grazia et al. (2019) explicam que concretos dosados a partir de modelos de empacotamento de partículas tendem a diminuir a porosidade resultando em misturas altamente compactadas, que podem prejudicar o estado fresco. Isso porque os espaçamentos entre as partículas e a espessura máxima da pasta possuem influência na reologia do concreto. Assumindo que as partículas finas não estão aglomeradas, o espaçamento entre partículas pode ser considerado como a distância em relação à quantidade total de água que se encontra entre elas. Em misturas com baixa quantidade de água as partículas finas podem deixar a água aprisionada, dificultando a percolação e hidratação do ligante.

Já as partículas grossas são separadas pela espessura de pasta existente na mistura (partículas finas e água) e quanto menor essa distância, menos fluido é o concreto (AÏTCIN, JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994; CASTRO e PANDOLFELLI, 2009; GRAZIA et al., 2019). Além disso, partículas finas tendem a se aglomerar devido às forças de Van der Waals, atuando como partículas maiores (aumentando a colisão entre elas, fricção e viscosidade) e dessa forma diminuindo a fluidez da mistura (FELEKOĞLU, 2007; GRAZIA et al., 2019). Problemas de consistência também foram observados nos estudos de Campos (2019) e Londero, Klein e Mazer (2021), em que, devido ao empacotamento das partículas finas houve alta coesão da pasta, promovendo redução do índice de vazios, tornando o concreto mais denso.

Observa-se também que a massa específica do concreto dosado a partir do modelo de Alfred teve uma tendência de crescimento até a relação água/finos 0,55, começando a reduzir na relação 0,60. Entretanto, a partir da Análise de Variância (ANOVA), apresentada no Anexo B, e da Comparação Múltipla das Médias, não houve diferença estatística significativa entre as duas últimas relações água/finos. Já para as demais relações, há diferença estatística significativa, indicando que a variação da relação a/finos possui influência na massa específica. Todos os valores de massa específica se enquadram na classificação de concreto convencional apontada pela NBR 8953 (ABNT, 2015b).

Como pode ser observado na Figura 54, as massas específicas dos concretos produzidos a partir do modelo CPM ficaram bem próximas e dentro da classificação de concreto convencional de acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015b). Observa-se que o maior valor de massa específica foi de  $2,522 \text{ g/cm}^3$  para a menor relação água/finos de 0,45, visto que há uma menor quantidade de água na mistura, conforme esperado. Para os concretos dosados pelo modelo CPM, nas menores relações água/finos, a mistura apresentou fluidez suficiente para moldagem dos corpos de prova, resultando em melhores resultados para relações mais baixas, como é esperado. A partir da ANOVA (Anexo B) e da Comparação Múltipla das Médias, as relações 0,50, 0,55 e 0,60 não possuem diferença significativa entre si, estatisticamente, enquanto que a relação 0,45 possui influência no valor de massa específica.

A partir da Figura 54 nota-se também que, apesar de os resultados dos concretos dosados pelo modelo CPM serem ligeiramente superiores, os resultados dos concretos com relações água/finos 0,50, 0,55 e 0,60 para ambos os modelos ficaram muito próximos, indicando a similaridade na moldagem quanto ao estado fresco das misturas e na capacidade de empacotamento. A diferença entre a massa específica dos concretos com relação 0,45 ocorreu especialmente por causa do estado fresco, no qual o modelo de Alfred, com menor trabalhabilidade, foi mais difícil de

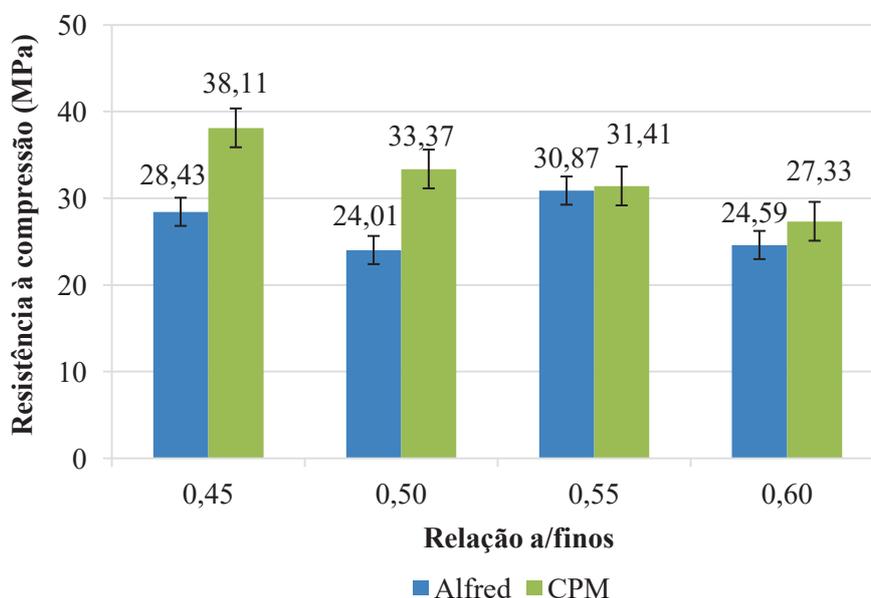
moldar quando comparado ao modelo CPM, conforme comentado. A partir da ANOVA, apresentada no Anexo B, para o ensaio de massa específica o modelo de empacotamento, a relação água/finos e a interação entre eles possui efeito significativo, com 95% de intervalo de confiança.

#### 4.4.2 Ensaio no estado endurecido dos concretos pelos modelos de Alfred e CPM

##### 4.4.2.1 Resistência à compressão

Para comparação, os resultados de resistência à compressão aos 7 dias dos concretos dosados pelos modelos de empacotamento são observados na Figura 55.

Figura 55 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, AOS 7 DIAS



FONTE: A autora (2023).

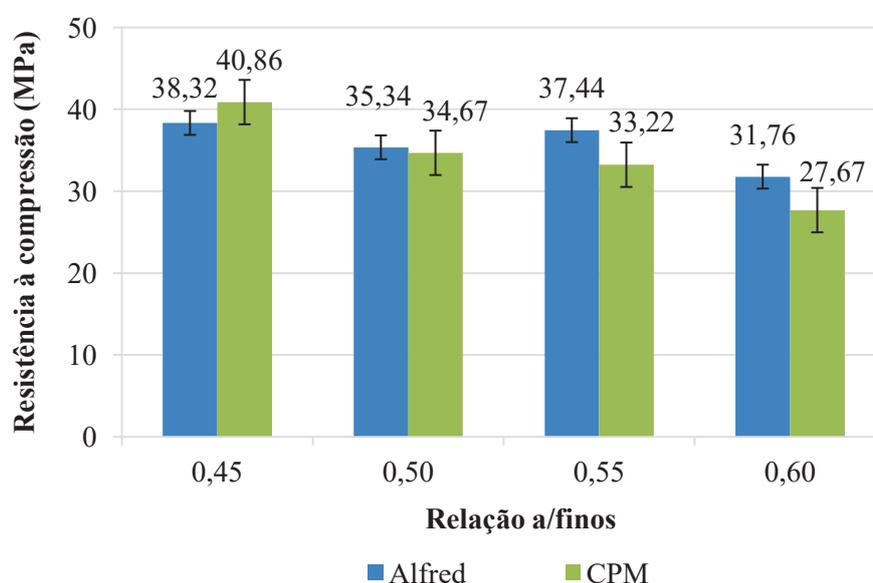
Conforme Figura 55 o modelo CPM apresentou maiores valores de resistência à compressão aos 7 dias para todas as relações água/finos. Observa-se uma maior variação entre relações água/finos 0,45 e 0,50, sendo respectivamente 25,40% e 28,05% menores para os concretos dosados a partir do modelo de Alfred quando comparados ao CPM. Isso, provavelmente, pode ser justificado pelo estado fresco dos concretos do modelo de Alfred, que apresentaram maior dificuldade de moldagem quando comparados aos concretos do modelo CPM, conforme já comentado. O estudo de Campos et al. (2022) com dosagens a partir do modelo de Alfred também constatou variação no abatimento das misturas e sua influência nos resultados de resistência à compressão.

De acordo com a Figura 55, para o modelo de Alfred, observa-se o crescimento esperado da resistência à compressão ao longo do tempo. Aos 7 dias o maior valor de resistência, de 30,87 MPa,

se deu na relação 0,55, diferente do esperado. Nas relações água/finos menores, onde é esperado um maior valor de resistência à compressão devido a menor quantidade de água na mistura, ocorreu maior dificuldade na moldagem, prejudicando os valores de resistência. Conforme comentado anteriormente, o empacotamento resulta em alta compactidade da mistura. A partir da ANOVA, apresentada no Anexo B, e da Comparação Múltipla das Médias existe diferença significativa entre todas as relações água/finos para os resultados de 7 dias, apontando que a variação da relação água/finos teve influência nos resultados.

Para comparação, os resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos dosados pelos modelos de empacotamento são observados na Figura 56.

Figura 56 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, AOS 28 DIAS



FONTE: A autora (2023).

Com os resultados apresentados na Figura 56 observa-se que as relações 0,45 para ambos os modelos obtiveram os maiores valores de resistência à compressão, sendo de 38,32 MPa para o modelo de Alfred e de 40,86 MPa para o modelo CPM. Isso pode ser justificado pela menor quantidade de água e maior quantidade de cimento, visto que o pó de diabásio utilizado é inerte.

Observa-se que, com exceção da relação água/finos 0,45, o modelo de Alfred superou os valores de resistência à compressão do CPM aos 28 dias, indicando que o empacotamento de partículas proporcionado pelo modelo de Alfred, apesar da menor trabalhabilidade e dificuldade de moldagem no estado fresco, resultou em melhor desempenho mecânico no estado endurecido. Entretanto, a partir da ANOVA que está apresentada no Anexo B, o modelo de empacotamento utilizado não interferiu estatisticamente na resistência dos concretos. A interação entre os modelos e

as relações água/finos não é significativa, indicando que em todas as variações de água/finos não há diferença estatística em ambos os modelos e que seus resultados de resistência foram estatisticamente equivalentes. Apenas a relação água/finos teve efeito significativo na resistência à compressão, com 95% de confiabilidade, sendo a relação 0,60 aquela com diferença significativa para ambos os modelos.

Já para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos dosados a partir do modelo de Alfred, a relação água/finos 0,45 apresentou o maior valor de resistência, de 38,32 MPa, conforme esperado. O resultado de 28 dias na relação água/finos 0,50 apresentou queda de 5,6% em comparação a relação 0,55, porém, de acordo com a ANOVA, apresentada no Anexo B, e a Comparação Múltipla das Médias estes resultados são estatisticamente equivalentes, com 95% de nível de confiança. Possivelmente, a dificuldade de moldagem da mistura com relação a/finos 0,50 em comparação com a relação 0,55 tenha prejudicado a resistência aos 28 dias. As três primeiras relações água/finos obtiveram melhores valores de resistência à compressão aos 28 dias, sendo estatisticamente equivalentes, conforme ANOVA apresentada no Anexo B. Em todas as relações água/finos os concretos obtiveram resistência à compressão superior a 30 MPa, sendo classificados como concreto convencional de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2022).

Partindo para o modelo CPM, observa-se na Figura 56 que conforme foi aumentando a quantidade de água da mistura, a resistência à compressão foi diminuindo para ambas as idades, conforme esperado. As resistências aos esforços mecânicos variam na relação inversa da quantidade de água da mistura (ABRAMS, 1919), assim, menores relações água/finos resultam em maiores resistências.

Para o modelo CPM, o maior resultado, de 40,86 MPa ocorrido na relação 0,45, possui 32% de diferença em relação ao menor resultado, de 27,67 MPa ocorrido na relação 0,60. Independentemente da idade analisada, os resultados das relações 0,50 e 0,55 são estatisticamente equivalentes, conforme ANOVA apresentada no Anexo B. Todas as misturas permaneceram na classificação de concreto convencional de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2022).

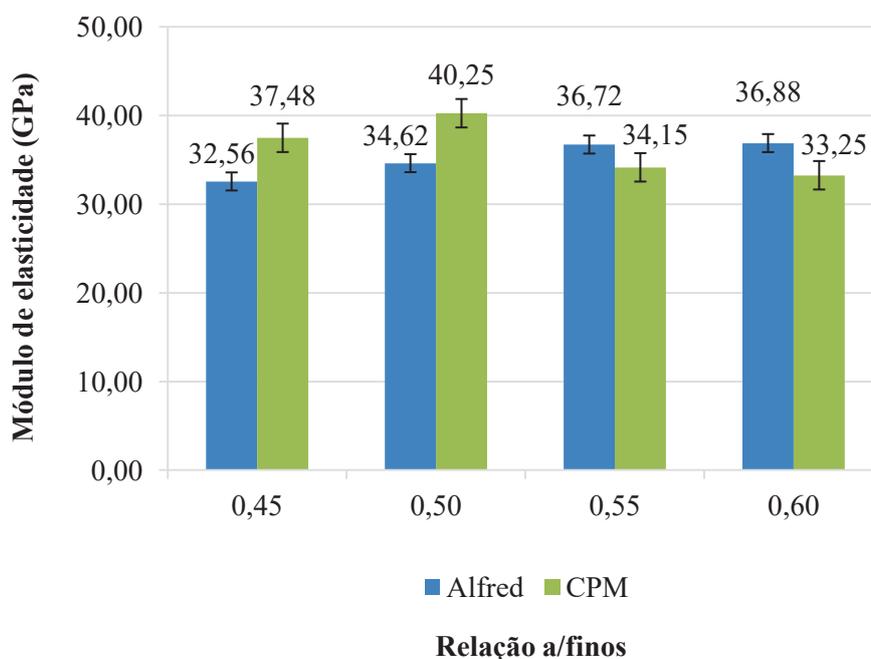
Vale ressaltar que a aplicação dos modelos de empacotamento de partículas permitiu a obtenção de concretos com resistência à compressão superior à esperada pela Lei de Abrams para as relações a/c utilizadas (ABRAMS, 1919). Embora a Lei de Abrams seja o fator mais crítico para controlar a resistência em situações convencionais, o maior empacotamento do esqueleto granular resulta em maiores resistências à compressão, afirmam Yousuf et al. (2019). A média de consumo de cimento dos concretos dosados a partir do modelo de Alfred foi de 240,37 kg/m<sup>3</sup> obtendo uma média

de 35,72 MPa de resistência à compressão. Para os concretos dosados pelo modelo CPM, o consumo de cimento médio de 242,59 kg/m<sup>3</sup> proporcionou uma resistência à compressão média de 34,11 MPa dos quatro traços. Ambos os modelos obtiveram resistência superior a 25 MPa estipulada para concretos de classe de agressividade II com relação a/c menor ou igual a 0,60 preconizados pela NBR 6118 e, além disso, com um consumo de cimento 13% a 14% menor em relação ao mínimo de 280 kg/m<sup>3</sup> estipulado pela NBR 12655 (ABNT, 2014a; ABNT, 2022).

#### 4.4.2.2 Módulo de elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade estático para todos os concretos são apresentados na Figura 57.

Figura 57 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS



FONTE: A autora (2023).

O módulo de elasticidade do concreto dosado a partir do modelo de Alfred teve tendência a um ligeiro crescimento conforme se aumentou a relação água/finos, como observado na Figura 57. Esse comportamento não é o esperado, visto que com o aumento da quantidade de água, aumenta-se o índice de vazios da mistura, diminuindo a resistência à compressão e a capacidade de deformação, por consequência menor é o módulo de elasticidade estático. Possivelmente, assim como nos resultados de resistência, o estado fresco das misturas com menor relação água/finos teve influência na moldagem devido à compacidade das misturas, prejudicando as propriedades no estado

endurecido, como explicado nos resultados de massa específica. O maior valor de módulo foi de 36,88 GPa para a relação 0,60 e o menor valor, de 32,56 GPa, para a relação 0,45. Pela ANOVA, apresentada no Anexo B, e a Comparação Múltipla das Médias, os concretos dosados a partir do modelo de Alfred possuem resultados de módulo de elasticidade estatisticamente equivalentes para todas as relações água/finos analisadas.

Já para o concreto dosado a partir do modelo CPM, Observa-se na Figura 57 que o maior valor de módulo de elasticidade ocorreu na relação água/finos 0,50, com um valor de 40,25 GPa, e que o menor valor, de 33,25 GPa, ficou para a relação 0,60. Com exceção da relação 0,45, houve uma tendência de queda com o aumento da quantidade de água da mistura. Campos (2019), com concretos dosados pelo modelo CPM contendo um teor de pasta de 27% observou comportamento semelhante, mesmo com diferentes variações de relação água/finos. A partir da ANOVA (Anexo B) e da Comparação Múltipla das Médias todos os resultados de módulo de elasticidade dos concretos dosados a partir do modelo CPM são estatisticamente equivalentes, com nível de 95% de confiança.

Fazendo a comparação, de acordo com os resultados apresentados na Figura 57, os concretos dosados a partir do modelo de Alfred apresentaram melhores resultados nas relações 0,55 e 0,60. Já os concretos dosados a partir do modelo CPM apresentaram resultados melhores nas relações 0,45 e 0,50. O estado fresco dos concretos produzidos a partir do modelo de Alfred prejudicaram a moldagem e conseqüentemente as propriedades no estado endurecido nas menores relações água/finos, enquanto que os concretos moldados pelo modelo CPM apresentaram o comportamento esperado, com a queda dos valores de módulo conforme se aumentou a quantidade de água da mistura.

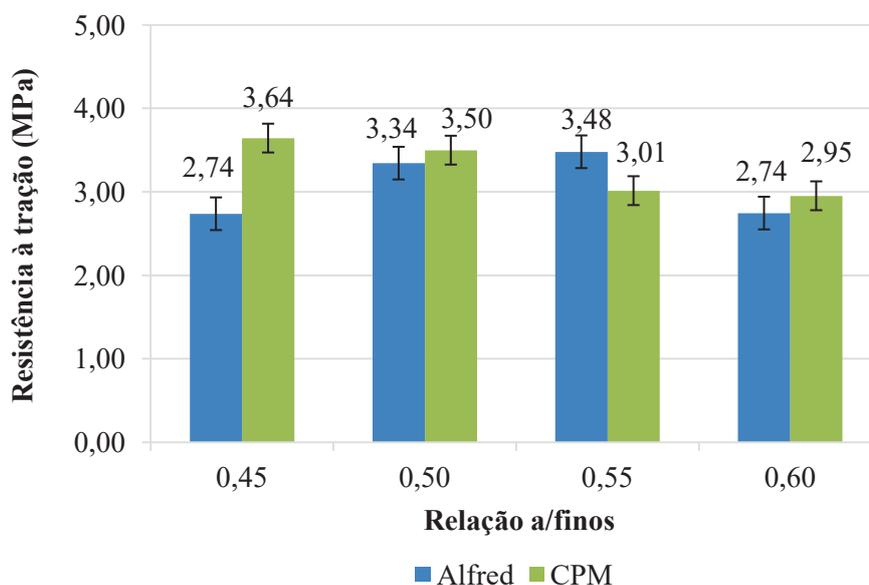
A partir da ANOVA apresentada no Anexo B e da Comparação Múltipla das Médias observou-se que, independentemente da relação água/finos, os resultados de módulo de elasticidade são estatisticamente equivalentes. O modelo, a relação água/finos e a interação entre os fatores não é significativo para os resultados de módulo de elasticidade, mostrando que a influência do módulo dos agregados é o que determina o módulo do concreto. Para todos os traços estudados, tanto nos concretos dosados pelo modelo de Alfred quanto nos concretos dosados pelo CPM, a proporção de agregados na mistura permaneceu constante. Maiores teores de agregados graúdos e menores teores de argamassa nas misturas tendem a apresentar maiores valores de módulo de elasticidade nos concretos (ALMEIDA, 2012; MEHTA e MONTEIRO, 2014; CAMPOS, 2019; SANTOS, 2020). Além disso, o módulo de elasticidade, a morfologia, a composição granulométrica, o tamanho, a textura, a classificação e a composição mineralógica dos agregados afetam o módulo de elasticidade do concreto (ALEMEIDA, 2012; SANTOS, 2020). Por fim, Klein, Lenz e Mazer (2020) observaram

que o empacotamento de partículas possui influencia no módulo de elasticidade estático, tendendo a aumentar o módulo de misturas que possuem esqueleto granular empacotados.

#### 4.4.2.3 Resistência à tração

A Figura 58 apresenta os valores de resistência à tração dos concretos para os modelos de Alfred e CPM, aos 7 dias.

Figura 58 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, AOS 7 DIAS



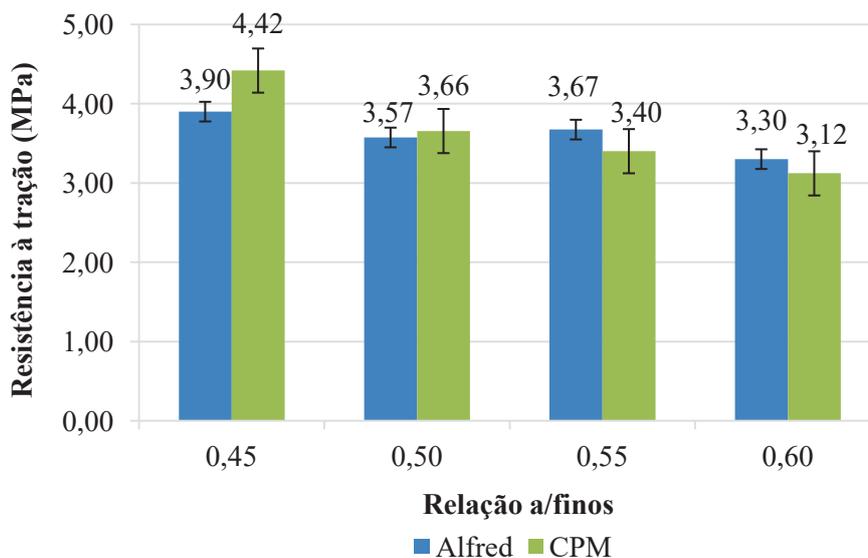
FONTE: A autora (2023).

Observando os valores de resistência à tração da Figura 58 nota-se que, aos 7 dias, a única resistência do modelo de Alfred superior ao CPM foi na relação água/finos 0,55, com um valor de 3,48 MPa. As demais relações, o modelo CPM apresentou melhores resultados, sendo a relação 0,45 aquela com o maior valor, de 3,64 MPa.

Conforme a ANOVA o modelo de empacotamento, a relação água/finos e a interação entre os dois fatores é significativo para os resultados de resistência à tração aos 7 dias. Os dados da ANOVA podem ser conferidos no Anexo B.

A Figura 59 apresenta os valores de resistência à tração dos concretos para os modelos de Alfred e CPM, ambos aos 28 dias.

Figura 59 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, AOS 28 DIAS



FONTE: A autora (2023).

Conforme os valores de resistência à tração da Figura 59 as relações 0,55 e 0,60 de Alfred ficaram superiores ao CPM. De modo geral, a relação 0,45 foi a que resultou em maiores valores de resistência à tração, como esperado, sendo o valor de 4,42 MPa para o concreto dosado pelo modelo CPM, e o de 3,90 MPa para o concreto dosado pelo modelo de Alfred, uma diferença de 11,76%.

De acordo com a ANOVA, o modelo de empacotamento utilizado na dosagem de concretos não é significativo para os resultados de resistência à tração aos 28 dias. Já a relação água/finos e a interação entre os modelos e as relações têm influência nos resultados. Pela Comparação Múltipla das Médias a relação 0,45 o modelo é importante, enquanto que nas demais relações não há diferença estatística entre os modelos. Para os concretos dosados a partir do modelo de Alfred as relações 0,45, 0,50 e 0,55 são estatisticamente equivalentes. Para os concretos dosados a partir do modelo CPM as relações 0,50, 0,55 e 0,60 são estatisticamente equivalentes, com 95% de confiabilidade.

Analisando os concretos dosados a partir do modelo de Alfred, pode ser observado que, assim como para a resistência à compressão, o maior valor aos 7 dias, de 3,48 MPa, se deu na relação água/finos 0,55, enquanto que o maior valor aos 28 dias, de 3,90 MPa, ocorreu na relação 0,45. É possível observar que na relação 0,45 houve um aumento de 29,74% no ganho de resistência à tração ao longo do tempo, o maior ganho quando comparado aos demais traços. De acordo com a ANOVA, apresentada no Anexo B, e com a Comparação Múltipla das Médias as relações 0,50 e 0,55 são estatisticamente equivalentes aos 7 dias, apontando diferença significativa entre as demais relações. Já aos 28 dias, não houve diferença estatística entre as relações 0,45, 0,50 e 0,55. Em todas as idades, a relação 0,60 possui diferença significativa estatisticamente em comparação as demais.

Também para os concretos dosados pelo modelo CPM, assim como na resistência à compressão, observa-se na Figura 59 a tendência de redução dos valores de resistência à tração conforme ocorreu o aumento da quantidade de água das misturas, conforme esperado. O maior valor de resistência à tração ocorreu na relação 0,45, com 4,42 MPa e o menor valor, na relação 0,60, com 3,12 MPa. O maior valor, de 4,42 MPa, é 29% diferente do menor valor, de 3,12 MPa. O maior ganho de resistência à tração ao longo do tempo também foi para a relação 0,45, com 17,64% de crescimento. De acordo com a ANOVA, apresentada no Anexo B, e a Comparação Múltipla das Médias aos 7 dias de idade as relações 0,45 e 0,50 não possuem diferença significativa, bem como entre as relações 0,55 e 0,60. Já aos 28 dias de idade, a relação 0,45 é a única que possui diferença significativa em relação às demais.

A NBR 6118 (ABNT, 2014a) propõe uma equação para estimativa da resistência à tração de concretos a partir da resistência à compressão obtida aos 28 dias. A Tabela 28 apresenta uma comparação entre os valores teóricos calculados a partir do proposto pela norma e os valores experimentais obtidos pelo ensaio de tração por compressão diametral.

Tabela 28 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO TEÓRICO E EXPERIMENTAL, AOS 28 DIAS

Relação a/finos	Resistência à tração teórica (MPa)		Resistência à tração experimental (MPa)	
	Alfred	CPM	Alfred	CPM
0,45	3,41	3,56	3,90	4,42
0,50	3,23	3,19	3,57	3,66
0,55	3,36	3,10	3,67	3,40
0,60	3,01	2,74	3,30	3,12

FONTE: A autora (2023).

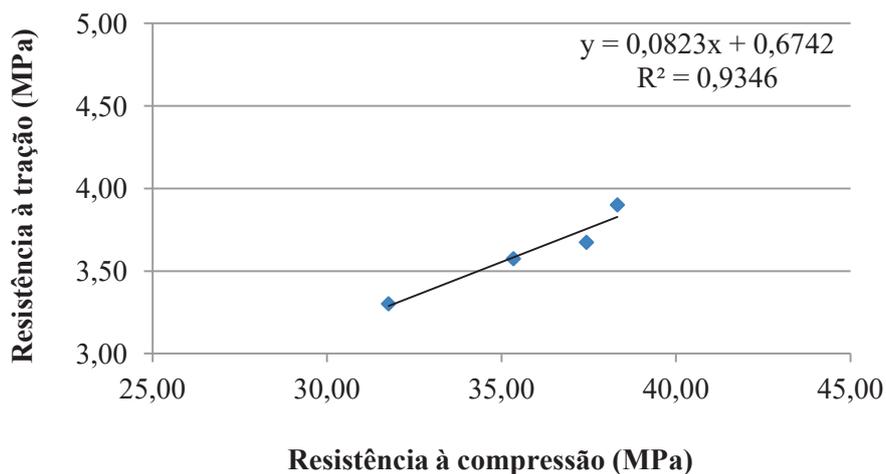
Observam-se na Tabela 28 que todos os valores experimentais foram superiores aos valores teóricos calculados a partir da NBR 6118 (ABNT, 2014a) para ambos os modelos. A média dos resultados de resistência à tração experimentais para o modelo de Alfred foi de 3,61 MPa, 11,06% de variação em relação à média dos resultados de resistência à tração teóricos de 3,25 MPa. Já o modelo CPM teve uma variação de 15,57% do valor médio de resistência à tração experimental de 3,65 MPa em relação ao valor médio de 3,15 MPa da resistência à tração teórica.

Comparando a média das resistências à compressão aos 28 dias com a resistência à tração por compressão diametral para ambos os modelos verificou-se que os concretos produzidos a partir do modelo de Alfred possuem uma relação de 10,11% entre a tração e a compressão, enquanto que os concretos produzidos a partir do modelo CPM tiveram relação de 10,70%. Para concretos

convencionais, a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão é em torno de 10% (NEVILLE, 2016; MEERT, HASTENPFLUG e ANDRADE, 2021).

A Figura 60 apresenta a correlação entre a resistência à tração e a resistência à compressão aos 28 dias dos concretos dosados a partir do modelo de Alfred.

Figura 60 - CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS PELO MODELO DE ALFRED

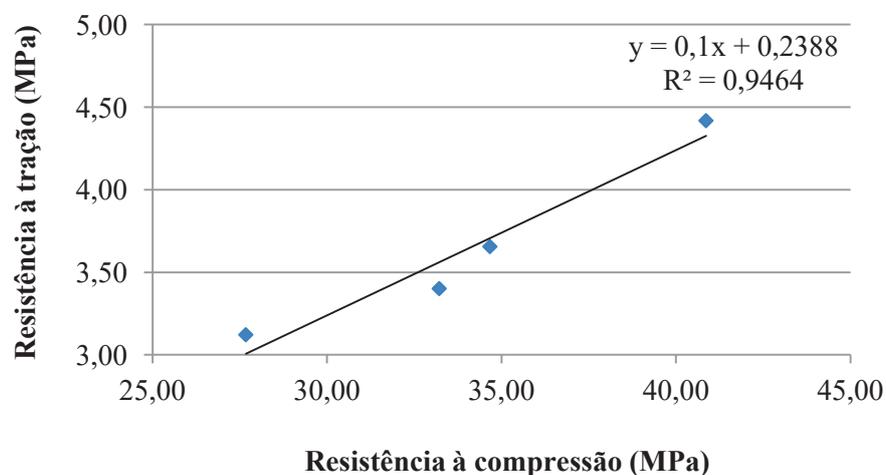


FONTE: A autora (2023).

Conforme observado na Figura 60 que o valor da relação  $R^2$  ficou muito próxima de 1, indicando uma boa correlação entre os valores de resistência à tração e à compressão dos concretos dosados a partir do modelo de Alfred.

A Figura 61 apresenta a correlação entre a resistência à tração e a resistência à compressão aos 28 dias dos concretos dosados a partir do modelo de CPM.

Figura 61 - CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS PELO MODELO CPM



FONTE: A autora (2023).

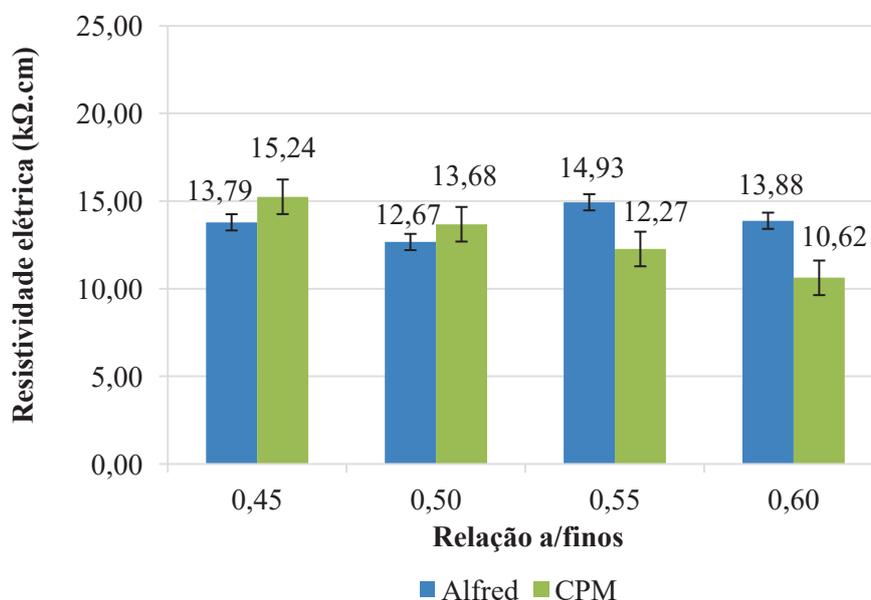
Observa-se na Figura 61 que, assim como nos concretos dosados pelo modelo de Alfred, o modelo CPM também apresentou valor de  $R^2$  próximo de 1, indicando boa correlação entre as resistências dos concretos. Observa-se também a tendência de crescimento da resistência à tração com o aumento da resistência à compressão.

#### 4.4.3 Ensaio de durabilidade dos concretos pelos modelos de Alfred e CPM

##### 4.4.3.1 Resistividade elétrica

A Figura 62 compara os valores dos resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial dos concretos com composição dos materiais definida pelos modelos de empacotamento, aos 7 dias.

Figura 62 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULA, AOS 7 DIAS



FONTE: A autora (2023).

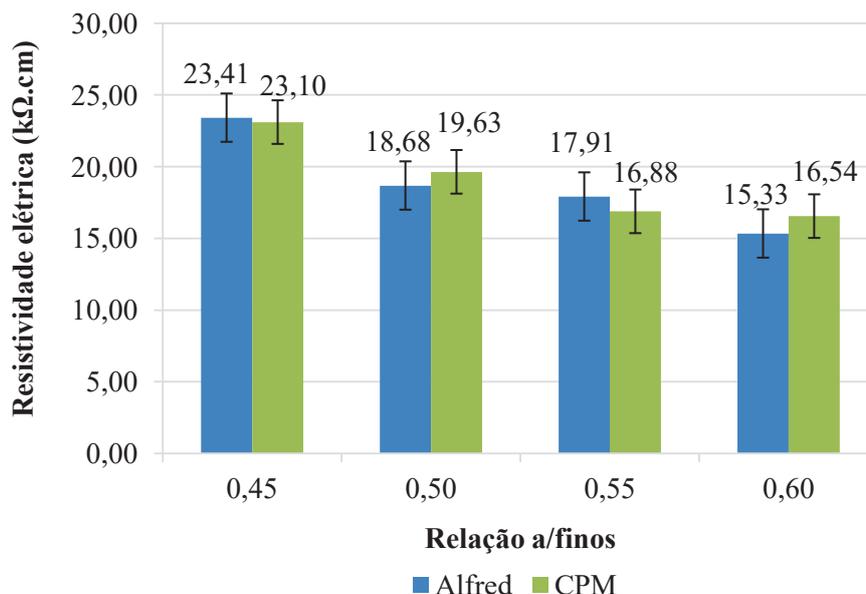
Observam-se na Figura 62 que os concretos dosados a partir do modelo CPM tiveram o comportamento esperado, com redução da resistividade elétrica ao aumentar a relação água/finos. Para os concretos dosados a partir do modelo de Alfred esse comportamento é observado somente nas relações 0,55 e 0,60 enquanto que as menores relações, de 0,45 e 0,50, tiveram comportamento diferente devido à maior dificuldade de moldagem no estado fresco, já comentada. Pela classificação proposta por Whiting e Nagi (2003) os concretos tiveram resultados de resistividade aos 7 dias com risco de corrosão moderado, permanecendo dentro do intervalo de 10 kΩ.cm e 20 kΩ.cm.

Conforme análise estatística realizada pela ANOVA, apresentada no Anexo B, e pela Comparação Múltipla das Médias entre as relações 0,45 e 0,50 são estatisticamente equivalentes para

os concretos dosados a partir do modelo de Alfred, assim como as relações 0,55 e 0,60. Já para os concretos dosados a partir do modelo CPM não há diferença significativa entre todas as relações.

A Figura 63 apresenta os valores dos resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial dos concretos com composição dos materiais definida pelos modelos de empacotamento aos 28 dias.

Figura 63 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULA, AOS 28 DIAS



FONTE: A autora (2023).

Independentemente do modelo, na Figura 63 que, aos 28 dias, com o aumento da quantidade de água nas misturas o valor de resistividade elétrica diminuiu, conforme esperado (AZARSA E GUPTA, 2017; SANG, YANG e ZHAO, 2022). Para ambos os concretos dosados utilizando os modelos de empacotamento de partículas os melhores valores de resistividade elétrica ocorreram na menor relação água/finos de 0,45, sendo o valor de 23,41 kΩ.cm para o modelo de Alfred e 23,10 kΩ.cm para o modelo CPM, tendo apenas 1,34% de variação. De acordo com a classificação sugerida por Whiting e Nagi (2003), os concretos com relação 0,50, 0,55 e 0,60 apresentam risco de corrosão moderado, enquanto que os concretos produzidos com relação 0,45 apresentam risco de corrosão baixo por apresentarem valores superiores a 20 kΩ.cm. Já pela classificação de Azarsa e Gupta (2017) todos os concretos estudados apresentam risco de corrosão moderado.

Nas relações 0,50 e 0,60 os concretos dosados com o modelo CPM tiveram valores de resistividade superiores, já nas relações 0,45 e 0,55 os maiores valores foram obtidos nos concretos dosados pelo modelo de Alfred. A ANOVA, presente no Anexo B, apontou que o modelo de empacotamento não possui efeito significativo na resistividade elétrica dos concretos aos 28 dias,

enquanto que a relação água/finos possui. Além disso, a análise estatística concluiu que a interação entre os dois fatores não é significativa, com 95% de nível de confiabilidade.

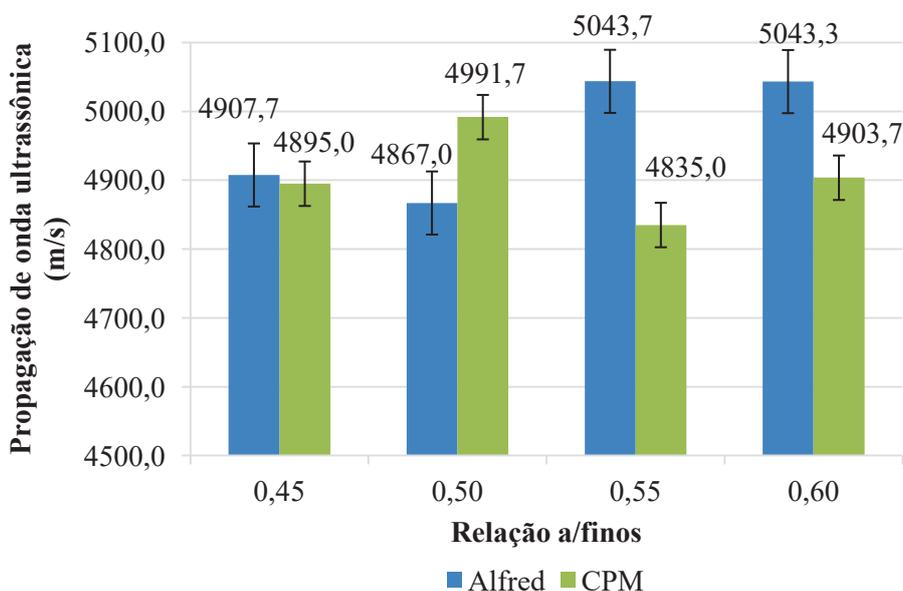
Como pode ser observado para os concretos dosados pelo modelo de Alfred, o maior valor de resistividade elétrica aos 7 dias foi de 14,93 k $\Omega$ .cm na relação 0,55 enquanto que aos 28 dias, a relação 0,45 foi a que proporcionou o maior valor de resistividade, com 23,41 k $\Omega$ .cm. Todos os concretos apresentaram risco de corrosão moderado de acordo com a classificação de Azarsa e Gupta (2017). Também é possível observar que a resistividade elétrica aos 28 dias diminuiu ao ponto em que se aumenta a quantidade de água da mistura, como esperado. Isso porque a relação água/finos influencia na porosidade da matriz com o aumento da quantidade de água, reduzindo a resistividade elétrica (CAMPOS, 2019). Enquanto isso, novamente observa-se uma exceção ao comportamento padrão esperada nas relações água/finos 0,45 e 0,50, devido à dificuldade de moldagem dos concretos que teve influência direta da baixa trabalhabilidade no estado fresco e impactou o estado endurecido. Após a aplicação da ANOVA, que está apresentada no Anexo B, e da Comparação Múltipla das Médias, aos 7 dias, as relações 0,45 e 0,50, bem como 0,55 e 0,60 são estatisticamente equivalentes. Já aos 28 dias, as relações 0,50 e 0,55 são estatisticamente equivalentes, com 95% de confiança.

Observando os concretos dosados pelo modelo CPM, também como os valores de resistência mecânica (compressão e tração) os valores de resistividade elétrica diminuíram com o aumento da quantidade de água nas misturas, para ambas as idades. Esse comportamento é esperado porque, ao aumentar a quantidade de água da mistura, a permeabilidade do concreto é maior, formando uma maior e mais conectada rede de poros e conseqüentemente levando a uma menor resistividade (AZARSA E GUPTA, 2017). Em todo caso, todos os concretos pelo modelo CPM apresentaram valores entre 10 e 50 k $\Omega$ .cm em ambas as idades, sendo classificados com risco de corrosão moderado (AZARSA E GUPTA, 2017).

#### 4.4.3.2 Propagação de onda ultrassônica

A fim de comparação por idade, a Figura 64 apresenta os valores de velocidade de propagação de onda ultrassônica dos concretos produzidos com a composição dos materiais definida pelos modelos de Alfred e CPM aos 7 dias.

Figura 64 - PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULA, AOS 7 DIAS



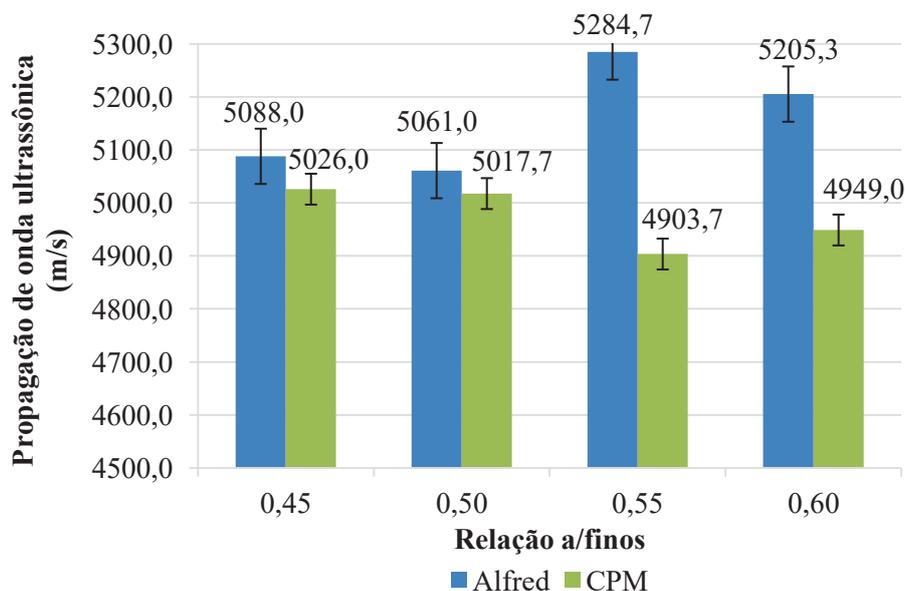
FONTE: A autora (2023).

Conforme observado na Figura 64, para os resultados de velocidade de propagação de onda aos 7 dias, o concreto dosado a partir do modelo CPM obteve valor superior apenas na relação 0,50. Nas demais relações, os concretos dosados a partir do modelo de Alfred apresentaram valor de propagação de onda ultrassônica superior, sendo o valor de 5043,7 m/s o maior, obtido na relação 0,55. Este valor é 4,32% maior em relação ao valor de 4835,0 m/s, obtido pelo concreto dosado a partir do modelo CPM na mesma relação. Possivelmente os resultados de velocidade de propagação de onda dos concretos do modelo de Alfred seriam ainda maiores e superiores que os dos concretos do modelo CPM nas menores relações água/finos caso a moldagem não tivesse sido prejudicada devido à consistência observada no estado fresco.

A partir da análise realizada pela ANOVA, apresentada no Anexo B, para os resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica aos 7 dias os modelos e as relações água/finos são estatisticamente significativas, bem como a interação entre os dois fatores, com nível de 95% de confiabilidade.

A Figura 65 apresenta os valores de velocidade de propagação de onda ultrassônica aos 28 dias dos concretos produzidos com a composição dos materiais a partir dos modelos de Alfred e CPM.

Figura 65 - PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, AOS 28 DIAS



FONTE: A autora (2023).

Analisando a Figura 65 percebe-se que em todas as comparações o modelo de Alfred obteve melhores resultados, com valores de velocidade de propagação de onda superior ao CPM aos 28 dias. Mesmo com a maior dificuldade de moldagem nas menores relações água/finos dos concretos pelo modelo de Alfred, os resultados foram maiores quando comparados ao modelo CPM. Nas relações 0,55 e 0,60 os concretos dosados a partir do modelo de Alfred são 7,77% e 5,18% superiores aos concretos dosados pelo modelo CPM, respectivamente. A velocidade de propagação de onda ultrassônica tende a ser maior em misturas de concreto com maiores valores de resistência à compressão, por apresentarem matriz mais densa e menos porosa (MOURA, MORENO JÚNIOR e FERREIRA, 2023). Ao analisar os valores de resistência a compressão aos 28 dias, percebe-se que os concretos do modelo de Alfred tiveram valores superiores ao modelo CPM, com exceção somente da relação 0,45 e mesmo assim, nesta relação água/finos a velocidade de propagação de onda também foi superior para o modelo de Alfred.

A partir da ANOVA, apresentada no Anexo B, e da Comparação Múltipla das Médias concluiu-se que para as relações 0,45 e 0,50 os resultados são estatisticamente equivalentes. Já nas relações 0,55 e 0,60, há diferença significativa entre os modelos.

Analisando os concretos dosados pelo modelo de Alfred, o maior valor de velocidade de propagação de onda aos 7 dias foi de 5043,7 m/s na relação 0,55 e aos 28 dias foi de 5284,7 m/s na mesma relação água/finos. As duas menores relações, por conta da dificuldade de moldagem do material no estado fresco, obtiveram valores de propagação de onda menores. A velocidade de

propagação de onda ultrassônica é menor quando a matriz do concreto apresenta maior índice de vazios, visto que a onda ultrassônica se propaga mais rápido pela pasta de cimento e mais devagar pelo ar (HERNANDEZ et al., 2000). Isso justifica a tendência de queda a partir da relação 0,55 por conta do aumento da quantidade de água (que aumenta o índice de vazios) e os baixos valores observados nas relações em que a moldagem foi prejudicada, pois os corpos de prova tiveram um índice de vazios maior em comparação com os demais, verificado pelos menores valores de massa específica.

Em ambas as idades dos concretos dosados pelo modelo de Alfred, as relações 0,50 e 0,55 apresentaram diferença estatística significativa, enquanto que as duas primeiras relações água/finos bem como as duas últimas se mostraram estatisticamente equivalentes pela Comparação Múltipla das Médias e da ANOVA, apresentada no Anexo B, com índice de confiança de 95%. De modo geral, observa-se que todos os valores de velocidade de propagação de onda dos concretos dosados a partir do modelo de Alfred foram superiores a 4500 m/s, valor mínimo estipulado pela literatura para que o concreto seja considerado excelente (RINCÓN et al., 1998; WHITEHURST, 1966 apud RAMÍREZ, 2015).

Analisando os concretos do modelo CPM, o maior valor de propagação de onda ultrassônica aos 28 dias foi de 5026,0 m/s e ocorreu na relação 0,45, um ganho de 26% em relação aos 7 dias de idade (4895,0 m/s). Aos 7 dias, o valor de 4991,7 m/s foi o maior observado e ocorreu na relação água/finos 0,50. Para os concretos dosados a partir do modelo CPM percebe-se a tendência de redução dos valores de propagação de onda ao passo que se aumenta a quantidade de água, com exceção da relação água/finos 0,55.

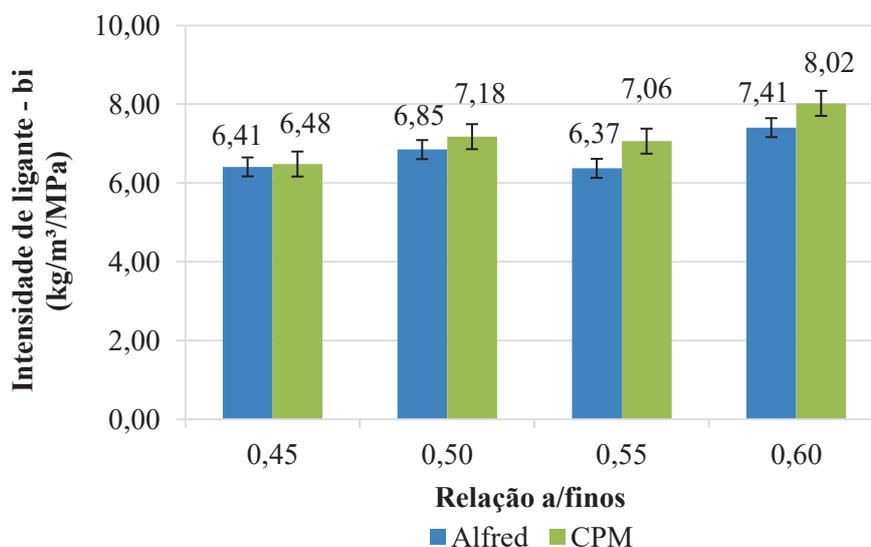
De acordo com a ANOVA aplicada nos concretos do modelo CPM, que pode ser conferida no Anexo B, e da Comparação Múltipla das Médias, os resultados das relações 0,55 e 0,60 são estatisticamente equivalentes em ambas às idades analisadas. Para os resultados de 28 dias, as relações 0,45 e 0,50 também são equivalentes, com 95% de nível de confiança. Todos os valores foram superiores a 4500 m/s, valor mínimo para que o concreto seja classificado como excelente pela literatura (RINCÓN et al., 1998; WHITEHURST, 1966 apud RAMÍREZ, 2015).

#### 4.4.4 Parâmetros de sustentabilidade dos concretos pelos modelos de Alfred e CPM

##### 4.4.4.1 Intensidade de ligante

A Figura 66 apresenta os resultados de intensidade de ligante (ou consumo de cimento por MPa) dos concretos com a composição dos materiais feita a partir dos modelos de Alfred e CPM.

Figura 66 - INTENSIDADE DE LIGANTE DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS



FONTE: A autora (2023).

Iniciando pelos resultados do modelo de Alfred, como pode ser observado na Figura 66, o menor valor de intensidade de ligante foi para a relação 0,55, indicando que esta obteve a melhor eficiência quanto ao consumo de cimento para produção de uma unidade de resistência à compressão. O esperado era que, conforme se aumenta o consumo de água e diminui a resistência mecânica, o índice de intensidade de ligante fosse crescendo. Porém, como nas primeiras relações água/finos a moldagem foi prejudicada pela consistência no estado fresco, não foram estas que resultaram em menores índices. De modo geral, todos os concretos apresentaram valor inferior a 10 kg/m³/MPa, valor usual para concreto convencional (DAMINELI et al., 2010), apontando que a aplicação do modelo de Alfred e a utilização do pó de diabásio como substituto parcial do cimento asseguraram a produção de concretos mais ecoeficientes.

Conforme Figura 66, o concreto dosado pelo modelo CPM de relação água/finos 0,45 obteve o melhor índice de intensidade de ligante, conforme esperado. A relação consumo de cimento (kg/m³) por MPa de resistência à compressão diminui com o crescimento da resistência (DAMINELI et al., 2010; YOUSUF et al., 2019). Mesmo sendo esta a relação que teve o maior consumo de cimento (264,87 kg/m³) sua eficiência em produzir resistência mecânica foi maior que as demais misturas. Além disso, os quatro concretos dosados com a composição dos materiais pelo modelo CPM apresentaram valores de intensidade de ligante menores que 10 kg/m³/Mpa, valor comum em concretos convencionais (DAMINELI et al., 2010).

Em todas as relações água/finos, nota-se pela Figura 66, que os concretos dosados a partir do modelo de Alfred tiveram resultados de intensidade de ligante melhores quando comparados aos

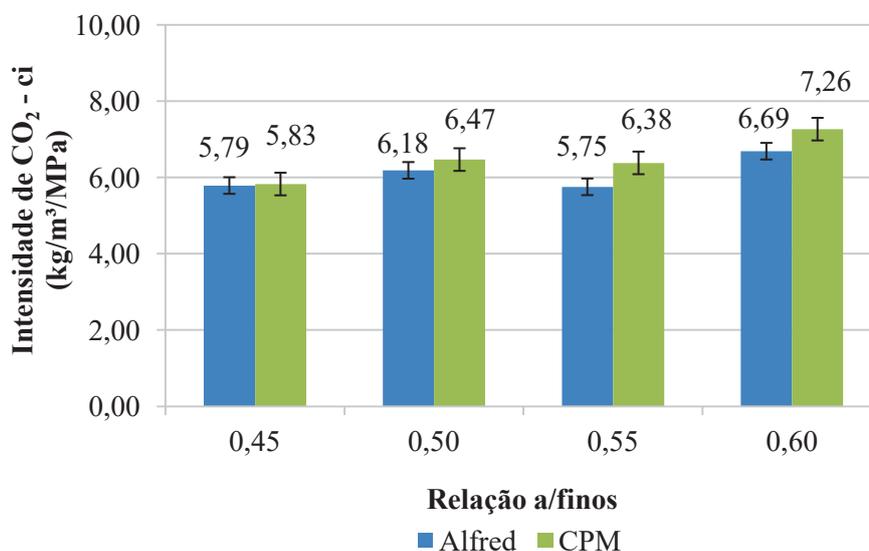
concretos dosados pelo modelo CPM. Mesmo assim, os resultados ficaram muito próximos para ambos os modelos, com diferença de apenas 1,09% na relação 0,45. De modo geral, os quatro traços de concretos dosados pelo modelo de Alfred obtiveram uma média de resistência à compressão maior que a média dos concretos dosados pelo CPM, e um consumo de cimento médio menor, o que levou a melhores resultados de intensidade de ligante.

De acordo com Grazia et al. (2019) a intensidade de ligante para concreto convencional varia de 9 kg/m<sup>3</sup>/MPa a 14kg/m<sup>3</sup>/MPa. Para todos os concretos dosados na pesquisa, utilizando os métodos de empacotamento de partículas, observa-se que os resultados ficaram em média 23,11% abaixo do menor valor estimado pela literatura.

#### 4.4.4.2 Intensidade de CO<sub>2</sub>

Os valores de intensidade de CO<sub>2</sub> dos concretos produzidos a partir dos modelos de empacotamento de partículas são apresentados na Figura 67.

Figura 67 - INTENSIDADE DE CO<sub>2</sub> DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS



FONTE: A autora (2023).

De acordo com a Figura 67, para o concreto dosado a partir do modelo de Alfred, da mesma forma que na intensidade de ligante, o traço mais eficiente foi na relação água/finos de 0,55 com um valor de 5,75 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>/MPa. Para os concretos dosados a partir do modelo CPM, também como na intensidade de ligante, o concreto com relação água/finos de 0,45 foi o que obteve melhor resultado para a intensidade de CO<sub>2</sub>, com o valor de 5,83 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>/MPa.

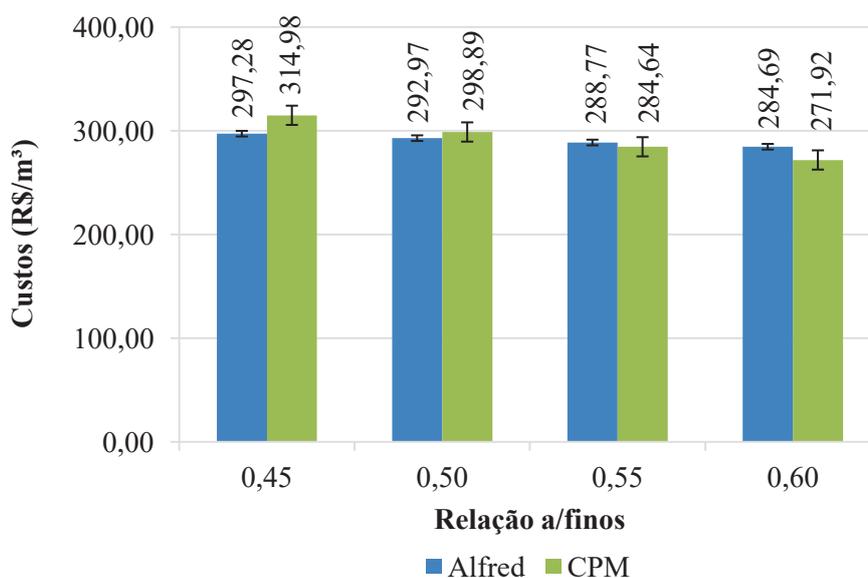
Nota-se na Figura 67 que todos os concretos dosados a partir de ambos os modelos de empacotamento de partículas obtiveram valores de intensidade de CO<sub>2</sub> abaixo da média geral de 9,1 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>/MPa de concretos convencionais produzidos no Brasil (DAMINELI et al., 2010). Isso indica que, para os concretos produzidos a partir da composição dos materiais definida pelo modelo de Alfred e pelo modelo CPM, independentemente da relação água/finos e com a utilização de 20% de substituição do cimento pelo pó de diabásio, há redução da quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> durante sua produção.

Observa-se pela Figura 67 que, novamente para todas as relações água/finos, os concretos produzidos a partir do modelo de Alfred tiveram valores de intensidade de CO<sub>2</sub> melhores quando comparado aos concretos dosados a partir do modelo CPM, justamente por apresentar valores médios de resistência à compressão maior e de consumo de cimento menor. Entretanto, independentemente do modelo de empacotamento utilizado observou-se que os índices de intensidade de CO<sub>2</sub> obtidos são menores ao estipulado pela literatura. Em média, o índice de intensidade de CO<sub>2</sub> é 32,94% inferior para o modelo de Alfred e 28,74% inferior para o modelo CPM, quando comparados ao valor de 9,1 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>/MPa (DAMINELI et al., 2010).

#### 4.4.4.3 Custos

Os custos dos concretos dosados a partir da composição dos materiais pelos modelos de empacotamento estão apresentados na Figura 68.

Figura 68 - CUSTOS DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

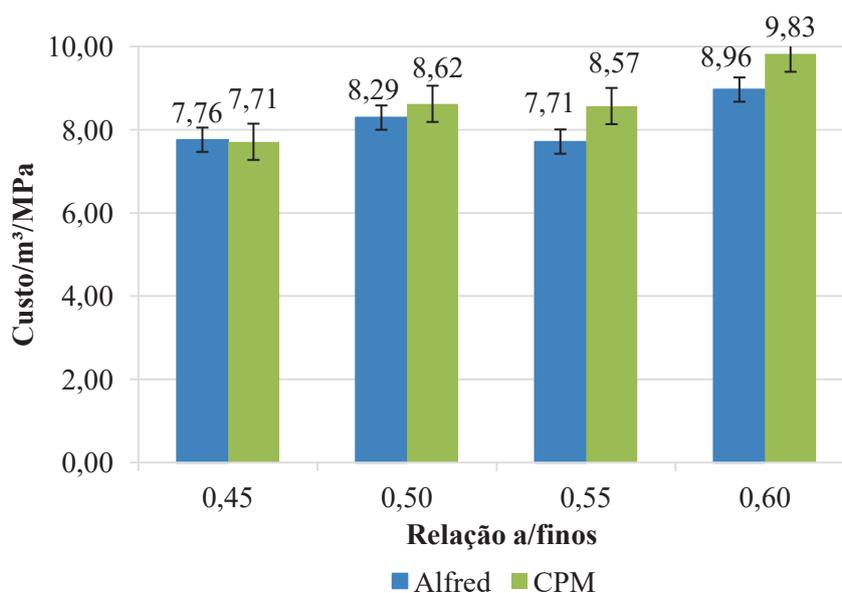


FONTE: A autora (2023).

Pela Figura 68 nota-se que em ambos os modelos os concretos tiveram custos aproximados. Para as relações água/finos 0,45 e 0,50 o modelo de Alfred produziu concretos com menores custos enquanto que o modelo CPM produziu concretos com menores custos nas relações 0,55 e 0,60. Observa-se também que, independentemente do modelo de empacotamento, com o aumento da relação água/finos o custo diminuiu, conforme esperado, visto que se reduz a quantidade de cimento das misturas. Para o concreto dosado a partir do modelo de Alfred o menor valor foi de 284,69 R\$/m<sup>3</sup> e para o concreto dosado pelo modelo CPM o menor valor foi de 271,92 R\$/m<sup>3</sup>, uma diferença de 4,49%.

A partir dos custos por metro cúbico e da resistência à compressão aos 28 dias, a Figura 69 apresenta os custos relativos dos concretos produzidos pelos modelos de Alfred e CPM para a produção de uma unidade de desempenho mecânico.

Figura 69 - CUSTOS RELATIVOS DOS CONCRETOS DOSADOS POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS



FONTE: A autora (2023).

Conforme apresentado na Figura 69, o concreto com 0,60 de relação água/finos obteve o maior custo para produzir uma unidade de resistência à compressão por metro cúbico, mesmo tendo o menor custo entre as relações para ambos os modelos, isso porque foram os traços que apresentaram a menor resistência à compressão aos 28 dias. Para ambos os modelos, o menor custo relativo foi de 7,71 R\$/m<sup>3</sup>/MPa, tendo ocorrido na relação 0,55 do concreto dosado a partir do modelo de Alfred e na relação 0,45 do concreto dosado pelo modelo CPM.

Assim como os parâmetros de sustentabilidade analisados anteriormente, a Figura 69 mostra que o melhor custo/m<sup>3</sup>/MPa ocorreu nos concretos de relação água/finos 0,45, em ambos os modelos.

Esta relação, por ter o maior consumo de cimento, é a que apresentou o maior custo, nos valores de 297,28 R\$/m<sup>3</sup> para Alfred e 314,98/m<sup>3</sup> para CPM, porém, entre todas as misturas, foi a que acarretou no melhor aproveitamento a produção de uma unidade de resistência mecânica.

Os custos para produção de uma unidade de resistência mecânica dos concretos pelo modelo de Alfred apresentaram valores menores nas relações água/finos 0,50, 0,55 e 0,60. Já na relação 0,45, o concreto produzido a partir do modelo CPM teve custo/m<sup>3</sup>/MPa ligeiramente inferior, sendo o modelo de Alfred 0,65% mais caro.

Mesmo com maior consumo de cimento nas relações água/finos 0,45 (245,62 kg/m<sup>3</sup> para o modelo de Alfred e 264,87 kg/m<sup>3</sup> para o modelo CPM), principal componente para quantificar o valor da dosagem, para ambos os modelos foram obtidos os menores custos relativos (7,76 R\$/m<sup>3</sup>/MPa para o modelo de Alfred e 7,71 R\$/m<sup>3</sup>/MPa para o modelo CPM). Apesar do menor custo/m<sup>3</sup> do modelo de Alfred na relação 0,45, seu custo relativo para produção de uma unidade de desempenho mecânico foi inferior por ter tido a moldagem prejudicada quanto ao estado fresco. De modo geral, é possível observar uma tendência de aumento de custos relativos conforme se aumenta a quantidade de água, visto que as propriedades são afetadas, reduzindo o desempenho mecânico dos concretos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do programa experimental, dos resultados apresentados e das análises estatísticas é possível chegar às seguintes conclusões:

- Os concretos dosados para validação do pó de diabásio como substituto parcial do cimento Portland apresentaram índices de intensidade de ligante e intensidade de CO<sub>2</sub> relativamente menores que os encontrados na literatura, apontando a eficiência da utilização do pó de diabásio com o empacotamento de partículas. Assim, foi validada a utilização do pó de diabásio para a produção de concretos ecoeficientes;
- Como resultados iniciais do estudo dos materiais finos, encontrou-se um ponto de saturação do aditivo para o cimento de 0,9% e para o pó de pedra de 1,2%. Foram determinadas as densidades de empacotamento para o cimento de 0,641 e para o pó de pedra de 0,629 pelo método experimental úmido de Wong e Kwan. A densidade de empacotamento do cimento pode ter sido superior porque o pó de pedra possui partículas maiores, com uma curva granulométrica que, mesmo contínua, apresentou leve tendência à linearidade quando compara a curva granulométrica do cimento;
- O teor de pasta de 26% foi definido como ideal para a composição dos traços pelo modelo CPM, visto que foi aquele que obteve os melhores índices de ecoeficiência;
- Para o estado fresco, as relações 0,50, 0,55 e 0,60 de massa específica apresentaram valores muito próximos entre os concretos dosados por ambos os modelos. Apenas na relação 0,45 ocorreu maior diferença, tendo o concreto dosado com o modelo de Alfred 2,458 g/cm<sup>3</sup> de massa específica em comparação com 2,522 g/cm<sup>3</sup> atingido pelo concreto dosado a partir do modelo CPM. Isso porque, nas relações água/finos mais baixas, o concreto dosado pelo modelo de Alfred apresentou maior dificuldade na moldagem, devido à compacidade da mistura;
- A utilização do pó de diabásio, que é um material duro e lamelar, influenciou nas propriedades dos concretos dosados a partir dos modelos de empacotamento de partículas, especialmente no estado fresco, reduzindo a trabalhabilidade;
- Quanto a resistência à compressão, aos 7 dias os concretos dosados pelo modelo CPM apresentaram valores superiores em todas as relações água/finos. Sendo o maior valor de 38,11 MPa na relação 0,45. Já aos 28 dias, o modelo CPM superou o modelo de Alfred apenas na relação 0,45, onde o modelo de Alfred teve prejuízos quanto ao estado fresco. Nas demais relações água/finos os concretos dosados a partir do modelo de Alfred tiveram valores de resistência à compressão maiores. Também para

os 28 dias, o maior valor de resistência foi na relação 0,45, de 40,86 MPa pelo concreto dosado a partir do modelo CPM;

- O módulo de elasticidade estático, aos 28 dias, apresentou que para relações água/finos maiores o modelo de Alfred atingiu resultados mais altos, enquanto que para relações água/finos menores o modelo CPM atingiu maiores resultados. O estado fresco dos concretos dosados pelo modelo de Alfred influenciou a moldagem nas relações água/finos mais baixas, prejudicando os resultados. Já os concretos dosados pelo modelo CPM apresentaram o comportamento esperado de queda dos valores de módulo conforme ocorreu o aumento da quantidade de água. Para o modelo de Alfred o maior valor de módulo de elasticidade foi de 36,88 GPa na relação 0,60 enquanto que para o modelo CPM o maior valor de módulo foi de 40,25 GPa na relação 0,50.
- Os resultados do ensaio de resistência à tração apontaram que, aos 7 dias, o concreto dosado pelo modelo de Alfred obteve resultado superior apenas na relação 0,55. Nas demais relações os concretos do modelo CPM tiveram melhores resultados, sendo o valor de 3,64 MPa o maior obtido, na relação 0,45, conforme esperado. Também foi possível observar a tendência de redução da resistência à tração com o aumento da quantidade de água da mistura para os concretos do modelo CPM em ambas as idades analisadas. Os concretos dosados a partir do modelo de Alfred apresentaram melhores resultados de resistência à tração nas maiores relações água/finos aos 28 dias, o mesmo comportamento observado para o ensaio de módulo de elasticidade. Possivelmente a moldagem das menores relações água/finos prejudicou também os valores de resistência à tração do modelo de Alfred. Também aos 28 dias o maior valor de resistência à tração foi na relação 0,45, como esperado, de 4,42 MPa para o concreto dosado pelo modelo CPM.
- Para o ensaio de resistividade elétrica aos 7 dias os concretos dosados pelo modelo de Alfred apresentaram valores superiores nas maiores relações água/finos enquanto que nas menores relações água/finos os concretos dosados pelo modelo CPM apresentaram melhores resultados. Mais uma vez, o estado fresco das misturas do modelo de Alfred teve influência nas propriedades dos concretos. O maior valor de resistividade ocorreu na relação 0,45, como esperado, de 15,24 kΩ.cm para o concreto dosado pelo modelo CPM. Já aos 28 dias, os concretos dosados a partir do modelo de Alfred apresentaram valores superiores nas relações 0,45 e 0,55, sendo o

maior valor encontrado de 23,41 k $\Omega$ .cm na menor relação, como esperado. Foi possível observar a tendência de queda da resistividade ao passo que se aumentou a quantidade de água das misturas em ambos os modelos analisados, conforme esperado;

- No ensaio de verificação da velocidade de propagação de onda ultrassônica os concretos dosados pelo modelo de Alfred obtiveram a maioria dos valores superiores, com exceção apenas da relação água/finos 0,50 aos 7 dias, em que o modelo CPM obteve melhor resultado. Em todos os demais casos o modelo de Alfred apresentou velocidade de propagação de onda maior. Tanto aos 7 quanto aos 28 dias os maiores resultados de velocidade de propagação de onda ocorreram na relação água/finos 0,55, nos valores de 5043,7 m/s e 5284,7 m/s, respectivamente. Todos os concretos analisados apresentaram valores superiores a 4500 m/s, valor mínimo estipulado pela literatura para classificar o concreto como excelente (RINCÓN et al., 1998).
- Em relação à velocidade de propagação de onda ultrassônica é importante ressaltar que, apesar dos resultados positivos, devido ao estado fresco a moldagem dos corpos de prova ficou prejudicada, especialmente para relações água/finos menores dos concretos dosados a partir do modelo de Alfred, o que pode acarretar em cobrimentos inadequados para proteção do aço das estruturas de concreto armado.
- Quanto aos parâmetros de sustentabilidade, foi possível observar que a utilização dos modelos de empacotamento de partículas permite a redução do consumo de cimento sem prejudicar as propriedades do concreto, garantindo índices de ecoeficiência inferiores aos encontrados na literatura. Os concretos dosados a partir do modelo de Alfred apresentaram os melhores índices, com os menores valores de 6,37 kg/m<sup>3</sup>/MPa para a intensidade de ligante e de 5,75 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa para a intensidade de CO<sub>2</sub>. Em ambos os parâmetros observou-se a tendência de crescimento dos índices de ecoeficiência ao passo em que se aumentou a quantidade de água das misturas, isso porque as propriedades mecânicas são prejudicadas com o aumento de água, influenciando diretamente na eficiência. Todos os valores analisados para os índices foram inferiores aos encontrados pela literatura para concreto convencional.
- Por fim, na análise de custos para produção dos concretos observou-se que os custos relativos do modelo CPM foram maiores quando comparados ao modelo de Alfred, com exceção da relação 0,45, em que o modelo de Alfred ficou levemente mais caro, com variação de 0,65% de aumento. Os maiores custos para produzir um metro

cúbico de concreto ocorreram na menor relação água/finos, como esperado. Para o modelo de Alfred o maior valor foi de 245,62 R\$/m<sup>3</sup> e para o modelo CPM foi de 264,87 R\$/m<sup>3</sup>.

Finalmente, conclui-se que o objetivo geral do trabalho foi alcançado. Foi possível produzir concretos ecoeficientes com a composição dos materiais definidas pelos modelos de empacotamento de partículas de Alfred e CPM a fim de verificação e comparação de suas propriedades. Os dois modelos de empacotamento propuseram concretos com resultados satisfatórios no estado endurecido, nas avaliações iniciais de durabilidade e nos parâmetros de sustentabilidade. No estado fresco, a alta compactidade da mistura dificultou a moldagem dos concretos dosados pelo modelo de Alfred nas menores relações a/finos. Assim, de modo geral, os concretos dosados a partir do modelo de Alfred apresentaram melhores valores das propriedades analisadas nas maiores relações água/finos quando comparados aos concretos dosados pelo modelo CPM.

O desenvolvimento de concretos ecoeficientes a partir da utilização de empacotamento de partículas possui potencial de aplicação visto que suas propriedades são satisfatórias e apresentam vantagens relacionadas ao seu uso. Recomenda-se, então, o aprofundamento de pesquisas nessa área. Assim, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Comparação entre os modelos de Alfred e CPM com utilização de outros materiais, especialmente diferentes pós de pedra, a fim de verificar a influência da composição dos traços nos parâmetros analisados;
- Verificar a aplicabilidade dos concretos dosados a partir dos modelos de empacotamento de partículas para diferentes fins construtivos devido à necessidade de alta energia de compactação, como pré-moldados, por exemplo;
- Dosagem com diferentes pós de pedra e variação dos valores de fator de ajuste (q) no modelo de Alfred para verificação da influência do estado fresco nas amostras de concreto;
- Dosagem a partir do modelo CPM alternando diferentes teores de pasta, não só buscando o melhor em termos de ecoeficiência, mas verificando o estado fresco para que o teor de pasta adotado seja suficiente para envolver os agregados;
- Avaliação reológica de concretos produzidos a partir dos modelos de Alfred e CPM para fins de comparação, definindo o estado fresco como principal parâmetro do estudo;

- Aprofundar o estudo das propriedades de durabilidade dos concretos dosados com a composição dos materiais definida por modelos de empacotamento de partículas a fim de se obter maiores dados sobre o desempenho do material ao longo do tempo;
- Comparação de concretos ecoeficientes dosados a partir de outros modelos de empacotamento de partículas, objetivando ampla faixa de resistência mecânica, para obtenção de maiores dados sobre a aplicabilidade de um material que visa ser mais sustentável.

## REFERÊNCIAS

- ABRAMS, D. A. Design of concrete mixtures. Chicago, USA. Lewis Institute. **Structural Materials Research Laboratory**, 1919.
- AÍTCIN, P. C.; JOLICOEUR, C.; MACGREGOR, J. G. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. **Concrete International**, v. 16, p. 45-52, 1994.
- ALMEIDA, S. M. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- ALMEIDA, S. L. L.; SILVA, V. S. **Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados**. II SUFFIB – Seminário: O uso da fração fina de britagem. Anais. São Paulo, 2005.
- AMERICAN, SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standart test method for pulse velocity through concrete**. ASTM C-597. West Conshohocken, 2016.
- ANDRIOLO, F. R. **Usos e abusos do pó de pedra em diversos tipos de concreto**. II SUFFIB – Seminário: O uso da fração fina da britagem. Anais, São Paulo, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Panorama e tendências técnico-mercado do setor de concreto**. São Paulo, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1**: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14725**: Produtos químicos – informações sobre segurança, saúde e meio ambiente. Rio de Janeiro, 2014b.

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

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

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 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021a.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **Areia de brita para construção**. Ed. 73, p. 20-24, São Paulo, 2019.

AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. **Advances in Materials Science and Engineering**. v. 2017, 2017.

BHAT, J. A. Mechanical behaviour of self compacting concrete: Effect of wood ash and coal ash as partial cement replacement. **Materials Today: Proceedings**. 2021.

BRITO, J.; KURDA, R. The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials. **Journal of Cleaner Production**. v. 281, 2021.

BUENO, E. T.; PARIS, J. M.; CLAVIER, K. A.; SPREADBURY, C.; FERRARO, C. C.; TOWNSEND, T. G. A review of ground waste glass as a supplementary cementitious material: A focus on alkali-silica reaction. **Journal of Cleaner Production**. v. 257, 2020.

CABRAL, K. O. **Influência da areia artificial oriunda da britagem de rocha granito-gnaiss nas propriedades do concreto convencional no estado fresco e endurecido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Demanda habitacional no Brasil**. Política habitacional – Brasil. Brasília, 2012. Disponível em: [https://www.caixa.gov.br/Downloads/habitacao-documentos-gerais/demanda\\_habitacional.pdf](https://www.caixa.gov.br/Downloads/habitacao-documentos-gerais/demanda_habitacional.pdf).

CAMPOS, H. F. **Dosagem de concreto sustentável e de alta resistência, otimizada por modelos de empacotamento de partículas, com substituição parcial do cimento Portland por pó de pedra e sílica ativa**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

CAMPOS, H.F.; BELLON, A. L.; LARA E SILVA, E. R.; VILLATORE JUNIOR, M. Eco-efficient concrete, optimized by Alfred's particle packing model, with partial replacement of Portland cement by stone powder. **IBRACON Structures and Materials Journal**. v. 15, n. 2, 2022.

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J.; BIANCHINI, M. Low-cement high-strength concrete with partial replacement of Portland cement with stone powder and silica fume designed by particle packing optimization. **Journal of Cleaner Production**. v. 261, 2020.

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J. Proposed mix design method for sustainable high-strength concrete using particle packing optimization. **Journal of Cleaner Production**. v. 265., 2020.

CAMPOS, H. F.; ROCHA, T. M. S.; REUS, G. C.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J. Determination of the optimal replacement content of Portland cement by stone powder using particle packing methods and analysis of the influence of the excess water on the consistency of pastes. **IBRACON Structures and Materials Journal**. v. 12, n. 2, p. 221-232, 2019.

CARDOSO, H. R.; SANJUAN, P. E. C. P. O déficit habitacional no Brasil: a relevância dos instrumentos privados na implementação de políticas públicas de moradia. **Revista eletrônica do Tribunal Regional do Trabalho da 9ª Região**. vol. 8, n. 78, p. 152-177, Curitiba, 2019.

CASAGRANDE, C. A.; MATOS, P. R.; SAKATA, R. D.; JOCHEM, L. F. Efeito da substituição do cimento por cinza volante em concretos autoadensáveis de alto desempenho. **Revista Técnico-Científica do CREA PR**. ISSN 2358-5420. Edição Especial, 2019.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**. v. 55, 2009.

CATTANA, G.; IWANA, D. **La escala de Mohs**. Aguilar, 2019.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB Bulletins 192: **Diagnosis and assessment of concrete structures — state of the art report**. Lausanne, 1989.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**. v. 32, 2010, p. 555-562.

DAMINELLI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. v. 10, 2017.

DAMTOFT, J. S. LUKASIK, J.; HERFORT, D.; SORRENTINO, D.; GARTNER, E. M. Sustainable development and climate change initiatives. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 115–127, 2008.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: A scientific approach**. E. & F.N. Spon, 1 Ed. vol. 9, London, 1999.

DI DOMENICO, P.; ALCÂNTARA, M. M. A.; FERREIRA, L. S.; CAMPOS, H. F (no prelo). Substituição ecoeficiente do cimento Portland por adições no concreto de alto desempenho: Revisão sistemática. **IBRACON**, Anais do Jubileu de Ouro, 2022.

DIAS, A. R. O.; AMANCIO, F. A.; SOUZA, I. L. X.; LUCAS, S. O.; LIMA, D. A.; CABRAL, A. E. B. Efeitos da substituição do cimento Portland por escória de aciaria BSSF nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. **Revista Matéria**. v. 25, n. 4, Rio de Janeiro, 2020.

DING, M.; YU, R.; FENG, Y.; WANG, S.; ZHOU F.; SHUI, Z.; GAO, X; HE, Y.; CHEN, L. Possibility and advantages of producing an ultra-high performance concrete (UHPC) with ultra-low cement content. **Construction and Building Materials**, v. 273, 2021.

DRAGO, C.; VERNEY, J. C. K.; PEREIRA, F. M. Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento Portland. **Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 3, p. 399-408, 2009.

DUARTE, J. B. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por pó de pedra em concreto de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

EUROPEAN READY MIXED CONCRETE ORGANIZATION – ERMCO. **Ready-mixed concrete industry statistics**. Bélgica, 2020.

FELEKOĞLU, B. Effects of PSD and surface morphology of micro-aggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro-concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, p. 481-489, 2007.

FENNIS, S. A. A. M. **Design of ecological concrete by particle optimization**. Tese (Doutorado), Technische Universiteit Delft, Amersfoort, Holanda, 2011.

FENNIS, S. A. A. M.; WALRAVEN, J. C.; DEN UIJL, J. A. Compaction-interaction packing model: regarding the effect of fillers in concrete mixture design. **Materials and Structures**. v. 46, 2013, p.463-478.

FERREIRA, R. L. S. **Efeitos da incorporação de areia reciclada de resíduos de construção e demolição (RCD) em argamassas mistas de revestimento**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

FERREIRA, G. E.; FONSECA JUNIOR, C. A. F. **Manual de agregados para a construção civil**. Adão Benvindo da Luz e Salvador Luiz M. de Almeida. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. 432p.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (FJP). **Dados déficit habitacional 2016-2019 Reponderado**. Belo Horizonte, FJP, 2023. Disponível em: <https://fjp.mg.gov.br/deficit-habitacional-no-brasil/>.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (FJP). **Metodologia do déficit habitacional e da inadequação de domicílios no Brasil – 2016-2019**. Belo Horizonte, FJP, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/habitacao/RelatorioMetodologiadoDeficitHabitacionaledaInadequacaodeDomiciliosnoBrasil20162019v1.0.pdf>.

FUNK, J. E. e DINGER, D. R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions: Applied to Ceramic Manufacturing**. Ed. Springer, 842 p. 1993.

GCP, **ADVA Superplastificantes**. Folha de dados do produto, 2022. Disponível em: <https://gcpat.com.br/pt-br/solutions/products/adva-high-range-water-reducers/adva-flow-880>.

GRAZIA, M. T.; SANCHEZ, L. F. M.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G. Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems. **Construction and Building Materials**. v. 195, p. 524-536, 2019.

GOZI, D. D.; DO COUTO, A. F.; MORALES, G. **Interferência da substituição parcial de cimento Portland por fíler basáltico na carbonatação de concretos**. 3º Congresso Luso-Brasileiro. Materiais de Construção Sustentáveis. CLB-MSC. Coimbra, 2018.

GUIMARÃES, C.; GOMES, M. V. A. Areia de britagem como alternativa à areia natural na confecção de concreto: um panorama sobre o estado da arte. **Labor e Engenho**. v. 14, 2020.

GUPTA, T.; KHOTARI, S.; SIDDIQUE, S.; SHARMA, R. K.; CHAUDHARY, S. Influence of stone processing dust on mechanical, durability and sustainability of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 223, p. 918-927, 2019.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Editora Pini, São Paulo, 1992.

HERNANDEZ, M. G.; IZQUIERDO, M. A. G.; IBANEZ, A.; ANAYA, J. J.; ULLATE, L. G. **Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE**. *Ultrasonics*, v. 38, n. 1, p. 531–533, 2000.

HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. A new mix design concept for each-moist concrete : A theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**. v. 38, p. 1246–1259, 2008.

IMBABI, M. S.; CARRIGAN, C.; MCKENNA, S. Trends and developments in green cement and concrete technology. **International Journal of Sustainable Built Environment**. v. 1, 2012, p.194–216.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Projeções da população**. Brasília, IBGE, 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html?=&t=resultados>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2022. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_FullReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf).

ITAMBÉ, **Cimento Portland de alta resistência inicial**. Especificações técnicas e relatório de ensaios, 2022. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/produtos/cp-v-ari>.

JESUS, L. S. A resistividade elétrica do concreto e a sua correlação com a durabilidade das estruturas. **Engenharia, Estudo e Pesquisa**, ABPE, n. 18, p. 26-33, 2018.

KANTRO, D. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste - A Miniature Slump Test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, p. 95–102, 1980.

KHAN, S.; MAHESHWARI, N.; AGLAVE, G.; ARORA, R. Experimental design of green concrete and assessing its suitability as a sustainable building material. **Materials Today: Proceedings**. v. 26, p. 1126-1130, 2020.

KLEIN, N. S.; CAVALARO, S.; AGUADO, A.; SEGURA, A.; TORALLES, B. The wetting water in cement-based materials: Modeling and experimental validation. **Construction and Building Materials**. v. 121, p. 34-43, 2016.

KLEIN, N. S.; LENZ, L. A.; MAZER, W. Influence of the granular skeleton packing density on the static elastic modulus of conventional concretes. **Construction and Building Materials**. v. 242, 2020.

KUMAR, N. V. S. Crushed rock dust as filler material in concrete. **Materials Today: Proceedings**. v. 43, p. 1714-1719, 2021.

KWAN, A. K. H.; MORA, C. F. Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles. **Magazine of Concrete Research**. v. 53, n. 2, p. 91-100, 2001.

KWAN, A. K. H.; LI, L. G. Combined effects of water film, paste film and mortar film thicknesses on fresh properties of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 50, p. 598-608, 2014.

LAGE, E. B. D. **Comparação dos métodos de ensaio não destrutivo para qualidade do concreto: resistividade elétrica superficial e volumétrica em corpo de prova**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

LANG, C. L. **Avaliação do uso de areia britada de origem basáltica lavada e não lavada para utilização em concreto à base de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

LARUCCIA, M. M. Sustentabilidade e impactos ambientais da construção civil. **Revista ENIAC Pesquisa**, Guarulhos, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 69-84, 2014.

LAYSSI, H.; GHODS, P.; ALIZADEH, A. R.; SALEHI, M. Electrical resistivity of concrete: concepts, applications, and measurement techniques. **Concrete International**. 2015.

LEPCHAK, J. K. **Dissolução e precipitação de minerais em um Latossolo após 5 anos de aplicação de pó de diabásio**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021.

LONDERO, C. **Dosagem de concreto ecológico com base em empacotamento de partículas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

LONDERO, C. KLEIN, N. S.; MAZER, W. Study of low-cement concrete mix-design through particle packing techniques. **Journal of Building Materials**. v. 42, 2021.

LONDERO, C.; LENZ, L. A.; SANTOS, I. M. R.; KLEIN, N. S. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. **Revista Cerâmica**. v. 63, p. 22-23, 2017.

LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

LOPES, H. M. T.; PEÇANHA, A. C. C.; CASTRO, A. L. Considerações sobre a eficiência de misturas de concreto de cimento Portland com base no conceito de empacotamento de partículas. **Revista Matéria**. v. 25, n. 1, 2020.

MACEDO, J. W. N.; PIPOLO, L. F. G.; RAMOS FILHO, R. E. B.; SOUZA, J. M.; SILVA, V. M.; ACCHAR, W. Argamassas produzidas com resíduos de scheelita e pó de pedra: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Principia**. v. 60, n.1, p. 166-188, 2023.

MEERT, R.; HASTENPFLUG, D.; ANDRADE, J. J. O. Contribuição para o uso de lodo de estação de tratamento de água in natura como agregado miúdo em concretos de cimento Portland: avaliação da consistência, massa específica, porosidade, absorção, resistência à compressão e tração na compressão diametral. **Revista Matéria**. v. 26, n. 3, 2021.

MENOSSE, R. T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

MENOSSE, R. T.; MELGES, J. L. P.; AKASAKI, J. L.; CAMACHO, J. S.; FAZZAN, J. V.; TASHIMA, M. M.; SALLES, F. M. Pó de pedra: uma alternativa ou um complemento ao uso da areia na elaboração de misturas de concreto? **HOLOS Environment**. v. 10, n. 2, p. 209, 2010.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª Ed. São Paulo, IBRACON, 2014.

MILLER, S. A.; MONTEIRO, P. J. M.; OSTERTAG, C. Concrete mixture proportioning for desired strength and reduced global warming potential. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 410-421, 2016.

MOHAMAD, N.; MUTHUSAMY, K.; EMBONG, R.; KUSBIANTORO, A.; HASHIM, M. H. Environmental impact of cement production and solutions: a review. **Materials Today: Proceedings**. v. 48, p. 741-746, 2022.

NELSON, E.; GUILLOT, D. **Well cementing**. Ed. 2. Schlumberger, 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremosini. 5ª Ed. Editora Bookman. Porto Alegre, 2016.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico**. Fazendo Arte Editorial, São Paulo, SP, 2000.

OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Ilha Solteira, 2013.

OLIVEIRA, R. G. G. **Ecoeficiência de concretos com agregados graúdos reciclados de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **World Population Prospects 2022 - Brazil**. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2022. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **World Population Prospects 2019 - World**. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Volume II: Demographic Profiles, 2019. Disponível em: [https://population.un.org/wpp/Graphs/1\\_Demographic%20Profiles/World.pdf](https://population.un.org/wpp/Graphs/1_Demographic%20Profiles/World.pdf).

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **World Population Prospects 2022: Summary of Results**. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, 2022. Disponível em: [https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022\\_summary\\_of\\_results.pdf](https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf).

PEREIRA, C. P.; PAES, D. P.; PRATA, D. M.; MONTEIRO, L. P. C. Desenvolvimento do índice de comparação de ecoeficiência a partir de ecoindicadores. **Revista Eletrônica Sistemas e Gestão**. v. 9, n. 2, p. 168-180, 2014.

POLDER, R.; ANDRADE, C.; ELSENER, B.; VENNESLAND, O.; GULIKERS, J.; WEIDERT, R.; RAUPACH, M. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. In: RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. **Materials and Structures**. v. 33, 2000.

POLUCHA, A. **Estudo experimental de concreto auto-adensável utilizando areia 100% artificial e filer calcário como substituição parcial do cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

POSSAN, E. Captura de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios. **Revista Concreto e Construções**. Ed. 95, p. 60-66, 2019.

RAMADON, L. F. F. **A extração ilegal da areia no Brasil e no mundo**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1xOJLDnNP1R3ed-QiYXOM61meJHK4yatF/view>.

RAMADON, L. F. F. Extração ilegal de areia: o faturamento no Brasil e no mundo. **Revista Brasileira de Ciências Policiais**, v. 12, n. 6, p. 281-313, Brasília, 2021. Disponível em: <https://dspace.mj.gov.br/handle/1/7942>.

RAMÍREZ, F. C. **Detecção de danos em estruturas de concreto por meio de tomografia ultrassônica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

RECENA, F. A. P. **Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com emprego de cinza volante**. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RINCÓN, O. T.; CARRUYO, C. A.; HELENE, P.; DÍAZ, I. Manual de inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion em estruturas de hormigon armado. **DURAR: Red Temática XV**, 1998.

RODRIGUES, P. P. F. Parâmetros de dosagem do concreto. ET-67. Ed. 3. São Paulo: **IBRACON** – Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

SANTOS, C. C. **Proposta de modelo de previsão do módulo de elasticidade estático do concreto de cimento Portland**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

SANG, Y.; YANG, Y.; ZHAO, Q. Electrical resistivity of plain cement-based materials based on ionic conductivity: A review of applications and conductive models. **Journal of Building Engineering**. v. 46, 2022.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Calcário e Dolomito. **In Rochas e Minerais Industriais**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, 2005.

SBRIGHI NETO, C. **A importância dos conceitos tecnológicos na seleção de agregados para argamassas e concretos**. ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil. Revista Areia e Brita. n. 12, 2000.

SCOLARO, T. P.; SILVESTRO, L.; RUVIARO, A. S.; AZEVEDO, A. R. G.; MONTEIRO, S. N.; PELISSER, F. Effect of ornamental stone waste incorporation on the rheology, hydration, microstructure, and CO<sub>2</sub> emissions of ordinary Portland cement. **Materials**. v. 15, 2022.

SERNA, H. A. L.; REZENDE, M. M. **Agregados para a construção civil**. Departamento Nacional de Produção Mineral Economia Mineral do Brasil. Coordenação. Antonio Fernando da Silva Rodrigues. Brasília, cap. 8, p. 602-635, 2009. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1>.

SHIN, H. O.; YOO, D. Y.; LEE, J. H.; LEE, S. H.; YOON, Y. S. Optimized mix design for 180 MPa ultra-high-strength concrete. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 5, p. 4182–4197, 2019.

SHUKLA, A.; GUPTA, N.; GUPTA, A. Development of green concrete using waste marble dust. **Materials Today: Proceedings**. v. 26, p. 2590-2594, 2020.

SILVA, M. B.; BONATO, S. V.; ABRITA, N. F. M.; PEREIRA JUNIOR, E. F. Z. Análise do retorno de paletes e chapatex em empresa de bebidas. **Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção**, v. 7, n. 11, 2019, p. 68-81.

SILVA, T. J.; FERREIRA, G.; DIAS, J. F. Influência de variáveis nos resultados de ensaios não destrutivos em estruturas de concreto armado. **Ciência e Engenharia**. v. 22, n. 1, 2013.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono na indústria do cimento brasileira até 2050**. Coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro, 64 p., 2019.

SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO. **Produção nacional de cimento por regiões e estados (t) 2014**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php>.

SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: [http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2021.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2021.pdf).

SINKHONDE, D. Generating response surface models for optimization of CO<sub>2</sub> emission and properties of concrete modified with waste materials. **Cleaner Materials**. v. 6, 2022.

SIVAKRISHNA, A.; ADESINA, A.; AWOYERA, P. O.; RAJESH KUMAR, K. Green concrete: A review of recent developments. **Materials Today: Proceedings**. v. 27, p. 54-58, 2020.

SHEN, W.; LIU, Y.; WANG, Z.; CAO, L.; WU, D.; WANG, Y.; JI, X. Influence of manufactured sand's characteristics on its concrete performance. **Construction and Building Materials**. v. 172, p. 574-583, 2018.

SOHAIL, M. G.; WANG, B.; JAIN, A.; KAHRAMAN, R.; OZERKAN, N. G.; GENCTURK, B.; DAWOOD, M.; BELARBI, A. Advancements in Concrete Mix Designs: High-Performance and Ultrahigh-Performance Concretes from 1970 to 2016. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 2018.

SONG, T. H.; LEE, S. H.; KIM, B. Recycling of crushed stone powder as a partial replacement for silicapowder in extruded cement panels. **Construction and Building Materials**. v. 52, p. 105-115, 2014.

VAN DAMME, H. Concrete material science: Past, present, and future innovations. **Cement and Concrete Research**. v. 112, p. 5-24, 2018.

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

VARHEN, C.; DILONARDO, I.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G.; FIGUEIREDO, A. D. Effect of the substitution of cement by limestone filler on the rheological behavior and shrinkage of microconcretes. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 375-386, 2016.

VERFAILLIE, H. A.; BIDWELL, R. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). In: **Measuring Eco-Efficiency: A guide to reporting company performance**. World Business Council for Sustainable Development, 2000. Disponível em: <http://www.gdrc.org/sustbiz/measuring.pdf>.

VIEIRA, A. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; CORDEIRO, G. C. Effect of particle size, porous structure and content of rice husk ash on the hydration process and compressive strength evolution of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 236, 2020.

WANG, X.; WU, D.; ZHANG, J.; YU, R.; HOU, D.; SHUI, Z. Design of sustainable ultra-high performance concrete: A review. **Construction and Building Materials**. v. 307, 2021.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. Electrical resistivity of concrete – A literature review. Skokie, USA. **Portland Cement Association**, 2003.

WONG, H. H. C.; KWAN, A. K. H. Packing density of cementitious materials: part 1 – measuring using a wet packing method. **Materials and Structures**. v. 41, n. 4, p. 689-701, 2008.

YANG, R.; YU, R.; SHUI, Z.; GAO, X.; HAN, J.; LIN, G.; QIAN, D.; LIU, Z.; HE, Y. Environmental and economical friendly ultra-high performance-concrete incorporating appropriate quarry-stone powders. **Journal of Cleaner Production**. v. 260, 2020.

YOUSUF, S.; SANCHEZ, L. F. M.; SHAMMEH, S. A. The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry. **Journal of Building Engineering**. v. 25, 2019.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Development of an eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. **Cement and Concrete Composites**. v. 55, p. 383-394, 2015.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Static properties and impact resistance of a green Ultra-High Performance Hybrid Fibre Reinforced Concrete (UHPCFRC): Experiments and modeling. **Construction and Building Materials**. v. 68, p. 158-171, 2014.

ZAGO, S. C. **Avaliação da durabilidade do concreto da construção civil com a utilização de agregados de escória de aciaria LD**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo, Lorena, 2019.

ZHANG, W.; ZHENG, M.; ZHU, L.; LV, Y. Mix design and characteristics evaluation of high-performance concrete with full Aeolian sand based on the packing density theory. **Construction and Building Materials**. v. 349, p. 2022.

ZHANG, Y.; ZHANG, J.; LUO, W.; WANG, J.; SHI, J.; ZHUANG, H.; WANG, Y. Effect of compressive strength and chloride diffusion on life cycle CO<sub>2</sub> assessment of concrete containing supplementary cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**. v. 218, p. 450-458, 2019.

ZHENG, K.; LIU, Y.; HUANG, W.; ZHOU, J.; CUI, D. Reverse filling cementitious materials based on dense packing: The concept and application. **Powder Technology**. v. 359, p. 152-160, 2020.

ZUNINO, F.; LOPEZ, M. Decoupling the physical and chemical effects of supplementary cementitious materials on strength and permeability: A multi-level approach. **Cement and Concrete Composites**. v. 65, p. 19-28, 2016.

## ANEXO A – EDS DO PÓ DE PEDRA

Figura 70 - IMAGEM DE ELÉTRONS DO PÓ DE PEDRA

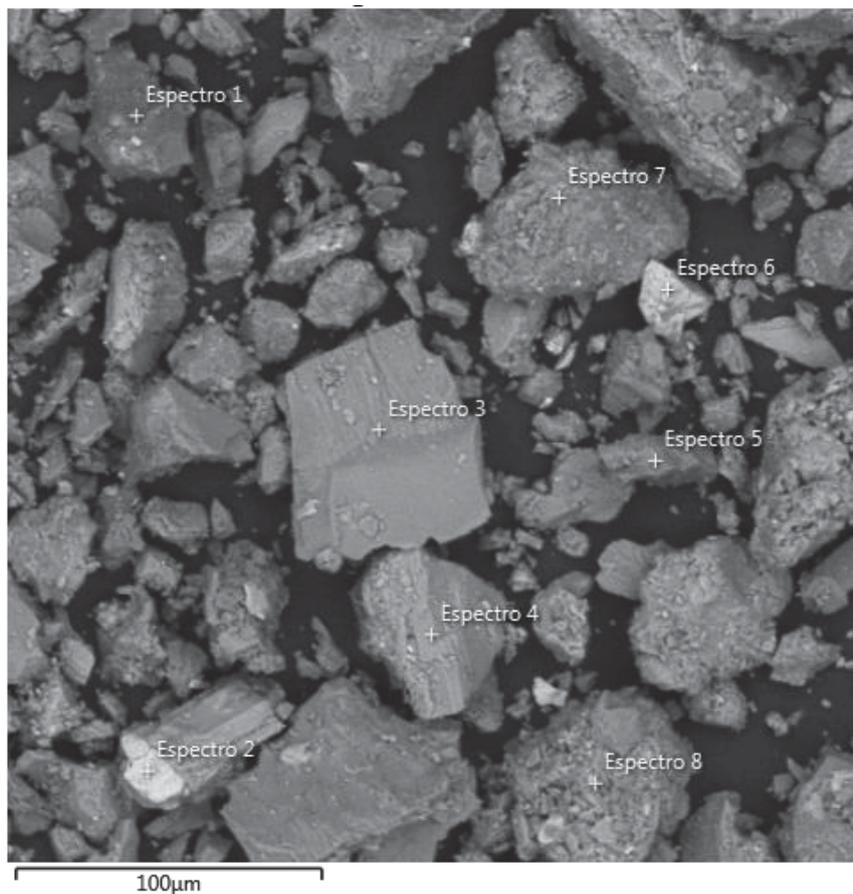


Figura 71 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 1

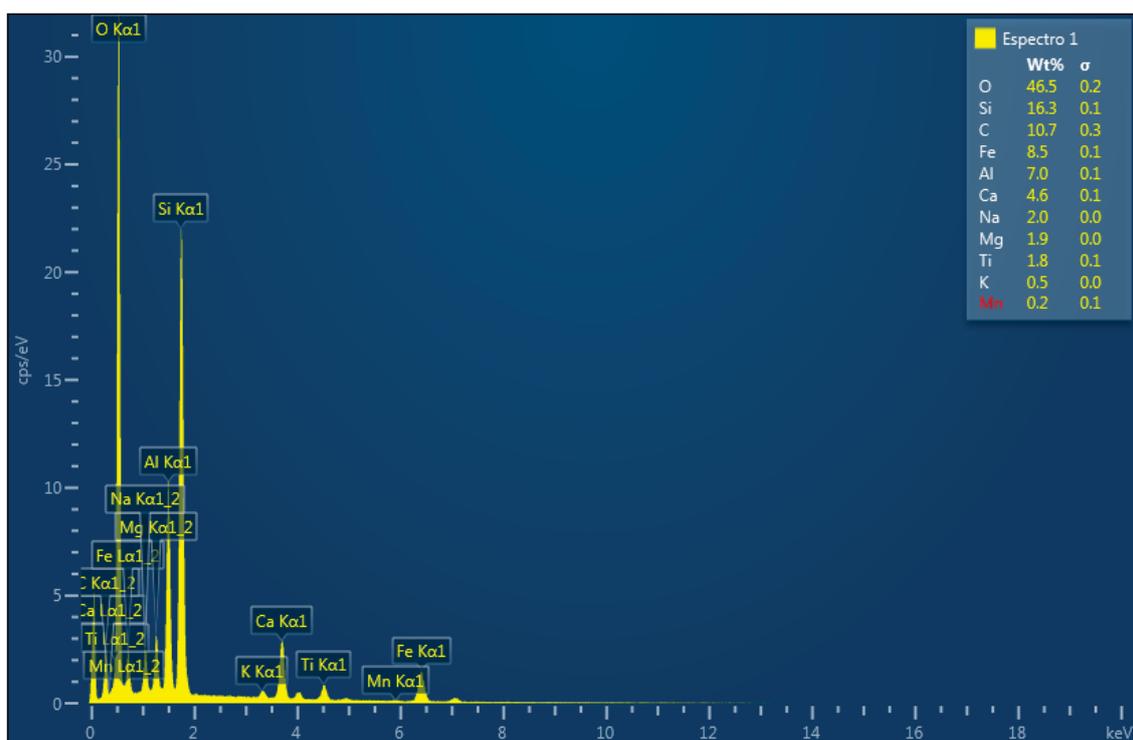


Figura 72 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 2

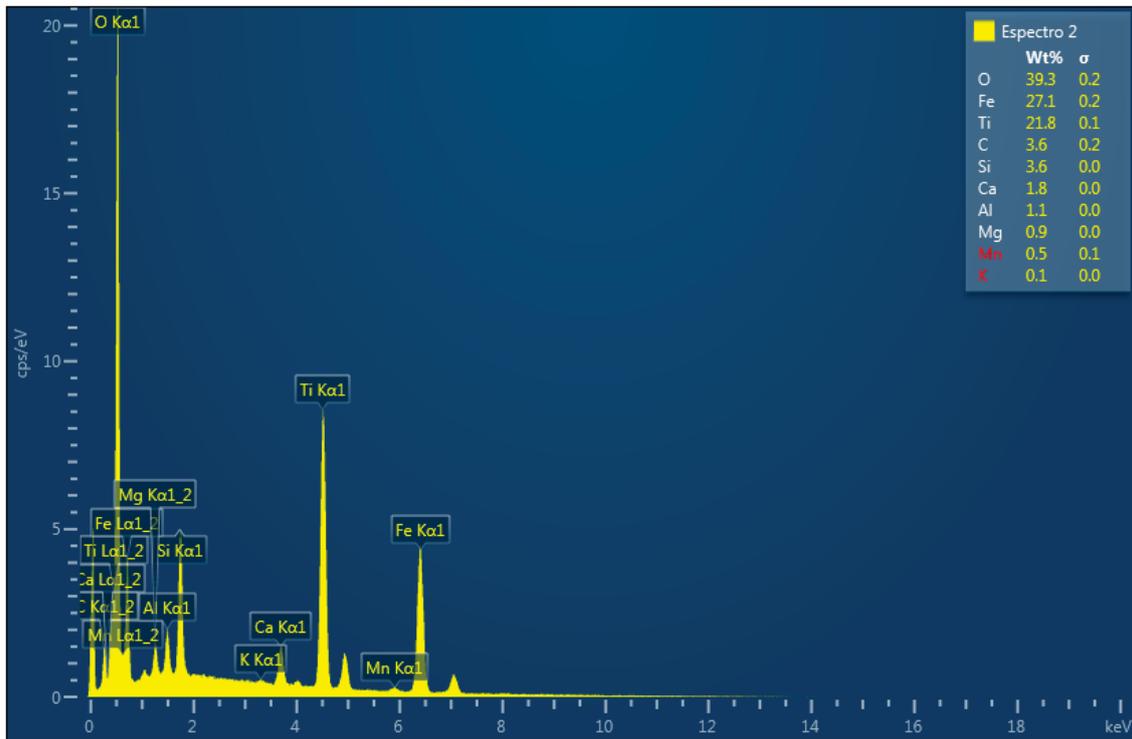


Figura 73 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 3

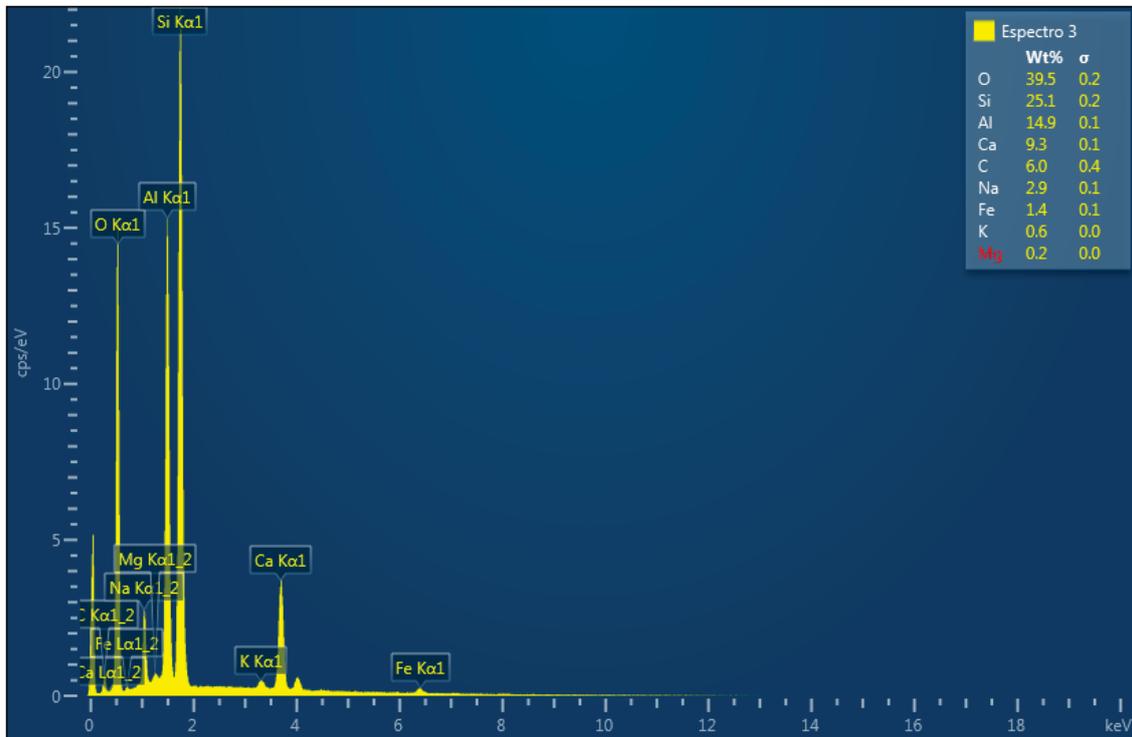


Figura 74 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 4

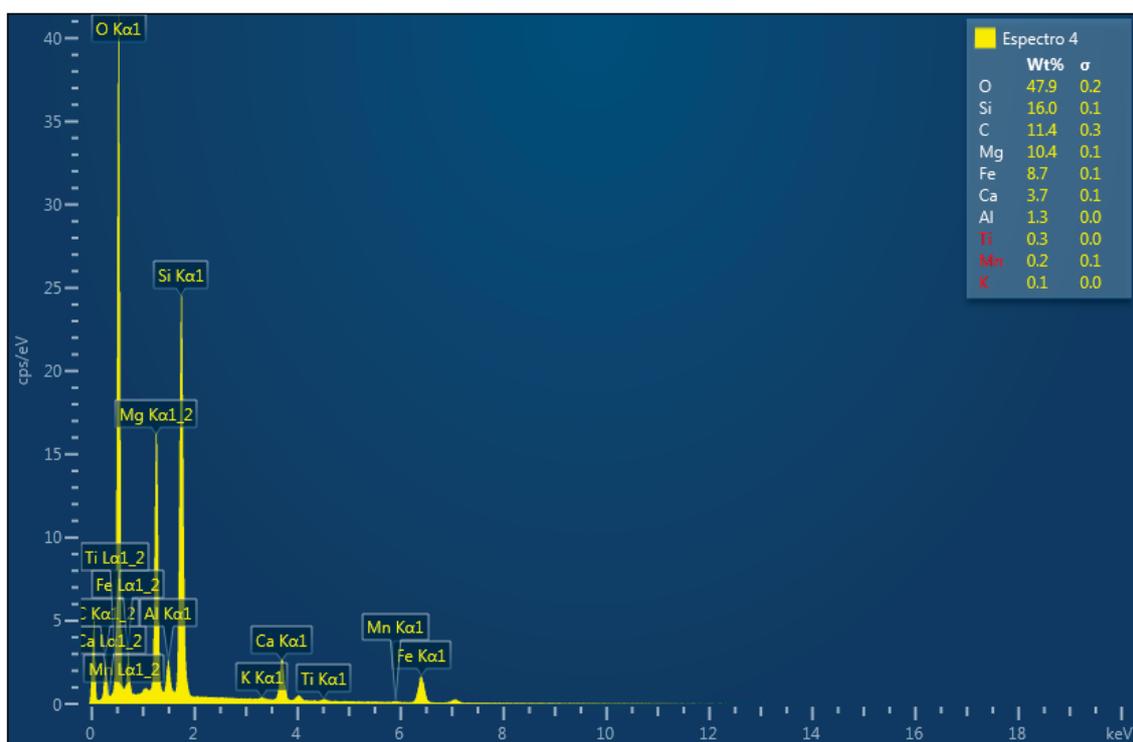


Figura 75 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 5

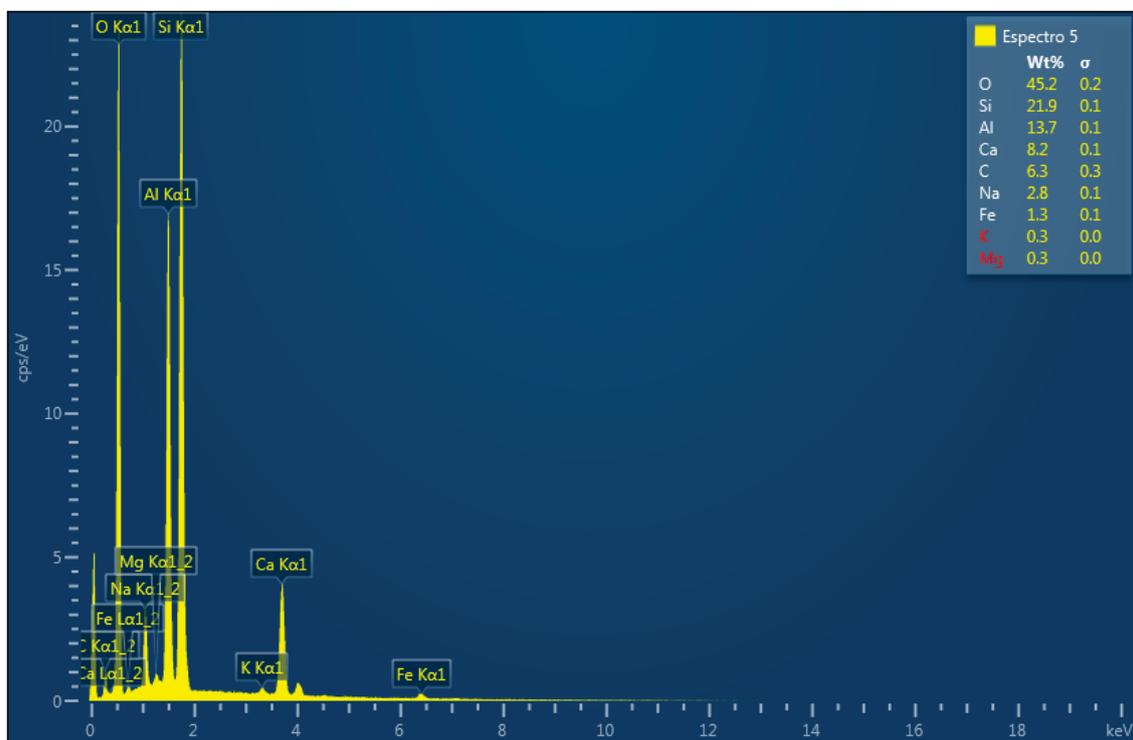


Figura 76 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 6

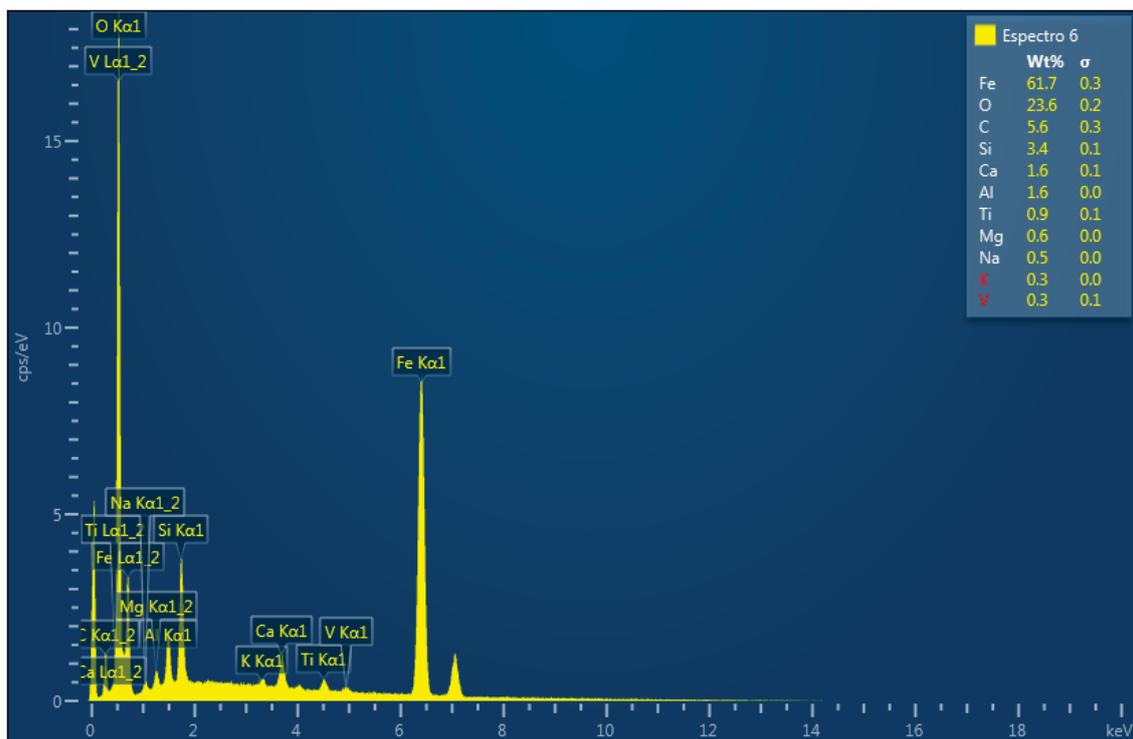


Figura 77 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 7

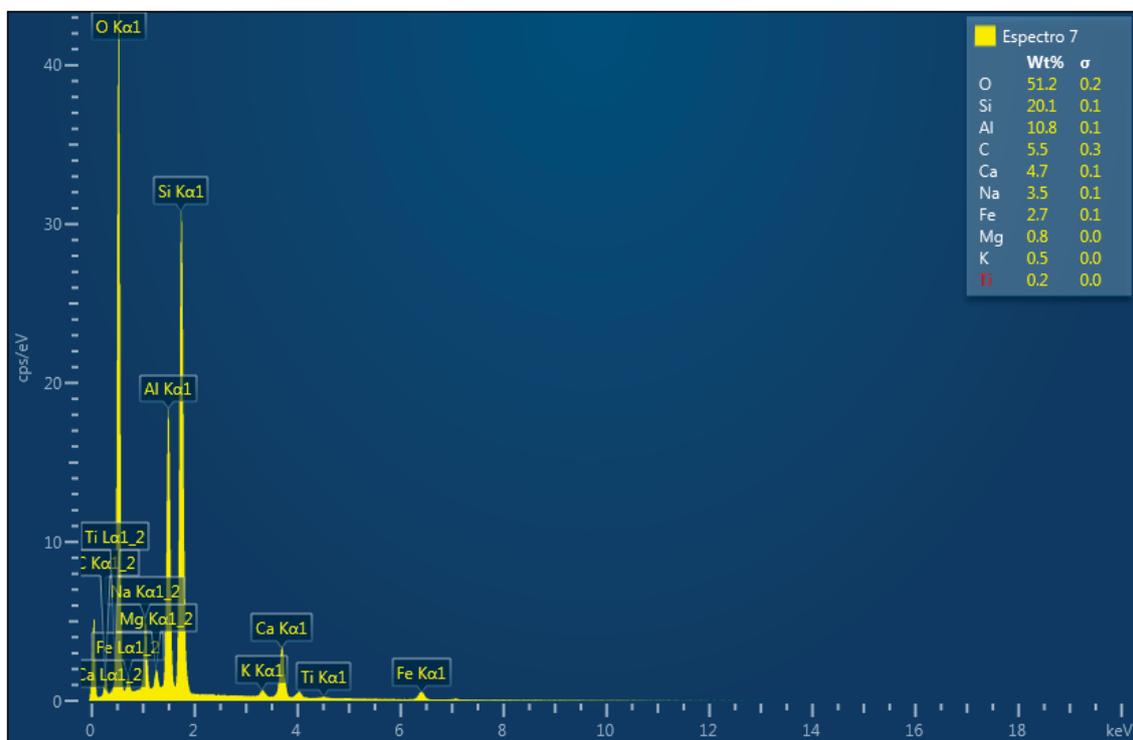


Figura 78 - EDS PÓ DE PEDRA ESPECTRO 9

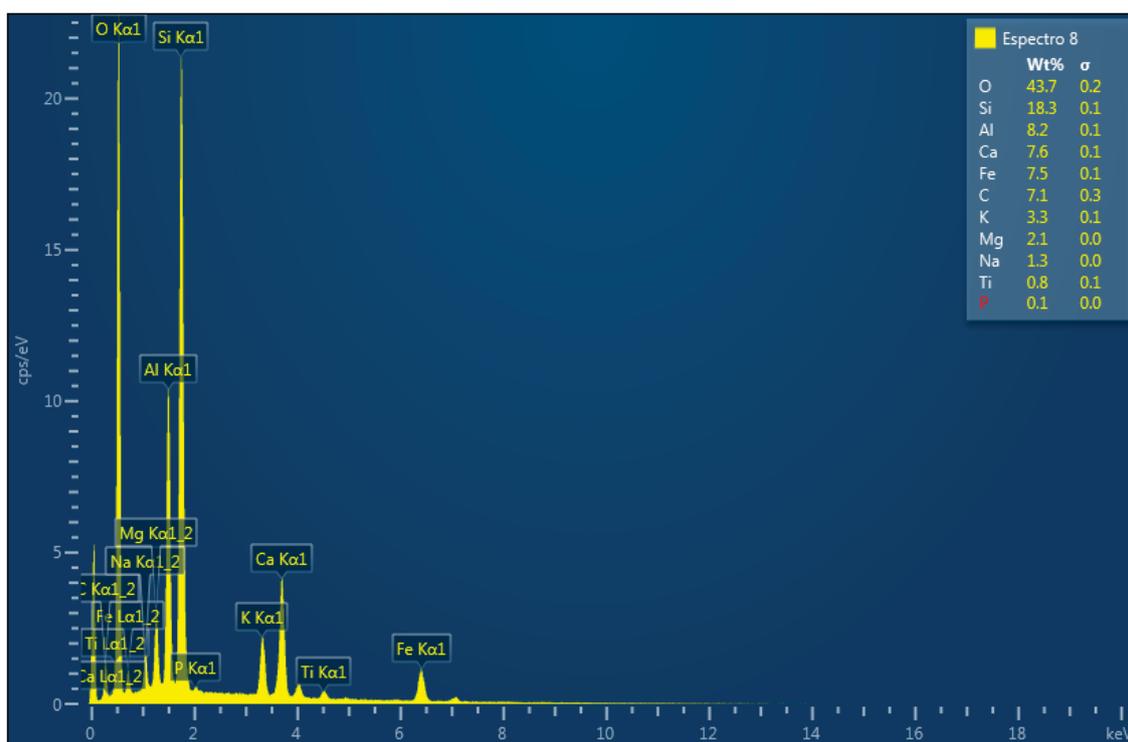


Figura 79 - IMAGEM EM CAMADA 1 EDS PÓ DE PEDRA

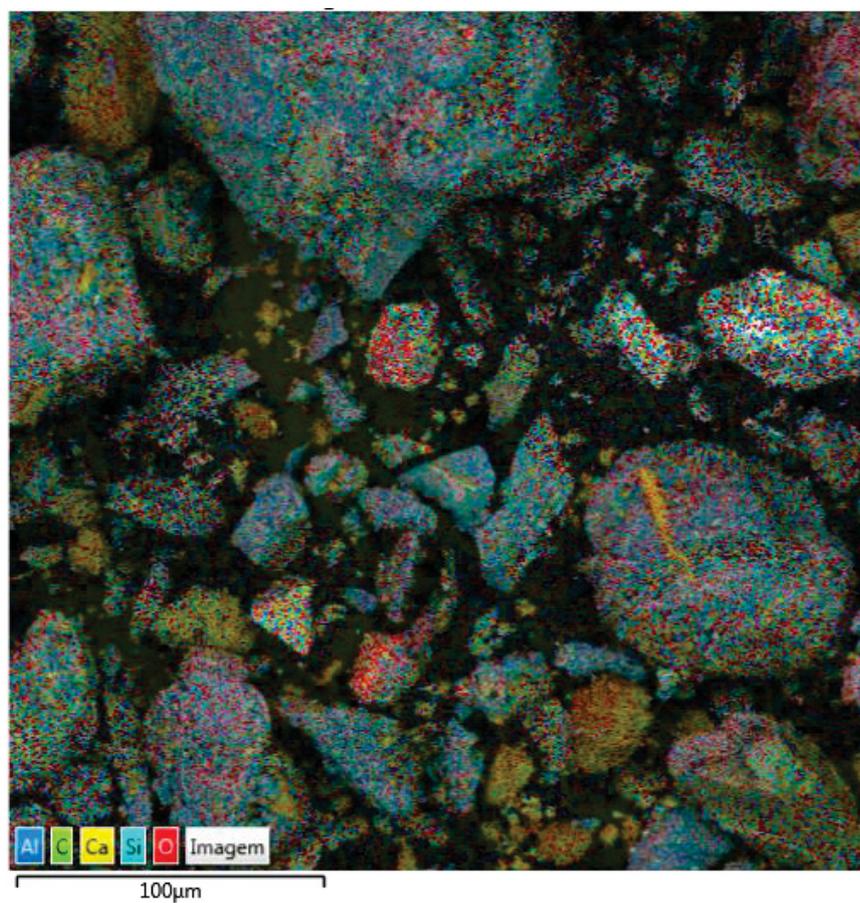
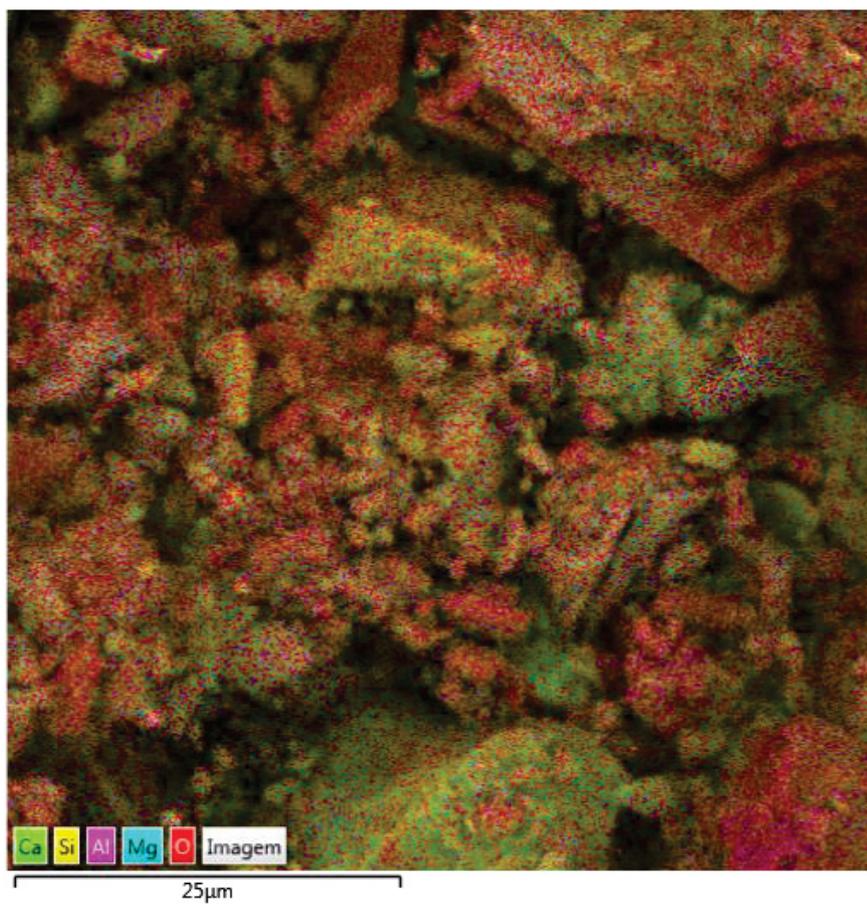


Figura 80 IMAGEM EM CAMADA 2 EDS PÓ DE PEDRA



## ANEXO B – ANOVAS

As ANOVAS de todos os resultados de dosagem estão apresentadas neste anexo.

**Tabela 29 - ANOVA DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO**

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Entre Grupos	0,00	2	0,00	0,85	4,26	Não há diferença significativa
Dentro Grupos (Residual)	0,00	9	0,00			
Total	0,00	11				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUÍDO

**Tabela 30 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO**

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Entre Grupos	38,36	2	19,18	7,55	3,35	Há diferença significativa
Dentro Grupos (Residual)	68,55	27	2,54			
Total	106,92	29				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUÍDO

**Tabela 31 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO**

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Entre Grupos	2,44	2	1,22	0,38	5,14	Não há diferença significativa
Dentro Grupos (Residual)	9,62	3	3,21			
Total	12,06	5				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUÍDO

Tabela 32 - ANOVA DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Entre Grupos	286,73	2	143,36	5,04	5,14	Não há diferença significativa pela ANOVA. Porém, o teste Tukey mostrou diferença significativa.
Dentro Grupos (Residual)	170,53	6	28,42			
Total	457,26	8				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUÍDO

Tabela 33 - ANOVA DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Entre Grupos (Teor de pasta)	0,00	3	0,00	6,14	2,90	Há diferença significativa
Dentro Grupos (Residual)	0,01	32	0,00			
Total	0,01	35				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUÍDO

Tabela 34 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Entre Grupos (Teor de pasta)	100,15	3	33,38	26,44	2,90	Há diferença significativa
Dentro Grupos (Residual)	40,41	32	1,26			
Total	140,56	35				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUÍDO

Tabela 35 - ANOVA DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Entre Grupos (Teor de pasta)	5964,92	3	1988,31	0,63	4,07	Não há diferença significativa
Dentro Grupos (Residual)	25302,00	8	3162,75			
Total	31266,92	11				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUÍDO

Tabela 36 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Entre Grupos (Teor de pasta)	94,89	3	31,63	8,57	4,07	Há diferença significativa
Dentro Grupos (Residual)	29,54	8	3,69			
Total	124,43	11				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUÍDO

Tabela 37 - ANOVA DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Entre Grupos (Teor de pasta)	63,03	3	21,01	0,71	3,49	Não há diferença significativa
Dentro Grupos (Residual)	353,65	12	29,47			
Total	416,68	15				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUÍDO

Tabela 38 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Entre Grupos (Teor de pasta)	0,29	3	0,10	0,53	4,07	Não há diferença significativa
Dentro Grupos (Residual)	1,47	8	0,18			
Total	1,76	11				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUÍDO

Tabela 39 - ANOVA DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Modelo (A)	0,002	1	0,002	23,87	4,49	O modelo é significativo A relação a/f é significativa A interação entre eles é significativa
Relação a/f (B)	0,002	3	0,001	7,48	3,24	
AB	0,004	3	0,001	16,42	3,24	
Erro	0,001	16	0,000			
Total	0,009	23				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUÍDO

Tabela 40 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA AOS 7 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Modelo (A)	4,5	1	4,5	4,88	4,49	O modelo é significativo
Relação a/f (B)	15,7	3	5,2	5,67	3,24	A relação a/f é significativa
AB	26,8	3	8,9	9,69	3,24	A interação entre eles é significativa
Erro	14,8	16	0,9			
Total	61,84	23				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUIDO

Tabela 41 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA AOS 28 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Modelo (A)	0,2	1	0,2	0,26	4,49	O modelo não é significativo
Relação a/f (B)	180,5	3	60,2	65,18	3,24	A relação a/f é significativa
AB	5,0	3	1,7	1,79	3,24	A interação entre eles não é significativa
Erro	5,7	16	0,4			
Total	191,45	23				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUIDO

Tabela 42 - ANOVA DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA AOS 7 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Modelo (A)	20945,0	1	20945,0	13,18	4,49	O modelo é significativo
Relação a/f (B)	15981,1	3	5327,0	3,35	3,24	A relação a/f é significativa
AB	97181,1	3	32393,7	20,38	3,24	A interação entre eles é significativa
Erro	25429,3	16	1589,3			
Total	159536,63	23				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUIDO

Tabela 43 - ANOVA DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA AOS 28 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Modelo (A)	206832,7	1	206832,7	68,77	4,49	O modelo é significativo
Relação a/f (B)	10240,8	3	3413,6	1,13	3,24	A relação a/f não é significativa
AB	118051,7	3	39350,6	13,08	3,24	A interação entre eles é significativa
Erro	48124,7	16	3007,8			
Total	383249,83	23				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUIDO

Tabela 44 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Modelo (A)	186,7	1	186,7	36,63	4,49	O modelo é significativo
Relação a/f (B)	178,7	3	59,6	11,69	3,24	A relação a/f é significativa
AB	96,9	3	32,3	6,34	3,24	A interação entre eles é significativa
Erro	81,5	16	5,1			
Total	543,76	23				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUIDO

Tabela 45 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Modelo (A)	15,6	1	15,6	2,60	4,49	O modelo não é significativo
Relação a/f (B)	294,4	3	98,1	16,40	3,24	A relação a/f é significativa
AB	46,6	3	15,5	2,60	3,24	A interação entre eles não é significativa
Erro	95,7	16	6,0			
Total	452,30	23				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUIDO

Tabela 46 - ANOVA DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE AOS 28 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Modelo (A)	9,5	1	9,5	0,48	4,26	O modelo não é significativo A relação a/f não é significativa A interação entre eles não é significativa
Relação a/f (B)	31,5	3	10,5	0,53	3,01	
AB	141,9	3	47,3	2,41	3,01	
Erro	471,8	24	19,7			
Total	654,8	31				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUÍDO

Tabela 47 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO AOS 7 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Modelo (A)	0,2	1	0,2	6,85	4,49	O modelo é significativo A relação a/f é significativa A interação entre eles é significativa
Relação a/f (B)	1,0	3	0,3	9,73	3,24	
AB	1,4	3	0,5	13,40	3,24	
Erro	0,6	16	0,0			
Total	3,26	23				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUÍDO

Tabela 48 - ANOVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO AOS 28 DIAS ENTRE OS MODELOS DE ALFRED E CPM

Fonte de Variação	Somas Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F	F tab	O efeito é significativo?
Modelo (A)	0,0	1	0,0	0,20	4,49	O modelo não é significativo A relação a/f é significativa A interação entre eles é significativa
Relação a/f (B)	2,8	3	0,9	22,57	3,24	
AB	0,6	3	0,2	4,63	3,24	
Erro	0,7	16	0,0			
Total	4,03	23				

GDL: GRAUS DE LIBERDADE

TESTE F: DISTRIBUICAO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR PARA 95% DE CONFIANCA DAS VARIABILIDADES SEREM DIFERENTES DO RUÍDO

## APÊNDICE A – ROTEIRO DE CÁLCULO: EMPACOTAMENTO EXPERIMENTAL DOS MATERIAIS FINOS INDIVIDUAIS PELO MÉTODO DE WONG E KWAN (2008)

O roteiro de cálculo a seguir demonstra como foram obtidos os valores de densidade de empacotamento experimental dos materiais finos pelo método úmido experimental proposto por Wong e Kwan (2008). Os resultados da densidade de empacotamento individual dos materiais finos foram utilizados como dados de entrada para a produção dos concretos pelo modelo CPM. Neste exemplo será demonstrado o cálculo realizado para o pó de diabásio na relação água/finos de 0,15. A Tabela A. 1 apresenta os dados considerados para início do cálculo.

Tabela A. 1 - DADOS DE ENTRADA PARA CÁLCULO DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO EXPERIMENTAL DO PÓ DE PEDRA COM ÁGUA/FINOS 0,15

a/finos (massa)	0,15
V (m <sup>3</sup> )	0,000399
$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
$\rho_{pó}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2946
$u_w$ (m <sup>3</sup> )	0,41244
$R_{pó}$	1
M (kg)	0,80796

FONTE: A autora (2023).

A massa da pasta que preenche o recipiente foi determinada após procedimento de mistura proposto pelo método, considerando a quantidade de pó de pedra, água e aditivo superplastificante. Com o valor da massa determinada em laboratório, calculou-se:

$$V_c = \frac{M}{\rho_w u_w + \rho_\alpha R_\alpha + \rho_\beta R_\beta + \rho_Y R_Y} \quad (A.1)$$

Onde:

$V_c$ : volume dos sólidos dos materiais finos;

M: massa de pasta que preenche o recipiente;

$\rho_w$ : densidade da água;

$u_w$ : relação água/finos;

$\rho_\alpha$ ,  $\rho_\beta$  e  $\rho_Y$ : densidade dos demais materiais sólidos;

$R_\alpha$ ,  $R_\beta$  e  $R_Y$ : volume do material  $\alpha$ ,  $\beta$  ou Y pelo volume total de sólidos.

Aplicando a Equação A.1 para o exemplo:

$$V_c = \frac{0,80796}{1000 \cdot 0,41244 + 2946,1} \quad (\text{A.2})$$

$$V_c = 0,000241 \text{ m}^3$$

Posteriormente, calcula-se o volume de água pela Equação A.3:

$$V_w = u_w \times V_c \quad (\text{A.3})$$

Onde:

$V_w$ : volume de água;

$u_w$ : relação água/finos;

$V_c$ : volume dos sólidos dos materiais finos.

Aplicando a Equação A.3:

$$V_w = 0,41244 \times 0,000241 \quad (\text{A.4})$$

$$V_w = 0,000099 \text{ m}^3$$

Com os valores de volume de água e volume de sólidos determinados, encontra-se o volume de vazios e concentração de sólidos pelas Equações A.5 e A.6, respectivamente.

$$u = \frac{(V - V_c)}{V_c} \quad (\text{A.5})$$

$$\phi = \frac{V_c}{V} \quad (\text{A.6})$$

Onde:

$u$ : relação de vazios;

$V$ : volume do recipiente;

$V_c$ : volume dos sólidos dos materiais finos;

$\phi$ : concentração de sólidos.

Aplicando as Equações A.5 e A.6, tem-se:

$$u = \frac{(0,000399 - 0,000241)}{0,000241} \quad (\text{A.7})$$
$$u = 0,660$$

$$\phi = \frac{0,000241}{0,000399} \quad (\text{A.8})$$
$$\phi = 0,603$$

O mesmo procedimento foi realizado para todas as variações de relação água/finos nos dois materiais (cimento e pó de pedra) e os resultados podem ser observados no item 4.2.2. Os cálculos foram realizados em planilha Excel e este exemplo utiliza os valores com limitação de casas decimais.

## APÊNDICE B – ROTEIRO DE CÁLCULO: MODELO CPM

O roteiro de cálculo demonstra como se aplica o modelo CPM para determinação do empacotamento real de uma mistura de materiais. Para exemplo foi utilizado os dados de entrada para aplicação do modelo na composição dos materiais finos (considerando 80% de cimento e 20% de pó de pedra). A Tabela B. 1 apresenta os dados de entrada do modelo CPM.

Tabela B. 1 - DADOS DE ENTRADA PARA CÁLCULO DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DA COMBINAÇÃO DE 80% DE CIMENTO E 20% DE PÓ DE PEDRA PELO MODELO CPM

D50 (μm)	i	yi - proporção em volume dos materiais	Bi - densidade de empacotamento de cada material (experimental)
150	Pó de pedra	0,2	0,629
10,76	Cimento	0,8	0,641

FONTE: A autora (2023).

A partir dos dados de entrada o procedimento de cálculo segue uma sequência determinada pelo modelo para obtenção dos valores de densidade de empacotamento virtual e real.

### I. Determinação dos coeficientes de interação entre as partículas

O modelo inicia os cálculos levando em consideração a interação existente entre as partículas pelos coeficientes  $a_{ij}$  e  $b_{ij}$ . O coeficiente  $a_{ij}$  se refere ao efeito de afastamento e o coeficiente  $b_{ij}$  ao efeito parede e são calculados pelas Equações 12 e 13, ambos explicados no item 2.3. Cada coeficiente é calculado pensando em todas as possibilidades de combinação entre as classes de grãos existentes, resultando em matrizes. Aplicando o exemplo, têm-se as Equações B.1, B.2, B.3 e B.4 para o efeito de afastamento nas combinações  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$  e  $a_{22}$ .

$$a_{11} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_1}{d_1}\right)^{1,02}} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{150}{150}\right)^{1,02}} = 1 \quad (\text{B.1})$$

$$a_{12} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_2}{d_1}\right)^{1,02}} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{10,76}{150}\right)^{1,02}} = 0,27040 \quad (\text{B.2})$$

$$a_{21} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_1}{d_2}\right)^{1,02}} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{150}{10,76}\right)^{1,02}} = \notin \mathbb{R} \quad (\text{B.3})$$

$$a_{22} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_2}{d_2}\right)^{1,02}} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{10,76}{10,76}\right)^{1,02}} = 1 \quad (\text{B.4})$$

Aplicando o exemplo, têm-se as Equações B.5, B.6, B.7 e B.8 para o efeito parede nas combinações  $b_{11}$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{21}$  e  $b_{22}$ .

$$b_{11} = 1 - \left(1 - \frac{d_1}{d_1}\right)^{1,50} = 1 - \left(1 - \frac{150}{150}\right)^{1,50} = 1 \quad (\text{B.5})$$

$$b_{12} = 1 - \left(1 - \frac{d_1}{d_2}\right)^{1,50} = 1 - \left(1 - \frac{150}{10,76}\right)^{1,50} = \notin \mathbb{R} \quad (\text{B.6})$$

$$b_{21} = 1 - \left(1 - \frac{d_2}{d_1}\right)^{1,50} = 1 - \left(1 - \frac{10,76}{150}\right)^{1,50} = 0,10565 \quad (\text{B.7})$$

$$b_{22} = 1 - \left(1 - \frac{d_2}{d_2}\right)^{1,50} = 1 - \left(1 - \frac{10,76}{10,76}\right)^{1,50} = 1 \quad (\text{B.8})$$

A seguir estão as matrizes dos cálculos de  $a_{ij}$  e  $b_{ij}$  nas Tabela B. 2 e Tabela B. 3.

Tabela B. 2 - RESULTADOS DO COEFICIENTE  $a_{ij}$ , REFERENTE AO EFEITO DE AFASTAMENTO

$a_{ij} = \sqrt{\{1-[1-(d_j/d_i)]^{1,02}\}}$			
		j	
		1	2
i	1	1,00000	0,27040
	2	Valor $\notin \mathbb{R}$	1,00000

FONTE: A autora (2023).

Tabela B. 3 - RESULTADOS DO COEFICIENTE  $b_{ij}$ , REFERENTE AO EFEITO PAREDE

$b_{ij} = 1-[1-(d_i/d_j)]^{1,5}$			
		j	
		1	2
i	1	1,00000	Valor $\notin \mathbb{R}$
	2	0,10565	1,00000

FONTE: A autora (2023).

Observa-se que quando a combinação ocorre entre as classes de grãos cujos diâmetros são iguais o resultado dos coeficientes é igual a um. Isso ocorre porque grãos de um mesmo tamanho não provocam efeito de afastamento e efeito parede entre eles. Os efeitos ocorrem somente entre grãos de diferente tamanhos.

Além disso, observa-se que algumas combinações de classes não pertencem ao conjunto de números reais. Isso ocorre quando o diâmetro  $d_i < d_j$ , para o coeficiente de efeito de afastamento  $a_{ij}$ , porque o afastamento se dá pela ação de partículas menores sobre partículas maiores, como mostrado na Figura 9. Já para o coeficiente de efeito parede  $b_{ij}$  isso acontece quando o diâmetro  $d_i > d_j$ , porque as partículas de maior tamanho causam o efeito parede sobre as partículas menores, também mostrado na Figura 9. Em ambos os casos, quando há inversão da relação entre os diâmetros, as partículas não causam seus respectivos efeitos e o resultado é um número não pertencente ao conjunto real.

Após o cálculo dos coeficientes  $a_{ij}$  e  $b_{ij}$  para todas as combinações possíveis é determinada a densidade de empacotamento virtual proposta pelo modelo CPM.

## II. Determinação da densidade de empacotamento virtual

A partir da Equação 11 apresentada no item 2.3 é determinada a densidade de empacotamento virtual. Considerando uma classe dominante para cada etapa de cálculo, têm-se as Equações B.9 e B.10.

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - \sum_{j=1}^{1-1=0} \left[ 1 - \beta_1 + b_{1j} \times \beta_1 \left( 1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \times y_j - \sum_{j=1+1=2}^2 \left[ 1 - a_{1j} \times \frac{\beta_1}{\beta_j} \right] \times y_j} \quad (\text{B.9})$$

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - \left\{ \left[ 1 - a_{12} \times \frac{\beta_1}{\beta_2} \right] \times y_2 \right\}}$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - \sum_{j=1}^{2-1=1} \left[ 1 - \beta_2 + b_{2j} \times \beta_2 \left( 1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \times y_j - \sum_{j=1+2=3}^2 \left[ 1 - a_{2j} \times \frac{\beta_2}{\beta_j} \right] \times y_j} \quad (\text{B.10})$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - \left\{ \left[ 1 - \beta_2 + b_{21} \times \beta_2 \left( 1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right] \times y_1 \right\}}$$

Substituindo os valores do exemplo nas Equações B.9 e B.10, têm-se as Equações B.11 e B.12, respectivamente:

$$\gamma_1 = \frac{0,629}{1 - \left\{ \left[ 1 - 0,2704 \times \frac{0,629}{0,641} \right] \times 0,8 \right\}} \quad (\text{B.11})$$

$$\gamma_1 = 1,5257$$

$$\gamma_2 = \frac{0,641}{1 - \left\{ \left[ 1 - 0,641 + 0,1057 \times 0,641 \left( 1 - \frac{1}{0,629} \right) \right] \times 0,2 \right\}} \quad (\text{B.12})$$

$$\gamma_2 = 0,6847$$

A partir dos resultados obtidos, a densidade de empacotamento virtual do conjunto será o menor valor encontrado. Logo,  $\gamma = \gamma_{\min} = 0,6847$ . Por fim, na última etapa, calcula-se a densidade de empacotamento real.

## III. Determinação da densidade de empacotamento real

Conforme Equação 14, apresentada no item 2.3, obtém-se a densidade de empacotamento real ( $\phi$ ) que é calculada de acordo com o método de compactação utilizado na mistura (K) a partir do processo experimental utilizado para determinar os valores de densidade de empacotamento de cada classe individual ( $\beta_i$ ). O valor de K utilizado foi igual a 12, de acordo com a Tabela 4 do item 2.3,

proposto por Fennis (2011) como valor de energia de compactação para método úmido que mais se aproxima do experimento de Wong e Kwan (2008) para determinação da densidade de empacotamento de partículas finas. Assim, a Equação B.13 apresenta a aplicação do exemplo.

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{Y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{Y_i}}$$

$$K = \frac{\frac{Y_1}{\beta_1}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{Y_1}} + \frac{\frac{Y_2}{\beta_2}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{Y_2}} \quad (\text{B.13})$$

$$12 = \frac{\frac{0,2}{0,629}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{1,5257}} + \frac{\frac{0,8}{0,641}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{0,6847}}$$

$$\phi = 0,6379$$

A Equação B.13 resulta em uma equação de 2º grau por apresentar 2 termos referentes às duas classes de grãos do exemplo (cimento e pó de pedra). Quanto mais classes são consideradas, maior será o grau da equação a ser resolvida. Por isso, foi utilizado a função Atingir Meta disponível no Excel para resolver a equação quando se tem K igual a 12, neste exemplo. Por fim, a densidade de empacotamento real ( $\phi$ ) é definida como a raiz de menor valor, neste exemplo, de 0,6379.

Todo o roteiro de cálculo apresentado foi realizado para as diversas combinações do estudo realizado, tanto para os materiais finos (cimento e pó de pedra) quanto para os agregados (areia artificial, brita 0 e brita 1), variando as proporções entre as classes analisadas para obtenção do máximo empacotamento real da mistura.

### APÊNDICE C – ROTEIRO DE CÁLCULO: MODELO DE ALFRED

O roteiro de cálculo a seguir apresenta como definir a proporção volumétrica de uma combinação de materiais pelo modelo de Alfred, cujo empacotamento da mistura seja o mais próximo da curva alvo. A Tabela C. 1 apresenta os dados de entrada para obtenção da curva alvo pela aplicação do modelo de Alfred a partir da caracterização dos materiais finos e dos agregados. Como exemplo será calculado a proporção dos materiais utilizados para definição do traço referência, conforme item 3.1.1, para validação do pó de diabásio.

Tabela C. 1 - DADOS DE ENTRADA PARA DEFINIÇÃO DA CURVA ALVO PELO MODELO DE ALFRED

Materiais	Cimento	Areia	Brita 0	Brita 1
D (mm)	% passante	% passante	% passante	% passante
25	100	100	100	100
19	100	100	100	95,88
12,5	100	100	100	42,12
9,5	100	100	95,43	15,57
6,3	100	100	42,09	1,45
4,75	100	96,38	14,21	0,38
2,36	100	72,06	1,19	0,19
1,18	100	51,99	0,85	0,18
0,6	100	37,87	0,85	0,18
0,3	100	26,64	0,85	0,18
0,15	100	17,12	0,83	0,17
0,075	98,78	0	0	0
0,045	94,88	0	0	0
0,02	73,55	0	0	0
0,01	47,42	0	0	0
0,005	26,75	0	0	0
0,002	10,57	0	0	0
0,001	4,35	0	0	0
0,0005	0,92	0	0	0
0,0003	0,13	0	0	0
0,0001	0	0	0	0

FONTE: A autora (2023).

A partir dos dados de entrada utiliza-se a Equação 10 apresentada no item 2.3 para determinação da curva granulométrica alvo com a combinação dos materiais. Um fator de ajuste  $q$  de 0,3 foi considerado para garantia de misturas com trabalhabilidade adequada para a moldagem conforme explicado no item 3.2.1. Assim, aplicando o exemplo para o diâmetro 6,3 mm, tem-se a Equação C.1.

$$\frac{CPFT}{100} = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q}$$

$$\frac{CPFT}{100} = \frac{6,3^{0,3} - 0,0001^{0,3}}{25^{0,3} - 0,0001^{0,3}} \quad (C.1)$$

$$CPFT = 65,2997\%$$

Logo, para o exemplo calculado, a porcentagem passante acumulada de partículas de diâmetro inferior a 6,3 mm é de 65,2997%. Esse cálculo é realizado para todos os diâmetros apresentados na Tabela C. 1. Com todas as porcentagens passantes acumuladas projeta-se a curva alvo do modelo de Alfred.

Posteriormente, para todos os diâmetros calcula-se, pela Equação 18 apresentada no item 2.4, o menor valor da Soma dos Quadrados dos Resíduos (RSS), que indica o menor desvio entre a curva alvo e a curva otimizada da mistura. O valor de  $P_{\text{mix}}$  é definido conforme a proporção dos materiais na mistura. Para dois ou três materiais é possível variar diferentes proporções manualmente até encontrar o menor valor para RSS. Já para uma maior quantidade de materiais essa combinação fica inviável de ser feita de forma manual. Portanto, no presente trabalho, foi utilizada a linguagem de programação Phyton para determinar entre milhares de combinações aquela cujo RSS seja mínimo. Dessa maneira, a proporção encontrada para o exemplo está apresentada na Tabela C. 2.

Tabela C. 2 - PROPORÇÃO DOS MATERIAIS CALCULADA NO PHYTON PELA EQUAÇÃO DA SOMA DOS QUADRADOS DOS RESÍDUOS

Materiais	Cimento	Areia	Brita 0	Brita 1
Proporção	13,369%	46,909%	7,866%	31,856%

FONTE: A autora (2023).

Com as proporções volumétricas dos materiais definida, calcula-se, para cada diâmetro, a porcentagem passante pela proporção de cada material. Assim, a Equação C.2 apresenta o cálculo da porcentagem da mistura otimizada para o diâmetro 6,3 mm.

$$\%Mistura = \sum_{i=1}^n P_{\text{mix}_i} \times D_i^{i+1}$$

$$\%Mistura = (P_{\text{mix}_c} \times D_c) + (P_{\text{mix}_a} \times D_a) + (P_{\text{mix}_{b0}} \times D_{b0}) + (P_{\text{mix}_{b1}} \times D_{b1}) \quad (C.2)$$

$$\%Mistura = (100 \times 0,136) + (100 \times 0,469) + (42,09 \times 0,787) + (1,45 \times 0,319)$$

$$\%Mistura = 64,05$$

Aplicando o cálculo de RSS no exemplo do diâmetro 6,3 mm, tem-se a Equação C.3.

$$RSS = \sum_{i=1}^n \left( P_{\text{curva alvo}} (D_i^{i+1}) - P_{\text{mistura}} (D_i^{i+1}) \right)^2$$

$$RSS = (\%Passante_{\text{curva alvo}} - \%Mistura)^2 \quad (C.3)$$

$$RSS = (0,6530 - 0,6405)^2$$

$$RSS = 0,000156$$

As mesmas equações são aplicadas para todos os diâmetros dos dados de entrada e por fim, a soma de todos os erros dá o menor valor de RSS para a mistura, levando em consideração as proporções dos materiais definidas. A Tabela C. 3 apresenta os valores calculados para todos os diâmetros apresentados neste exemplo.

Tabela C. 3 - DEFINIÇÃO DA CURVA ALVO E A COMBINAÇÃO DA MISTURA COM A SOMA DOS QUADRADOS DOS RESÍDUOS PELO MODELO DE ALFRED

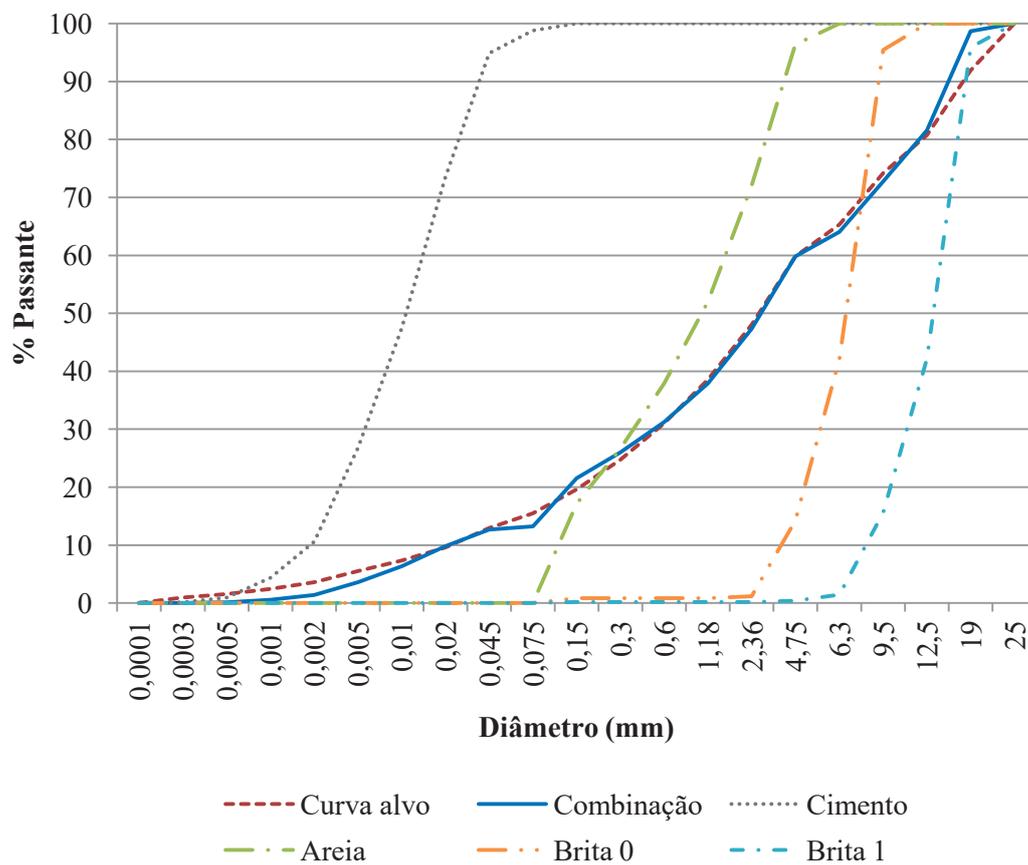
D (mm)	% passante	Mistura	RSS
25	100,00000	100,00000	0,000000
19	91,90217	98,68752	0,004604
12,5	80,76312	81,56164	0,000064
9,5	74,18564	72,74436	0,000208
6,3	65,29971	64,05076	0,000156
4,75	59,79535	59,81886	0,000000
2,36	48,01077	47,32593	0,000047
1,18	38,53475	37,88134	0,000043
0,6	31,00615	31,25778	0,000006
0,3	24,72270	25,98988	0,000161
0,15	19,61895	21,51938	0,000361
0,075	15,47342	13,20599	0,000514
0,045	12,92520	12,68460	0,000006
0,02	9,60251	9,83297	0,000005
0,01	7,33754	6,33962	0,000100
0,005	5,49782	3,57623	0,000369
0,002	3,58489	1,41311	0,000472
0,001	2,44972	0,58156	0,000349
0,0005	1,52767	0,12300	0,000197
0,0003	0,96090	0,01738	0,000089
0,0001	0,00000	0,00000	0,000000

FONTE: A autora (2023).

A soma de todos os valores de RSS ficou igual a 0,007750, o menor valor encontrado entre as milhares de combinações analisadas pelo Phyton, variando as proporções dos materiais.

Por fim, as curvas da composição granulométrica de cada material individual, a curva alvo e a curva da combinação dos materiais com a proporção que apresenta o menor valor da Soma dos Quadrados dos Resíduos é apresentada na Figura C. 1.

Figura C. 1 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS, CURVA ALVO E CURVA DA COMBINAÇÃO DOS MATERIAIS PARA EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MODELO DE ALFRED



FONTE: A autora (2023).

## APÊNDICE D – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NOS CONCRETOS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO

A Tabela D. 1 apresenta os resultados de massa específica dos concretos para avaliação do potencial de utilização do pó de diabásio.

Tabela D. 1 – RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA DOS CONCRETOS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO

Traço	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		
	CP1	CP2	CP3
Referência	2,45	2,44	2,45
Pó de calcário	2,44	2,45	2,47
Pó de diabásio	2,44	2,48	2,46

A Tabela D. 2 apresenta os resultados de resistência à compressão dos concretos para avaliação do potencial de utilização do pó de diabásio.

Tabela D. 2 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO

Traço	Resistência à compressão (MPa)	
	CP1	CP2
Referência	56,00	59,50
Pó de calcário	60,30	58,00
Pó de diabásio	57,20	58,50

A Tabela D. 3 apresenta os resultados de módulo de elasticidade estático dos concretos para avaliação do potencial de utilização do pó de diabásio.

Tabela D. 3 – RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO

Traço	Módulo de elasticidade (GPa)		
	CP1	CP2	CP3
Referência	53,16	56,70	54,81
Pó de calcário	49,36	35,60	39,26
Pó de diabásio	43,32	51,86	41,32

A Tabela D. 4 apresenta os resultados de resistividade elétrica dos concretos para avaliação do potencial de utilização do pó de diabásio.

Tabela D. 4 – RESULTADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CONCRETOS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO PÓ DE DIABÁSIO

Traço	Resistividade elétrica (k $\Omega$ .cm)		
	CP1	CP2	CP3
Referência	23,73	25,57	25,57
Pó de calcário	25,40	25,67	28,67
Pó de diabásio	23,03	23,70	24,73

## APÊNDICE E – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA PELO MODELO CPM

A Tabela E. 1 apresenta os resultados de massa específica dos concretos para definição do teor de pasta pelo modelo CPM.

Tabela E. 1 – RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO  
TEOR DE PASTA PELO MODELO CPM

Traço	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )								
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9
Teor Pasta 0,26	2,47	2,48	2,49	2,48	2,49	2,50	2,49	2,51	2,49
Teor Pasta 0,28	2,48	2,52	2,50	2,50	2,48	2,51	2,51	2,52	2,49
Teor Pasta 0,30	2,52	2,51	2,54	2,50	2,50	2,50	2,51	2,52	2,53
Teor Pasta 0,32	2,47	2,49	2,50	2,50	2,48	2,50	2,48	2,47	2,53

A Tabela E. 2 apresenta os resultados de resistência à compressão dos concretos para definição do teor de pasta pelo modelo CPM.

Tabela E. 2 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS PARA  
DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA PELO MODELO CPM

Traço	Resistência à compressão (MPa)		
	CP1	CP2	CP3
Teor Pasta 0,26	38,49	37,47	40,80
Teor Pasta 0,28	37,07	35,68	39,40
Teor Pasta 0,30	42,40	37,99	41,50
Teor Pasta 0,32	31,09	34,15	33,91

A Tabela E. 3 apresenta os resultados de módulo de elasticidade dos concretos para definição do teor de pasta pelo modelo CPM.

Tabela E. 3 – RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS PARA  
DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA PELO MODELO CPM

Traço	Módulo de elasticidade (GPa)			
	CP1	CP2	CP3	CP4
Teor Pasta 0,26	43,69	51,51	32,51	41,78
Teor Pasta 0,28	45,94	35,54	34,01	38,64
Teor Pasta 0,30	41,26	40,29	41,69	51,05
Teor Pasta 0,32	42,14	38,55	38,10	40,82

A Tabela E. 4 apresenta os resultados de resistência à tração dos concretos para definição do teor de pasta pelo modelo CPM.

Tabela E. 4 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA PELO MODELO CPM

Traço	Resistência à tração (MPa)		
	CP1	CP2	CP3
Teor Pasta 0,26	3,78	3,33	4,10
Teor Pasta 0,28	3,08	3,78	3,22
Teor Pasta 0,30	3,89	4,27	3,07
Teor Pasta 0,32	3,32	3,62	3,85

A Tabela E. 5 apresenta os resultados de resistividade elétrica dos concretos para definição do teor de pasta pelo modelo CPM.

Tabela E. 5 – RESULTADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA PELO MODELO CPM

Traço	Resistividade elétrica (k $\Omega$ .cm)								
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9
Teor Pasta 0,26	21,30	20,40	22,30	19,80	24,20	22,90	21,00	19,80	19,90
Teor Pasta 0,28	18,50	20,00	18,40	18,10	17,80	19,80	18,20	19,70	20,40
Teor Pasta 0,30	20,30	20,70	21,00	23,00	20,60	21,90	23,20	23,00	22,20
Teor Pasta 0,32	17,40	18,30	17,20	16,80	18,00	18,40	17,10	18,40	17,60

A Tabela E. 6 apresenta os resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica dos concretos para definição do teor de pasta pelo modelo CPM.

Tabela E. 6 – RESULTADOS DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA DOS CONCRETOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE PASTA PELO MODELO CPM

Traço	Propagação de onda ultrassônica (m/s)		
	CP1	CP2	CP3
Teor Pasta 0,26	5078,00	5105,00	5214,00
Teor Pasta 0,28	5145,00	5078,00	5013,00
Teor Pasta 0,30	5078,00	5078,00	5078,00
Teor Pasta 0,32	5078,00	5039,00	5149,00

## APÊNDICE F – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NOS CONCRETOS COM A COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS PELOS MODELOS DE ALFRED E CPM

A Tabela F. 1 apresenta os resultados de massa específica dos concretos com composição dos materiais pelos modelos de Alfred e CPM.

Tabela F. 1 – RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA DOS CONCRETOS COM A COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS PELOS MODELOS DE ALFRED E CPM

Traço	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		
	CP1	CP2	CP3
Alfred 0,45	2,45	2,46	2,47
Alfred 0,50	2,49	2,50	2,49
Alfred 0,55	2,53	2,51	2,50
Alfred 0,60	2,50	2,50	2,50
CPM 0,45	2,53	2,52	2,51
CPM 0,50	2,51	2,50	2,50
CPM 0,55	2,53	2,52	2,50
CPM 0,60	2,51	2,51	2,49

A Tabela F. 2 apresenta os resultados de resistência à compressão dos concretos com composição dos materiais pelos modelos de Alfred e CPM.

Tabela F. 2 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS COM A COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS PELOS MODELOS DE ALFRED E CPM

Traço	Resistência à compressão (MPa)					
	7 dias			28 dias		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
Alfred 0,45	29,12	29,07	27,09	43,60	35,24	36,13
Alfred 0,50	25,48	22,97	23,59	37,77	34,67	33,59
Alfred 0,55	27,27	32,24	33,10	39,00	36,28	37,03
Alfred 0,60	26,36	22,47	24,95	32,06	30,86	32,37
CPM 0,45	34,13	40,90	39,30	38,49	40,90	43,20
CPM 0,50	34,29	31,46	34,35	36,82	33,45	33,74
CPM 0,55	28,28	33,84	32,10	30,92	32,10	36,63
CPM 0,60	28,22	26,93	26,84	26,63	28,92	27,47

A Tabela F. 3 apresenta os resultados de módulo de elasticidade dos concretos com composição dos materiais pelos modelos de Alfred e CPM.

Tabela F. 3 – RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS COM A COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS PELOS MODELOS DE ALFRED E CPM

Traço	Módulo de elasticidade (GPa)			
	CP1	CP2	CP3	CP4
Alfred 0,45	30,78	40,67	28,18	30,59
Alfred 0,50	34,29	29,26	34,17	40,75
Alfred 0,55	38,49	34,80	40,40	33,18
Alfred 0,60	41,71	29,94	35,07	40,80
CPM 0,45	39,92	36,59	35,25	38,14
CPM 0,50	38,19	36,30	48,51	38,00
CPM 0,55	32,32	30,89	36,91	36,46
CPM 0,60	29,32	38,89	34,55	30,25

A Tabela F. 4 apresenta os resultados de resistência à tração dos concretos com composição dos materiais pelos modelos de Alfred e CPM.

Tabela F. 4 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS CONCRETOS COM A COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS PELOS MODELOS DE ALFRED E CPM

Traço	Resistência à tração (MPa)					
	7 dias			28 dias		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
Alfred 0,45	2,74	2,77	2,69	4,00	3,93	3,77
Alfred 0,50	3,44	3,47	3,12	3,88	3,34	3,50
Alfred 0,55	3,53	3,60	3,30	3,83	3,68	3,51
Alfred 0,60	2,71	2,76	2,77	3,14	3,44	3,33
CPM 0,45	3,73	3,55	3,65	4,75	4,47	4,05
CPM 0,50	3,09	3,83	3,57	3,52	3,66	3,78
CPM 0,55	2,91	3,22	2,91	3,39	3,62	3,19
CPM 0,60	2,75	2,97	3,13	3,12	3,07	3,18

A Tabela F. 5 apresenta os resultados de resistividade elétrica dos concretos com composição dos materiais pelos modelos de Alfred e CPM.

Tabela F. 5 – RESULTADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CONCRETOS COM A COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS PELOS MODELOS DE ALFRED E CPM

Traço	Resistividade elétrica (k $\Omega$ .cm)					
	7 dias			28 dias		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
Alfred 0,45	12,67	14,60	14,10	23,23	23,43	23,57
Alfred 0,50	13,40	12,90	11,70	18,47	18,10	19,47
Alfred 0,55	14,93	15,27	14,60	17,90	18,10	17,73
Alfred 0,60	13,90	14,47	13,27	15,60	15,30	15,10
CPM 0,45	15,87	14,73	15,13	22,47	23,50	23,33
CPM 0,50	13,57	12,00	15,47	19,57	18,93	20,40
CPM 0,55	13,50	12,27	11,03	17,00	15,80	17,83
CPM 0,60	11,07	10,40	10,40	17,20	16,20	16,23

A Tabela F. 6 apresenta os resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica dos concretos com composição dos materiais pelos modelos de Alfred e CPM.

Tabela F. 6 – RESULTADOS DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA DOS CONCRETOS COM A COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS PELOS MODELOS DE ALFRED E CPM

Traço	Propagação de onda ultrassônica (m/s)					
	7 dias			28 dias		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
Alfred 0,45	4887,00	4887,00	4949,00	5132,00	5000,00	5132,00
Alfred 0,50	4887,00	4827,00	4887,00	5065,00	5000,00	5118,00
Alfred 0,55	4987,00	5039,00	5105,00	5242,00	5299,00	5313,00
Alfred 0,60	5078,00	4987,00	5065,00	5172,00	5299,00	5145,00
CPM 0,45	4887,00	4849,00	4949,00	5013,00	5052,00	5013,00
CPM 0,50	5013,00	5013,00	4949,00	4949,00	5026,00	5078,00
CPM 0,55	4827,00	4851,00	4827,00	4863,00	4949,00	4899,00
CPM 0,60	4887,00	4912,00	4912,00	4949,00	4949,00	4949,00