

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

LARISSA RODRIGUES DUTRA

**Aplicação do empacotamento de partículas na otimização de aglomerantes para a
produção de concretos de alta resistência**

SÃO CARLOS

2022

LARISSA RODRIGUES DUTRA

**Aplicação do empacotamento de partículas na otimização de aglomerantes para a
produção de concretos de alta resistência**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadora: Prof^a. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro

SÃO CARLOS

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

D978a Dutra, Larissa Rodrigues
 Aplicação do empacotamento de partículas na
otimização de aglomerantes para a produção de concretos
de alta resistência / Larissa Rodrigues Dutra;
orientadora Alessandra Lorenzetti de Castro. São
Carlos, 2022.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de
Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2022.

 1. Concreto de alta resistência. 2. Aglomerantes.
3. Adições minerais. 4. Empacotamento de partículas. 5.
Sustentabilidade. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **LARISSA RODRIGUES DUTRA**.

Título da dissertação: "Aplicação do empacotamento de partículas na otimização de aglomerantes para a produção de concretos de alta resistência".

Data da defesa: 09/12/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Dra. **Alessandra Lorenzetti de Castro**
(Orientadora)

Aprovada

(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

Prof. Dra. **Ana Paula da Luz**

Aprovada

(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Prof. Dr. **Valdecir Angelo Quarcioni**

Aprovado

(Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo/IPT)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
(Engenharia de Estruturas):

Prof. Associado **Vladimir Guilherme Haach**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, inicialmente, à minha mãe, Laudenira, por incentivar meus estudos desde pequena, pelo apoio e amor incondicional e por ser minha confidente nos períodos difíceis. Ao meu irmão, Arthur, por suportar meus momentos de estresse e por me alegrar com suas piadas ruins. Ao meu pai, Pedro, pelo suporte, conselhos e grandes ensinamentos.

A meu marido, Rafael, pelo apoio, carinho, compreensão, companheirismo e momentos de descontração ao longo dessa jornada.

Agradeço à minhas cachorras, Flora e Tequila, por tornarem meus dias sempre especiais.

Agradeço à minha avó, Zildair, por me apoiar e auxiliar ao longo da minha graduação. À minha avó Vilma (*in memoriam*), que ajudou em minha criação e me confortava quando precisava de colo. À minha tia, Vânia (*in memoriam*), que sempre acreditou que eu conquistaria minha pós-graduação.

Agradeço imensamente à minha orientadora, Alessandra Lorenzetti de Castro, por me atender em todas as vezes que precisei, sempre me tranquilizando e instruindo sobre a melhor forma de conduzir o trabalho. Suas contribuições foram essenciais para a realização da pesquisa. Agradeço, ainda, por ser um exemplo de professora, transmitindo as informações de forma clara e tornando as aulas mais interessantes.

Aos professores membros da banca, Ana Paula da Luz e Valdecir Ângelo Quarcioni, pelas valiosas contribuições ao trabalho.

Agradeço à Mariana Rossi por me apresentar o Laboratório de Estruturas e me ensinar os procedimentos necessários para o desenvolvimento de uma pesquisa experimental. Ao Bruno Bianchi, Fernanda Gabriella e Tito Balabuch por me ajudarem na realização de ensaios.

Ao Luiz Fernando por me incentivar a prestar o processo seletivo do mestrado e por ajudar na minha preparação para a prova de ingresso. Ao Matheus Rocha pela paciência e por ser um excelente professor.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas e do Laboratório de Materiais de Construção Civil da EESC, nas pessoas de Luiz Varela, Amauri, Mauri, Fabiano, Romeu e Osni, pela grande ajuda durante as concretagens e realização de ensaios.

Ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (SET – EESC) pela oportunidade em realizar o mestrado.

Agradeço ao pós-doutorando, Paulo Giovany, e aos professores, Eduardo Bellini e Marcelo Falcão, pela grande ajuda na realização de ensaios essenciais à pesquisa e externos ao SET.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), instituição na qual me formei engenheira civil e que me proporcionou muitos momentos de felicidade e aprendizado. Agradeço ainda ao professor da UFU, Arquimedes Diógenes Ciloni, por orientar meu Trabalho de Conclusão de Curso e despertar em mim o interesse pelas estruturas de concreto.

Às empresas Lafarge Holcim, GCP Applied Technologies, Brasilminas, Metacaulim do Brasil e Elkem por fornecerem materiais necessários ao desenvolvimento da pesquisa.

Finalmente, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo financiamento da bolsa de pesquisa.

RESUMO

DUTRA, L. R. **Aplicação do empacotamento de partículas na otimização de aglomerantes para a produção de concretos de alta resistência.** 2022. 198p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

O concreto é o material de construção civil mais utilizado no mundo sendo constituído essencialmente por cimento Portland, água e agregados. A produção de cimento é um processo altamente poluidor, de forma que a tecnologia do concreto tem buscado mecanismos que permitam sua produção de maneira mais sustentável. Uma das práticas encontradas para esta finalidade baseia-se na substituição parcial de cimento por adições minerais. Visando a otimização dos aglomerantes constituídos de cimento Portland e adições minerais, aplicam-se métodos de empacotamento de partículas, os quais podem ocasionar a densificação da mistura, promover o refinamento de poros, reduzir sua permeabilidade, elevar sua resistência mecânica e durabilidade. A otimização do empacotamento leva à redução do volume de pasta necessário para preencher os vazios da mistura, contribuindo para a produção de concretos mais sustentáveis, além de otimizar as propriedades do material. Neste contexto, este trabalho tem o objetivo de avaliar o efeito do empacotamento de partículas na otimização de aglomerantes para a produção de concretos de alta resistência. Para isso, aplicou-se o modelo de empacotamento de partículas de Alfred aos materiais constituintes do aglomerante dos concretos produzidos originalmente efetuando-se a substituição parcial do cimento Portland por adições minerais, considerando porcentagens fixas. Na continuidade do trabalho, foram produzidas misturas ternárias e quaternárias de cimento Portland e adições minerais, considerando os aglomerantes de referência e otimizados, para a avaliação dos efeitos do empacotamento na trabalhabilidade e microestrutura das pastas de aglomerantes e nas propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido. Verificou-se que as pastas de aglomerantes otimizadas apresentaram maior viscosidade, menor porosidade aparente e pouca alteração em sua microestrutura, em comparação às misturas de referência. A otimização das pastas de aglomerantes levou à produção de concretos com menor consumo de cimento e maior consumo de superplastificante, necessário para atingir a consistência especificada. No estado endurecido, os concretos otimizados apresentaram resistência à compressão estatisticamente igual, ou superior, aos concretos de referência. Notou-se, ainda, que a otimização dos aglomerantes não teve impacto no módulo de elasticidade dinâmico dos concretos. Por fim, demonstrou-se o potencial do empacotamento de partículas para a produção de concretos com menor consumo de cimento e propriedades adequadas para sua utilização na construção civil.

Palavras-chave: concreto de alta resistência; aglomerantes; adições minerais; empacotamento de partículas; sustentabilidade.

ABSTRACT

DUTRA, L. R. **The application of particle packing in the optimization of binder to produce high strength concretes.** 2022. 198p. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structures)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2022.

Concrete is the most widely used building material in the world, consisting essentially of Portland cement, water and aggregates. Cement production is a highly polluting process, in a way that the concrete technology has sought mechanisms that allow its production in a more sustainable way. One of the methodologies found for this purpose is based on the partial replacement of cement with mineral admixtures. Seeking to optimize the binders composed of Portland cement and mineral admixtures, particle packing methods are applied, which can densify the mixture, promote the refinement of the pores, reduce its permeability and increase its mechanical resistance and durability. The optimization of particle packing leads to a reduction in the paste volume necessary to fill the voids in the mixture, contributing to the production of more sustainable concretes, in addition to optimize the material properties. In this context, this study seeks to evaluate the effect of particle packing on the optimization of binders to produce high strength concrete. For this purpose, the Alfred's particle packing model was applied to the constituents of the binder of the concretes originally produced with the partial replacement of Portland cement by mineral admixtures, considering fixed contents. Continuing the study, ternary and quaternary mixtures of Portland cement and mineral admixtures were produced, considering the reference binders and the optimized binders, to evaluate the effects of particle packing in the workability and microstructure of the binder paste and in the properties of the concrete in the fresh and hardened states. It was verified that the pastes with optimized binder showed higher viscosity, lower apparent porosity and little alteration in their microstructure, compared to the reference mixtures. The optimization of the binders has led to the production of concretes with lower cement consumption and higher superplasticizer content, necessary to achieve the specified consistency. In the hardened state, the optimized concretes presented compressive strength statistically equal or higher to the reference concretes. It was also noted that the binder optimization had no impact on the dynamic modulus of elasticity of the concretes. Finally, the potential of particle packaging for the production of concretes with lower cement consumption and suitable properties for its use in civil construction was demonstrated.

Keywords: high strength concrete; binder; mineral admixtures; particle packing; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da produção e hidratação do cimento Portland.....	8
Figura 2 - Micrografia eletrônica de varredura da sílica ativa.....	16
Figura 3 - Micrografia eletrônica de varredura do metacaulim.....	19
Figura 4 - Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz.....	21
Figura 5 - Micrografia eletrônica de varredura de fíler calcário.....	23
Figura 6 - Influência do efeito parede na densidade de empacotamento.....	36
Figura 7 - Metodologia utilizada para o desenvolvimento do aglomerante.....	37
Figura 8 - Fluxograma das principais etapas do programa experimental.....	40
Figura 9 – Procedimento experimental: (a) preenchimento do minicone e (b) obtenção das medidas.....	45
Figura 10 – Amostras de pastas utilizadas no MEV.....	46
Figura 11 – Saturação das amostras: (a) amostras imersas em água e (b) esquema para aplicação de vácuo.....	47
Figura 12 - Máquina de ensaio ELE Autotest 2000.....	48
Figura 13 - Esquema do ensaio de excitação por impulso.....	49
Figura 14 - Granulometria a laser dos componentes do aglomerante.....	54
Figura 15 - Distribuição discreta dos componentes do aglomerante.....	55
Figura 16 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo e zona limite 9,5/25.....	56
Figura 17 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos.....	57
Figura 18 - Distribuição granulométrica da composição de areias.....	57
Figura 19 - Distribuição granulométrica dos aglomerantes com misturas ternárias.....	60
Figura 20 - Distribuição granulométrica dos aglomerantes com misturas quaternárias.....	60
Figura 21 - Determinação do módulo de distribuição para P1-R.....	61
Figura 22 - Determinação do módulo de distribuição para P2-R.....	62
Figura 23 - Determinação do módulo de distribuição para P3-R.....	62
Figura 24 - Determinação do módulo de distribuição para P4-R.....	62
Figura 25 - Determinação do módulo de distribuição para P5-R.....	63
Figura 26 - Determinação do módulo de distribuição para P6-R.....	63
Figura 27 - Determinação do módulo de distribuição para P7-R.....	63
Figura 28 - Determinação do módulo de distribuição para P8-R.....	64
Figura 29 - Determinação do módulo de distribuição para P9-R.....	64
Figura 30 - Determinação do módulo de distribuição para P10-R.....	64
Figura 31 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P1-O.....	67
Figura 32 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P2-O.....	67
Figura 33 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P3-O.....	67
Figura 34 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P4-O.....	68
Figura 35 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P5-O.....	68

Figura 36 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P6-O	68
Figura 37 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P7-O	69
Figura 38 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P8-O	69
Figura 39 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P9-O	69
Figura 40 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P10-O	70
Figura 41 - Resultados do miniabatimento para composições ternárias de aglomerantes com sílica ativa ...	73
Figura 42 - Resultados do miniabatimento para composições ternárias de aglomerantes sem sílica ativa ...	73
Figura 43 - Resultados do miniabatimento para composições quaternárias de aglomerantes	74
Figura 44 -Micrografia da pasta de aglomerante P1 composta por cimento Portland, sílica ativa (SA) e metacaulim (M): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas	76
Figura 45 -Micrografia da pasta de aglomerante P2 composta por cimento Portland, sílica ativa (SA) e cinza de casca de arroz (CCA): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas.....	76
Figura 46 - Micrografia da pasta de aglomerante P3 composta por cimento Portland, sílica ativa (SA) e fíler calcário (FC): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas	77
Figura 47 - Micrografia da pasta de aglomerante P4 composta por cimento Portland, metacaulim (M) e cinza de casca de arroz (CCA): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas.....	77
Figura 48 - Micrografia da pasta de aglomerante P5 composta por cimento Portland, metacaulim (M) e fíler calcário (FC): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas	78
Figura 49 - Micrografia da pasta de aglomerante P6 composta por cimento Portland, cinza de casca de arroz (CCA) e fíler calcário (FC): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas.....	78
Figura 50 - Micrografia da pasta de aglomerante P7 composta por cimento Portland, sílica ativa (SA), metacaulim (M) e cinza de casca de arroz (CCA): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas.....	79
Figura 51 - Micrografia da pasta de aglomerante P8 composta por cimento Portland, sílica ativa (SA), metacaulim (M) e fíler calcário (FC): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas.....	79
Figura 52 - Micrografia da pasta de aglomerante P9 composta por cimento Portland, metacaulim (M), cinza de casca de arroz (CCA) e fíler calcário (FC): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas.....	80
Figura 53 - Micrografia da pasta de aglomerante P10 composta por cimento Portland, sílica ativa, cinza de casca de arroz e fíler calcário: (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas.....	80
Figura 54 - Detalhes da morfologia da cinza de casca de arroz: (a) pasta de referência P2-R e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas P10-O.....	81

Figura 55 - Detalhes das diferentes morfologias do C-S-H: (a) pasta de referência P10-R e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas P8-O	82
Figura 56 - Porosidade aparente das composições ternárias com sílica ativa	84
Figura 57 - Porosidade aparente das composições ternárias sem sílica ativa	84
Figura 58 - Porosidade aparente das composições quaternárias	85
Figura 59 - Comparação do consumo de cimento entre os concretos otimizados e de referência produzidos com aglomerante ternário.....	87
Figura 60 – Comparação do consumo de cimento entre os concretos otimizados e de referência produzidos com aglomerante quaternário.....	87
Figura 61 - Aspectos do concreto: (a) estado fresco e (b) corpo de prova.....	90
Figura 62 - Resultados da absorção de água por imersão para os concretos produzidos com aglomerantes ternários com sílica ativa.....	93
Figura 63 - Resultados da absorção de água por imersão para os concretos produzidos com aglomerantes ternários sem sílica ativa	93
Figura 64 - Resultados da absorção de água por imersão para os concretos produzidos com aglomerantes quaternários.....	94
Figura 65 – Resultados do índice de vazios para os concretos produzidos com aglomerantes ternários com sílica ativa	94
Figura 66 - Resultados do índice de vazios para os concretos produzidos com aglomerantes ternários sem sílica ativa	95
Figura 67 - Resultados do índice de vazios para os concretos produzidos com aglomerantes quaternários. 95	
Figura 68 - Resistência à compressão ao longo do tempo para os concretos com aglomerante ternário contendo sílica ativa.....	100
Figura 69 - Resistência à compressão ao longo do tempo para os concretos com aglomerante ternário sem sílica ativa	101
Figura 70 - Resistência à compressão ao longo do tempo para os concretos com aglomerante quaternário	101
Figura 71 - Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, ao longo do tempo, para os concretos com aglomerante ternário contendo sílica ativa.....	106
Figura 72 - Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, ao longo do tempo, para os concretos com aglomerante ternário sem sílica ativa	106
Figura 73 - Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, ao longo do tempo, para os concretos com aglomerante quaternário.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos resultados de resistência à compressão de concretos com adições minerais	24
Tabela 2 - Resumo dos resultados de resistência à compressão de concretos com mais de uma adição mineral	27
Tabela 3 - Caracterização do cimento Portland	41
Tabela 4 - Caracterização da sílica ativa.....	41
Tabela 5 - Caracterização do metacaulim, cinza de casca de arroz e fíler calcário	42
Tabela 6 - Caracterização dos agregados miúdos e graúdos	42
Tabela 7 - Teores de substituição, em volume, dos aglomerantes de referência	43
Tabela 8 - Resumo das misturas ternárias e quaternárias dos traços de aglomerantes.....	43
Tabela 9 - Resumo dos corpos de prova ensaiados para cada traço de concreto	49
Tabela 10 - Resultados da caracterização dos materiais constituintes do aglomerante	50
Tabela 11 - Análise química dos materiais constituintes do aglomerante	51
Tabela 12 - Relação entre óxidos e abreviações	52
Tabela 13 - Composição potencial do CPH E32.....	52
Tabela 14 - Valores típicos dos teores de compostos no cimento Portland Tipo I (ASTM).....	53
Tabela 15 - Tamanho médio de partícula dos componentes do aglomerante	54
Tabela 16 - Resultados da caracterização dos agregados miúdos e graúdos.....	56
Tabela 17 - Índices granulométricos dos agregados	58
Tabela 18 - Consumo de materiais dos concretos de referência	58
Tabela 19 - Proporções, em massa, dos constituintes das pastas de aglomerantes	59
Tabela 20 - Resumo dos resultados obtidos na determinação dos módulos de distribuição.....	65
Tabela 21 - Restrições adotadas para utilização da planilha	66
Tabela 22 - Proporções, em massa, otimizadas dos aglomerantes.....	70
Tabela 23 - Consumo de materiais das pastas de referência	71
Tabela 24 - Consumo de materiais das pastas otimizadas	72
Tabela 25 - Resultados da porosidade aparente das pastas de aglomerantes	83
Tabela 26 - Consumo de materiais (em kg/m ³) real dos concretos otimizados.....	86
Tabela 27 - Resultados para os concretos de referência no estado fresco.....	88
Tabela 28 - Resultados para os concretos otimizados no estado fresco.....	89
Tabela 29 - Resultados da absorção de água por imersão para os concretos de referência	91
Tabela 30 - Resultados da absorção de água por imersão para os concretos otimizados.....	91
Tabela 31 - Resultados do índice de vazios para os concretos de referência.....	91
Tabela 32 - Resultados do índice de vazios para os concretos otimizados	92
Tabela 33 - Resultados da massa específica da amostra seca para os concretos de referência	98
Tabela 34 - Resultados da massa específica da amostra seca para os concretos otimizados	98
Tabela 35 - Resultados da resistência à compressão para os concretos de referência	99

Tabela 36 - Resultados da resistência à compressão para os concretos otimizados100

Tabela 37 - Resultados para módulo de elasticidade dinâmico longitudinal dos concretos de referência...105

Tabela 38 - Resultados para módulo de elasticidade dinâmico longitudinal dos concretos otimizados.....105

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	JUSTIFICATIVA	2
1.2	OBJETIVOS	3
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	O CONCRETO	5
2.1.1	Breve histórico.....	5
2.1.2	Materiais constituintes.....	7
2.1.2.1	Cimento Portland	7
2.1.2.2	Agregados	9
2.1.2.3	Água de amassamento.....	9
2.1.2.4	Aditivos químicos e adições minerais.....	10
2.1.2.4.1	Aditivos químicos	11
2.1.2.4.2	Adições minerais.....	12
2.2	DO CONCRETO CONVENCIONAL AO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA	13
2.3	O CONCRETO COM ADIÇÕES MINERAIS.....	16
2.3.1	A sílica ativa no concreto.....	16
2.3.2	O metacaulim no concreto.....	19
2.3.3	A cinza de casca de arroz no concreto.....	20
2.3.4	O fíler calcário no concreto	22
2.3.5	O concreto com mais de uma adição mineral.....	24
2.3.6	As adições minerais e a sustentabilidade do concreto.....	27
2.4	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	30
2.4.1	Modelos de empacotamento de partículas	31
2.4.1.1	Modelo de Fuller e Thompson	31
2.4.1.2	Modelo de Furnas	31
2.4.1.3	Modelo de Andreasen	32
2.4.1.4	Modelo de Alfred.....	33
2.4.2	Fatores que influenciam o empacotamento de partículas	33
2.4.3	Estudos pertinentes.....	36

3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	41
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	41
3.3	CONCRETOS DE REFERÊNCIA.....	42
3.4	OTIMIZAÇÃO DOS AGLOMERANTES.....	43
3.5	ANÁLISES DAS PASTAS DE AGLOMERANTES	44
3.5.1	Miniabatimento.....	44
3.5.2	Microscopia eletrônica de varredura.....	45
3.5.3	Porosidade aparente	47
3.6	ANÁLISE DOS CONCRETOS NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	50
4.2	CONCRETOS DE REFERÊNCIA.....	58
4.3	OTIMIZAÇÃO DOS AGLOMERANTES.....	59
4.3.1	Etapa 1 - Distribuição granulométrica das composições de aglomerante	59
4.3.2	Etapa 2 - Determinação do módulo de distribuição (q).....	61
4.3.3	Etapa 3 – Otimização das composições de aglomerantes	65
4.4	ANÁLISE DAS PASTAS DE AGLOMERANTES.....	71
4.4.1	Consumo de materiais	71
4.4.2	Miniabatimento.....	72
4.4.3	Microscopia eletrônica de varredura.....	75
4.4.4	Porosidade aparente	82
4.5	CONCRETOS OTIMIZADOS.....	86
4.6	PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO	88
4.7	PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO.....	90
4.7.1	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	90
4.7.2	Resistência à compressão	99
4.7.3	Propriedades dinâmicas	104
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112

APÊNDICE A - TESTES ESTATÍSTICOS PARA MINIABATIMENTO DAS PASTAS DE AGLOMERANTES	119
APÊNDICE B – ESPECTROSCOPIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA DAS PASTAS DE AGLOMERANTES	130
APÊNDICE C - TESTES ESTATÍSTICOS PARA POROSIDADE APARENTE DAS PASTAS DE AGLOMERANTES	134
APÊNDICE D - TESTES ESTATÍSTICOS PARA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DOS CONCRETOS.....	145
APÊNDICE E - TESTES ESTATÍSTICOS PARA ÍNDICE DE VAZIOS DOS CONCRETOS	155
APÊNDICE F - TESTES ESTATÍSTICOS PARA MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SECA DOS CONCRETOS	165
APÊNDICE G - TESTES ESTATÍSTICOS PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS	175
APÊNDICE H - TESTES ESTATÍSTICOS PARA MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO LONGITUDINAL DOS CONCRETOS.....	186

1 INTRODUÇÃO

A construção civil causa grande impacto ambiental, sendo a indústria que mais consome recursos naturais no mundo. Além disso, a produção e o transporte de materiais de construção contribuem com cerca de 10 a 30% da emissão de gases do efeito estufa e os resíduos de obras e demolições são responsáveis por cerca de 30 a 50% dos descartes na natureza (NOËL; SANCHEZ; FATHIFAZL, 2016). Dentre os materiais de construção o concreto é o mais utilizado, sendo produzidas anualmente cerca de 12,5 bilhões de toneladas, devendo chegar a 16 bilhões de toneladas por ano até 2050 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O concreto é definido como um material compósito, constituído de fragmentos de agregados envolvidos por um aglomerante (pasta de cimento). Tradicionalmente, os materiais necessários à sua produção são: cimento Portland, água e agregados miúdo e graúdo, podendo haver ou não a presença de aditivos químicos e adições minerais.

A extração de matéria-prima para a produção de cimento consome grandes quantidades de recursos naturais e, além disso, o processo de clínquerização é responsável por cerca de 5% da emissão global de CO₂ proveniente da ação humana. Aitcin (2000) destaca que, embora o cimento ainda seja essencial para a produção de concretos, nem sempre é o material mais importante da mistura. A utilização de adições minerais, em quantidades significativas, tem se tornado cada vez mais frequente, bem como o uso de aditivos químicos. Dessa forma, o estudo da tecnologia do concreto torna-se cada vez mais necessário para entender as interações entre os diversos materiais empregados em sua produção.

As adições minerais, de origem natural ou como subproduto industrial, podem ser incorporadas ao concreto como substituição parcial do cimento Portland. A utilização dessas adições reduz o consumo de cimento na mistura e possibilita uma destinação adequada a subprodutos industriais que seriam descartados na natureza, contribuindo para a sustentabilidade do material.

Além dos benefícios ambientais, a redução do consumo de cimento no concreto minimiza problemas como retração e, conseqüentemente, aumenta sua durabilidade (NOËL; SANCHEZ, FATHIFAZL, 2016). Com a incorporação das adições minerais, há um aumento da quantidade de finos na mistura, reduzindo a porosidade da matriz cimentícia. Ademais, as adições podem ter hidraulicidade latente com o cimento Portland, reagindo com o hidróxido de cálcio (proveniente da hidratação do cimento) e formando silicato de cálcio hidratado, responsável pela resistência do concreto.

Os benefícios proporcionados às principais propriedades do concreto no estado endurecido, resistência à compressão e durabilidade, fazem com que o uso de adições minerais seja amplamente difundido na produção de concretos de alta resistência.

Outro mecanismo utilizado para aumentar a sustentabilidade do concreto e otimizar suas propriedades é o empacotamento de partículas, o qual consiste na seleção adequada de materiais de forma que os vazios entre duas partículas sejam preenchidos por grãos menores, que terão seus vazios preenchidos por grãos ainda menores e assim sucessivamente. A aplicação desse processo promove o refinamento dos poros da matriz cimentícia, podendo haver inclusive sua desconexão a depender da densidade de empacotamento, reduzindo a permeabilidade do concreto e aumentando sua resistência mecânica e durabilidade.

A escolha adequada dos materiais granulares, visando a otimização do empacotamento, permite a redução do consumo de cimento na mistura por meio de sua substituição parcial por adições minerais. Dessa forma, pode-se otimizar o aglomerante a partir de misturas binárias, ternárias ou quaternárias de cimento Portland e adições minerais, aplicando o conceito de empacotamento de partículas.

Diante do exposto, este trabalho aplicou o conceito de empacotamento de partículas na otimização de aglomerantes voltados para a produção de concretos de alta resistência. Visando a aplicação dos resultados na prática da construção civil, foram produzidas misturas ternárias e quaternárias de cimento Portland com adições minerais usualmente comercializadas no Brasil: sílica ativa, metacaulim e fíler calcário. A incorporação da cinza de casa de arroz também foi avaliada devido à grande produção nacional de arroz, sendo necessária uma destinação adequada aos resíduos desse processo.

1.1 JUSTIFICATIVA

A construção civil tem grande importância para o desenvolvimento socioeconômico de uma região devido à sua elevada capacidade para geração de empregos. Simultaneamente, o setor é apontado como um dos maiores consumidores de recursos naturais, além de ser responsável pela emissão anual de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera.

Atualmente, discussões acerca de como desacelerar a evolução do aquecimento global e minimizar suas consequências promoveram o desenvolvimento de pesquisas que buscam soluções sustentáveis para a produção de materiais consagradamente poluentes. Neste contexto, a tecnologia de materiais tem estudado mecanismos que promovam a redução do consumo de cimento na produção de concreto, tornando sua fabricação mais ecologicamente adequada.

Dentre os mecanismos avaliados para promover a sustentabilidade do concreto, tem-se a substituição parcial do cimento Portland por adições minerais. Este processo reduz o consumo de cimento na mistura e dá uma destinação adequada a subprodutos industriais que seriam descartados no meio ambiente.

Além da substituição parcial do cimento Portland, pode-se otimizar a composição do aglomerante por meio do empacotamento de partículas, reduzindo ainda mais o consumo de cimento na mistura. Outro grande benefício promovido pelo empacotamento é a redução da porosidade, possibilitando a obtenção de maiores resistências à compressão, mesmo com um menor consumo de material cimentício.

Apesar dos benefícios do empacotamento de partículas, tanto em relação à sustentabilidade quanto para a otimização de propriedades do concreto como resistência mecânica e durabilidade, esse conceito não é amplamente difundido na prática da construção civil. Não há uma normatização, ou procedimento claramente definido, para a aplicação do empacotamento na produção de concretos e a maior parte da literatura aborda este assunto voltado para a produção de materiais (ou concretos) refratários. Evidencia-se, então, a relevância da realização de mais estudos sobre o tema, de modo que o empacotamento de partículas possa ser incorporado como uma prática recorrente do setor construtivo.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho consiste em avaliar o efeito do empacotamento de partículas na otimização de aglomerantes constituintes de concretos de cimento Portland, produzidos a partir de misturas ternárias e quaternárias de cimento e adições minerais, para aplicação em concretos de alta resistência.

Os objetivos específicos são:

- Aplicar o modelo de empacotamento de Alfred para a otimização dos aglomerantes constituintes de concretos de alta resistência.
- Avaliar o efeito do empacotamento de partículas nas propriedades do estado fresco e na microestrutura das pastas de aglomerantes constituintes dos concretos de alta resistência.
- Avaliar o impacto do empacotamento de partículas, aplicado ao aglomerante, para a redução do consumo de cimento dos concretos produzidos a partir dos aglomerantes ternários e quaternários otimizados.

- Avaliar o efeito dos aglomerantes otimizados pelo empacotamento nas propriedades do concreto de alta resistência nos estados fresco e endurecido.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se estruturado em 5 capítulos, descritos a seguir.

O Capítulo 1 aborda a introdução do trabalho, na qual apresenta-se uma breve contextualização do assunto abordado. Também são expostos a justificativa e os objetivos geral e específicos da pesquisa.

A revisão bibliográfica está disposta no Capítulo 2, o qual trata dos principais tópicos referentes a este trabalho. São apresentados os conceitos e propriedades dos concretos convencionais e de alta resistência, além de uma exposição acerca da sustentabilidade na produção de concretos. Discorre-se, ainda, sobre a aplicação do empacotamento de partículas em misturas de concreto e apresentam-se os conceitos de reologia.

O Capítulo 3 contempla a metodologia utilizada na pesquisa, apresentando os materiais necessários e os métodos de ensaio considerados, com suas respectivas normas de referência.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e as discussões pertinentes ao trabalho. Expõe-se a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, a composição dos concretos de referência e a otimização dos aglomerantes constituintes dos concretos com base no conceito de empacotamento de partículas, aplicando o modelo de Alfred. Mostra-se, ainda, a composição dos concretos produzidos a partir dos aglomerantes otimizados, os resultados referentes às pastas de aglomerantes e os resultados relacionados às propriedades dos concretos, de referência e otimizados, nos estados fresco e endurecido.

Na sequência, o Capítulo 5 traz as conclusões da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são dispostas as referências bibliográficas consultadas para a realização deste trabalho e os apêndices com as devidas análises estatísticas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo de revisão bibliográfica aborda os principais aspectos necessários para a compreensão do trabalho. É apresentado o conceito de concreto, juntamente com um breve histórico e a relação dos principais materiais utilizados em sua composição. Consta também a evolução do concreto de resistência normal para o concreto de alta resistência, abordando a utilização de adições minerais, e a relação concreto-sustentabilidade. Por fim, apresenta-se o conceito de empacotamento de partículas, bem como o modelo a ser utilizado (modelo de Alfred) e os fatores que influenciam no empacotamento.

2.1 O CONCRETO

O concreto de cimento Portland é o material de construção civil mais utilizado no mundo. Jiao *et al.* (2017) estimaram uma produção de cerca de 30 bilhões de metros cúbicos em 2015. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a demanda por concreto deve chegar a 16 bilhões de toneladas por ano até 2050.

Diversos fatores explicam a ampla utilização desse material. Em primeiro lugar cita-se a elevada resistência do concreto, inclusive em ambientes úmidos. Com a limitação da fissuração do concreto e realização de cura adequada do material garante-se a durabilidade da estrutura, prolongando sua vida útil e, assim, reduzindo custos com manutenção. Um segundo fator de interesse é a facilidade em se moldar o concreto em variadas formas, permitindo maior liberdade arquitetônica. Essa característica é possível devido à plasticidade que o material apresenta no estado fresco. Pode-se destacar ainda o baixo custo de produção do concreto, já que a maior parte dos materiais utilizados em sua composição são facilmente encontrados em todo o mundo.

Mehta e Monteiro (2014) definem o concreto como um compósito constituído por partículas ou fragmentos de agregados envolvidos por um aglomerante (pasta de cimento). Usualmente os materiais componentes do concreto são: água, cimento Portland, agregados miúdo e graúdo, podendo haver ou não a presença de aditivos químicos e adições minerais.

2.1.1 Breve histórico

As características desejadas em materiais para uso estrutural são: resistência mecânica, durabilidade e disponibilidade. Os primeiros materiais a serem utilizados pelo homem para essa finalidade foram a rocha, a madeira e as ligas metálicas (CLÍMACO, 2008). As rochas apresentam elevada resistência à compressão e durabilidade, mas são difíceis de serem

trabalhadas e transportadas. Já a madeira tem resistência e durabilidade variáveis com diversos fatores, além de limitações impostas por questões ambientais. Quanto às ligas metálicas, estas possuem alta resistência à tração e à compressão, mas apresentam problemas de durabilidade quando submetidas a ambientes favoráveis à corrosão.

De acordo com Clímaco (2008), um grande avanço na área de materiais utilizados para fins estruturais foi possível graças ao desenvolvimento dos aglomerantes hidráulicos. Em contato com a água o aglomerante hidráulico endurece, tornando possível a produção de uma rocha artificial. A esta mistura são acrescentados materiais "inertes"(agregados) para aumentar o volume, garantir estabilidade dimensional e reduzir custos. Esse material –o concreto– apresentava resistência à compressão, trabalhabilidade adequada e disponibilidade dos componentes necessários à sua produção. No entanto, a resistência à tração era insuficiente para a sua ampla utilização nas estruturas. Surgiu, então, o concreto armado, como uma solução para aproveitar a resistência à compressão da rocha artificial (concreto) e melhorar sua resistência à tração por meio do uso de barras de aço perfeitamente aderidas.

Carvalho e Figueiredo Filho (2014) elencaram cronologicamente alguns fatos relevantes para o início da utilização do concreto armado:

- 1824 - Invenção do cimento Portland pelo francês J. Aspdin.
- 1855 - O francês J. L. Lambot constrói um barco com argamassa de cimento reforçada com ferro.
- 1861 - F. Coignet publica os princípios básicos para as construções em concreto armado.
- 1867 - F. Coignet apresenta, na Exposição Internacional de Paris, vigas e tubos de concreto armado.
- 1900 - Início do desenvolvimento da teoria do concreto armado por Koenen, enquanto Morsch desenvolve essa teoria baseado em ensaios.
- 1904 - São publicadas, na Alemanha, as “Instruções provisórias para preparação, execução e ensaio de construções de concreto armado”.

Clímaco (2008) aborda o desenvolvimento do concreto armado no Brasil, o qual se deu de maneira acelerada a partir do século XX:

- 1908 - Construção da primeira ponte de concreto armado, no Rio de Janeiro.
- 1912 - Companhia Construtora de Concreto Armado - Primeira firma de engenharia a construir edificações com estruturas de concreto armado.

- 1955 a 1960 - Construção de Brasília. As edificações e monumentos de Brasília, com estruturas em concreto armado e protendido em diversos formatos, marcaram o desenvolvimento dessas soluções construtivas.

Giongo (2019) menciona que o brasileiro Emílio Henrique Baumgart foi o responsável pelo projeto da ponte sobre o Rio do Peixe, em 1928, construída entre os municípios de Joaçara e Herval do Oeste, em Santa Catarina. Foi utilizado o método de balanços sucessivos, pioneiro à época, além de estabelecer o recorde mundial de comprimento de vão para vigas em concreto armado (68 m). Outra obra relevante de autoria de Baumgart foi o Edifício “A Noite”, no Rio de Janeiro, inaugurado em 1929. Com 22 andares já foi considerado o edifício, em concreto armado, mais alto do mundo.

2.1.2 Materiais constituintes

Os principais materiais constituintes do concreto são cimento Portland, agregados miúdos e graúdos, e água. Pode haver ainda a incorporação de aditivos químicos e adições minerais. Estes materiais são descritos, brevemente, nos tópicos que seguem.

2.1.2.1 Cimento Portland

De acordo com a organização Cimento.Org (2014), a produção mundial de cimento em 2013 foi de cerca de 4 bilhões de toneladas. A China ocupava o primeiro lugar no *ranking* com uma fabricação de 2,3 bilhões de toneladas. Já o Brasil encontrava-se em quinto lugar com uma produção de 70 milhões de toneladas.

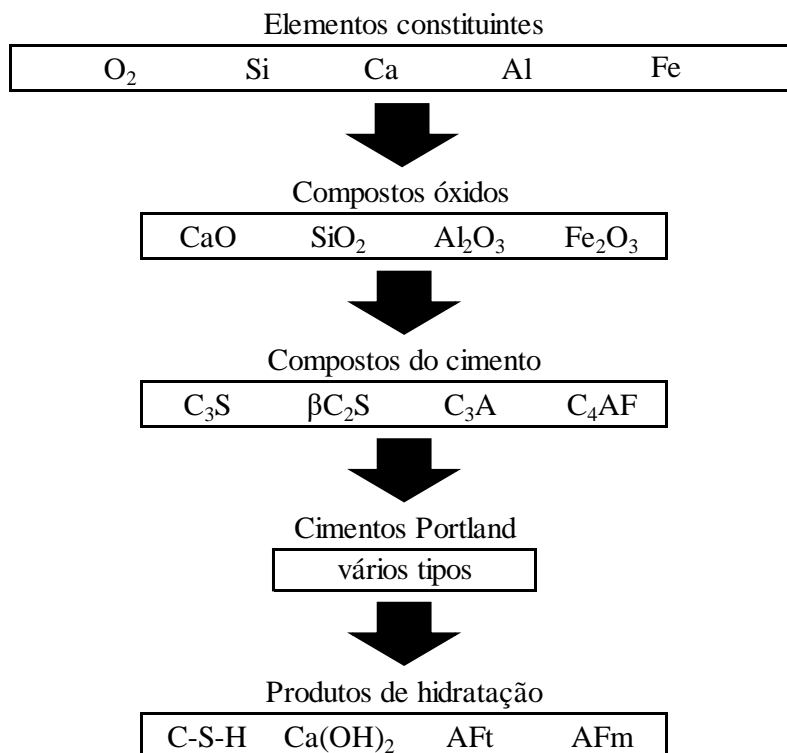
O consumo nacional em 2019 foi próximo de 54,5 milhões de toneladas (CIMENTO.ORG, 2020). Ainda segundo a organização, a indústria cimenteira brasileira é moderna e tecnologicamente atualizada, alcançando um consumo médio de energia por tonelada de cimento produzido de 107 kW/h. Além disso, de acordo com o *roadmap* publicado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2019) em parceria com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) a indústria brasileira de cimento apresenta um dos menores índices de emissão específica de dióxido de carbono (CO₂) no mundo, chegando a 564 kg de CO₂ por tonelada de cimento em 2014.

O cimento Portland foi patenteado em 1824 por Joseph Aspdin, pedreiro e construtor. O cimento era produzido pelo aquecimento de uma mistura de argila finamente moída e calcário até a extinção do CO₂, que ocorre em temperatura inferior à necessária para formação do clínquer (NEVILLE, 2016). O nome cimento Portland foi atribuído devido à semelhança da cor do cimento endurecido com a pedra de Portland.

A NBR 16697:2018 (ABNT, 2018, p. 2) define o cimento Portland como “ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos nesta Norma”. O cimento pode ser descrito como um material seco e finamente pulverizado que em contato com a água desenvolve propriedades ligantes como resultado das reações químicas de hidratação. Quando esses produtos de hidratação são estáveis em ambiente aquoso, o cimento é dito hidráulico.

O cimento anidro é um pó cinza composto por partículas variando de 1 a 50 μm , produzido a partir da moagem do clínquer com adição de pequenas quantidades de sulfato de cálcio. É possível ainda a obtenção de cimentos especiais com a incorporação de adições minerais, tais como fíler, escória e pozolanas. Os principais constituintes químicos do cimento são: silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferro aluminato tetracálcico (C_4AF). Neville (2016) apresenta um esquema (Figura 1) para a representação da produção e hidratação do cimento Portland. Destaca-se que os produtos de hidratação de maior importância para o desenvolvimento da resistência mecânica e durabilidade do cimento são o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e um gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Ademais, há a formação de etringita (AFt) e monossulfoaluminato de cálcio (AFm), aluminatos responsáveis pelo enrijecimento e pega do cimento Portland.

Figura 1 - Esquema da produção e hidratação do cimento Portland



Fonte: Adaptado de Neville (2016)

2.1.2.2 Agregados

Os agregados ocupam cerca de 3/4 do volume do concreto, sendo inicialmente considerados materiais inertes e utilizados principalmente por razões econômicas, por serem mais baratos do que o cimento (NEVILLE, 2016). No entanto, o autor afirma que os agregados não são verdadeiramente inertes, pois suas propriedades físicas, térmicas ou até mesmo químicas têm influência no desempenho do concreto.

O agregado é definido como um material granular utilizado juntamente com um meio cimentício para a produção de concretos ou argamassas. O termo agregado graúdo refere-se aqueles com dimensões superiores a 4,75 mm, enquanto o termo agregado miúdo trata daqueles com dimensões entre 4,75 mm e 75 µm. Os agregados podem ser naturais, como a pedra britada, ou artificiais como a escória de alto-forno. Neville (2016) relata o uso de agregados reciclados de concreto, proveniente de resíduos de construção e demolição, em obras de pavimentação e em concretos não estruturais.

O agregado exerce grande influência na massa unitária, no módulo de elasticidade e na estabilidade dimensional do concreto. Dessa forma, suas características físicas, como volume, tamanho e distribuição dos poros são mais relevantes do que suas propriedades químicas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Normalmente os agregados são a fase mais resistente do concreto, interferindo indiretamente na resistência à compressão do compósito. Partículas de maiores dimensões ou alongadas tendem a formar uma lâmina de água espessa na interface entre agregado e pasta (zona de transição), elevando a relação água/cimento no local. Dessa forma, tem-se uma região no concreto mais suscetível a fissurações e que contribui para a redução da sua resistência mecânica. Em relação aos concretos de alta resistência, a matriz de cimento é tão otimizada que os agregados passam a ser a fase mais frágil.

2.1.2.3 Água de amassamento

A água de amassamento é essencial para garantir a trabalhabilidade da mistura, além de ser responsável pela hidratação do cimento. Neville (2016) menciona ainda outros aspectos influenciados pela água: pega, exsudação, retração por secagem, fluência, manchamento superficial, corrosão das armaduras, gelo e degelo, e reação álcali-agregado. O autor afirma que a água de amassamento não deve conter substâncias orgânicas indesejáveis e nem constituintes inorgânicos em excesso.

A presença de impurezas em excesso na água de amassamento pode afetar a resistência à compressão do concreto, o tempo de pega do cimento, causar eflorescência e a corrosão de armaduras. No geral, exige-se que a água utilizada em misturas de concreto seja adequada para o consumo humano. Apesar disso, Mehta e Monteiro (2014) afirmam que uma água imprópria para consumo humano não deve ser descartada de imediato quanto a seu uso como água de amassamento. Além disso, águas provenientes de mineração, operações industriais ou recicladas de cidades podem ser utilizadas satisfatoriamente em misturas de concreto.

A NBR 15900-1:2009 (ABNT, 2009) traz os requisitos necessários para que a água seja considerada adequada para a produção do concreto. Ademais, Mehta e Monteiro (2014) apresentam um procedimento para verificar a adequabilidade da água para sua utilização em misturas de concreto. Os autores sugerem que sejam realizados ensaios comparativos para o tempo de pega do cimento e a resistência à compressão de corpos de prova de argamassa, entre as misturas feitas com a água de qualidade desconhecida e a água de referência considerada limpa. A resistência à compressão dos corpos de prova moldados com água de qualidade desconhecida deve atingir pelo menos 90% daquela obtida para os corpos de prova moldados com a água de referência. Além disso, o tempo de pega do cimento não pode ser afetado.

2.1.2.4 Aditivos químicos e adições minerais

Os aditivos químicos e as adições minerais são materiais, além do cimento, agregados e água, adicionados ao concreto, ou argamassa, imediatamente antes ou durante sua mistura. Esses materiais são amplamente utilizados pois, além de contribuírem para a produção de um concreto mais sustentável (as adições minerais muitas vezes são subprodutos industriais), atuam beneficiando diversas características do compósito, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Neville (2016) define aditivo como um produto químico adicionado ao concreto em quantidades máximas de, usualmente, 5% em relação à massa de cimento. Tem-se como objetivo a obtenção de alterações específicas nas propriedades convencionais do concreto.

Partículas finas e insolúveis, de origem natural ou como subproduto industrial, são denominadas de adições minerais (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O efeito físico dessas adições nas propriedades reológicas do concreto no estado fresco é evidente logo após a

finalização da mistura, enquanto os efeitos químicos demandam mais tempo para serem notados.

2.1.2.4.1 Aditivos químicos

Os aditivos químicos costumam ter um preço elevado, o que nem sempre significa uma despesa adicional. De acordo com Neville (2016), a sua utilização pode promover redução no consumo de cimento, menor custo de mão de obra para adensamento e melhoria da trabalhabilidade sem a necessidade de medidas suplementares, gerando economia.

Mehta e Monteiro (2014) agrupam os aditivos químicos em dois grupos: tensoativos e reguladores de pega. Os tensoativos abrangem os aditivos incorporadores de ar e os redutores de água; os reguladores de pega podem tanto retardar quanto acelerar a pega do cimento.

Os incorporadores de ar tendem a aumentar a porosidade do concreto e reduzir sua resistência mecânica. No entanto, em concretos com baixo consumo de cimento, os incorporadores de ar melhoram a trabalhabilidade e o adensamento da mistura, elevando a resistência da zona de transição e, conseqüentemente, a resistência mecânica do compósito (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os redutores de água (aditivos plastificantes e superplastificantes) baseiam-se na dispersão das partículas de cimento, aumentando seu grau de hidratação e elevando tanto a resistência mecânica inicial quanto a resistência mecânica final do concreto. A redução do teor de água na mistura varia de 5 a 10%, alcançando, em alguns casos, valores de 15% para concretos de alta trabalhabilidade (NEVILLE, 2016).

Pode-se pensar a utilização dos redutores de água de duas maneiras: redução da relação água/cimento enquanto a trabalhabilidade é mantida, possibilitando a produção de concretos de alta resistência à compressão; ou aumento da trabalhabilidade para uma relação água/cimento fixa. Os concretos produzidos com esses aditivos costumam apresentar baixa segregação e boa fluidez. Em relação às propriedades no estado endurecido, os aditivos redutores de água contribuem para a redução da permeabilidade e para o aumento da resistência à compressão do concreto.

Os aditivos plastificantes são classificados pela NBR 11768-1:2019 (ABNT, 2019) como aditivos redutores de água tipo 1 (RA1), sendo definidos como aqueles que, sem alterar a consistência do concreto, permitem reduzir a quantidade de água; ou que, sem modificar o conteúdo de água, altera a consistência do concreto tornando-o mais fluido e aumentando seu abatimento.

A NBR 11768-1:2019 (ABNT, 2019) classifica ainda os aditivos superplastificantes como aditivos redutores de água tipo 2 (RA2), sendo definidos como aqueles que, sem alterar a consistência, permite maior redução de água no concreto quando comparado ao RA1; ou que, sem modificar o conteúdo de água, aumenta consideravelmente o abatimento e a fluidez do concreto.

Os aditivos aceleradores de pega têm grande aplicação em indústrias de pré-moldados, onde há o interesse em uma rápida desforma. Os retardadores de pega prolongam o tempo pelo qual o concreto pode ser transportado, lançado e adensado, encontrando vasta aplicação em concretagens executadas em alta temperatura ambiente.

2.1.2.4.2 Adições minerais

A utilização de adições minerais como substituição parcial do cimento Portland se deu, inicialmente, por razões econômicas, pois esses produtos exigiam menos beneficiamento ou eram resíduos de processos industriais. Além disso, o aumento do custo da energia na década de 1970 favoreceu ainda mais a utilização desses recursos (NEVILLE, 2016).

Atualmente, sabe-se que a produção do cimento Portland gera enormes quantidades de CO₂, sendo um processo muito prejudicial para o meio ambiente. Dessa forma, o uso de adições minerais em substituição ao cimento ganhou visibilidade referente a uma produção de concreto mais sustentável, além de ser uma alternativa para a deposição de resíduos industriais.

Além das motivações econômicas e ambientais, o uso de adições minerais permite o aprimoramento de propriedades do concreto como trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade. Esse conjunto de benefícios técnicos, econômicos e ambientais, além da otimização do material, fez com que a utilização das adições minerais na produção de concretos se tornasse cada vez mais comum.

As adições minerais são incorporadas ao concreto em grandes quantidades, de 20 a 70% da massa total de material cimentício (MEHTA; MONTEIRO, 2014). As pozolanas, naturais ou artificiais, são materiais cimentícios, de forma potencial, que contêm sílica em forma reativa (NEVILLE, 2016). A NBR 16697:2018 (ABNT, 2018, p. 3) define materiais pozolânicos como:

"Materiais silicosos ou silicoaluminosos, que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade hidráulica, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, a temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentícias".

Mehta e Monteiro (2014) descrevem que quando utilizadas como substituição parcial do cimento Portland, as adições tendem a reduzir a resistência mecânica inicial do concreto. No entanto, as adições minerais podem reagir com o hidróxido de cálcio, produto de hidratação do cimento, e formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Este último é responsável por grande parte da resistência mecânica da pasta de cimento hidratada devido às forças de Van der Waals. Ademais, a formação de C-S-H adicional pode levar a uma redução da porosidade da matriz e da zona de transição, reduzindo a permeabilidade, e aumentando a durabilidade e a resistência mecânica final do compósito.

2.2 DO CONCRETO CONVENCIONAL AO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

A construção de edifícios altos com a utilização do concreto convencional evidenciou algumas limitações deste material, como a necessidade de pilares com seções transversais mais robustas, especialmente nos andares inferiores, reduzindo consideravelmente a área útil do espaço. Além disso, algumas estruturas passaram a apresentar problemas recorrentes de durabilidade, sendo necessário um maior número de manutenções corretivas ao longo da vida útil da edificação. Vale mencionar também a limitação do concreto convencional quanto à sustentabilidade do material, já que, normalmente, não são utilizadas adições minerais em substituição parcial ao cimento na sua composição.

O avanço na tecnologia dos materiais possibilitou o aprimoramento do concreto convencional, de forma que este alcançasse maiores valores de resistência à compressão e apresentasse maior durabilidade. O desenvolvimento dos aditivos superplastificantes permitiu a produção de concretos de trabalhabilidade adequada com uma menor relação água/cimento. A utilização de adições minerais contribui para a sustentabilidade do compósito, promovendo o refinamento dos poros do concreto e, quando reativas, formam produtos de hidratação responsáveis pelo ganho de resistência mecânica do material. A utilização conjunta de aditivos superplastificantes e adições minerais é essencial para a produção dos concretos de alta resistência.

O concreto de alta resistência é constituído, essencialmente, pelos mesmos materiais utilizados na produção de um concreto convencional e pode ser considerado como um concreto de alto desempenho. Este último subdivide-se em três categorias: concretos de alta resistência, de alta durabilidade e autoadensáveis (ILLSTON; DOMONE, 2001). Os autores definem que os concretos de alto desempenho devem ter características que permitam sua produção e lançamento do mesmo modo que os convencionais, considerando um controle de

qualidade mais rigoroso e seleção de materiais mais criteriosa. Neville (2016) destaca ainda que a cura úmida deve ser realizada de maneira adequada.

A NBR 8953:2015 (ABNT, 2015) divide os concretos para fins estruturais em dois grupos de acordo com a classe de resistência à compressão, sendo os concretos do grupo II considerados de alta resistência, variando de 55 a 100 MPa. Illston e Domone (2001) definem o concreto de alta resistência como aquele que apresenta valores de resistência à compressão significativamente superiores às utilizadas comumente e indicam o valor mínimo de 80 MPa, assim como Neville (2016).

Dos materiais constituintes do concreto, seja este convencional ou de alta resistência, a água é o componente responsável pela hidratação do cimento Portland e por fornecer trabalhabilidade à mistura. No entanto, as partículas finas de cimento tendem a formar aglomerados, aprisionando água em seu interior de maneira que esta se torna indisponível para aumentar a fluidez do concreto.

Para garantir a trabalhabilidade da mistura seria necessário aumentar a quantidade de água, elevando a permeabilidade do concreto e reduzindo sua resistência mecânica. De acordo com Aitcin (1998) é impossível produzir um cimento Portland que não forme aglomerados, sendo necessária a utilização de aditivos químicos que reduzam a tendência do cimento em se aglomerar e permitam a redução da quantidade de água de amassamento.

Por volta de 1940, descobriu-se que algumas moléculas orgânicas, de propriedade dispersante, poderiam ser utilizadas para neutralizar as cargas elétricas presentes na superfície das partículas de cimento, reduzindo sua tendência de formar aglomerados (AITCIN, 1998). Atualmente essas moléculas são conhecidas como redutores de água, plastificantes ou agentes dispersantes. A utilização do aditivo redutor de água faz com que uma maior área superficial do cimento fique disponível para a hidratação, reduzindo a quantidade de água necessária para a dispersão das partículas de cimento.

Durante muito tempo o setor da construção civil mostrou-se satisfeito com os aditivos redutores de água disponíveis. No entanto, no final da década de 1960, o Japão começou a estudar os efeitos dispersantes do naftaleno sulfonado formaldeído condensado e a Alemanha passou a utilizar uma nova linha de aditivos redutores de água mais potentes (AITCIN, 1998). Atualmente esses produtos são conhecidos como superplastificantes, redutores de água de alto desempenho ou fluidificantes.

Com a disseminação do uso de superplastificantes, percebeu-se que era possível atingir valores para a relação água/cimento (a/c) muito baixos e ainda assim assegurar a trabalhabilidade da mistura, o que é essencial para a produção de concretos de alta resistência.

Além destes aditivos, a utilização de adições minerais também contribui para a produção desses concretos.

Misturas de concreto com elevado teor de cimento tendem a fissurar devido às retrações térmica e por secagem. A solução encontrada foi o uso de adições minerais em substituição parcial ao cimento Portland, para atingir resistências superiores à fissuração e garantir a integridade do compósito. Mehta e Monteiro (2014) relatam que misturas de cimento Portland, sílica ativa, superplastificante e agregados com elevada densidade de empacotamento têm sido comercializadas na Europa para a produção de concretos de ultra-alta resistência à compressão (superiores a 200 MPa).

Para a produção de concretos de alta resistência são necessários: agregados de boa qualidade e com diâmetro máximo reduzido, baixa relação água/cimento, cimento Portland em consumos elevados (entre 450 e 550 kg/m³), sílica ativa entre 5 e 15% da massa total de material cimentício, aditivo superplastificante em alta dosagem (entre 5 e 15 litros por metro cúbico de concreto) e, eventualmente, outras adições minerais (NEVILLE, 2016). Não são indicados consumos de cimento superiores a 600 kg/m³ devido ao aumento do custo, maior probabilidade de problemas com retração e a existência de um platô de resistência em que o aumento da quantidade de cimento não gera mais aumento na resistência à compressão do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O concreto de alta resistência está relacionado com uma reduzida porosidade, a qual é atingida com a utilização de partículas graduadas até a menor dimensão (como as adições minerais), que tenham capacidade de preencher os vazios entre as partículas de cimento e de agregados. Além disso, a mistura deve ter trabalhabilidade adequada para que os sólidos se dispersem e promovam um denso empacotamento, o que pode ser feito com a incorporação de aditivos superplastificantes compatíveis com o cimento Portland utilizado.

Todos esses fatores influenciam no elevado custo de um concreto de alta resistência. No entanto, deve-se considerar que seu uso pode reduzir os custos com estrutura em uma obra, já que há a possibilidade de seções mais delgadas, reduzindo o peso próprio dos elementos estruturais e carregando menos os elementos de fundação. Além disso, vigas e pilares mais esbeltos permitem a construção de ambientes com maior área útil.

Destaca-se ainda que o uso de concretos de alta resistência garante maior durabilidade da estrutura, já que possuem uma baixa relação água/cimento e, conseqüentemente, reduzida porosidade e permeabilidade. Elevando a durabilidade de uma estrutura, reduz-se a necessidade de manutenções preventivas e evitam-se manutenções corretivas, diminuindo o custo de um empreendimento a longo prazo.

2.3 O CONCRETO COM ADIÇÕES MINERAIS

As adições minerais encontram vasta aplicação na produção de concretos de alta resistência, já que otimizam sua resistência mecânica e durabilidade, principais propriedades do compósito no estado endurecido. Ademais, tem-se tornado evidente a necessidade de se produzir materiais de construção civil de maneira mais sustentável. Neste contexto, as adições minerais, incorporadas como substituição parcial do cimento Portland, promovem a redução da pasta de cimento na mistura e contribuem para uma menor emissão de CO₂ proveniente do processo de clínquerização.

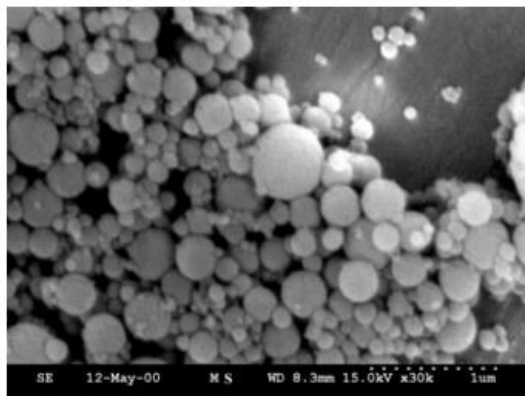
Diante do exposto, discutem-se os aspectos referentes ao comportamento do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, produzido com as adições minerais utilizadas neste trabalho. Além disso, trata-se do concreto com a incorporação de mais de uma adição mineral e, por fim, aborda-se o uso das adições no âmbito da sustentabilidade.

2.3.1 A sílica ativa no concreto

Mehta e Monteiro (2014) descrevem a sílica ativa como um pó extremamente fino, constituído por esferas de diâmetro em torno de 0,1 µm e área de superfície de 20 m²/g. Trata-se de um resíduo, de custo elevado, da produção de silício ou de ligas de ferrosilício, obtido a partir do quartzo de alto grau de pureza e de carvão em forno elétrico a arco submerso (NEVILLE, 2016).

As partículas de sílica ativa preenchem os espaços entre as partículas de cimento, aprimorando seu empacotamento. Além disso, é um material altamente pozolânico, mas de difícil manuseio e aumenta a quantidade de água necessária à mistura de concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A Figura 2 apresenta uma micrografia das partículas de sílica ativa.

Figura 2 - Micrografia eletrônica de varredura da sílica ativa



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Neville (2016) relata que a massa específica da sílica ativa atinge valores em torno de $2,20 \text{ g/cm}^3$, enquanto a massa unitária é da ordem de $0,20$ a $0,30 \text{ g/cm}^3$. O autor menciona que, embora seja usualmente incorporada à mistura na betoneira, alguns países produzem cimentos compostos com sílica ativa em quantidades variando de 6,5 a 8%, em massa.

A sílica ativa é amplamente utilizada em concretos de alto desempenho e possui elevada reatividade com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento. Além de sua reação pozolânica, a sílica ativa propicia um efeito físico na mistura, já que suas partículas extremamente finas e esféricas se acomodam na interface entre a pasta de cimento e o agregado, promovendo um empacotamento de partículas.

A elevada finura da sílica ativa também contribui para a redução da exsudação, diminuindo a quantidade de água depositada abaixo das partículas de agregado graúdo (NEVILLE, 2016). Desse modo, reduz-se a porosidade da zona de transição e, conseqüentemente, do concreto.

Teores de sílica ativa inferiores a 5% da massa total de material cimentício não promovem elevada resistência mecânica do concreto. Neville (2016) explica que essa quantidade de adição é insuficiente para cobrir a superfície das partículas de agregado graúdo. Em contrapartida, teores muito além de 10% também não são muito benéficos pois o excesso de sílica não consegue se depositar na superfície dos agregados.

É essencial que a sílica ativa seja uniformemente distribuída no concreto, sendo necessário o aumento no tempo de mistura, especialmente quando a sílica for utilizada em sua forma densificada (NEVILLE, 2016).

As partículas de sílica ativa são muito finas e possuem elevada área superficial, aumentando a demanda de água de amassamento. Em certos casos, é necessário o uso de aditivo superplastificante, o qual tem sua eficiência melhorada pela sílica ativa (NEVILLE, 2016). Dessa forma, o uso conjunto de sílica e superplastificante permite a produção de concretos com baixa relação água/cimento e adequada trabalhabilidade.

Hermann *et al.* (2016) afirmam que teores de sílica entre 5 e 15% contribuem para melhorar a trabalhabilidade da mistura, já que suas partículas ocupam os vazios entre aquelas do cimento, liberando a água aprisionada para atuar na fluidificação do compósito. Por outro lado, teores acima de 15% levam a um grande aumento na quantidade de finos, elevando a necessidade de água de amassamento. Ainda em relação ao estado fresco, a incorporação de sílica ativa propicia uma mistura coesa e com reduzida, ou mesmo inexistente, exsudação. A elevada coesão do concreto com sílica ativa permite sua utilização em bombeamentos e em concretagens submersas. A redução da exsudação evita a presença de água ao redor das

partículas de agregados graúdos, reduzindo a porosidade da região de interface pasta-agregado e, assim, melhorando a resistência mecânica e diminuindo a permeabilidade dos concretos produzidos com sílica ativa (NEVILLE, 2016). No entanto, dado o tamanho reduzido das partículas de sílica e sua elevada área superficial específica, Hooton¹ (1993 *apud* NEVILLE, 2016) menciona que a retração de concretos produzidos com sílica ativa é cerca de 15% maior do que a de concretos produzidos apenas com cimento Portland.

A redução da relação água/cimento, a reação pozolânica da sílica ativa e seu efeito físico contribuem para o aumento da resistência mecânica do concreto. Sua elevada finura proporciona pontos de nucleação, acelerando a hidratação do cimento e contribuindo para o desenvolvimento da resistência inicial. O aumento na velocidade dessas reações promove o aumento do calor de hidratação e o rápido consumo da água de amassamento. Além disso, a densa microestrutura da pasta de cimento com sílica ativa dificulta a penetração de água em direção ao cimento não hidratado ou às partículas de sílica, fazendo com que o acréscimo da resistência em idades posteriores não seja tão significativo quanto nas idades iniciais (NEVILLE, 2016).

Medeiros, Raisdorfer e Hoppe Filho (2017) compararam a resistência à compressão de concretos convencionais e concretos produzidos com substituição parcial do cimento por sílica ativa ou adição da sílica ativa à mistura. Os autores concluíram que a substituição, em massa, do cimento Portland por sílica (em teor de 10%) aumentou a resistência de 55 para 62 MPa, enquanto a adição de 10% de sílica, em massa, elevou a resistência de 55 para 70 MPa.

Em relação à porosidade, a continuidade da reação pozolânica da sílica ativa promove a redução das dimensões dos poros da pasta hidratada, reduzindo sua permeabilidade. Para tal, é essencial a realização de uma cura prolongada em concretos com sílica ativa.

A cura adequada permite a continuidade das reações de hidratação e a redução da permeabilidade do concreto, sendo que aqueles produzidos com sílica ativa são menos permeáveis do que os concretos convencionais. Estando a baixa permeabilidade diretamente relacionada com uma elevada durabilidade, pode-se dizer que concretos com sílica ativa são mais duráveis do que os concretos convencionais. Khayat e Aitcin² (1992 *apud* NEVILLE, 2016) relataram que a adição de 5% de sílica ativa permitiu a redução do coeficiente de

¹HOOTON, R. D. Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity. **ACI Materials Journal**, v. 90, n. 2, p. 143-151, 1993.

²KHAYAT, K. H; AITCIN, P. C. Silica fume in concrete – An overview. In: Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 4, 1992, Istanbul/Turkey. **Anais**. Detroit/Michigan: ACI, 1992. v. 2, p. 835-872.

permeabilidade do concreto em três ordens de grandeza, oferecendo maior resistência ao ingresso de íons cloreto.

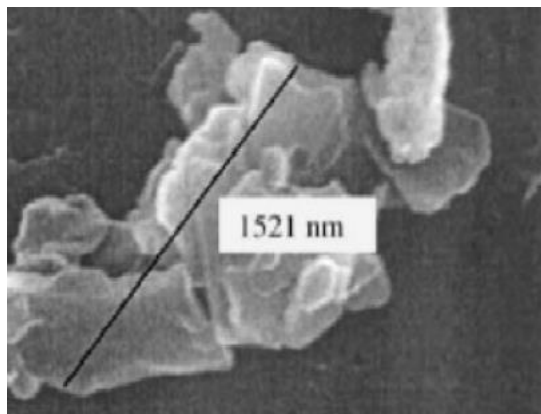
Em relação aos sulfatos, Neville (2016) menciona que a resistência de concretos com sílica ativa é boa, devido à baixa permeabilidade e ao reduzido teor de hidróxido de cálcio e alumina na matriz cimentícia. Apesar dessa redução, a pasta continua a apresentar alcalinidade suficientemente elevada para a proteção das armaduras contra a corrosão.

2.3.2 O metacaulim no concreto

O metacaulim é um material constituído principalmente de sílica e alumina na fase amorfa, resultado da calcinação da argila caulinítica, pura ou refinada, em temperaturas variando de 650 a 850°C, seguida da moagem até a finura entre 0,70 e 0,90 m²/g (NEVILLE, 2016). O material é caracterizado por elevada pozolanicidade.

Mota, Oliveira e Carneiro (2016, p. 1106) descrevem o metacaulim como “placas contínuas em plano, sendo empilhadas na direção perpendicular, cujas espessuras das unidades são de aproximadamente 7,2 Å”. As unidades são interligadas por pontes de hidrogênio de tal forma que o mineral não é disperso em água. Além disso, as partículas são muito pequenas, variando entre 0,2 a 15 µm e atingindo valores para a área específica maiores que 12 m²/g (ILLSTON; DOMONE, 2001). A Figura 3 mostra uma micrografia do metacaulim.

Figura 3 - Micrografia eletrônica de varredura do metacaulim



Fonte: Mota, Oliveira e Carneiro (2016)

De acordo com Medina (2011), a interação física do metacaulim com o cimento Portland influencia a reologia do concreto, argamassa e pasta de cimento no estado fresco e proporciona propriedades especiais em relação à durabilidade e resistência mecânica no estado endurecido. O autor afirma que sua elevada área superficial otimiza a distribuição

granulométrica da pasta, contribuindo para a retenção de água, aumento da coesão e redução da exsudação e segregação. Além disso, o metacaulim acelera as reações de hidratação do cimento Portland e atua como fíler, preenchendo os espaços entre as partículas de cimento, contribuindo para um melhor empacotamento.

A incorporação de metacaulim também interfere nas propriedades do concreto no estado endurecido. Dentre estas modificações, Detwiler, Bhatti e Battacharja³ (1996 *apud* MEDINA, 2011) mencionam: aumento da resistência à compressão, redução da porosidade e da permeabilidade, aumento da resistência a sulfatos, aumento da resistência à difusibilidade de íons cloreto, mitigação da reação álcali-agregado e redução da ocorrência de eflorescências. Fica evidente que a incorporação do metacaulim promove o aumento da durabilidade do concreto, devendo-se atentar à maior susceptibilidade à carbonatação (MEDINA, 2011).

Em estudos conduzidos por Medina (2011), o autor comparou a resistência à compressão de concretos produzidos com metacaulim (em teores de substituição ao cimento, em massa, de 5, 15, 30 e 50%) com aquela obtida para concretos produzidos apenas com cimento Portland. A conclusão do trabalho foi que a incorporação de metacaulim prejudica a resistência inicial do concreto, mas proporciona melhores resistências aos 28 dias, exceto para o teor de substituição de 50%. Este fenômeno pode ser atribuído às reações secundárias e mais lentas do metacaulim, que dependem do hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento para acontecerem. Outra consequência da baixa velocidade dessas reações é uma redução no calor de hidratação.

2.3.3 A cinza de casca de arroz no concreto

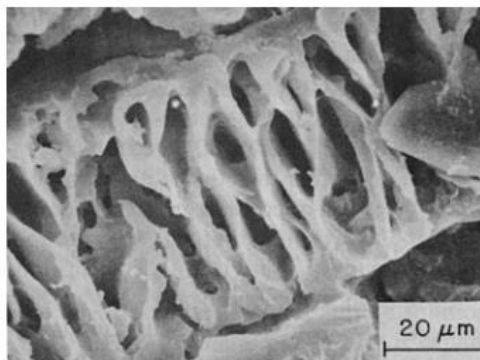
A cinza de casca de arroz é um resíduo natural que contém elevada quantidade de sílica, obtida pela queima controlada em temperaturas entre 500 e 700 °C, que forma um material amorfo e poroso (NEVILLE, 2016). Segundo Mehta e Monteiro (2014) as partículas possuem dimensões inferiores a 45 µm, têm área superficial em torno de 40 a 60 m²/g e contribuem para uma maior durabilidade relacionada a ataques químicos.

Cada tonelada de arroz em casca produz cerca de 200 kg de cascas que ao serem queimadas, de maneira controlada, rendem em torno de 40 kg de cinzas altamente pozolânicas (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Neville (2016) relata que os grãos de cinza de casca de arroz

³DETWILER, R. J.; BHATTY, J. I.; BATTACHARJA, S. **Supplementary cementing materials for use in blended cements**. Skokie/Illinois: Portland Cement Association, 1996. 103 p.

demandam grande quantidade de água, devendo ser moídos juntamente com o clínquer para quebrar sua estrutura porosa. A Figura 4 mostra uma micrografia da cinza de casca de arroz.

Figura 4 - Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

O controle de fatores como a temperatura, taxa de aquecimento e o ambiente, é determinante para a obtenção de uma cinza de casca de arroz com alto teor de sílica e elevada reatividade (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009). Entretanto, assegurar estas condições de queima em larga escala é, por vezes, inviável para as unidades de beneficiamento do arroz. Há, portanto, divergências nas propriedades das cinzas produzidas em laboratório com aquelas provenientes de resíduo industrial. Uma estratégia muitas vezes adotada para superar essas diferenças é a moagem da cinza de casca de arroz, de origem industrial, com o objetivo de aumentar sua homogeneidade.

A incorporação da cinza de casca de arroz em substituição parcial ao cimento Portland tende a otimizar as propriedades do concreto como resistência à compressão e durabilidade, além de reduzir o calor de hidratação. No entanto, sua elevada superfície específica pode ser prejudicial para a trabalhabilidade do compósito, demandando maior quantidade de água na mistura ou o uso de aditivos superplastificantes.

Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) estudaram a influência da incorporação da cinza ultrafina de casca de arroz em substituição parcial ao cimento Portland em misturas de concreto de classe de resistência característica à compressão (f_{ck}) de 25 e 60 MPa. Foram analisados três teores de substituição em massa—10, 15 e 20%—, sendo o primeiro ponto de destaque a necessidade de uma maior quantidade de superplastificante conforme se aumentou a porcentagem de substituição, para manter os valores de abatimento requeridos no estudo. Esta percepção corrobora com a ideia de que a cinza de casca de arroz influencia negativamente a trabalhabilidade do concreto.

Em relação às propriedades mecânicas do concreto, os autores concluíram que a incorporação da cinza ultrafina de casca de arroz contribuiu para o aumento da resistência à compressão do concreto de resistência convencional, especialmente nas idades mais avançadas. Destaca-se que o concreto com 20% de cinza atingiu, aos 180 dias, 40,76 MPa de resistência à compressão, valor 23,64% superior ao concreto de referência. Quanto aos concretos de alta resistência, os ganhos de resistência foram menos expressivos do que aqueles obtidos para o concreto convencional.

Vale mencionar que os concretos com cinza de casca de arroz apresentaram um aumento significativo em sua resistência à penetração de íons cloreto para todos os teores de substituição. Ademais, notou-se que a cinza de casca de arroz não modificou a quantidade de calor liberada pelo concreto, apesar de se esperar que houvesse uma redução do calor de hidratação. Os autores atribuíram este fenômeno à elevada atividade pozolânica da cinza ultrafina utilizada.

2.3.4 O fíler calcário no concreto

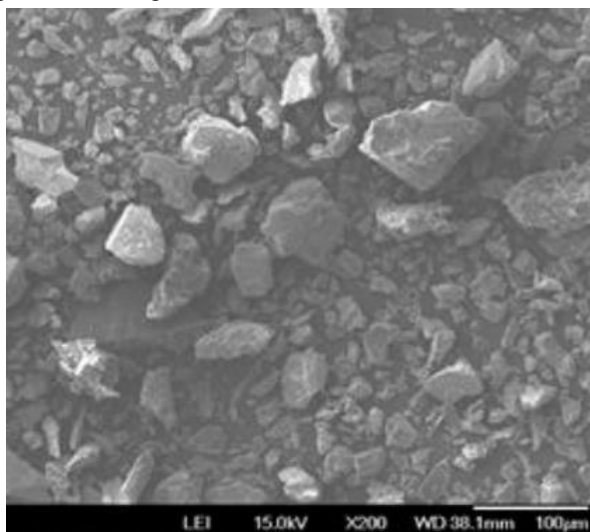
Os fílers normalmente são quimicamente inertes e são definidos por Neville (2016, p. 90) como:

"Material finamente moído, aproximadamente da mesma finura do cimento Portland, que, graças a suas propriedades físicas, exerce um efeito benéfico em algumas propriedades do concreto, como trabalhabilidade, massa específica, permeabilidade, capilaridade, exsudação e tendência à fissuração".

Neville (2016) menciona que os fílers podem intensificar a hidratação do cimento Portland, atuando como pontos de nucleação. Ramachandran (1995) relata que o carbonato de cálcio (CaCO_3), presente no fíler calcário, acelera as reações de hidratação do silicato tricálcico (C_3S). Além disso, parte do CaCO_3 adicionado ao C_3S é incorporado ao silicato de cálcio hidratado (C-S-H), sendo este um efeito benéfico para a pasta de cimento hidratada.

Os fílers não devem aumentar a demanda de água de amassamento no concreto e nem afetar negativamente sua resistência ao intemperismo (NEVILLE, 2016). Destaca-se também que não pode haver interferência negativa na resistência mecânica do concreto. A Figura 5 apresenta uma micrografia das partículas de fíler calcário.

Figura 5 - Micrografia eletrônica de varredura de fíler calcário



Fonte: Mendes, Effting e Schackow (2020)

No que diz respeito às propriedades mecânicas dos concretos, Aitcin (1998) relata que a incorporação de fíler calcário como adição promove um aumento na resistência à compressão inicial do compósito. Com relação à resistência final, foram encontrados resultados divergentes na literatura.

Feltrin e Isaia (2018) estudaram o efeito da substituição parcial, em massa, do cimento Portland por fíler calcário em teores de 10, 15 e 20% nas propriedades do concreto. Os autores concluíram que o uso de fíler calcário, aplicado em conjunto com o empacotamento de partículas, promoveu a redução da resistência à compressão inicial do concreto. Para a idade de 28 dias, o teor de substituição de 20% aumentou a resistência à compressão do concreto de 52 para 59 MPa, considerando uma relação água/aglomerante igual a 0,35. Em relação aos resultados de absorção de água por capilaridade, foi constatada a eficiência do fíler calcário na redução da permeabilidade do material, contribuindo, assim, para aumentar sua durabilidade.

No trabalho desenvolvido por Sequeira e Ghisleni (2020) também foi avaliada a influência da incorporação de fíler calcário como substituição parcial, em massa, do cimento Portland, aplicado a argamassas, em teores de 10, 20 e 30%. Verificou-se que a incorporação do fíler aumentou a fluidez das argamassas. Esse fenômeno foi atribuído ao fato das pequenas partículas de fíler preencherem os espaços vazios que seriam ocupados pela água de amassamento, deixando-a livre para contribuir com a fluidez da mistura. Os autores afirmam ainda que essa substituição pode levar a uma redução da relação água/cimento, contribuindo para as características no estado endurecido.

Em relação ao calor de hidratação e à retração por secagem, a substituição parcial do cimento por uma adição mineral praticamente inerte, como o fíler calcário, tende a promover a redução de ambos os fenômenos.

Os resultados obtidos para a resistência à compressão dos concretos dos estudos supracitados encontram-se resumidos na Tabela 1. Esclarece-se que os valores aproximados foram determinados por análise gráfica.

Tabela 1 - Resumo dos resultados de resistência à compressão de concretos com adições minerais

Trabalho	Adição mineral	Incorporação da adição	Resistência à compressão (MPa)	
			7 dias	28 dias
Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009)	CCA (ultrafina)	Concreto de referência	17,3 para CC 53,9 para CAR	24,0 para CC 60,9 para CAR
		Substituição, em massa (10%)	21,7 para CC 52,5 para CAR	29,0 para CC 61,0 para CAR
		Substituição, em massa (15%)	24,5 para CC 52,8 para CAR	32,6 para CC 63,4 para CAR
		Substituição, em massa (20%)	24,2 para CC 54,5 para CAR	32,6 para CC 70,0 para CAR
Medina (2011)	M	Concreto de referência	27,7	29,8
		Substituição, em massa (5%)	26,3	30,1
		Substituição, em massa (15%)	25,9	32,4
		Substituição, em massa (30%)	25,8	32,9
		Substituição, em massa (50%)	22,6	28,5
Medeiros, Raisdorfer e Hoppe Filho (2017)	SA	Concreto de referência	-	55
		Substituição, em massa (10%)	-	62,0
		Adição, em massa (10%)	-	70,0
Feltrin e Isaia (2018)	FC	Concreto de referência	≈ 43	≈ 52
		Substituição, em massa (10%)	≈ 40	≈ 52
		Substituição, em massa (15%)	≈ 40	≈ 51
		Substituição, em massa (20%)	≈ 42	≈ 59
CCA - Cinza de casca de arroz; M - Metacaulim; SA - Sílica ativa; FC - Fíler calcário; CC - Concreto convencional; CAR - Concreto de alta resistência				

Fonte: Autora (2022)

2.3.5 O concreto com mais de uma adição mineral

As adições minerais podem ser incorporadas ao concreto por meio de misturas binárias, ternárias ou quaternárias de aglomerantes, isto é, o cimento Portland com uma, duas ou três adições, respectivamente. Atualmente, tem-se estudado variadas composições e teores de substituição de cimento por adições minerais com o objetivo de compreender seu efeito nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Nesse

contexto, buscou-se discutir acerca de alguns resultados encontrados na literatura no tocante à produção de concretos com mais de uma adição mineral.

A incorporação de adições minerais como substituição parcial ao cimento Portland provoca um efeito físico na mistura, já que suas partículas de menores dimensões preenchem os vazios entre os grãos de cimento, promovendo o refinamento dos poros e a densificação da pasta de aglomerante. Com relação ao efeito químico, este depende do tipo de adição utilizada e está relacionado com a reação entre a adição e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ proveniente da hidratação do cimento. Feltrin, Isaia e Lübeck (2020) consideram ainda que a incorporação de mais de uma adição mineral, em misturas ternárias ou quaternárias, leva a um efeito de sinergia caracterizado pela sobreposição dos efeitos químicos e físicos dos diferentes materiais incorporados. O resultado é a produção de um concreto com propriedades mecânicas e microestrutura otimizadas.

O trabalho apresentado por Tuan *et al.* (2011) investigou a possibilidade de utilização da cinza de casca de arroz (CCA), em conjunto com a sílica ativa (SA), para a produção de concretos de ultra-alto desempenho. Os autores utilizaram variados teores de substituição, especificados na Tabela 2, do cimento Portland (CEM I 52,5N) pelas adições minerais, em massa, e avaliaram a trabalhabilidade das misturas por meio do ensaio de índice de consistência (*flow table test*). Ademais, foram moldados corpos de prova cúbicos para análise da resistência à compressão.

A primeira conclusão do estudo, em relação à trabalhabilidade do concreto, foi a possibilidade de substituição de até 40% do cimento Portland por cinza de casca de arroz, quando o teor de sílica ativa foi fixado em 10%. Os autores relataram que teores de CCA acima de 40% levaram a uma maior dificuldade no lançamento do compósito. Desse modo, fixou-se o teor de substituição máximo para o cimento Portland em 30% de CCA e 10% de SA.

Em relação aos ensaios de resistência mecânica, a amostra ternária 1 (cimento Portland, 10% de SA e 10% de CCA) obteve 186 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Este resultado mostrou-se superior ao concreto sem adições (165 MPa) e aqueles produzidos por meio de composições binárias de aglomerantes (cimento e 10% de sílica com 172 MPa; cimento e 10% de cinza de casca de arroz com 166 MPa). Por outro lado, a amostra ternária 2 (cimento Portland, 10% de SA e 20% de CCA) apresentou resistência à compressão aos 28 dias de 167 MPa, evidenciando uma redução na resistência do concreto quando comparada à amostra ternária 1.

Em estudos conduzidos por Vance *et al.* (2013) avaliou-se o comportamento de misturas ternárias de cimento Portland, metacaulim (M) e fíler calcário (FC) de dimensão média nominal de 0,7 μm em relação às suas respectivas misturas binárias (cimento e fíler calcário; cimento e metacaulim). Os autores verificaram que a composição ternária –cimento, 10% de fíler calcário e 10% de metacaulim– apresentou resistência à compressão aos 28 dias igual a 66 MPa. A mistura constituída de cimento e 10% de metacaulim obteve 68 MPa e o aglomerante composto por cimento e 10% de fíler alcançou 72 MPa de resistência à compressão na mesma idade.

Nota-se que a composição ternária apresentou menor resistência à compressão aos 28 dias do que as misturas binárias. Todavia, os valores determinados foram próximos (diferença máxima de 8,33%) e é certo que uma maior porcentagem de substituição leva a um menor consumo de cimento. Dessa forma, justifica-se a utilização de misturas ternárias de aglomerantes como alternativa para a produção de concretos de maneira mais sustentável.

Jung *et al.* (2018) estudaram a influência de misturas ternárias de cimento Portland pozolânico (cimento composto com cinza volante), fíler calcário e cinza de casca de arroz, em teores de substituição detalhados na Tabela 2, na resistência à compressão aos 28 dias e na porosidade de concretos. Verificou-se que o concreto produzido com 5% de fíler calcário e 5% de cinza de casca de arroz (FRL5) apresentou resistência à compressão de 33 MPa. A composição de 10% de FC e 10% de CCA atingiu 34 MPa. Ambos os resultados foram superiores à resistência do concreto produzido apenas com cimento Portland pozolânico (referência), o qual atingiu 31 MPa. Em relação às demais proporções analisadas, os concretos com teores de substituição de 15 e 20% (FRL15 e FRL20) apresentaram resistência à compressão de 29 e 24 MPa, respectivamente, indicando uma redução na resistência em comparação à referência.

No que diz respeito à porosidade, as misturas FRL5 e FRL10 obtiveram volume de poros permeáveis iguais a 16,26 e 17,19%, respectivamente, mostrando-se menos porosas do que a referência (17,29%). As composições FRL15 e FRL20 exibiram maior porosidade, com volume de poros permeáveis iguais a 22,70 e 20,15%, respectivamente.

Tratando de misturas quaternárias de aglomerantes, Kuzielová *et al.* (2017) estudaram o efeito da substituição parcial, em massa, do cimento Portland (CEM I 52,5N), em teores de 25, 30 e 35%, por escória granulada de alto forno, sílica ativa e metacaulim, na porosidade e resistência à compressão do concreto. Os autores destacam que a composição com 25% de

substituição obteve porosidade aos 28 dias igual a 9,60%, enquanto o valor encontrado para a mistura de referência (0% de substituição) foi de 11,28%.

Em relação à resistência à compressão aos 28 dias, as composições com 25, 30 e 35% de substituição atingiram 108,4, 103,5 e 95,8 MPa, respectivamente, evidenciando um acréscimo em comparação à referência que obteve uma resistência à compressão de 75,7 MPa. Destaca-se, por fim, que a amostra com melhor resultado para a resistência à compressão era composta por 5% de escória granulada de alto forno, 15% de sílica ativa e 5% de metacaulim.

Os resultados obtidos para a resistência à compressão dos concretos dos estudos supracitados encontram-se resumidos na Tabela 2. Esclarece-se que os valores aproximados foram determinados por análise gráfica.

Tabela 2 - Resumo dos resultados de resistência à compressão de concretos com mais de uma adição mineral

Trabalho	Adição mineral	Teor de substituição	Resistência à compressão (MPa)	
			7 dias	28 dias
Tuan <i>et al.</i> (2011)	CCA e SA	0%	≈ 135	≈ 165
		10% de SA	≈ 154	≈ 172
		20% de SA	≈ 137	≈ 168
		10% de CCA	≈ 154	≈ 166
		20% de CCA	≈ 146	≈ 172
		10% de SA e 10% de CCA	≈ 160	≈ 186
		10% de SA e 20% de CCA	≈ 135	≈ 167
Vance <i>et al.</i> (2013)	M e FC	10% de M	≈ 52	≈ 68
		10% de FC	≈ 55	≈ 72
		10% de M e 10% de FC	≈ 52	≈ 66
Jung <i>et al.</i> (2018)	CCA e FC	0%	-	≈ 31
		5% de CCA e 5% de FC	-	≈ 33
		10% de CCA e 10% de FC	-	≈ 34
		15% de CCA e 15% de FC	-	≈ 29
		20% de CCA e 20% de FC	-	≈ 24
Kuzielová <i>et al.</i> (2017)	EGAF, SA e M	0%	62,8	75,7
		5% de EGAF, 15% de SA e 5% de M	92,5	108,4
		10% de EGAF, 10% de SA e 10% de M	68,4	103,5
		15% de EGAF, 5% de SA e 15% de M	66,3	95,8
CCA - Cinza de casca de arroz; SA - Sílica ativa; M - Metacaulim; FC - Fíler calcário; EGAF - Escória granulada de alto forno				

Fonte: Autora (2022)

2.3.6 As adições minerais e a sustentabilidade do concreto

A produção de concreto demanda, anualmente, cerca de 1,5 bilhões de toneladas de cimento, 9 bilhões de toneladas de areia e pedra, e 1 bilhão de tonelada de água de

amassamento, sendo a indústria que mais consome recursos naturais no mundo (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Além disso, as etapas de mineração, processamento e transporte dos agregados, em conjunto com o processo de produção do cimento, consomem um considerável montante de energia.

A maior parcela da degradação ambiental proveniente da utilização do concreto deve-se à liberação de dióxido de carbono (CO_2) durante a produção do cimento. Proske *et al.* (2013) relatam que cerca de 5% das emissões globais de CO_2 advindas da ação do homem estão relacionadas com a produção de 3,3 bilhões de toneladas de cimento por ano.

Neste contexto, a tecnologia do concreto tem buscado soluções ecologicamente viáveis para a produção desse material, sendo que grande parte dessas inovações estão focadas na fabricação do concreto com menor consumo de cimento. Para isso, pode-se pensar na substituição de parte do cimento por adições minerais e no uso do empacotamento de partículas para a produção de aglomerantes otimizados, que assegurem o adequado desempenho do concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Além da substituição de parte do cimento Portland por adições minerais, Mehta e Monteiro (2014) sugerem a utilização de resíduos da construção civil como agregados graúdos e da água de reuso como água de amassamento. Proske *et al.* (2013) propuseram uma rotina para a produção de concretos com menor emissão de carbono:

- 1 - Seleção de cimento de alta resistência e incorporação de adições minerais.
- 2 - Otimização do volume de água e de materiais cimentícios na matriz (pasta) do concreto.
- 3 - Otimização do volume da pasta no concreto.

Ressalta-se que os concretos sustentáveis devem apresentar trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade adequadas para sua utilização na construção civil. Alterações na composição de concretos convencionais não podem afetar negativamente a performance do material a ser aplicado em obras.

Proske *et al.* (2013) conduziram experimentos para avaliar a trabalhabilidade e a resistência mecânica de concretos produzidos com menor consumo de cimento. Os autores reduziram o volume de água utilizada na mistura e empregaram adições minerais (cinza volante e fíler calcário). A consistência do concreto foi ajustada com o uso de aditivos superplastificantes. Foi avaliada ainda a influência da finura do fíler calcário na resistência do concreto, sendo utilizado pó de calcário padrão de área superficial igual a $0,31 \text{ m}^2/\text{g}$ e pó de calcário fino de área superficial igual a $21,60 \text{ m}^2/\text{g}$. Os resultados obtidos foram satisfatórios quanto à trabalhabilidade, mesmo com a redução do volume de água na mistura de 180 para

125 l/m³. Percebeu-se apenas a necessidade de maior quantidade de aditivo superplastificante em comparação às amostras de referência. Os autores concluíram que a quantidade mínima de água necessária para garantir a trabalhabilidade do concreto era de 145 l/m³, já que as misturas produzidas com 125 l/m³ apresentaram elevada viscosidade plástica.

Observou-se que a perda da resistência à compressão, proveniente da redução do volume de cimento, foi compensada pelo menor volume de água e pela utilização de adições minerais reativas como a cinza volante. Em relação à massa de clínquer necessária para obter 1 MPa de resistência à compressão, a eficiência do concreto sustentável foi superior ao concreto convencional. Os autores ressaltam que para uma maior redução dos volumes de água e de cimento, deve-se pensar na otimização da distribuição granulométrica dos finos utilizados.

A substituição do pó de calcário padrão (0,31 m²/g) pelo pó de calcário fino (21,60 m²/g) elevou a resistência à compressão de 32 para 46 MPa. Pode-se relacionar esse fenômeno com uma microestrutura mais homogênea e uma melhor zona de transição, decorrentes do uso de partículas mais finas. De acordo com os resultados obtidos, outra vantagem na utilização do fíler calcário de maior finura foi a redução no volume de aditivo superplastificante necessário para garantir adequada trabalhabilidade à mistura.

Por fim, os autores concluíram que a otimização do volume de cimento na mistura de concreto, com uma redução de 270 para 150 kg/m³, leva a um menor impacto ambiental quando comparado ao concreto convencional, sem prejudicar características essenciais como trabalhabilidade e resistência à compressão. O potencial de aquecimento global, que considera o impacto de diferentes gases de efeito estufa, sofreu uma redução de 35% para concretos produzidos com cinza volante e fíler calcário.

Barboza, Storch e Almeida Filho (2020) avaliaram o comportamento do concreto autoadensável com cimento Portland, fíler calcário e sílica ativa. Os autores tinham como objetivo contribuir para a sustentabilidade ambiental a partir do estudo de um concreto com baixo consumo de cimento. Mantendo as relações água/cimento, fíler calcário/cimento e sílica ativa/cimento constantes, variou-se o consumo de cimento entre 434,00 kg/m³ e 325,50 kg/m³, obtendo-se uma redução de até 25% do consumo de cimento.

Os concretos analisados apresentaram valores de espalhamento variando de 605 a 750 mm, indicando elevada fluidez. Evidenciou-se ainda misturas com elevada coesão, sem indícios de segregação. Quanto às propriedades mecânicas, todas as amostras com baixo consumo de cimento (358,00; 347,00 e 325,00 kg/m³) superaram 60 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Com 3 dias de cura submersa, o concreto de referência (CAAR)

apresentou resistência à compressão igual a 41,39 MPa, resultado superior aos obtidos pelos concretos com menor consumo de cimento (CAABCC), que variaram de 31,09 a 33,49 MPa. No entanto, aos 91 dias, a amostra de CAABCC com 25% de redução no consumo de cimento atingiu 82,36 MPa, o equivalente a 98,52% da resistência do CAAR (83,60 MPa), ou seja, pode-se considerar que as resistências foram similares.

O índice de intensidade de ligante (I_L) está relacionado com a quantidade de ligante, por metro cúbico de concreto, necessário para fornecer 1 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de idade. Verificou-se que os valores de I_L para os concretos com baixo consumo de cimento variaram entre 4,95 e 5,99 kg/m³/MPa, enquanto o concreto de referência apresentou I_L igual a 6,35 kg/m³/MPa.

Por fim, destaca-se que o concreto com 25% de redução no consumo de cimento apresentou ótimo desempenho quanto à emissão de CO₂, com valor abaixo de 3 kg/m³/MPa. Dessa forma, os autores concluíram que a redução no consumo de cimento não interferiu de maneira significativa nas propriedades mecânicas do concreto, ficando comprovada a viabilidade da produção de composições com baixo consumo de cimento de forma a contribuir com a sustentabilidade ambiental.

2.4 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

O empacotamento de partículas pode ser definido como a seleção adequada da proporção e tamanho dos materiais particulados, de tal modo que os vazios maiores sejam preenchidos pelas partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Um empacotamento eficiente promove a redução da porosidade, modifica a interconexão entre os poros e otimiza a mistura de concreto, contribuindo para a obtenção de elevado desempenho mecânico com um baixo consumo de cimento.

De acordo com Londero *et al.* (2017), Fuller e Thompson estudaram o empacotamento de partículas aplicado em concretos e propuseram, em 1907, uma curva granulométrica de distribuição contínua como a curva ideal para utilização em concretos. Mais adiante, por volta de 1930, Furnas e Andreasen publicaram seus estudos acerca do empacotamento de partículas, sendo que estes trabalhos se tornariam a base para as pesquisas desse tema.

2.4.1 Modelos de empacotamento de partículas

Os modelos de empacotamento de partículas de maior interesse para a realização do presente trabalho são apresentados a seguir.

2.4.1.1 Modelo de Fuller e Thompson

Com o intuito de encontrar uma curva de distribuição granulométrica ótima para utilização em concretos, Fuller e Thompson avaliaram o efeito da granulometria dos agregados sobre o empacotamento de partículas (LONDERO *et al.*, 2017). No ano de 1907 os autores propuseram uma distribuição contínua, Equação 1, considerando um coeficiente de distribuição (q) fixo em 0,50.

$$\text{CPFT} = \left(\frac{D_p}{D_L} \right)^q \times 100 \quad (1)$$

Onde:

CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que D_p .

D_p é o diâmetro da partícula.

D_L é o diâmetro da maior partícula.

q é o coeficiente, ou módulo, de distribuição.

Londero (2016) esclarece que se fixou o coeficiente de distribuição igual a 0,50 buscando a obtenção de uma curva com o mínimo de vazios. Obtém-se, então, uma distribuição granulométrica na qual os espaços vazios entre as partículas maiores são preenchidos pelas partículas menores.

2.4.1.2 Modelo de Furnas

Furnas iniciou seus estudos direcionados a uma distribuição discreta por volta de 1930, considerando que o máximo empacotamento seria alcançado com a utilização de apenas duas dimensões de partículas (FUNK; DINGER, 1994). Com o avanço de sua pesquisa, Furnas avaliou que, na realidade, a maior densidade de empacotamento era possível com a utilização de três ou mais tamanhos discretos de partículas, estendendo seus resultados para distribuições contínuas.

O modelo assume que a densidade de empacotamento está relacionada com o tamanho e a quantidade de partículas presentes na distribuição, admitindo que o empacotamento

máximo acontece quando as partículas finas preenchem completamente os vazios entre as maiores. De acordo com Furnas, as proporções dos diversos tamanhos de partículas relacionadas a uma máxima densidade de empacotamento formam uma progressão geométrica conforme a Equação 2.

$$CPFT = \left(\frac{D_P^{\log r} - D_S^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_S^{\log r}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Onde:

D_S é o diâmetro da menor partícula;

r é a razão entre o volume das partículas retidas em uma malha de peneira e o volume na malha imediatamente inferior.

Funk e Dinger (1994) afirmam que a relação entre os diâmetros das partículas graúdas e miúdas (finas) deve ser em torno de 100:1, de forma a promover o máximo empacotamento para a distribuição descrita por Furnas. Na prática, as relações utilizadas são 20:1 ou 10:1, sendo que quanto maior esta proporção melhor será o empacotamento.

2.4.1.3 Modelo de Andreasen

Segundo Andreasen as distribuições contínuas são encontradas com maior frequência na natureza, devendo o empacotamento de partículas ser tratado a partir dessa abordagem. Oliveira *et al.* (2000) explicam que o modelo considera que o empacotamento ideal ocorre quando em torno de duas partículas de tamanhos distintos há condições de similaridade, definindo a distribuição de partículas mostrada na Equação 3.

$$CPFT = \left(\frac{D_p}{D_L} \right)^q \times 100 \quad (3)$$

Nota-se que a Equação 3 é similar à Equação 1, mas não estabelece nenhum valor fixo para o coeficiente de distribuição q . Destaca-se ainda que a representação dessa distribuição em um gráfico de escala di-log tem comportamento linear, onde a inclinação da reta equivale ao coeficiente de distribuição q . A partir de análises experimentais, Andreasen determinou que o máximo empacotamento ocorreria para coeficientes de distribuição variando entre 0,33 e 0,50 (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

O máximo empacotamento obtido com o modelo de Andreasen ocorre para partículas infinitamente pequenas, o que não é possível na realidade. Além disso, o modelo foi criticado por chegar a conclusões baseado em alterações um tanto artificiais na composição (FUNK; DINGER, 1994).

2.4.1.4 Modelo de Alfred

Funk e Dinger (1994) analisaram os modelos mais significativos de empacotamento de partículas, tanto pela abordagem discreta quanto pela abordagem contínua, e concluíram que os modelos de Furnas e de Andreasen convergem para a Equação 4. Os autores avaliaram que a quantidade de partículas finas adicionadas para atingir determinada distribuição segue uma progressão geométrica no modelo de Furnas, enquanto o modelo de Andreasen apresenta comportamento linear ao ser plotado em um gráfico de escala di-log, indicando também uma progressão geométrica.

$$CPFT = \left(\frac{D_P^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \times 100 \quad (4)$$

A Equação 4 é conhecida como modelo de Alfred e é apresentada como um aperfeiçoamento das Equações 2 e 3 discutidas anteriormente. Oliveira *et al.* (2000) explicam que, na Equação 4, introduziu-se o conceito de tamanho mínimo de partícula no modelo de Andreasen e fez-se uma revisão matemática do modelo de Furnas.

Simulações computacionais desenvolvidas por Funk e Dinger (1994) concluíram que o valor de q para a máxima densidade de empacotamento é 0,37, sendo que quanto maior o valor do expoente acima de 0,37, menor a quantidade de partículas passíveis de empacotamento conforme a distribuição almejada. Em laboratório, é possível a obtenção de empacotamentos para qualquer módulo de distribuição. No entanto, quanto maior o valor de q , maior a quantidade de partículas graúdas, o que aumenta a porosidade e reduz a eficiência do empacotamento. Em contrapartida, quanto menor o valor de q , maior a quantidade de partículas finas e maior a fluidez da mistura.

2.4.2 Fatores que influenciam o empacotamento de partículas

A determinação da distribuição granulométrica é essencial para um denso empacotamento de partículas, mas não é condição suficiente. Outros fatores interferem na

otimização do empacotamento, como a morfologia, porosidade e densidade das partículas, a técnica de compactação, o estado de dispersão das partículas e o efeito parede.

Oliveira *et al.* (2000) relatam que quanto mais esférica for a partícula, maior será a densidade de empacotamento. A presença de partículas irregulares promove uma fricção interparticular, sendo que quanto menor for a partícula maior será esse efeito devido a uma maior área superficial.

Composições com pequena quantidade de partículas não esféricas não apresentam grandes reduções em sua densidade de empacotamento. No entanto, a introdução de mais partículas irregulares promove a destruição da estrutura de empacotamento e reduz sua densidade, aumentando a porosidade da mistura.

Devido à grande quantidade de formatos de partículas e sendo inúmeras as combinações possíveis, não há regras para a definição quantitativa da influência da morfologia dos materiais granulares na densidade de empacotamento (LUZ; BRAULIO; PANDOLFELLI, 2015). Ademais, a maioria dos modelos de empacotamento consideram as partículas como perfeitamente esféricas.

Outro fator relevante para a eficiência do empacotamento é a porosidade das partículas. As partículas podem ser totalmente densas (promovendo uma maior densidade de empacotamento), apresentar porosidade interna fechada ou porosidade aberta.

As partículas de porosidade aberta interferem no empacotamento pois apresentam superfície irregular que reduz a densidade da composição. Além disso, é necessária a adição de uma maior quantidade de água na mistura, o que acaba por elevar sua porosidade. Em relação às partículas que apresentam porosidade interna fechada, sua distribuição granulométrica se assemelha à distribuição encontrada para partículas densas.

Para que o sistema atinja seu máximo empacotamento, deve ser feita uma avaliação do modo como as partículas serão dispostas na mistura. Uma mesma distribuição pode gerar diferentes densidades de empacotamento, dependendo do modo de disposição das partículas e da técnica de compactação adotada.

É possível a obtenção de uma maior densidade de empacotamento se os vazios existentes forem preenchidos por partículas de menor dimensão. Todavia, caso sejam incorporadas partículas maiores que os vazios entre os grãos, haverá a formação de novos vazios, aumentando a porosidade da composição e reduzindo a eficiência do empacotamento (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Em relação à técnica de compactação, Oliveira *et al.* (2000) descrevem que a utilização da prensagem isostática é mais eficiente para o empacotamento de partículas do que

a prensagem uniaxial, pois a força de compactação é aplicada em todas as direções. Deve-se avaliar, porém, se a técnica de compactação adotada condiz com a distribuição planejada.

Para os concretos, normalmente, a compactação é feita por meio de vibração. Assim, é necessário atentar ao tempo e à intensidade das vibrações, para que não haja falta de energia de compactação (resultando em baixa densidade de empacotamento) e nem excesso de energia de compactação (resultando na segregação do material).

Partículas muito finas apresentam tendência a formar aglomerados, dificultando a otimização do empacotamento. Oliveira *et al.* (2000) atribuem este fenômeno ao aumento das forças coesivas interparticulares, associado à maior relação entre a área superficial e o volume dessas partículas. As aglomerações impedem a coordenação espacial que promove uma maior densidade de empacotamento.

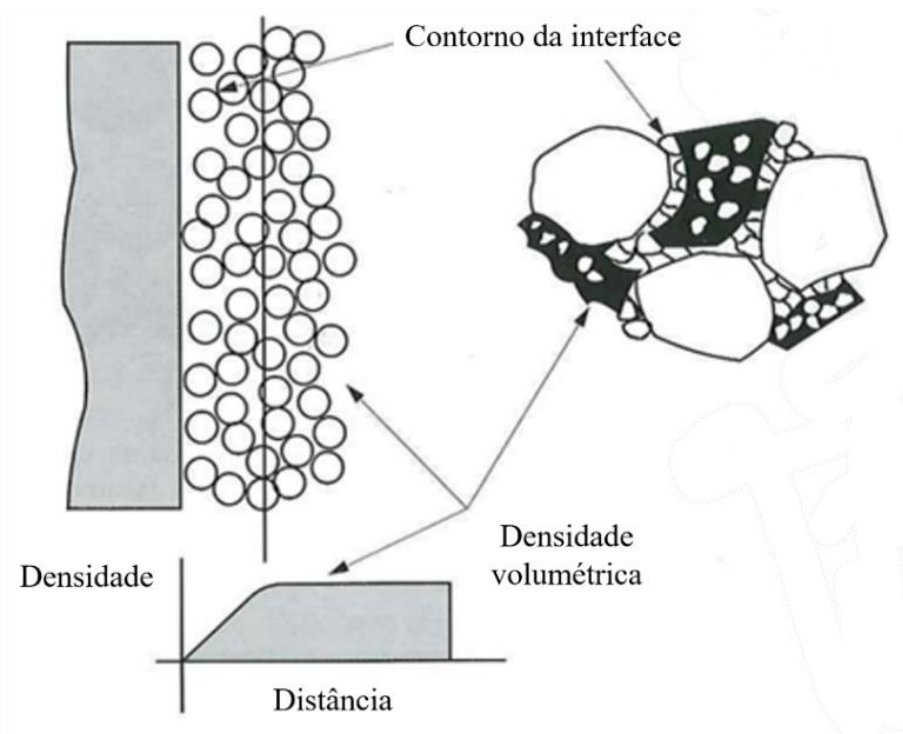
É interessante, portanto, que os aglomerados sejam eliminados, visando a obtenção de uma suspensão dispersa e homogênea com elevada concentração de sólidos. Para tanto, Castro e Pandolfelli (2009) esclarecem que as forças de repulsão entre as partículas devem ser superiores às forças de atração, sendo necessária a utilização de dispersantes. Esses aditivos químicos desaglomeram as partículas e reduzem a quantidade de água necessária para assegurar a adequada trabalhabilidade da mistura.

Outro problema gerado por uma dispersão inadequada é a alteração da distribuição granulométrica originalmente prevista. A formação de aglomerados pelas partículas finas aumenta o diâmetro D_s efetivo, o que, de acordo com os modelos de Furnas e Alfred, reduz a densidade de empacotamento. Este acaba sendo um efeito contrário aquele esperado ao se adicionar mais partículas finas à mistura.

Além da alteração do diâmetro mínimo efetivo, Oliveira *et al.* (2000) descrevem que os aglomerados formados equivalem a partículas ocas, originando poros na microestrutura e prejudicando propriedades como resistência mecânica e permeabilidade do material. Somando-se a isso, o aumento na porosidade leva à redução da densidade de empacotamento.

Quando duas partículas próximas têm uma grande diferença de tamanho, tal que a partícula maior pode ser considerada um plano em comparação à partícula menor, diz-se que ocorre o efeito parede. Esse fenômeno afeta a densidade do empacotamento já que promove o aumento da porosidade na região próxima à partícula de dimensões superiores em relação ao restante da mistura, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Influência do efeito parede na densidade de empacotamento



Fonte: Adaptado de Roy, Scheetz e Silsbee⁴ (1993 *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2000)

Luz, Braulio e Pandolfelli (2015) enfatizam que essa elevada porosidade local torna o material mais suscetível a ataques de corrosão, além de afetar seu desempenho mecânico. Para reduzir a influência do efeito parede na densidade do empacotamento, a razão entre os diâmetros (D_L/D_s) deve ser, pelo menos, igual a 10 (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

2.4.3 Estudos pertinentes

O trabalho desenvolvido por Yao *et al.* (2018) consistiu na otimização de concretos de ultra-alto desempenho (UHPC) a partir de três etapas: desenvolvimento do aglomerante a partir de misturas quaternárias; otimização dos agregados utilizando o empacotamento de partículas; e avaliação das propriedades do concreto. A Figura 7 traz a metodologia utilizada pelos autores para a produção do aglomerante.

⁴ROY, D. M.; SCHEETZ, B. E.; SILSBEE, M. R. Processing of optimized cements and concretes via particle packing. *Journal of Materials Education*, v. 15, p. 1-16, 1993.

Figura 7 - Metodologia utilizada para o desenvolvimento do aglomerante



Fonte: Adaptado de Yao *et al.* (2018)

Os materiais utilizados para a produção das misturas quaternárias foram: cimento Portland comum (OPC), escória, cinza volante, sílica ativa, metacaulim e fíler calcário. Adotou-se uma baixa relação água/aglomerante para a produção da pasta e a proporção de seus componentes foi otimizada para garantir uma fluidez adequada e um máximo empacotamento, considerando um modelo de empacotamento estocástico com a geração de volumes tridimensionais para partículas esféricas. Na segunda etapa, aplicou-se o empacotamento de partículas aos agregados graúdos e miúdos a partir de um modelo de empacotamento compressível (CPM). Por fim, as amostras de concreto de ultra-alto desempenho produzidas foram submetidas a ensaios experimentais para avaliar suas propriedades como resistência mecânica e durabilidade.

Os autores avaliaram a resistência à compressão de argamassas produzidas a partir das misturas quaternárias depois de 14 e 28 dias de cura úmida. Mesmo para uma redução de 30% do fator clínquer, as argamassas analisadas apresentaram resistência comparável, ou mesmo superior, à argamassa de referência. Além disso, Yao *et al.* (2018) concluíram que as resistências das composições com escória foram superiores às das composições com cinza volante. Os autores notaram ainda que concretos produzidos com fibras, redução da relação água/aglomerante e otimização da granulometria dos agregados podem atingir resistências superiores a 150 MPa aos 28 dias.

Outro trabalho de interesse para esta pesquisa, apresentado por Oliveira *et al.* (2018), consistiu na aplicação do empacotamento de partículas (modelo de Alfred) para a otimização de concretos de alto desempenho. Os autores utilizaram cimento Portland composto com

escória, sílica ativa não densificada, britas de origem basáltica comercialmente denominadas brita 1, pedrisco e pó de pedra, areia natural média, areia industrial fina e aditivo superplastificante à base de policarboxilato. O valor do módulo de distribuição obtido para o concreto de referência foi de 0,29, sendo mantido constante para a otimização da mistura.

O primeiro ponto de destaque foi o aumento da quantidade de superplastificante para o concreto otimizado, bem como uma redução da porosidade teórica e do abatimento. Menciona-se ainda que não foi evidenciada a ocorrência de segregação e nem de exsudação. Com relação às propriedades mecânicas, avaliou-se a influência do empacotamento na resistência à compressão do concreto aos 3, 7 e 28 dias. Nas idades iniciais, o concreto de referência apresentou resistência superior ao otimizado, sendo esta situação invertida nos resultados obtidos para 28 dias. Os concretos otimizados foram produzidos com uma menor quantidade de agregado graúdo, material que favorece o desempenho mecânico nas primeiras idades, de modo que apresentou menor resistência inicial do que o concreto de referência. (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Nas idades posteriores, o alto teor de sílica ativa presente no concreto otimizado promove o fortalecimento da zona de transição, elevando a resistência do concreto. Além disso, os autores atribuem esse ganho de resistência a uma melhor distribuição granulométrica dos materiais particulados, promovida pelo empacotamento de partículas, que reduz a porosidade da mistura e melhora seu desempenho mecânico.

O trabalho apresentado por Mendes e Repette (2019) investigou o efeito da nanossílica, em três diferentes graduações, na matriz de cimento Portland. Foram produzidas pastas de aglomerantes com a incorporação de 11, 6,2, 3,1, e 1,7%, em massa, de nanossílica, sendo que as composições foram otimizadas pelo modelo de empacotamento de Alfred, fixando os coeficientes de distribuição em 0,37, 0,50, 0,55 e 0,61, respectivamente.

Os autores concluíram que a ação pozolânica da nanossílica combinada com o efeito físico promovido pelo empacotamento de partículas levou ao aumento das reações de hidratação nas pastas de aglomerante e, conseqüentemente, à redução da porosidade da mistura. Além disso, verificou-se que a elevada área superficial da nanossílica requer um maior consumo de água e/ou superplastificante para assegurar a trabalhabilidade desejada para as composições.

Em estudo desenvolvido por Lopes, Peçanha e Castro (2020), realizou-se a aplicação do empacotamento de partículas, adotando o modelo de Alfred, para concretos de classe de resistência (f_{ck}) de 25, 40 e 80 MPa. O objetivo dos autores foi avaliar a influência do empacotamento nas propriedades físicas e mecânicas de concretos convencionais e de alta resistência.

Os materiais utilizados na pesquisa foram: cimento Portland composto com pozolana, sílica ativa, areia natural de origem quartzosa, britas de origem basáltica classificadas comercialmente como brita 1, brita 0 e pedrisco, e aditivo superplastificante à base de policarboxilato. Os concretos de referência foram produzidos adotando o método de dosagem IPT/EPUSP, sendo aplicado o modelo de Alfred para a determinação do módulo de distribuição de cada traço, obtendo-se os valores de 0,27, 0,23 e 0,16 para os concretos de 25, 40 e 80 MPa, respectivamente.

Em uma segunda etapa, Lopes, Peçanha e Castro (2020) aplicaram o modelo de Alfred, mantendo os módulos de distribuição obtidos anteriormente para os concretos de referência, para otimizar o empacotamento de cada traço de concreto. A primeira conclusão do estudo foi que os concretos produzidos com base no empacotamento de partículas demandaram uma maior quantidade de agregados e um menor consumo de cimento.

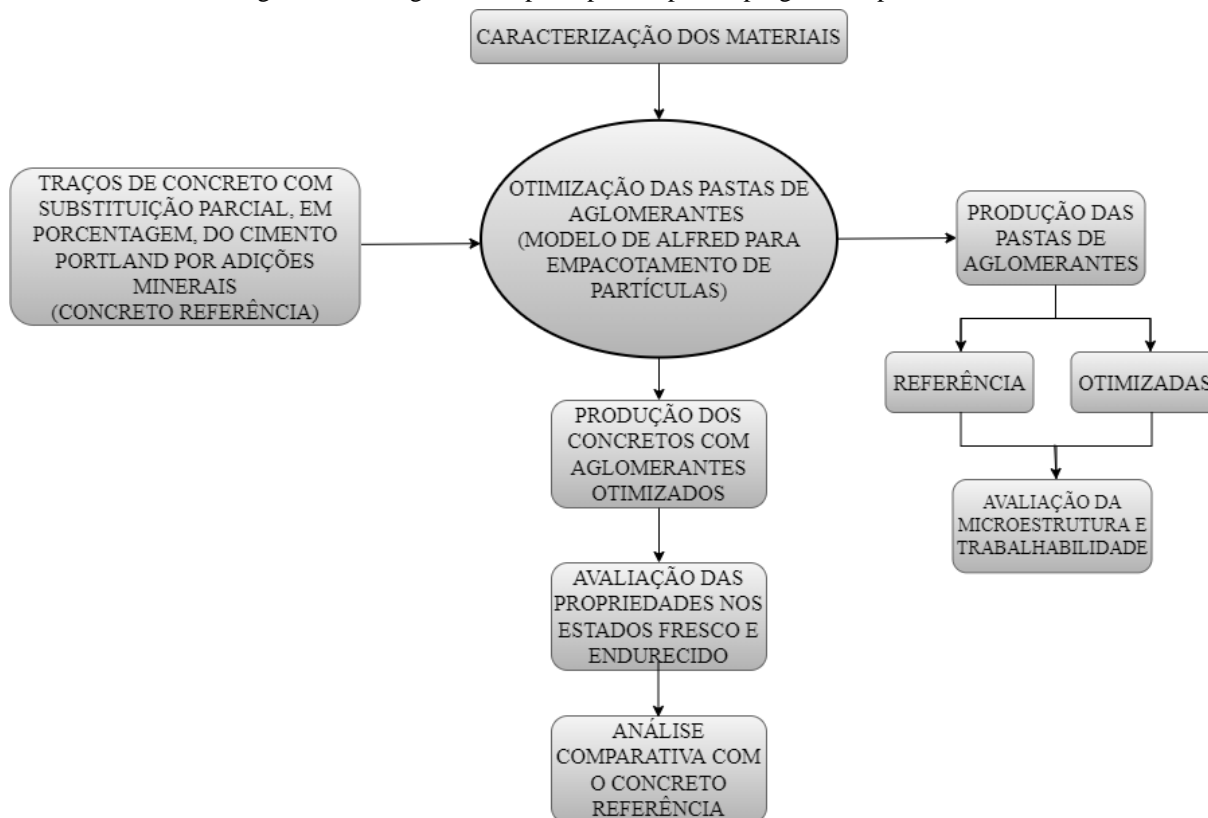
Em relação ao estado fresco, os autores verificaram a perda da trabalhabilidade nos concretos otimizados, sendo necessária uma maior quantidade de aditivo superplastificante para atingir a consistência adequada à moldagem dos corpos de prova. No que diz respeito às propriedades físicas, todos os traços analisados obtiveram resultados satisfatórios para o índice de vazios e absorção de água por imersão. No estado endurecido, os concretos otimizados pelo empacotamento de partículas apresentaram resistência à compressão aos 28 dias superior aos concretos de referência, para as três classes analisadas (25, 40 e 80 MPa). A maior variação foi verificada para o concreto de 25 MPa aos 28 dias, sendo que o empacotamento de partículas possibilitou o aumento da resistência em aproximadamente 42%.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho consiste na aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização dos aglomerantes utilizados nos traços de concretos produzidos a partir da substituição de parte do cimento Portland por adições minerais. O estudo teve como foco a produção de concretos de alta resistência, com resistência característica à compressão de 60 MPa, a partir de misturas ternárias e quaternárias de cimento Portland e adições minerais.

Neste capítulo são apresentados os materiais necessários e as etapas empregadas para atingir os objetivos propostos do estudo. A pesquisa está dividida em cinco etapas, iniciando pela caracterização dos materiais e obtenção do concreto de referência. Prosseguiu-se, então, para a otimização dos aglomerantes a partir do modelo de empacotamento de partículas de Alfred. Em seguida, foram realizadas análises referentes à microestrutura e trabalhabilidade das pastas de aglomerantes. Por fim, a partir dos aglomerantes otimizados, foram produzidos concretos de alta resistência, os quais foram avaliados tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A Figura 8 apresenta um fluxograma das principais etapas do programa experimental.

Figura 8 - Fluxograma das principais etapas do programa experimental



Fonte: Autora (2022)

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- Cimento Portland composto com escória de classe de resistência 32 MPa (CPII E32);
- Sílica ativa não densificada;
 - Metacaulim;
- Cinza de casca de arroz;
 - Fíler calcário malha 325;
- Agregado miúdo de origem natural constituído por areias quartzosas média e fina;
- Agregado graúdo de origem basáltica, comercialmente denominado de brita 1;
- Aditivo superplastificante à base de policarboxilato;
- Água da rede de abastecimento local.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O cimento Portland foi caracterizado de acordo com as especificações descritas na NBR 16697:2018 (ABNT, 2018), conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização do cimento Portland

Análise Laboratorial	Norma	Análise Laboratorial	Norma
Determinação de SO ₃	NBR NM 16 (2012)	Finura pelo método de Blaine	NBR 16372 (2015)
Análise química	NBR NM 14 (2012)	Finura peneira 75 µm	NBR 11579 (2012)
Resíduo insolúvel	NBR NM 15 (2012)	Massa específica	NBR 16605 (2017)
Perda ao fogo	NBR NM 18 (2012)	Tempo de pega	NBR 16607 (2018)
Granulometria a laser	ISO 13320 (2020)	Resistência à compressão	NBR 7215 (2019)

Fonte: Autora (2022)

A caracterização da sílica ativa foi realizada conforme as disposições da NBR 13956-1:2012 (ABNT, 2012), como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização da sílica ativa

Análise Laboratorial	Norma	Análise Laboratorial	Norma
Determinação do SiO ₂	NBR13956-2 (2012)	Finura por meio da peneira 45 µm	NBR 13956-4 (2012)
Teor de umidade	NBR 13956-2 (2012)	Índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias	NBR 13956-3 (2012)
Granulometria a laser	ISO 13320 (2020)	Massa específica	NBR 16605 (2017)

Fonte: Autora (2022)

Os demais materiais pozolânicos (metacaulim e cinza de casca de arroz) e o fíler calcário foram caracterizados conforme as recomendações dispostas na NBR 12653:2014 (ABNT, 2014), como explicitado pela Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização do metacaulim, cinza de casca de arroz e fíler calcário

Análise Laboratorial	Norma	Análise Laboratorial	Norma
Análise química	NBR NM 22 (2012)	Material retido na peneira 45 µm	NBR 15894-3 (2010)
Determinação de SO ₃	NBR NM 16 (2012)	Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias	NBR 5752 (2014)
Teor de umidade	NBR NM 24 (2003)	Massa específica	NBR 16605 (2017)
Granulometria a laser	ISO 13320 (2020)		

Fonte: Autora (2022)

A caracterização dos agregados miúdos e graúdos foi realizada de acordo com as recomendações especificadas na NBR 7211:2009 (ABNT, 2009), como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização dos agregados miúdos e graúdos

Agregados	Análise Laboratorial	Norma
Miúdos	Composição granulométrica	NBR 17054 (2022)
	Material fino através da peneira 75 µm	NBR 16973 (2021)
	Massa específica e absorção	NBR 16916 (2021)
	Teor de argila e materiais friáveis	NBR 7218 (2010)
Graúdos	Composição granulométrica	NBR 17054 (2022)
	Material fino através da peneira 75 µm	NBR 16973 (2021)
	Massa específica e absorção	NBR 16917 (2021)
	Teor de argila e materiais friáveis	NBR 7218 (2010)
	Índice de forma	NBR 7809 (2019)

Fonte: Autora (2022)

3.3 CONCRETOS DE REFERÊNCIA

Para a obtenção do concreto de referência (Concreto 0 – C0) foi utilizado o método de dosagem IPT/EPUSP, considerando a substituição parcial do cimento, em volume, por 10% de sílica ativa. Estipulou-se a resistência característica à compressão em 60 MPa e o abatimento em (120 ± 20) mm, sendo determinado o traço, em massa, 1:2,24:1,98:0,40, cujas proporções correspondem, respectivamente, ao cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água. A partir de C0, foram determinadas misturas ternárias e quaternárias de aglomerantes

com teores de substituição do cimento, em volume, de 20 e 30% (total), respectivamente. A Tabela 7 mostra os teores de substituição, em volume, das composições de aglomerante que foram utilizadas como referência neste trabalho.

Tabela 7 - Teores de substituição, em volume, dos aglomerantes de referência

Composição	Sigla	CPII E32 (%)	SA (%)	M (%)	CCA (%)	FC (%)	a/agl
Pasta 0	P0	90,00	10,00	-	-	-	0,37
Pasta 1 - Referência	P1-R	80,00	10,00	10,00	-	-	0,38
Pasta 2 - Referência	P2-R	80,00	10,00	-	10,00	-	0,38
Pasta 3 - Referência	P3-R	80,00	10,00	-	-	10,00	0,37
Pasta 4 - Referência	P4-R	80,00	-	10,00	10,00	-	0,37
Pasta 5 - Referência	P5-R	80,00	-	10,00	-	10,00	0,37
Pasta 6 - Referência	P6-R	80,00	-	-	10,00	10,00	0,38
Pasta 7 - Referência	P7-R	70,00	10,00	10,00	10,00	-	0,38
Pasta 8 - Referência	P8-R	70,00	10,00	10,00	-	10,00	0,38
Pasta 9 - Referência	P9-R	70,00	-	10,00	10,00	10,00	0,38
Pasta 10 - Referência	P10-R	70,00	10,00	-	10,00	10,00	0,39

**SA - Sílica ativa; M - Metacaulim; CCA - Cinza de casca de arroz; FC - Fíler calcário;
a/agl - água/aglomerante**

Fonte: Autora (2022)

3.4 OTIMIZAÇÃO DOS AGLOMERANTES

A partir das composições granulométricas dos materiais constituintes dos aglomerantes, cimento Portland e adições minerais, e dos traços de concreto de alta resistência de referência (traços com substituição do cimento por adições minerais em porcentagens normalmente consideradas na produção dos concretos), realizou-se a otimização dos aglomerantes aplicando o modelo de empacotamento de Alfred. As combinações de aglomerantes consideradas estão resumidas na Tabela 8.

Tabela 8 - Resumo das misturas ternárias e quaternárias dos traços de aglomerantes

Misturas ternárias (cimento Portland +)	Misturas quaternárias (cimento Portland +)
SA + M	SA + M + CCA
SA + CCA	SA + M + FC
SA + FC	M + CCA + FC
M + CCA	SA + CCA + FC
M + FC	-
CCA + FC	-

SA – Sílica ativa; M – Metacaulim; CCA – Cinza de casa de arroz; FC – Fíler calcário

Fonte: Autora (2022)

O processo de otimização dos aglomerantes consistiu em três etapas:

- 1 - Determinação da curva de distribuição granulométrica de cada material considerado como aglomerante.
- 2 - A partir das distribuições granulométricas determinadas na primeira etapa e das proporções (em massa) dos materiais constituintes dos aglomerantes nas misturas de referência, obteve-se o módulo de distribuição (q) para cada combinação de aglomerantes considerada, aplicando-se o modelo de empacotamento de Alfred.
- 3 - Mantendo o módulo de distribuição determinado na segunda etapa constante, a composição dos aglomerantes foi otimizada com base no conceito do empacotamento de partículas, aplicando-se o modelo de Alfred, de maneira a obter a distribuição granulométrica de maior densidade de empacotamento teórica.

Para a realização da segunda e da terceira etapas utilizou-se a planilha eletrônica desenvolvida por Lopes (2019), focada na otimização da dosagem de concretos a partir do empacotamento de partículas. Dessa forma, foram determinados os traços otimizados para a produção de aglomerantes de misturas ternárias e quaternárias de cimento Portland e adições minerais.

3.5 ANÁLISES DAS PASTAS DE AGLOMERANTES

As pastas de aglomerantes foram avaliadas através dos ensaios de miniabatimento, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e porosidade aparente. Nos tópicos a seguir descreve-se a metodologia utilizada para a realização de cada uma dessas análises experimentais.

3.5.1 Miniabatimento

Foram produzidas pastas de aglomerantes a partir dos traços de referência e otimizados, de forma a avaliar o efeito do empacotamento em sua trabalhabilidade. Para essa análise, realizou-se o ensaio de miniabatimento apresentado por Kantro (1980).

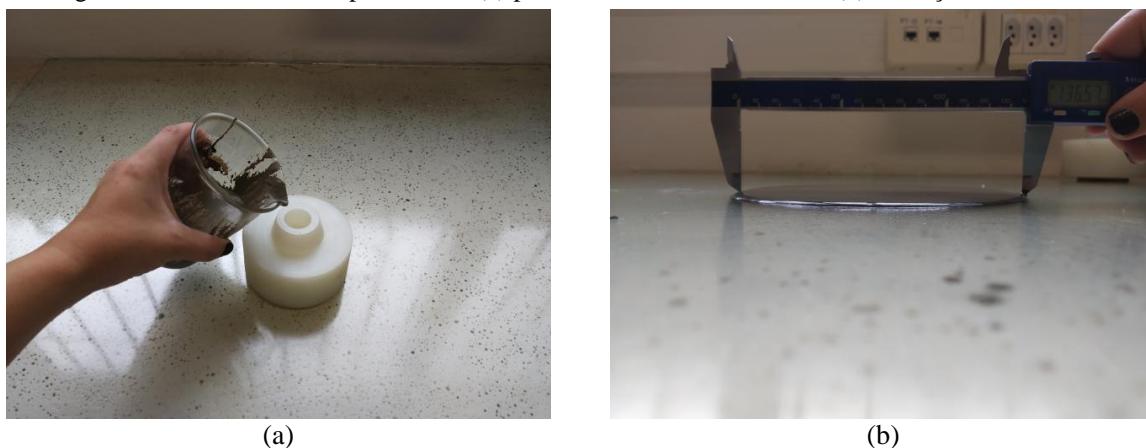
As pastas de aglomerantes foram preparadas manualmente, pois a quantidade necessária para a realização do procedimento experimental era insuficiente para a utilização do misturador mecânico. A mistura das pastas foi realizada como descrito a seguir:

- Em uma vasilha, adicionou-se o cimento Portland e as adições minerais do traço em análise.
- Incorporou-se 80% da água total a ser utilizada.

- Procedeu-se a mistura, com o auxílio de uma colher, por dois minutos.
- Acrescentou-se o superplastificante e o restante da água.
- Procedeu-se a mistura, com o auxílio de uma colher, por mais quatro minutos.

Para a realização do ensaio, posicionou-se uma placa de vidro sobre uma superfície devidamente nivelada. O minicone foi então disposto ao centro da placa e preenchido pela amostra (Figura 9a). Após dez batidas leves no topo do minicone, este foi erguido rapidamente, de modo que a pasta se espalhasse na superfície da placa. Prosseguiu-se com a medida de dois diâmetros perpendiculares entre si (Figura 9b), adotando como resultado a média de tais medições. O procedimento foi realizado nos tempos de 0, 30 e 60 minutos após o fim da mistura.

Figura 9 – Procedimento experimental: (a) preenchimento do minicone e (b) obtenção das medidas



Fonte: Autora (2022)

Vale mencionar que para a realização dos ensaios nos tempos de 30 e 60 minutos, as amostras ficavam em repouso dentro de um béquer com a abertura protegida por um filme plástico, de modo a evitar a perda de água das amostras. Pouco antes do ensaio, as amostras eram misturadas rapidamente, visando a sua homogeneização.

3.5.2 Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite ampliações em torno de 30 mil vezes e funciona por meio da incidência de um feixe de elétrons sobre a amostra, promovendo interações físicas que podem resultar no espalhamento elástico ou não elástico dos elétrons. No espalhamento elástico, os elétrons afetados passam a ser denominados de retroespalhados e fornecem imagens características da variação da composição. No espalhamento não elástico, há a formação dos elétrons secundários que permitem a obtenção de imagens de topografia da amostra em alta resolução.

Além das radiações relacionadas aos elétrons retroespalhados e secundários, a interação da amostra com o feixe de elétrons também promove a emissão de raios-X, os quais podem ser detectados com a utilização de um espectrômetro de dispersão de energia. A análise das amostras pela microscopia eletrônica de varredura associada à espectroscopia de dispersão de energia (EDS) permite avaliar, qualitativamente, a composição química de pontos de interesse do material estudado.

As pastas de aglomerantes foram avaliadas quanto à sua microestrutura por meio do ensaio de microscopia eletrônica de varredura com análise EDS, na idade de 28 dias. As análises foram realizadas no Departamento de Engenharia de Materiais (SMM) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), sendo utilizado o microscópio eletrônico de varredura da marca FEI, modelo INSPECT F 50 equipado com canhão de elétrons do tipo FEG (*Field Emission Gun*). As imagens foram obtidas a partir do detector de elétrons retroespalhados, em condições de tensão de aceleração (HV) de 10 kV e distância de trabalho (WD) variando entre 11,1 e 20,4 mm. O espectrômetro de dispersão de energia utilizado é da marca EDAX, modelo ELECT PLUS tipo SDD (*Silicon Drift Detector*).

Para a execução do ensaio, foi moldado um corpo de prova cilíndrico (25 mm x 50 mm) para cada traço de pasta, tanto de referência quanto otimizadas. Assim como realizado por Moretti (2018), os corpos de prova foram rompidos com o auxílio de um martelo e os fragmentos foram colados no porta-amostra com uma fita de carbono, conforme Figura 10. Além disso, as amostras foram recobertas por uma fina camada de platina, de forma a tornar sua superfície condutora.

Figura 10 – Amostras de pastas utilizadas no MEV



Fonte: Autora (2022)

3.5.3 Porosidade aparente

A avaliação da porosidade aparente das pastas de aglomerantes foi realizada conforme as recomendações da ASTM C830-00 (ASTM, 2016), nas idades de 7, 28 e 91 dias. Foram utilizados três corpos de prova cilíndricos (25 mm x 50 mm) por idade e por traço de pasta, tanto de referência quanto otimizadas.

Para a determinação da massa seca, as amostras foram dispostas em estufa à temperatura de 105°C até atingir massa constante. Na etapa de saturação, colocou-se as amostras em um recipiente com água, conforme Figura 11a, assegurando que todos os corpos de prova ficassem completamente submersos. O recipiente com as amostras foi então posicionado dentro de um dessecador, o qual foi conectado a uma bomba de vácuo, como mostra a Figura 11b. A bomba foi acionada a um vácuo de 560 mmHg por 2 horas, de modo que todos os microporos das pastas de aglomerantes fossem completamente preenchidos por água. Por fim, os corpos de prova foram pesados imersos em água e na condição saturado superfície seca.

Figura 11 – Saturação das amostras: (a) amostras imersas em água e (b) esquema para aplicação de vácuo



Fonte: Autora (2022)

3.6 ANÁLISE DOS CONCRETOS NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO

Foram produzidos concretos considerando a composição otimizada de aglomerantes, de maneira a avaliar seu efeito nas propriedades do concreto de alta resistência tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Para isso, avaliou-se as propriedades do concreto no estado fresco a partir do ensaio de abatimento do tronco de cone descrito pela NBR 16889:2020 (ABNT, 2020) e massa específica de acordo com a NBR 9833:2008

(ABNT, 2008). As propriedades do concreto no estado endurecido avaliadas foram a massa específica, absorção de água por imersão, índice de vazios, resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico.

Os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foram efetuados de acordo com a NBR 9778:2005 (ABNT, 2005), nas idades de 28 e 91 dias, sendo utilizados três corpos de prova para cada idade. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a NBR 5739:2018 (ABNT, 2018), nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias, sendo preparados três corpos de prova para cada idade de ensaio. Foi utilizada a máquina de ensaio ELE Autotest 2000 (Figura 12), configurada para o modo compressão com taxa de carga de 2,40 kN/s.

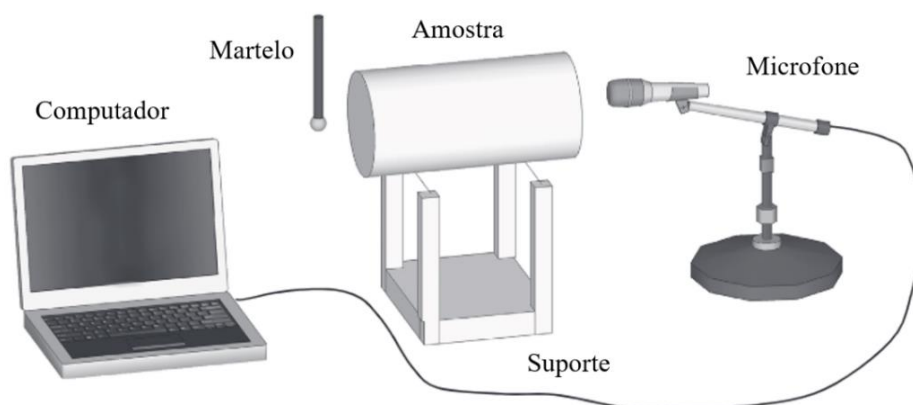
Figura 12 - Máquina de ensaio ELE Autotest 2000



Fonte: Autora (2022)

O módulo de elasticidade dinâmico dos concretos otimizados foi obtido por meio do ensaio não destrutivo de excitação por impulso, que utiliza os princípios do comportamento dinâmico para determinar algumas propriedades mecânicas do material. A realização do ensaio seguiu as diretrizes da norma ASTM E 1876-15 (ASTM, 2015), e consistiu na aplicação de um impacto mecânico com o martelo em determinado ponto do corpo de prova. Este impacto promove a vibração da amostra, cujas ondas sonoras são captadas por um microfone devidamente posicionado e conectado a um computador equipado com um *software* (Sonelastic 3.3) apropriado para a leitura dos dados coletados. A esquematização do ensaio pode ser visualizada na Figura 13. O módulo de elasticidade dinâmico dos concretos foi determinado nas idades de 1, 7, 28, 56, 70 e 91 dias, sendo ensaiados três corpos de prova prismáticos para cada traço de concreto.

Figura 13 - Esquema do ensaio de excitação por impulso



Fonte: Adaptado de Haach *et al.* (2013)

De uma maneira geral, a Tabela 9 reúne a quantidade de corpos de prova, por traço, necessários para a realização da pesquisa, bem como o formato e as dimensões dos corpos de prova empregados na execução de cada um dos ensaios físicos e mecânicos realizados.

Tabela 9 - Resumo dos corpos de prova ensaiados para cada traço de concreto

Ensaio		Corpos de prova (CP)	Formato do CP	Dimensões do CP (mm)
Absorção de água, índice de vazios e massa específica	28 dias	3	Cilíndrico	100 x 200
	91 dias	3	Cilíndrico	100 x 200
Resistência à compressão	7 dias	3	Cilíndrico	100 x 200
	28 dias	3	Cilíndrico	100 x 200
	56 dias	3	Cilíndrico	100 x 200
	91 dias	3	Cilíndrico	100 x 200
Módulo de elasticidade dinâmico		3	Prismático	150 x 150 x 500
Total		21	-	-

Fonte: Autora (2022)

Foram analisados 10 traços de concreto, variando a composição do aglomerante como mostrado na Tabela 8, sendo moldados 210 corpos de prova no total. Ao final dos ensaios experimentais foi feita uma análise estatística dos dados coletados para avaliar a influência do empacotamento de partículas, aplicado às misturas ternárias e quaternárias de aglomerantes, na fluidez e microestrutura da pasta de aglomerante, e nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido. Os resultados obtidos para os concretos produzidos na presente pesquisa foram comparados com aqueles obtidos para os concretos de referência, em que a substituição do cimento por adições minerais foi feita adotando-se porcentagens fixas, de acordo com as quantidades normalmente consideradas na produção dos concretos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo contempla os resultados obtidos e as discussões pertinentes ao trabalho.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os resultados da caracterização dos materiais constituintes do aglomerante, cimento Portland e adições minerais, podem ser visualizados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados da caracterização dos materiais constituintes do aglomerante

Propriedades	Cimento Portland	Sílica Ativa	Metacaulim	Cinza de Casca de Arroz	Fíler Calcário
Massa específica (g/cm ³)	2,96	2,24	2,72	2,04	2,63
F45µm (%) (1)	-	14,0	8,3	23,8	0,0
F75 µm (%) (2)	6,6	-	-	-	-
Icimento (%) (3)	-	115	92	67	113
Área superficial específica/Blaine (cm ² /g)*	3911	-	-	-	-
Início de pega (min)*	196	-	-	-	-
Teor de umidade (%)	-	1,6	3,0	9,0	4,0
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	19,4	-	-	-	-

* Dados fornecidos pela empresa (Lafarge Holcim, 2018).

(1) Finura representada pelo teor de resíduo retido na peneira de malha 45 µm.

(2) Finura representada pelo teor de resíduo retido na peneira de malha 75 µm.

(3) Índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias para sílica ativa e aos 28 dias para demais adições.

Fonte: Autora (2022)

Dos dados expostos na Tabela 10, percebe-se que o cimento Portland utilizado (CPII E32) não atingiu a resistência à compressão mínima – 32,0 MPa– aos 28 dias, exigida pela NBR 16697:2018 (ABNT, 2018). Os demais requisitos de norma foram satisfeitos.

Em relação à sílica ativa, esta adição apresentou finura por meio da peneira 45 µm superior ao limite de 10,0% estabelecido pela NBR 13956-1:2012 (ABNT, 2012). Pode-se atribuir este resultado ao fato de que a sílica ativa utilizada estava aglomerada, não atingindo assim a finura mínima estabelecida em norma. O teor de umidade atendeu ao limite superior de 3,0% definido pela norma, assim como o índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias superou o valor mínimo de 105%.

Os resultados obtidos para o metacaulim atenderam aos critérios da NBR 12653:2014 (ABNT, 2014) para finura por meio da peneira 45 mm (< 20,0%), teor de umidade (\leq 3,0%) e índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (\geq 90%).

A cinza de casca de arroz não atendeu aos requisitos físicos da NBR 12653:2014 (ABNT, 2014) para materiais pozolânicos. Notou-se que o material apresentava grande quantidade de partículas graúdas ($F_{45\mu\text{m}} > 20,0\%$), o que possivelmente afetou seu potencial de reação com o hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação do cimento, e reduziu seu índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias ($I_{\text{cimento}} < 90\%$). Além disso, a cinza apresentou teor de umidade superior ao limite de 3,0% da norma.

Ainda sobre a Tabela 10, nota-se que o fíler calcário satisfaz aos requisitos da NBR 12653:2014 (ABNT, 2014) para finura através da peneira 45 μm e para índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. O teor de umidade não atendeu ao limite da norma. Menciona-se, ainda, que o fíler calcário é uma adição mineral normalmente considerada quimicamente inerte e que contribui para a otimização das propriedades do concreto por seu efeito físico de preenchimento dos vazios.

A análise química dos materiais constituintes do aglomerante, cimento Portland e adições minerais, está disposta na Tabela 11.

Tabela 11 - Análise química dos materiais constituintes do aglomerante

Componente do aglomerante	Óxidos (%)						PF (%)*	RI (%)*
	SO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O		
CPII E32	2,09	21,8	5,51	3,06	64,8	0,26	4,39	1,92
Sílica Ativa	0,33	98,6	-	-	0,25	0,58	-	-
Metacaulim	-	70,6	25,0	2,07	0,17	0,26	-	-
Cinza de Casca de Arroz	-	95,3	-	0,20	0,89	2,45	-	-
Fíler Calcário	-	2,60	0,43	0,39	95,7	-	-	-

PF – Perda ao fogo; RI – Resíduo insolúvel
* Dados fornecidos pela empresa (Lafarge Holcim, 2018)

Fonte: Autora (2022)

Da análise química do cimento Portland (CPII E32) exposta na Tabela 11, nota-se que o teor de trióxido de enxofre (SO₃) atendeu ao limite superior de 4,5% estabelecido pela NBR 16697:2018 (ABNT, 2018). A porcentagem de óxido de cálcio (CaO) está próxima dos valores determinados por Silva *et al* (2020) e Kruger *et al.* (2020) para CP II. Vale mencionar que a análise química realizada não distingue a origem dos óxidos, podendo estes ser provenientes do clínquer ou da escória granulada de alto-forno utilizada como adição na produção do cimento.

Sabendo que o silicato tricálcico (C_3S) é o principal responsável pelo aumento da resistência inicial do concreto e que o silicato dicálcico (C_2S) tem grande influência na resistência do concreto em idades posteriores a 28 dias, optou-se por aplicar as Equações de Bogue (Equações 5 a 8) para melhor avaliar a resistência do concreto a partir do cimento utilizado. As Equações de Bogue são utilizadas para estimar a composição potencial do cimento a partir dos óxidos determinados pela análise química. As relações entre os óxidos utilizados nas equações e suas abreviações constam na Tabela 12.

$$\%C_3S = 4,071C - 7,600S - 6,718A - 1,430F - 2,850\bar{S} \quad (5)$$

$$\%C_2S = 2,867S - 0,7544C_3S \quad (6)$$

$$\%C_3A = 2,650A - 1,692F \quad (7)$$

$$\%C_4AF = 3,043F \quad (8)$$

Tabela 12 - Relação entre óxidos e abreviações

Óxido	Abreviação
CaO	C
SiO ₂	S
Al ₂ O ₃	A
Fe ₂ O ₃	F
SO ₃	\bar{S}

Fonte: Autora (2022)

A composição potencial do cimento Portland composto com escória (CPII E32) utilizado pode ser visualizada na Tabela 13. Destaca-se que as Equações de Bogue são aplicáveis para cimentos Portland com relação A/F igual, ou superior, a 0,64. Além disso, as Equações consideram que as reações para a formação dos compostos do cimento ocorreram por completo e que as impurezas presentes podem ser desprezadas. Ambas as suposições não são verdadeiras, de modo que pode haver variações entre a composição do cimento determinada pelas equações e a composição determinada por um ensaio específico para este fim. De todo modo, as equações fornecem um modelo simples para determinar os compostos do cimento e, por consequência, estimar algumas de suas propriedades.

Tabela 13 - Composição potencial do CPII E32

Composto	Teor (%)	Composto	Teor (%)
C ₃ S	50,491	C ₃ A	9,430
C ₂ S	24,502	C ₄ AF	9,315

Fonte: Autora (2022)

Valores típicos dos teores de compostos para o cimento Portland definido pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) como Tipo I, similar ao cimento Portland composto com escória (CPII E) utilizado no Brasil, estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores típicos dos teores de compostos no cimento Portland Tipo I (ASTM)

Composto	Teor (%)	Composto	Teor (%)
C ₃ S	42 - 67	C ₃ A	5-14
C ₂ S	8 - 31	C ₄ AF	6-12

Fonte: Adaptado de Neville (2016)

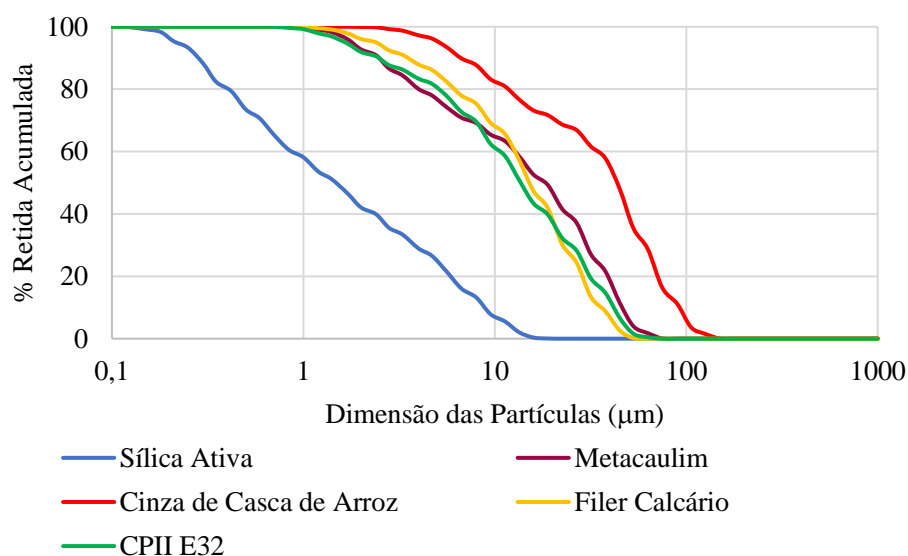
Comparando os dados das Tabelas 13 e 14, percebe-se que todos os compostos estão em conformidade com os valores indicados em Neville (2016). Dessa forma, espera-se um bom desenvolvimento da resistência dos concretos produzidos com o cimento analisado, especialmente em idades mais avançadas. Vale ressaltar, entretanto, que a substituição parcial do cimento por adições minerais pode prejudicar a resistência inicial dos concretos. Isso ocorre porque, além de substituir parte do cimento (material reativo), as adições minerais pozolânicas necessitam do hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação do cimento Portland, para reagirem e formarem silicatos de cálcio hidratados secundários, responsáveis pelo ganho de resistência do concreto. Dessa forma, inicialmente, o aumento da resistência do concreto se dará apenas devido à hidratação do cimento para, em seguida, haver o acréscimo da resistência também pela reação das adições com o hidróxido de cálcio advindo da hidratação do cimento.

Da análise química da sílica ativa, exposta na Tabela 11, percebe-se que o teor de dióxido de silício (SiO₂) atendeu ao valor mínimo de 85,0% estabelecido pela NBR 13956-1:2012 (ABNT, 2012). Dessa forma, tem-se uma sílica ativa com elevado teor de SiO₂, mas aglomerada. Tal aglomeração faz com que as reações entre esta adição mineral e o hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação do cimento, não ocorram como esperado, prejudicando a resistência dos concretos produzidos com esse material.

Com relação às demais adições minerais analisadas – metacaulim, cinza de casca de arroz e fíler calcário – todas atenderam ao limite máximo de 4% de trióxido de enxofre (SO₃), estabelecido pela NBR 12653:2014 (ABNT, 2014). O teor mínimo de 70% de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, definido pela norma, foi atendido pelo metacaulim e pela cinza de casca de arroz. O resultado desta composição determinado para o fíler calcário está de acordo com o esperado, por se tratar de uma adição mineral inerte.

O ensaio de granulometria a laser dos componentes do aglomerante foi realizado por meio do analisador de tamanho de partículas a laser Analysette 22 Nanotec, do fabricante FRITSCH. Além disso, utilizou-se o *software* MaS Control, versão 1.055, para leitura dos dados. As amostras foram preparadas através de uma dispersão líquida constituída por álcool isopropílico, agente dispersante DARVAN C-N, do fabricante Vanderbilt Minerals, e o componente do aglomerante a ser analisado. A granulometria a laser dos componentes do aglomerante pode ser visualizada na Figura 14 e o tamanho médio de partículas está disposto na Tabela 15. A distribuição discreta destes materiais consta na Figura 15.

Figura 14 - Granulometria a laser dos componentes do aglomerante



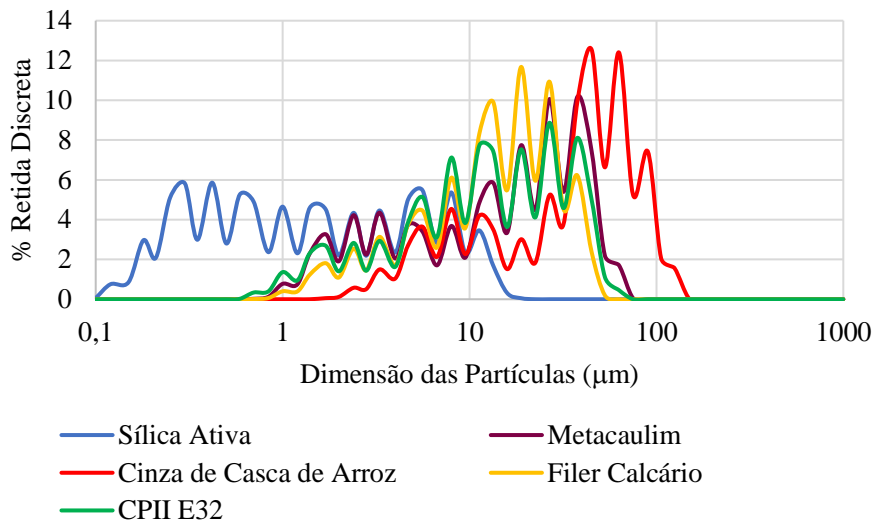
Fonte: Autora (2022)

Tabela 15 - Tamanho médio de partícula dos componentes do aglomerante

Componente do aglomerante	Tamanho médio de partícula – d_{50} (μm)
CII E32	13,4
Sílica Ativa	1,5
Metacaulim	18,9
Cinza de Casca de Arroz	43,5
Filer Calcário	15,2

Fonte: Autora (2022)

Figura 15 - Distribuição discreta dos componentes do aglomerante



Fonte: Autora (2022)

A distribuição granulométrica disposta na Figura 14 e o tamanho médio de partículas apresentado na Tabela 15 confirmam que a cinza de casca de arroz apresenta partículas maiores que as partículas dos demais constituintes do aglomerante. A sílica ativa é a adição mineral de granulometria mais fina dentre os materiais utilizados no estudo. O cimento Portland, o metacaulim e o fíler calcário apresentaram distribuições granulométricas similares. Além disso, percebe-se que todos os materiais analisados têm granulometria contínua, que promove um empacotamento de partículas mais eficiente.

Devido à similaridade das distribuições granulométricas determinadas para o CII E32, fíler calcário e metacaulim, pode ocorrer a substituição do cimento pelo fíler ou pelo metacaulim, sem causar grandes variações ao empacotamento da mistura analisada. No entanto, como o cimento Portland é fundamental na composição do concreto, pode ser necessário aplicar restrições ao modelo de empacotamento para que qualquer mistura otimizada contenha cimento Portland em sua composição.

Vale comentar que apenas a sílica ativa contém partículas entre as dimensões de 0,1 a 1 µm. Espera-se, portanto, que a aplicação do modelo de Alfred forneça misturas otimizadas com elevada quantidade de sílica. Desse modo, devem ser aplicadas restrições ao modelo, já que a incorporação de sílica ativa em porcentagens superiores a 15% é prejudicial para a trabalhabilidade do concreto (HERMANN *et al.*, 2016).

Os resultados da caracterização dos agregados miúdos e graúdos podem ser visualizados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados da caracterização dos agregados miúdos e graúdos

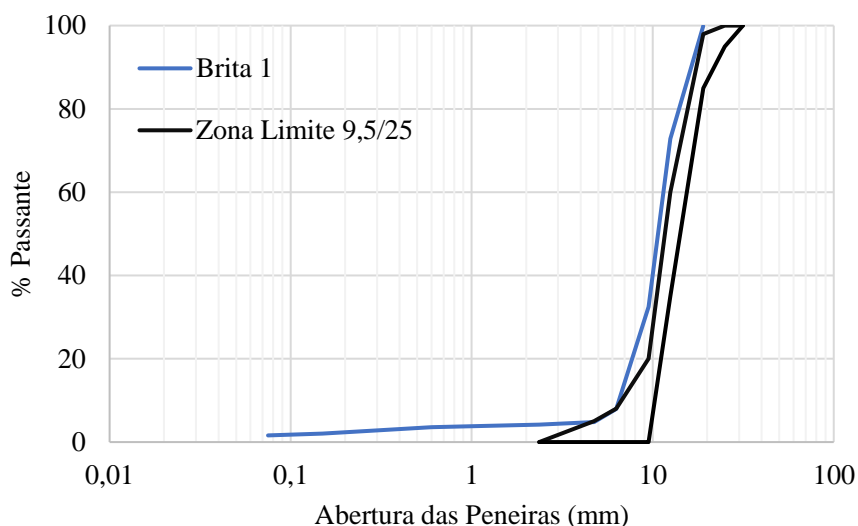
Propriedades	Areia fina	Areia média	Brita 1
Massa específica seca (g/cm ³)	2,58	2,53	3,01
Absorção (%)	0,4	0,4	1,5
Teor de argila e materiais friáveis (%)	-	0,2	0,6
Material fino através da peneira 75 µm (%)	0,8	1,4	1,5
Índice de forma	-	-	2,15

Fonte: Autora (2022)

Dos dados expostos na Tabela 16, tem-se que quase todos os requisitos da NBR 7211:2009 (ABNT, 2009) foram atendidos. A única exceção foi o material fino através da peneira 75 µm para a brita 1, que superou o limite de 1,0% estabelecido pela norma para agregados graúdos.

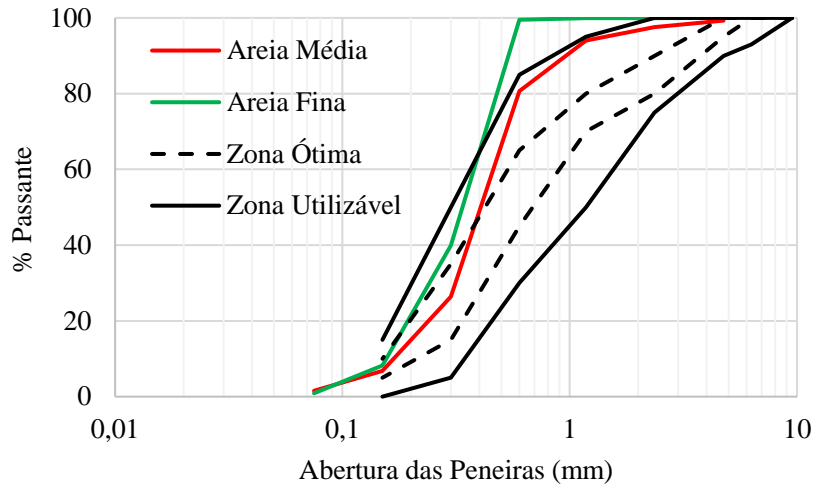
A Figura 16 apresenta a distribuição granulométrica do agregado graúdo e a zona limite conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009). A Figura 17 dispõe da distribuição granulométrica para os agregados miúdos.

Figura 16 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo e zona limite 9,5/25



Fonte: Autora (2022)

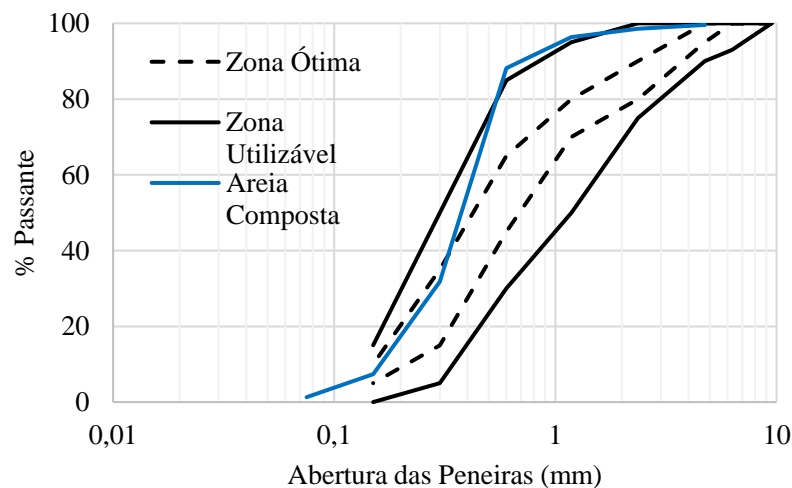
Figura 17 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos



Fonte: Autora (2022)

Na Figura 17 também é possível visualizar as curvas de distribuição granulométrica definidas pela NBR 7211:2009 (ABNT, 2009) como zona ótima e zona utilizável para agregados miúdos. Nota-se que a curva referente à areia fina não se enquadrou na faixa estabelecida em norma. Diante disso, optou-se por uma composição de areias constituída por 60% de areia média e 40% de areia fina, pois, de acordo com estudos conduzidos por Lopes (2019) para o mesmo material, esta proporção apresentou menor índice de vazios e maior massa unitária no estado compactado. A distribuição granulométrica da composição de areias encontra-se na Figura 18 e seus índices granulométricos, bem como os índices dos demais agregados, constam na Tabela 17.

Figura 18 - Distribuição granulométrica da composição de areias



Fonte: Autora (2022)

Tabela 17 - Índices granulométricos dos agregados

Agregados	Dimensão máxima característica (mm)	Módulo de finura
Areia fina	0,60	2,52
Areia média	2,36	2,94
Areia composta	1,18	2,77
Brita 1	19	7,45

Fonte: Autora (2022)

É evidente que a distribuição granulométrica da areia composta é mais adequada às curvas sugeridas pela NBR 7211:2009 (ABNT, 2009). Além disso, o módulo de finura da composição também está em consonância com o estabelecido em norma para a zona ótima.

4.2 CONCRETOS DE REFERÊNCIA

A Tabela 18 dispõe do consumo de materiais dos concretos de referência produzidos a partir das composições ternárias e quaternárias de aglomerantes. Nestes concretos a substituição do cimento pelas adições minerais foi feita em volume, considerando valores fixos definidos de acordo com a literatura (Tabela 7). Destaca-se que o teor água/materiais secos ($H = 7,5\%$) é constante em todos os traços.

Tabela 18 - Consumo de materiais dos concretos de referência

Composição	Sigla	Materiais (kg/m ³)								
		CPII E32	SA	M	CCA	FC	Areia Fina	Areia Média	Brita 1	Água
Concreto 0	C0	393,95	32,83	-	-	-	392,20	588,30	866,69	170,54
Concreto 1	C1-R	339,11	31,79	39,00	-	-	379,80	569,70	839,29	164,89
Concreto 2	C2-R	367,86	34,49	-	31,73	-	412,01	618,01	910,47	178,09
Concreto 3	C3-R	355,81	33,36	-	-	39,58	398,51	597,76	880,63	172,92
Concreto 4	C4-R	351,41	-	40,41	30,31	-	393,58	590,38	869,75	170,70
Concreto 5	C5-R	352,41	-	40,53	-	39,21	394,70	592,05	872,21	171,84
Concreto 6	C6-R	347,63	-	-	29,98	38,67	389,35	584,03	860,40	168,78
Concreto 7	C7-R	303,00	32,46	39,82	29,87	-	387,85	581,77	857,07	167,39
Concreto 8	C8-R	308,86	33,09	40,59	-	39,27	395,34	593,02	873,64	171,29
Concreto 9	C9-R	311,81	-	40,98	30,74	39,64	399,12	598,68	881,98	172,74
Concreto 10	C10-R	310,10	33,22	-	30,57	39,43	396,93	595,39	877,13	171,22

SA - Sílica ativa; M - Metacaulim; CCA - Cinza de casca de arroz; FC - Fíler calcário
R - Referência

Fonte: Autora (2022)

A substituição, em volume, de 20% de cimento Portland por adições minerais (composições ternárias) permitiu a redução, em média, de 10,55% do consumo de cimento em relação ao Concreto C0. As misturas quaternárias, com 30% de substituição do cimento, em volume, levaram a uma redução, em média, de 21,70% quando comparadas ao C0.

4.3 OTIMIZAÇÃO DOS AGLOMERANTES

A otimização dos aglomerantes pelo empacotamento de partículas, por meio da aplicação do modelo de Alfred, foi realizada a partir das composições dos concretos de referência dispostas na Tabela 18 e dos resultados da granulometria a laser dos constituintes do aglomerante apresentados na Figura 14. Destaca-se que o empacotamento de partículas foi aplicado apenas aos constituintes das pastas de aglomerantes: cimento Portland, sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz e fíler calcário, considerando apenas as misturas ternárias e quaternárias. Além disso, o teor de água/materiais secos ($H = 7,5\%$) foi mantido constante para todos os traços.

4.3.1 Etapa 1 - Distribuição granulométrica das composições de aglomerante

A primeira etapa do processo de otimização dos aglomerantes consistiu na obtenção das curvas de distribuição granulométrica de cada composição de aglomerantes. Utilizou-se, então, o consumo dos materiais constituintes das pastas de aglomerantes, dispostos na Tabela 18, para a determinação das proporções, em massa, de cada traço de pasta (Tabela 19).

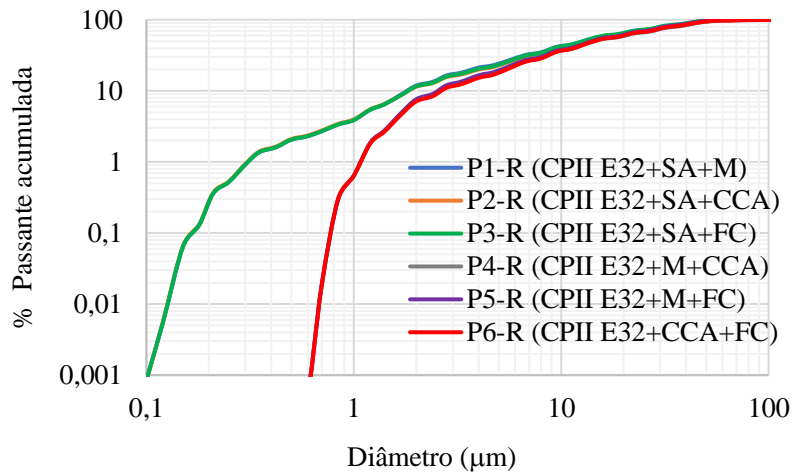
Tabela 19 - Proporções, em massa, dos constituintes das pastas de aglomerantes

Composição	Proporção de materiais em massa (%)				
	CPII E32	SA	M	CCA	FC
P1-R	82,73	7,76	9,51	-	-
P2-R	84,75	7,94	-	7,31	-
P3-R	82,99	7,78	-	-	9,23
P4-R	83,25	-	9,57	7,18	-
P5-R	81,55	-	9,38	-	9,07
P6-R	83,51	-	-	7,20	9,29
P7-R	74,79	8,01	9,83	7,37	-
P8-R	73,22	7,85	9,62	-	9,31
P9-R	73,68	-	9,68	7,26	9,37
P10-R	75,03	8,04	-	7,40	9,54

Fonte: Autora (2022)

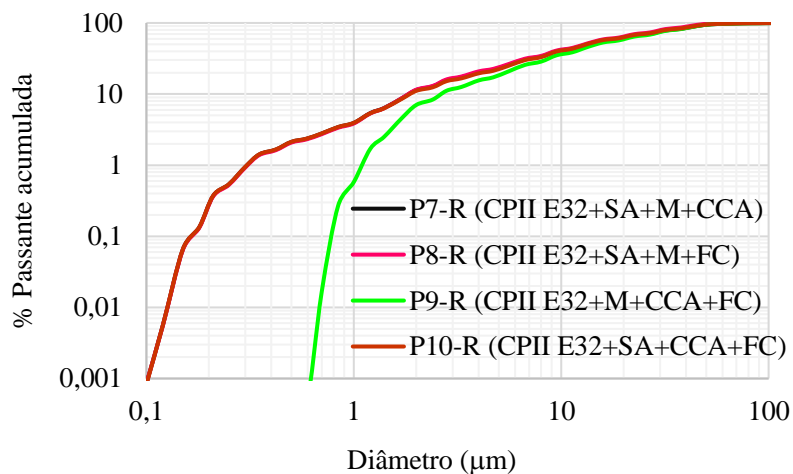
A partir das proporções dispostas na Tabela 19 e da granulometria a laser dos materiais aglomerantes apresentada na Figura 14, determinou-se as curvas de distribuição granulométrica das diferentes composições de aglomerante (Figuras 19 e 20).

Figura 19 - Distribuição granulométrica dos aglomerantes com misturas ternárias



Fonte: Autora (2022)

Figura 20 - Distribuição granulométrica dos aglomerantes com misturas quaternárias



Fonte: Autora (2022)

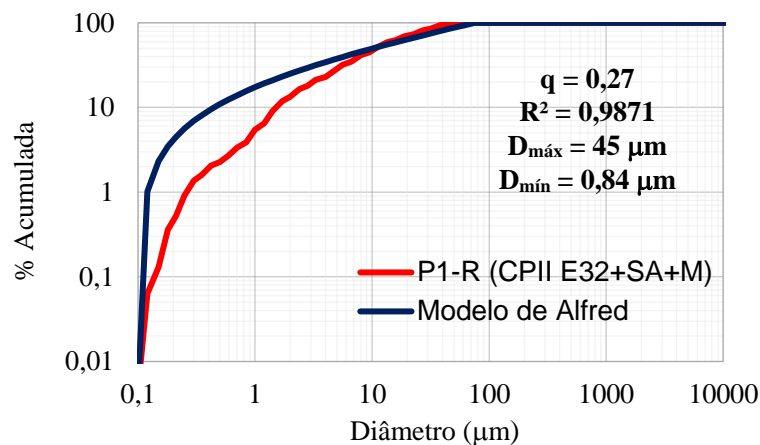
A partir da Figura 19, nota-se que as composições P1-R, P2-R e P3-R apresentaram distribuições granulométricas similares de tal forma que as curvas se sobrepõem. O mesmo é observado para as pastas P4-R, P5-R e P6-R. Para as misturas quaternárias, apresentadas na Figura 20, a única composição que apresentou composição granulométrica diferente foi a P9-R. De uma maneira geral, percebe-se que, tanto para as misturas ternárias quanto para as

quaternárias, a presença de sílica ativa faz com que a distribuição granulométrica da composição seja mais fina.

4.3.2 Etapa 2 - Determinação do módulo de distribuição (q)

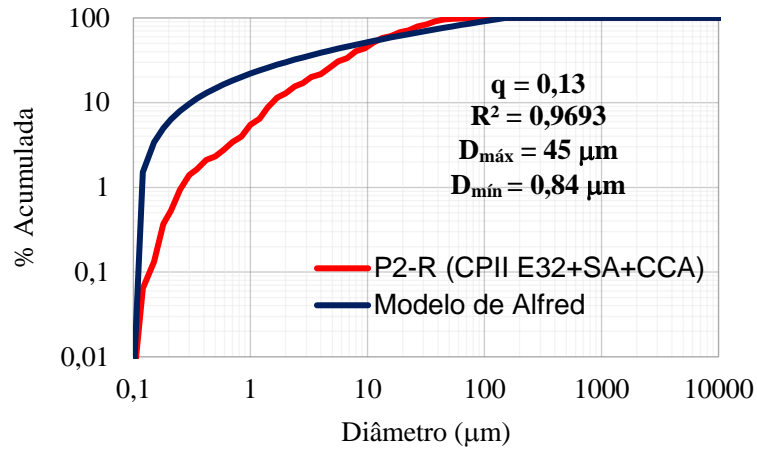
A segunda etapa do processo de otimização dos aglomerantes foi executada com o auxílio da planilha eletrônica desenvolvida por Lopes (2019), focada na otimização da dosagem de concretos a partir do conceito de empacotamento de partículas. Para a determinação do módulo de distribuição, a planilha utiliza um processo iterativo que ajusta a curva teórica (modelo de Alfred) à distribuição granulométrica de referência (curva experimental) com o objetivo de maximizar o coeficiente de correlação. Dessa forma, obtém-se o módulo de distribuição (q) referente ao coeficiente de correlação (R^2) maximizado. Os resultados obtidos e os diâmetros máximo e mínimo de cada composição de aglomerante podem ser visualizados nas Figuras 21 a 30, enquanto a Tabela 19 traz um resumo dos módulos de distribuição e dos coeficientes de correlação determinados. Destaca-se que os módulos de distribuição foram limitados ao intervalo de 0,10 a 0,40 para evitar quantidades excessivas tanto de materiais finos (prejudicial para a trabalhabilidade do concreto) quanto de materiais grossos (prejudicial para o empacotamento).

Figura 21 - Determinação do módulo de distribuição para P1-R



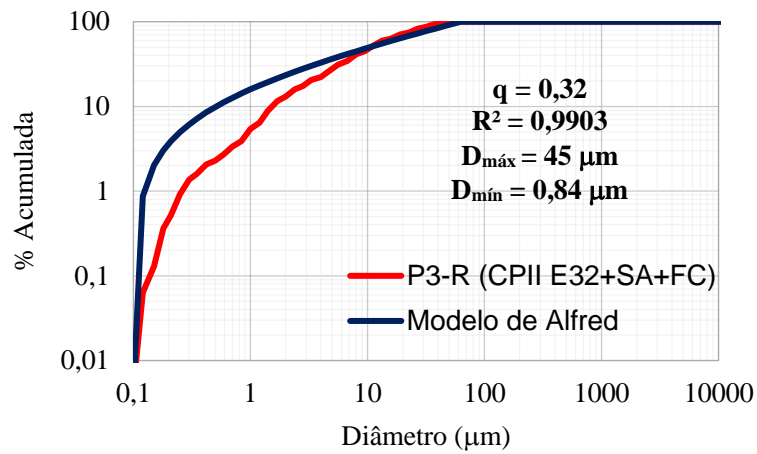
Fonte: Autora (2022)

Figura 22 - Determinação do módulo de distribuição para P2-R



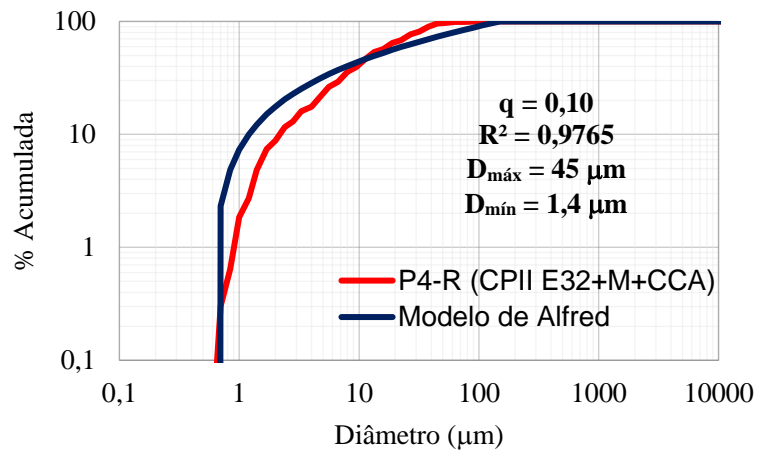
Fonte: Autora (2022)

Figura 23 - Determinação do módulo de distribuição para P3-R



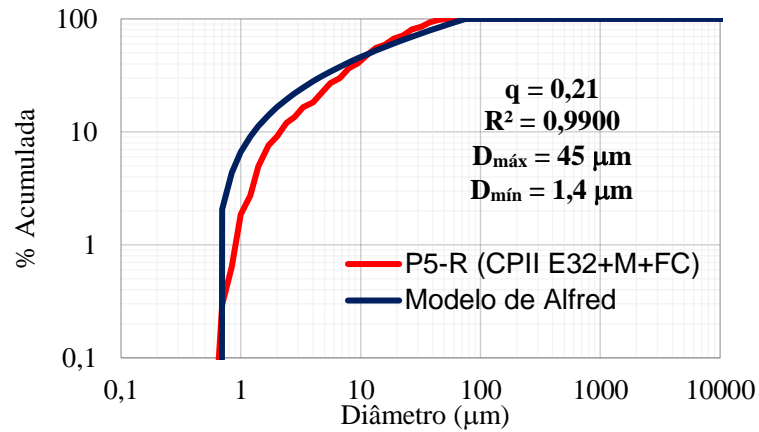
Fonte: Autora (2022)

Figura 24 - Determinação do módulo de distribuição para P4-R



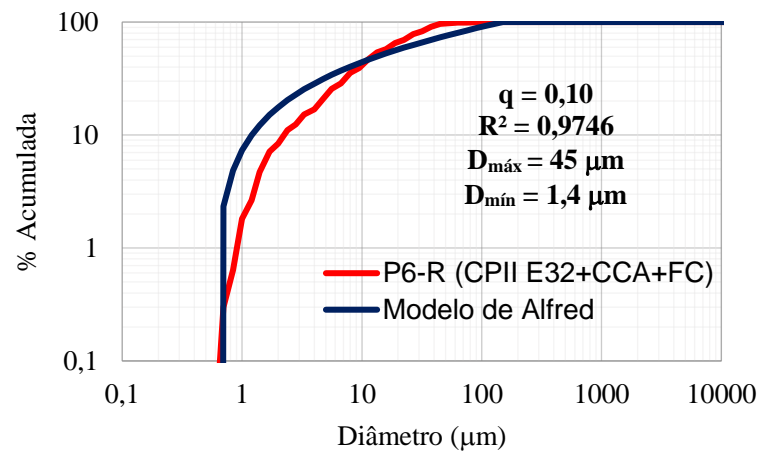
Fonte: Autora (2022)

Figura 25 - Determinação do módulo de distribuição para P5-R



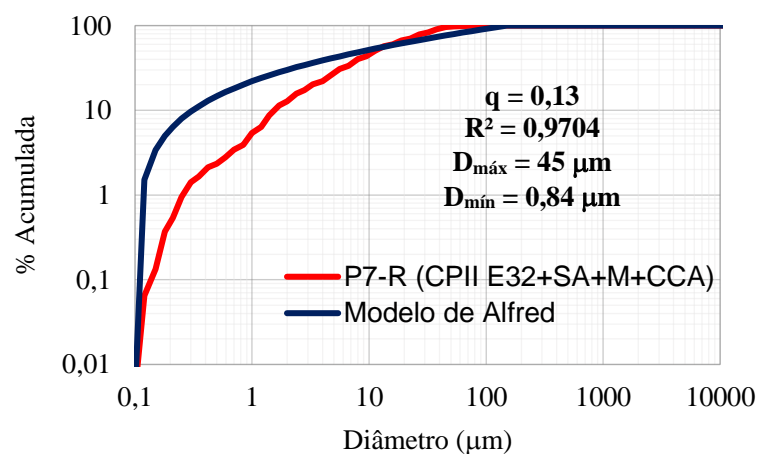
Fonte: Autora (2022)

Figura 26 - Determinação do módulo de distribuição para P6-R



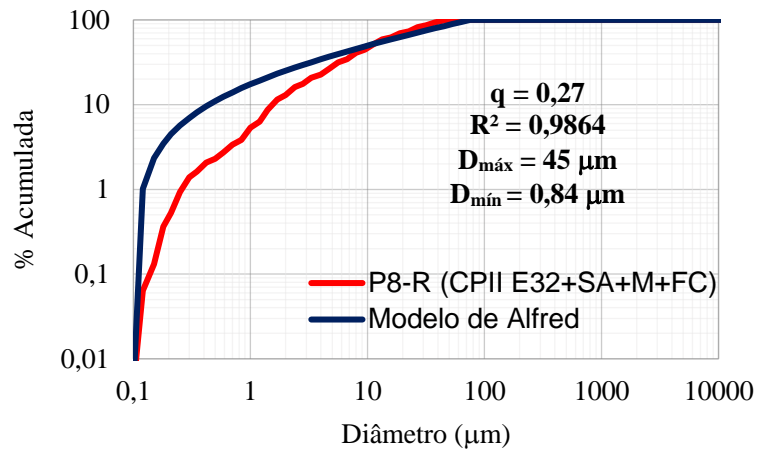
Fonte: Autora (2022)

Figura 27 - Determinação do módulo de distribuição para P7-R



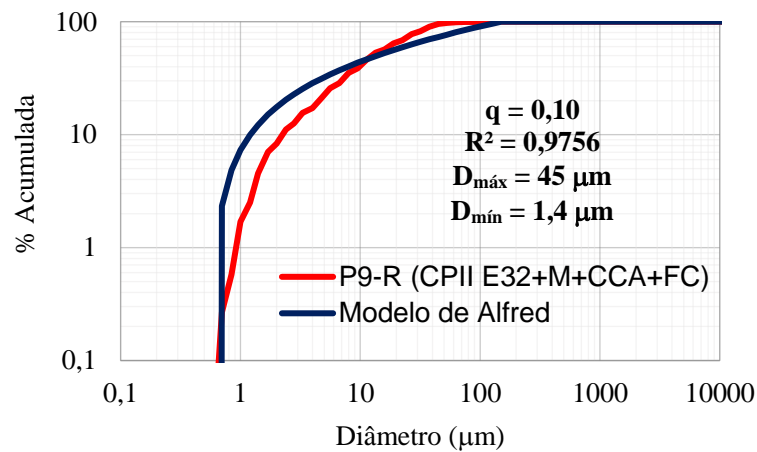
Fonte: Autora (2022)

Figura 28 - Determinação do módulo de distribuição para P8-R



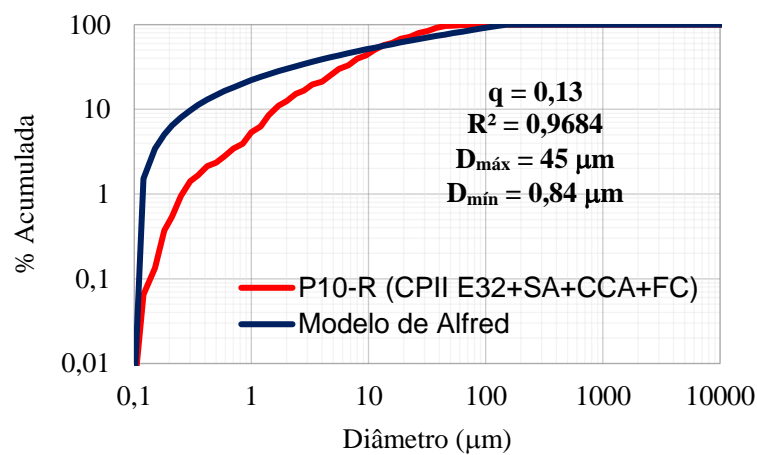
Fonte: Autora (2022)

Figura 29 - Determinação do módulo de distribuição para P9-R



Fonte: Autora (2022)

Figura 30 - Determinação do módulo de distribuição para P10-R



Fonte: Autora (2022)

Tabela 20 - Resumo dos resultados obtidos na determinação dos módulos de distribuição

Aglomerantes ternários	Módulo de distribuição (q)	R ²	Aglomerantes quaternários	Módulo de distribuição (q)	R ²
P1-R	0,27	0,9871	P7-R	0,13	0,9704
P2-R	0,13	0,9693	P8-R	0,27	0,9864
P3-R	0,32	0,9903	P9-R	0,10	0,9756
P4-R	0,10	0,9765	P10-R	0,13	0,9684
P5-R	0,21	0,9900	-	-	-
P6-R	0,10	0,9746	-	-	-

Fonte: Autora (2022)

A partir da análise da Tabela 20, percebe-se que os módulos de distribuição determinados para as diferentes composições de aglomerantes variaram de 0,10 a 0,32. Percebe-se ainda que os coeficientes de correlação distaram de 1, indicando que a aproximação da curva experimental à curva teórica (modelo de Alfred) não foi tão expressiva. A ausência de uma grande quantidade de partículas entre as dimensões de 0,1 a 1 μm pode ser a causa da correlação obtida entre as curvas. Observa-se este fenômeno nas Figuras 21 a 30, nas quais o maior afastamento entre as distribuições granulométricas ocorre na fração mais fina das diferentes composições de aglomerantes.

De acordo com Vanderlei (2004), o módulo de distribuição deve ser menor que 0,30 para que o concreto apresente boa capacidade de escoamento, sendo que valores inferiores a 0,25 resultam em misturas autoadensáveis. Todavia, os concretos a serem produzidos neste trabalho não foram dosados como autoadensáveis. Dessa forma, o adensamento foi realizado por vibração para todas as misturas.

4.3.3 Etapa 3 – Otimização das composições de aglomerantes

Para a realização da terceira etapa, utilizou-se um processo de otimização matemática por meio da ferramenta Solver disponível no *software* Excel. A planilha desenvolvida por Lopes (2019) utiliza como dados de entrada a distribuição discreta dos materiais (Figura 15) e o módulo de distribuição (q) almejado. De maneira iterativa, o programa altera a composição do aglomerante de forma a maximizar o coeficiente de correlação (R²) entre as curvas experimental e teórica (modelo de Alfred).

Em uma primeira tentativa, utilizou-se a ferramenta Solver para a composição P1-R sem nenhuma restrição quanto às proporções de materiais. Mantendo constante o módulo de distribuição determinado na etapa 2, os resultados obtidos mostraram-se inviáveis pois a proporção de cimento determinada foi de 0%. Além disso, o programa retornou uma

proporção acima de 80% para o metacaulim. Diante disso, foram impostas restrições para as proporções dos materiais de acordo com os teores de substituições usualmente utilizados na literatura. Tais restrições podem ser visualizadas na Tabela 21, bem como os trabalhos utilizados como referência para a determinação dos valores limites a serem adotados na otimização dos aglomerantes .

Tabela 21 - Restrições adotadas para utilização da planilha

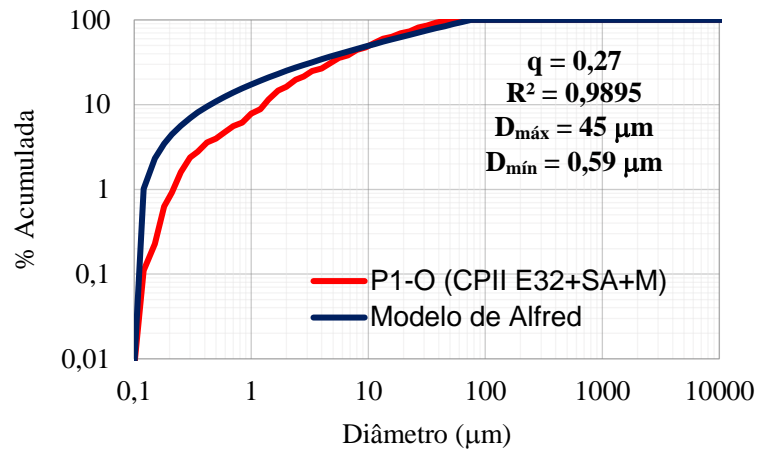
Material	Restrição (%)	Trabalho
CPII E32	≥ 60	-
SA	5 a 15	Tuan <i>et al.</i> (2011), Kuzielová <i>et al.</i> (2017) e Medeiros, Raisdorfer e Hoppe Filho (2017)
M	15 a 40	Medina (2011), Vance <i>et al.</i> (2013) e Kuzielová <i>et al.</i> (2017)
CCA	10 a 20	Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009), Tuan <i>et al.</i> (2011) e Jung <i>et al.</i> (2018)
FC	10 a 30	Vance <i>et al.</i> (2013), Feltrin e Isaia (2018) e Jung <i>et al.</i> (2018)

Fonte: Autora (2022)

Mantendo constante os módulos de distribuição (q) determinados na etapa 2 para cada mistura de aglomerante (Tabela 20) e adotando as restrições dispostas na Tabela 21, utilizou-se novamente a ferramenta Solver para determinar as proporções dos materiais para as diferentes misturas de aglomerantes. Este processo visou a maximização do coeficiente de correlação (R^2) entre as curvas experimentais e as curvas teóricas (modelo de Alfred).

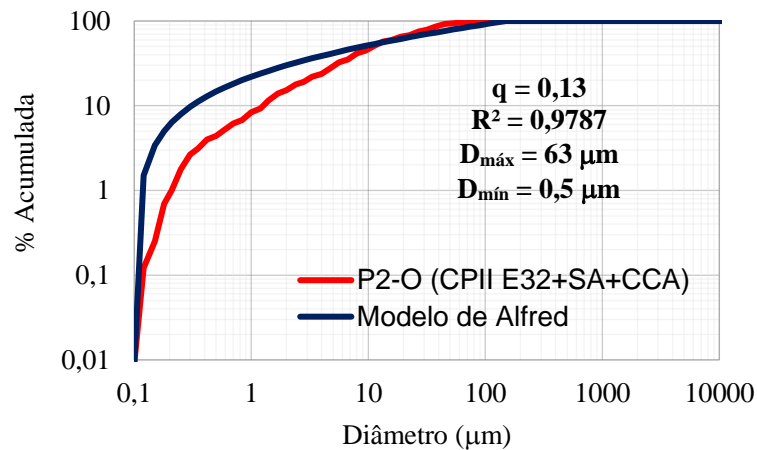
Os resultados obtidos e os diâmetros máximo e mínimo de cada composição de aglomerante podem ser visualizados nas Figuras 31 a 40. A Tabela 22 apresenta as composições otimizadas dos aglomerantes, os módulos de distribuição mantidos constantes da etapa 2, a variação na proporção de cimento e os valores do coeficiente de correlação (R^2) obtido para as novas curvas de distribuição granulométrica em relação às curvas teóricas do modelo de Alfred.

Figura 31 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P1-O



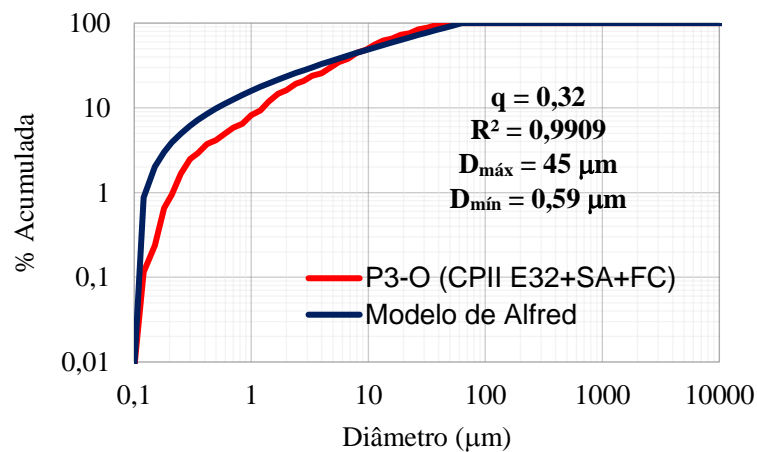
Fonte: Autora (2022)

Figura 32 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P2-O



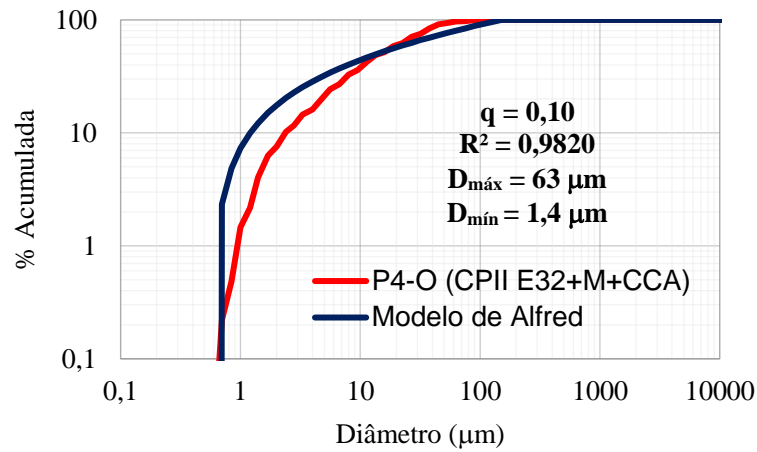
Fonte: Autora (2022)

Figura 33 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P3-O



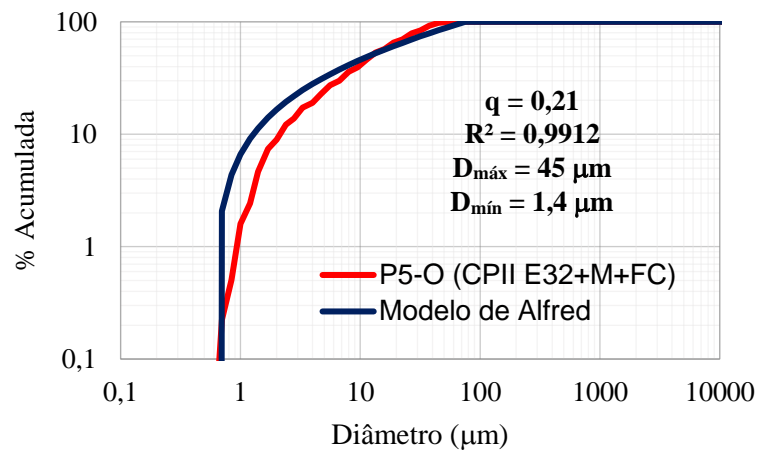
Fonte: Autora (2022)

Figura 34 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P4-O



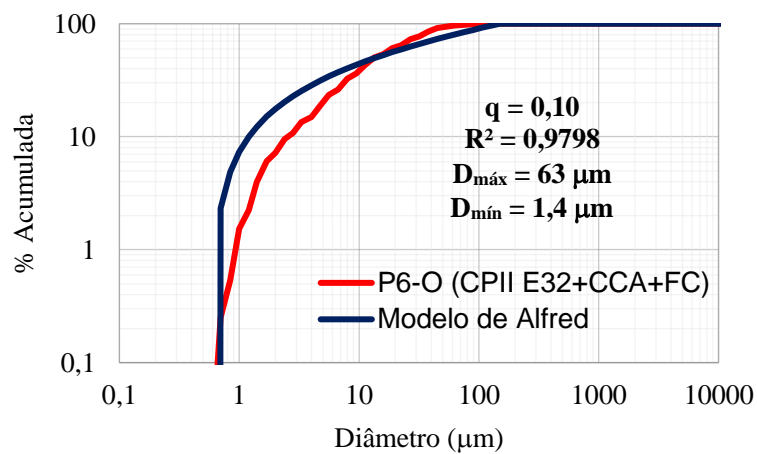
Fonte: Autora (2022)

Figura 35 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P5-O



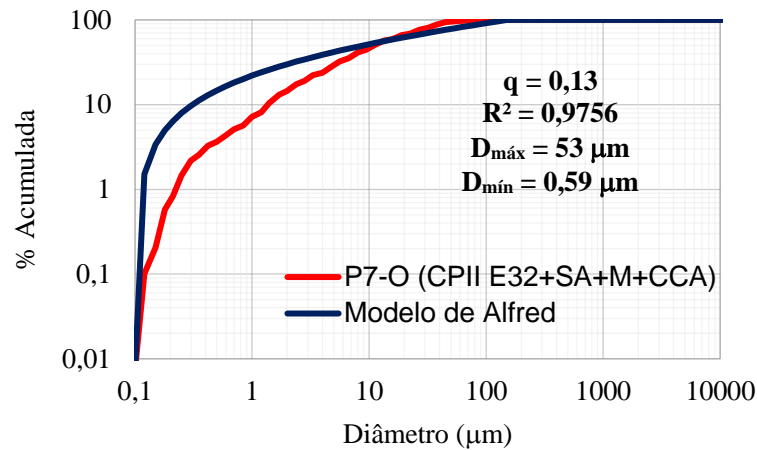
Fonte: Autora (2022)

Figura 36 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P6-O



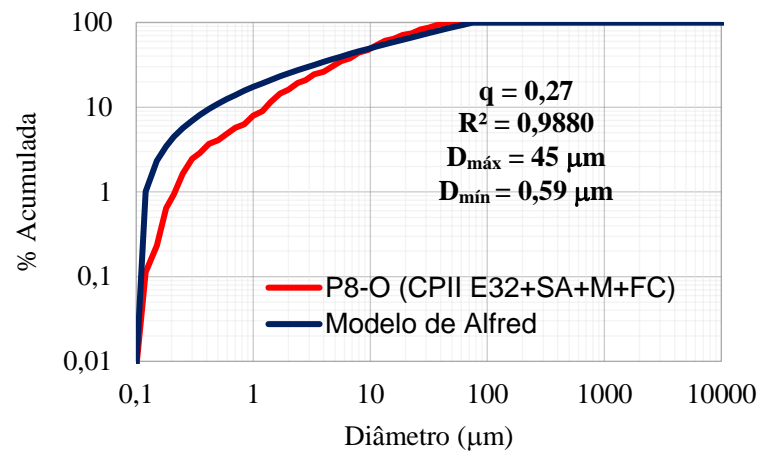
Fonte: Autora (2022)

Figura 37 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P7-O



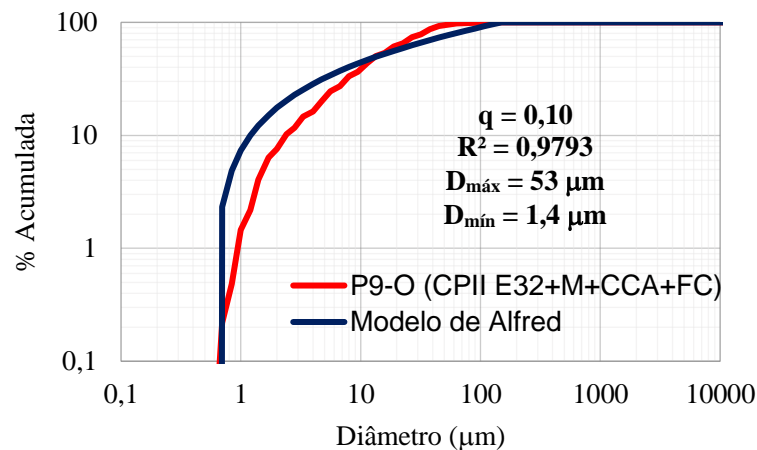
Fonte: Autora (2022)

Figura 38 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P8-O



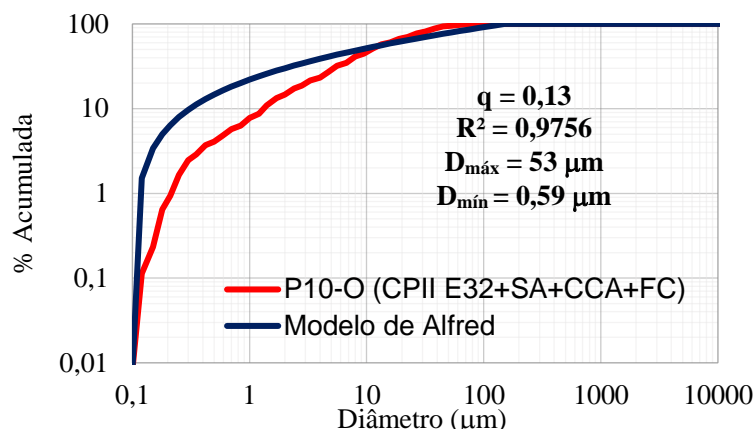
Fonte: Autora (2022)

Figura 39 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P9-O



Fonte: Autora (2022)

Figura 40 - Curva de distribuição granulométrica otimizada para P10-O



Fonte: Autora (2022)

Tabela 22 - Proporções, em massa, otimizadas dos aglomerantes

Composição	CPII E32 (%)	SA (%)	M (%)	CCA (%)	FC (%)	q	VAR CP (%)	R ²
P1-O	60,00	14,00	26,00	-	-	0,27	-27,47	0,9895
P2-O	65,00	15,00	-	20,00	-	0,13	-23,30	0,9787
P3-O	75,88	14,12	-	-	10,00	0,32	-8,57	0,9909
P4-O	60,00	-	20,00	20,00	-	0,10	-27,93	0,9820
P5-O	60,00	-	30,00	-	10,00	0,21	-26,43	0,9912
P6-O	70,00	-	-	20,00	10,00	0,10	-16,18	0,9798
P7-O	60,00	12,38	15,00	12,62	-	0,13	-19,78	0,9756
P8-O	60,00	13,90	16,10	-	10,00	0,27	-18,06	0,9880
P9-O	60,00	-	15,00	15,00	10,00	0,10	-18,57	0,9793
P10-O	60,00	13,93	-	16,07	10,00	0,13	-20,03	0,9756

VAR CP – Variação da proporção de cimento Portland

Fonte: Autora (2022)

Em uma análise comparativa entre as Tabelas 20 e 22, percebe-se que não houve um grande aumento no coeficiente de correlação (R^2) entre as curvas teórica e experimental. Isso ocorreu pois foi necessário limitar a quantidade de sílica ativa ao máximo de 15%, impedindo uma maior aproximação entre as curvas experimental e teórica. Este fenômeno fica evidente nas Figuras 31 a 40, nas quais nota-se o afastamento das curvas na fração mais fina (0,1 a 5 μm) das composições de aglomerantes. Destaca-se ainda que, apesar da pouca alteração do coeficiente de correlação entre as curvas, a otimização dos aglomerantes pelo empacotamento de partículas, por meio do modelo de Alfred, levou a reduções consideráveis da proporção de cimento. A mistura ternária P4-O apresentou a maior porcentagem de redução, 27,93%, em relação à pasta P4-R. O menor teor de redução foi de 8,57%, encontrado para a composição ternária P3-O quando comparada à pasta P3-R.

4.4 ANÁLISE DAS PASTAS DE AGLOMERANTES

As pastas de aglomerantes foram avaliadas no estado fresco a partir do ensaio de miniabatimento e no estado endurecido através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e da porosidade aparente. Os tópicos a seguir apresentam os resultados obtidos para os referidos ensaios, bem como o consumo de materiais determinado para as pastas de referência e otimizadas.

4.4.1 Consumo de materiais

Para avaliar o efeito do empacotamento de partículas na otimização dos aglomerantes foram produzidas pastas de aglomerantes considerando os traços de referência (Tabela 19) e os traços otimizados (Tabela 22). As Tabelas 23 e 24 apresentam o consumo de materiais das pastas de referência e otimizadas, respectivamente.

Tabela 23 - Consumo de materiais das pastas de referência

Composição	Materiais (kg/m ³)							a/c	a/agl
	CPII E32	SA	M	CCA	FC	Água	SP		
P1-R	1150,84	107,77	132,64	-	-	514,33	13,81	0,45	0,37
P2-R	1153,71	108,04	-	99,73	-	513,12	10,38	0,44	0,38
P3-R	1151,22	107,80	-	-	128,29	514,17	9,21	0,45	0,37
P4-R	1150,80	-	132,63	99,48	-	513,69	14,96	0,45	0,37
P5-R	1148,32	-	132,35	-	127,97	514,74	9,76	0,45	0,37
P6-R	1151,18	-	-	99,51	128,29	513,53	9,79	0,45	0,37
P7-R	1010,18	108,11	133,06	99,79	-	512,62	12,63	0,51	0,38
P8-R	1008,00	107,88	132,77	-	128,38	513,67	12,60	0,51	0,37
P9-R	1007,96	-	132,77	99,58	128,38	513,04	14,62	0,51	0,37
P10-R	1010,51	108,15	-	99,83	128,70	512,46	12,63	0,51	0,38

SP – Superplastificante; a/c – água/cimento; a/agl – água/aglomerante

Fonte: Autora (2022)

Tabela 24 - Consumo de materiais das pastas otimizadas

Composição	Materiais (kg/m ³)							a/c	a/agl
	CPII E32	SA	M	CCA	FC	Água	SP		
P1-O	821,37	191,79	355,79	-	-	506,09	18,07	0,62	0,37
P2-O	853,60	196,98	-	262,65	-	494,94	14,51	0,58	0,38
P3-O	1041,56	194,57	-	-	137,35	509,04	10,94	0,49	0,37
P4-O	804,58	-	268,19	268,19	-	498,11	28,96	0,62	0,37
P5-O	837,48	-	418,74	-	139,58	510,05	22,61	0,61	0,37
P6-O	939,66	-	-	268,47	134,24	499,90	15,97	0,53	0,37
P7-O	795,38	164,69	198,84	166,71	-	502,94	17,50	0,63	0,38
P8-O	816,68	183,71	224,63	-	136,11	507,74	15,52	0,62	0,37
P9-O	806,19	-	201,55	201,55	134,36	503,65	23,38	0,62	0,37
P10-O	787,40	185,28	-	208,42	131,23	499,21	18,11	0,63	0,38

SP – Superplastificante; a/c – água/cimento; a/agl – água/aglomerante

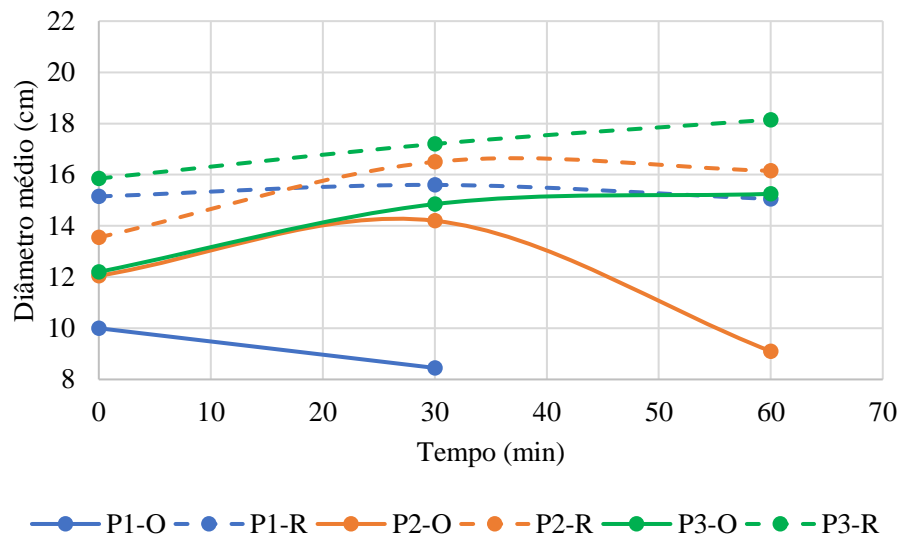
Fonte: Autora (2022)

Comparando as Tabelas 23 e 24, evidencia-se a redução do consumo de cimento para todos os traços, sendo a maior redução determinada para a P4 (30,09%) e a menor observada para a P3 (9,53%). Observa-se ainda que, como a relação água/aglomerante foi mantida constante para os traços de referência e otimizados, foi necessário aumentar a quantidade de superplastificante nas composições otimizadas para manter a trabalhabilidade desejada. Este resultado é semelhante ao observado por Oliveira *et al.* (2018) e por Lopes, Peçanha e Castro (2020) ao avaliarem o efeito do empacotamento de partículas na otimização de concretos.

4.4.2 Miniabatimento

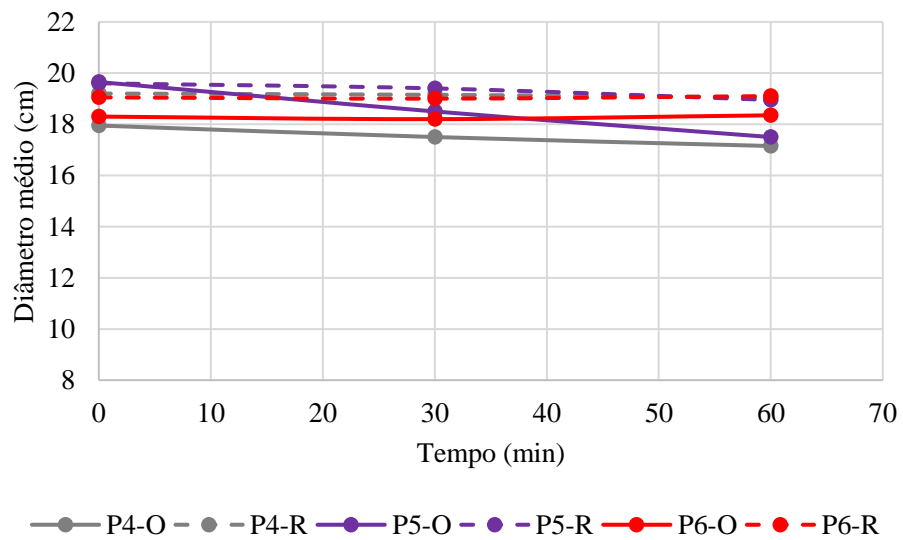
O ensaio de miniabatimento foi realizado para as pastas de referência produzidas a partir das proporções de materiais descritas na Tabela 19 e para as pastas otimizadas elaboradas tomando como base os valores em porcentagem indicados na Tabela 22. As Figuras 41 a 43 mostram os resultados obtidos para os ensaios de miniabatimento das pastas de aglomerantes de referência e otimizadas.

Figura 41 - Resultados do miniabatimento para composições ternárias de aglomerantes com sílica ativa



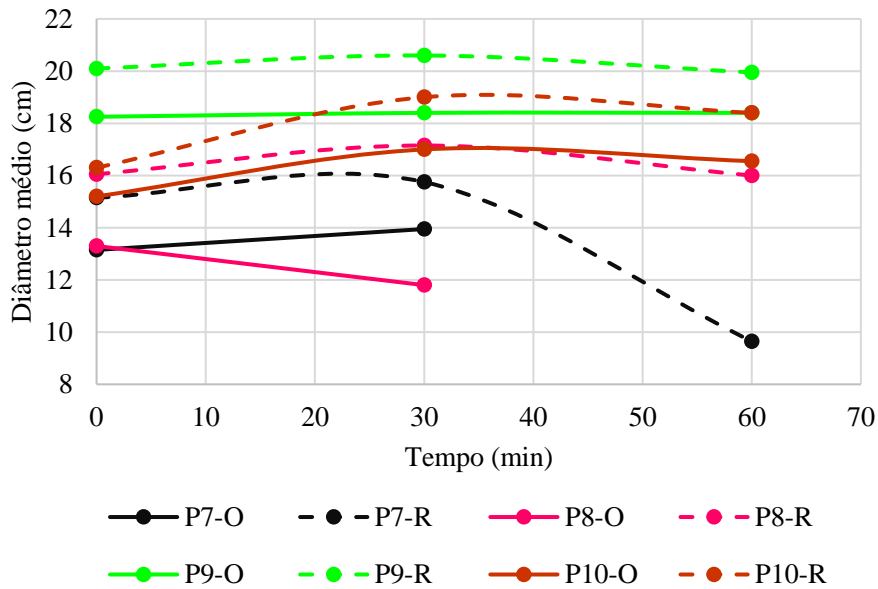
Fonte: Autora (2022)

Figura 42 - Resultados do miniabatimento para composições ternárias de aglomerantes sem sílica ativa



Fonte: Autora (2022)

Figura 43 - Resultados do miniabatimento para composições quaternárias de aglomerantes



Fonte: Autora (2022)

Cabe esclarecer, inicialmente, que as análises para as composições ternárias de aglomerantes foram subdivididas entre composições com e sem sílica ativa. Esta subdivisão foi realizada devido aos resultados de distribuição granulométrica obtidos, nos quais evidencia-se a diferença entre as curvas contendo ou não sílica ativa.

De maneira geral, percebe-se nas Figuras 41 a 43 que todas as composições de aglomerantes otimizadas tiveram um espalhamento menor sobre a placa de vidro em comparação com as composições de referência. Este resultado pode ser considerado um indicativo de que estas misturas otimizadas levarão à produção de concretos com menor trabalhabilidade do que aqueles produzidos com os aglomerantes não otimizadas pelo empacotamento de partículas.

Para algumas composições –P1-O, P7-O e P8-O– o aumento da viscosidade com o tempo foi tão elevada que não foi possível a realização do ensaio após 60 minutos da preparação da mistura, a qual atingiu uma consistência viscosa que impossibilitou o preenchimento do molde para o ensaio. Os resultados obtidos para o ensaio de miniabatimento evidenciam a perda da trabalhabilidade das pastas otimizadas quando comparadas às pastas de referência, efeito atribuído ao aumento da quantidade de finos na mistura. Em estudos conduzidos por Londero (2016) e Lopes (2019) observou-se efeito similar para os concretos produzidos a partir do empacotamento de partículas, ou seja, os concretos com menor consumo de cimento e maior consumo de adições minerais demonstraram redução da trabalhabilidade quando comparados aos concretos de referência.

Ademais, notou-se para algumas pastas de aglomerante a ocorrência da tixotropia, caracterizada pela redução da viscosidade aparente em função do tempo quando a suspensão é submetida a uma taxa de cisalhamento constante. Para a realização dos ensaios nos tempos de 30 e 60 minutos após o fim da produção, as pastas ficavam em repouso e no momento de preencher o minicone eram agitadas a fim de homogeneizar a mistura. Essa agitação pode ter ocasionado a redução da viscosidade das pastas, o que levou a um maior espalhamento sobre a mesa de vidro. Este fenômeno foi observado com maior evidência para as pastas P3-O e P3-R e com menor evidência para as pastas P2-O, P2-R, P10-O e P10-R.

As análises estatísticas referentes aos resultados obtidos para o ensaio de miniabatimento encontram-se dispostas no Apêndice A. Destaca-se que, pelo critério de *Chauvenet*, os dados coletados são considerados homogêneos. Além disso, aplicou-se o teste *t* de *Student* entre as composições otimizadas e suas respectivas composições de referência para avaliar a influência do empacotamento de partículas no miniabatimento das pastas de aglomerantes.

Da aplicação do teste *t*, percebe-se que para o ensaio realizado logo após o preparo das amostras (tempo 0) houve diferença significativa entre as composições P1, P2, P3 e P8. Para o ensaio aos 30 minutos, as pastas P4, P5, P7 e P10 podem ser consideradas estatisticamente iguais. Por fim, com relação ao ensaio realizado aos 60 minutos, notou-se diferença significativa entre as misturas P2, P3 e P5.

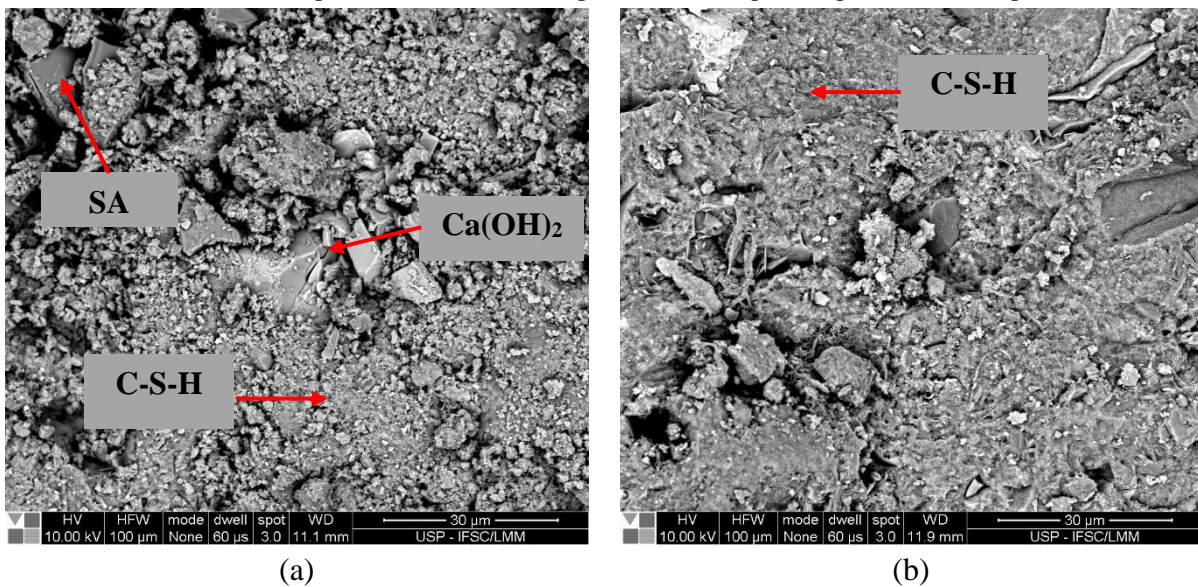
4.4.3 Microscopia eletrônica de varredura

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura com análise EDS foi realizado para as pastas de aglomerantes, de referência e otimizadas, na idade de 28 dias com o intuito de avaliar a hidratação do cimento e das adições minerais utilizadas. Para isso, buscou-se observar a formação dos produtos de hidratação diretamente vinculados ao desenvolvimento da resistência mecânica do concreto, sendo eles o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Os raios X resultantes da interação do feixe de elétrons com a pasta de aglomerante são captados pelo espectrômetro de dispersão de energia, que fornece um histograma de intensidade dos elementos presentes na amostra. Dessa forma, avalia-se a presença dos elementos por meio de uma comparação de intensidades. Além disso, o feixe de elétrons interage com uma ampla região da amostra, de modo que ao aplicar o EDS a um ponto específico, deve-se considerar que no seu histograma de intensidades constará a presença de elementos externos à região examinada.

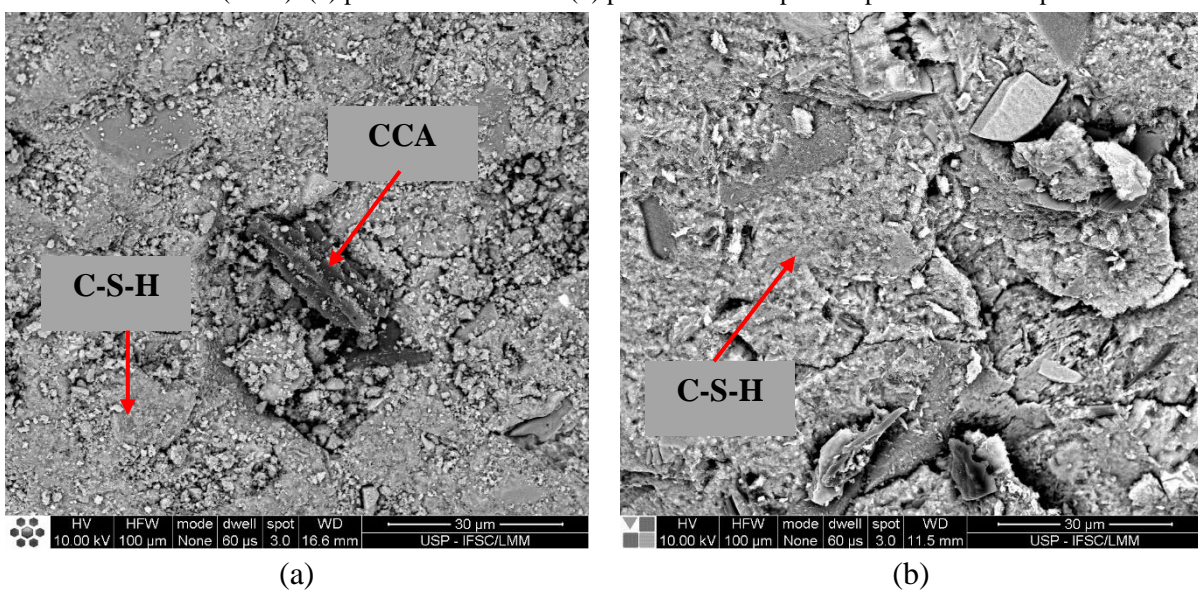
As Figuras 44 a 53 apresentam as imagens obtidas pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), a partir do detector de elétrons retroespalhados, para as pastas de aglomerante otimizadas e suas respectivas pastas de referência. Os resultados obtidos pela análise de espectroscopia de dispersão de energia (EDS) podem ser visualizados no Apêndice B.

Figura 44 - Micrografia da pasta de aglomerante P1 composta por cimento Portland, sílica ativa (SA) e metacaulim (M): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas



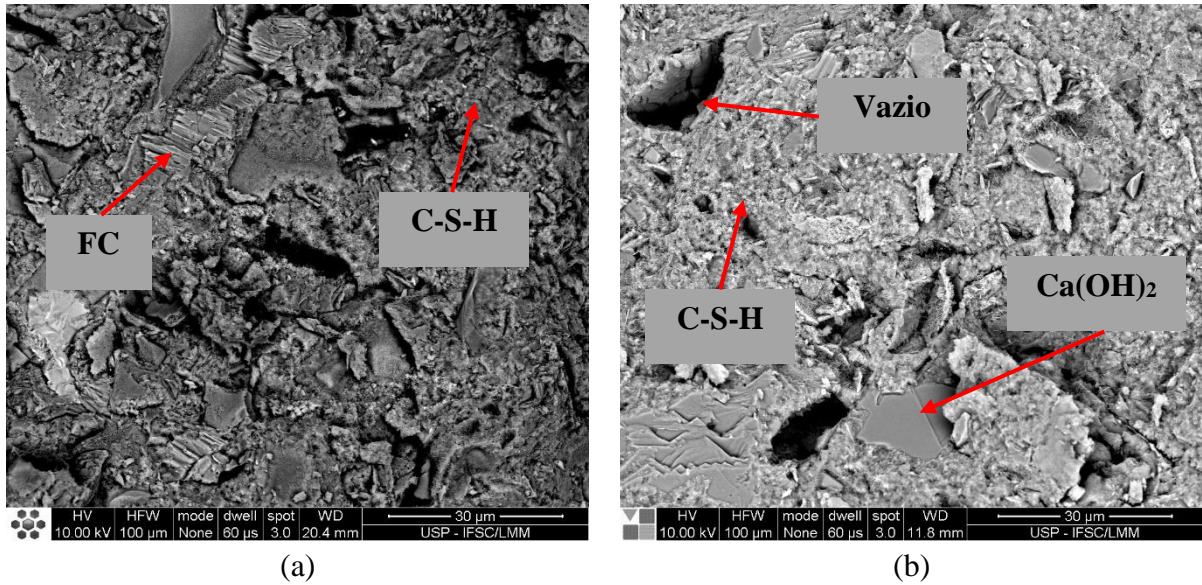
Fonte: Autora (2022)

Figura 45 - Micrografia da pasta de aglomerante P2 composta por cimento Portland, sílica ativa (SA) e cinza de casca de arroz (CCA): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas



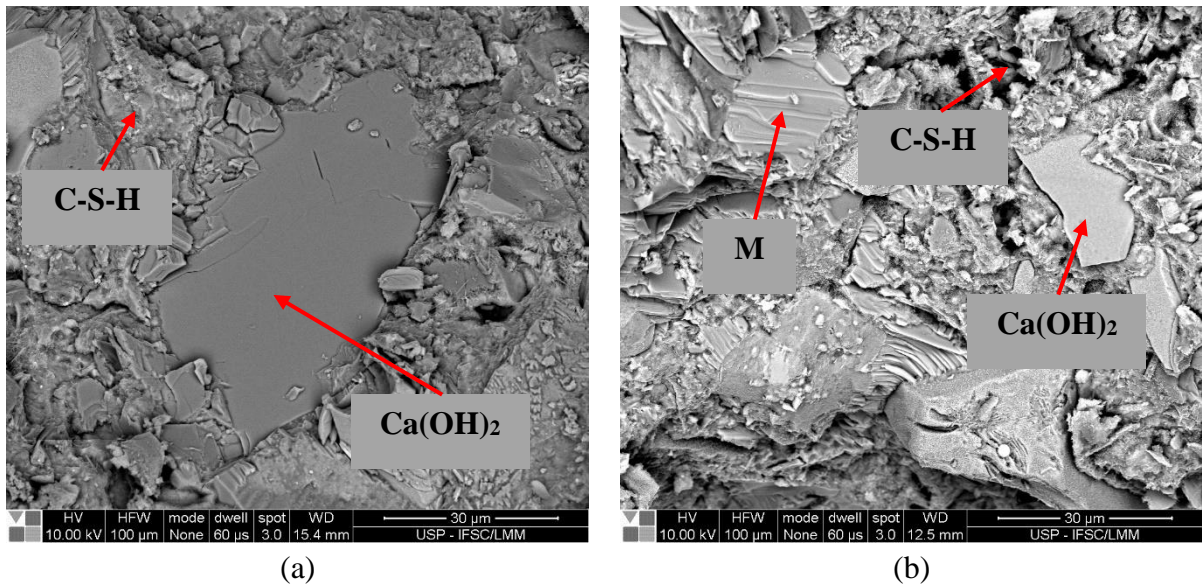
Fonte: Autora (2022)

Figura 46 - Micrografia da pasta de aglomerante P3 composta por cimento Portland, sílica ativa (SA) e fíler calcário (FC): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas



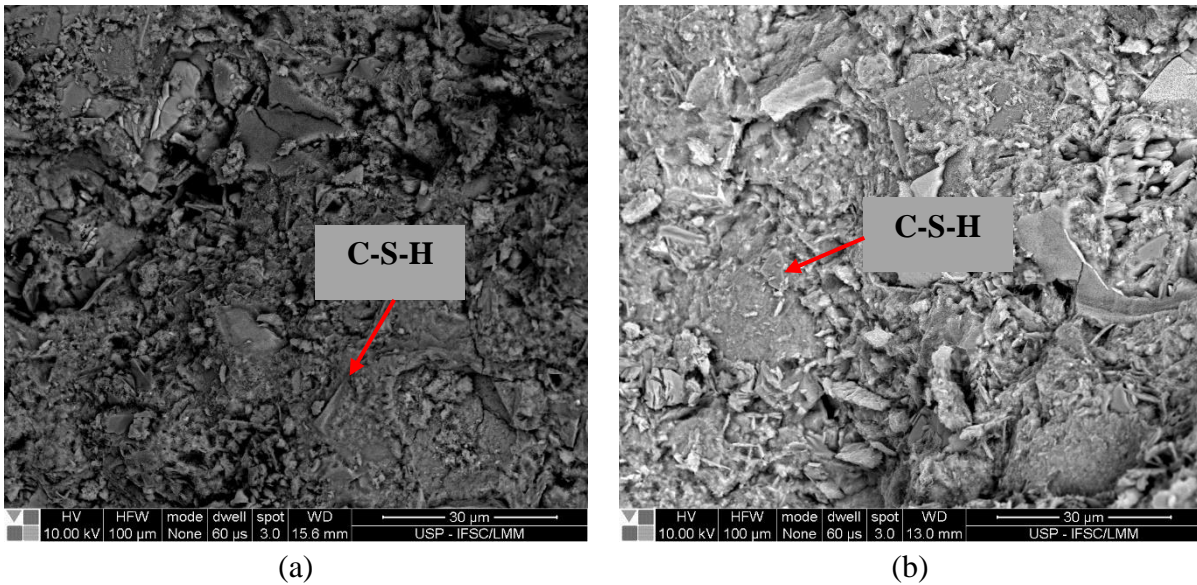
Fonte: Autora (2022)

Figura 47 - Micrografia da pasta de aglomerante P4 composta por cimento Portland, metacaulim (M) e cinza de casca de arroz (CCA): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas



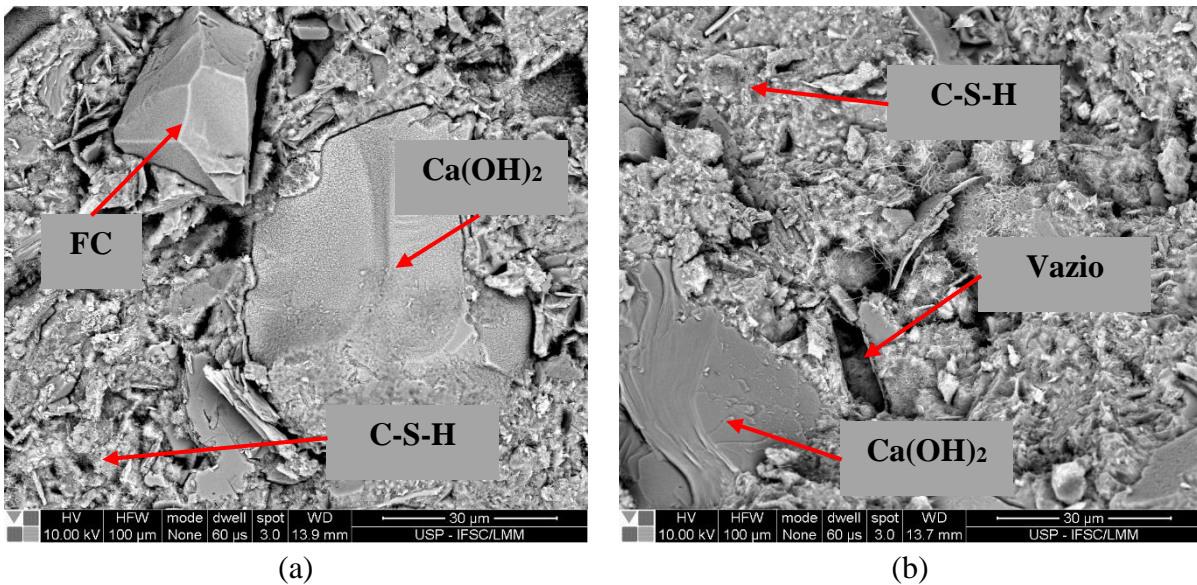
Fonte: Autora (2022)

Figura 48 - Micrografia da pasta de aglomerante P5 composta por cimento Portland, metacaulim (M) e fíler calcário (FC): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas



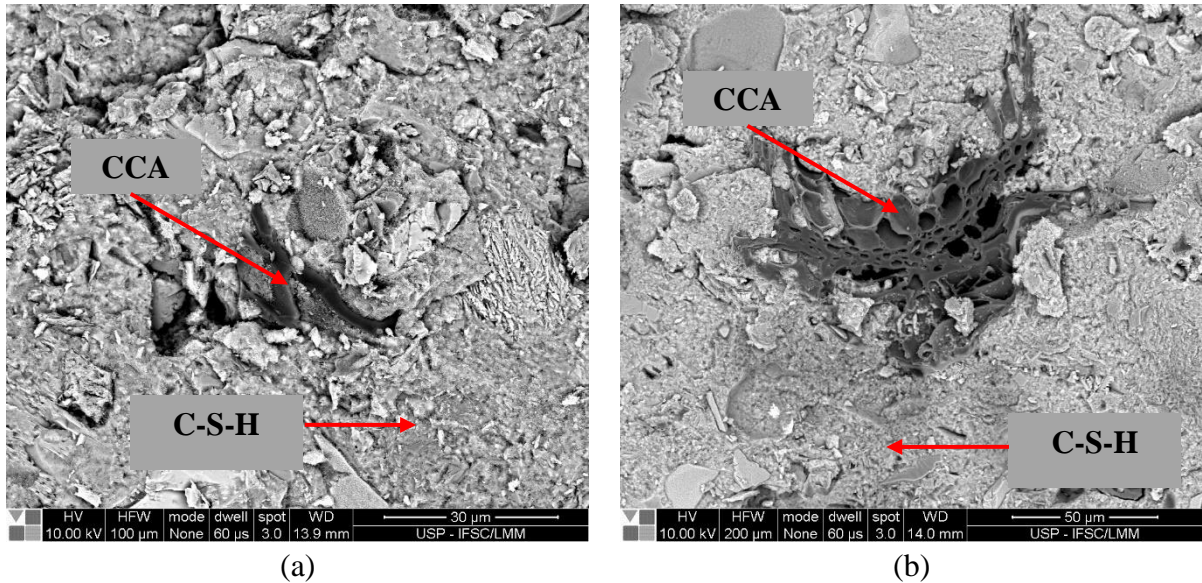
Fonte: Autora (2022)

Figura 49 - Micrografia da pasta de aglomerante P6 composta por cimento Portland, cinza de casca de arroz (CCA) e fíler calcário (FC): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas



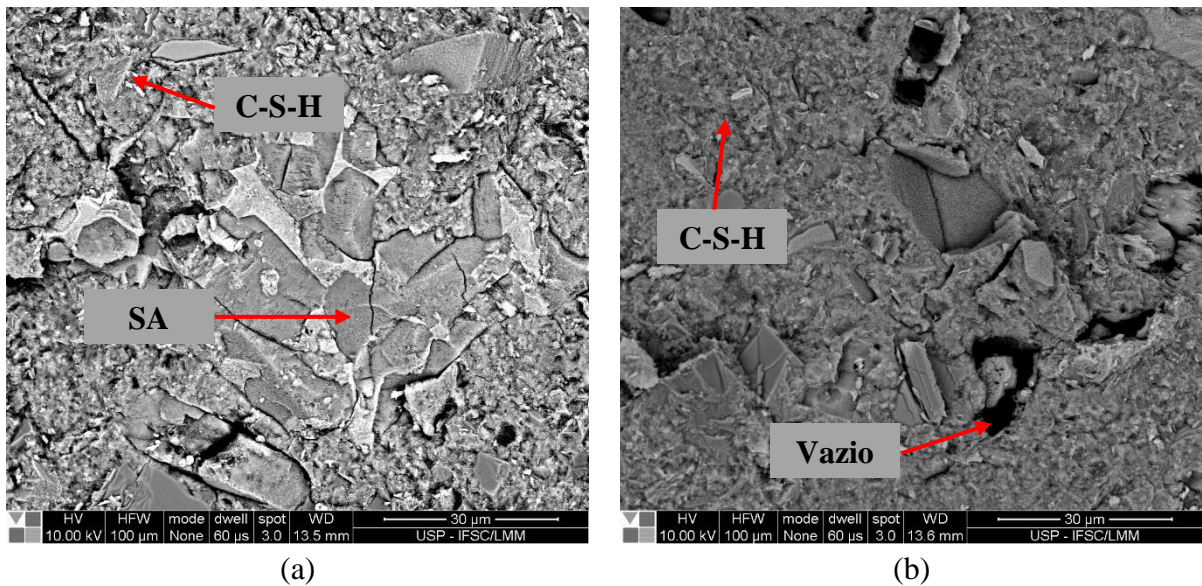
Fonte: Autora (2022)

Figura 50 - Micrografia da pasta de aglomerante P7 composta por cimento Portland, sílica ativa (SA), metacaulim (M) e cinza de casca de arroz (CCA): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas



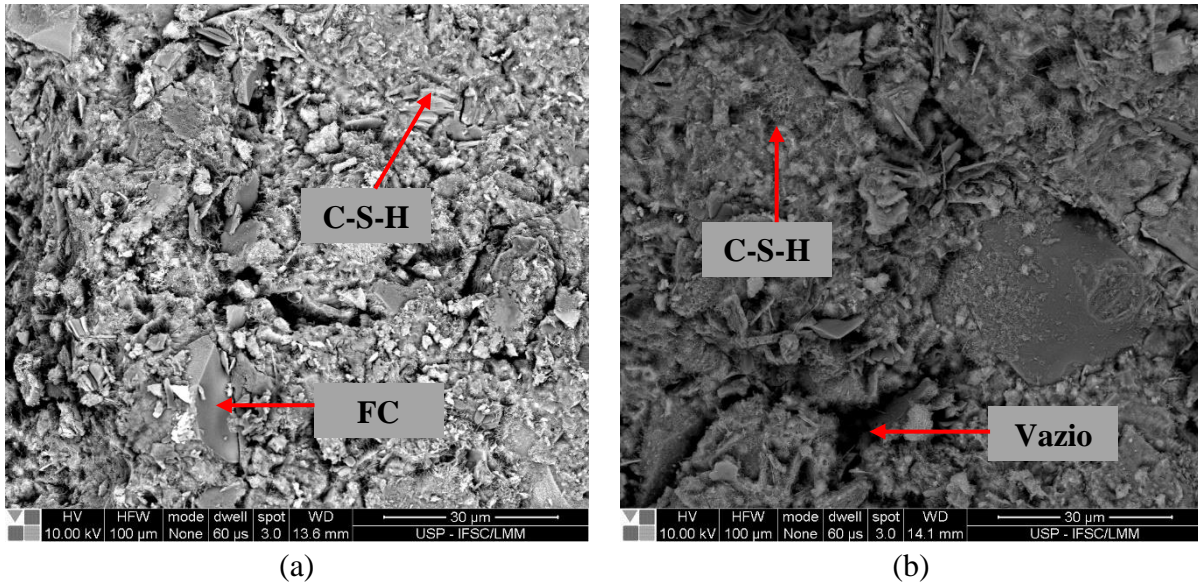
Fonte: Autora (2022)

Figura 51 - Micrografia da pasta de aglomerante P8 composta por cimento Portland, sílica ativa (SA), metacaulim (M) e filer calcário (FC): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas



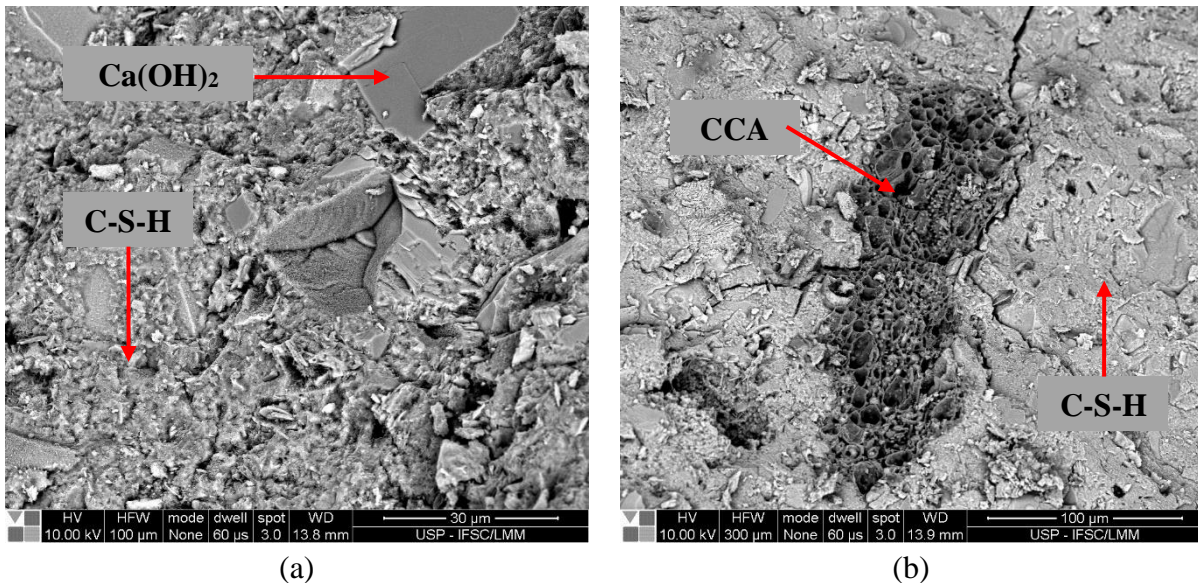
Fonte: Autora (2022)

Figura 52 - Micrografia da pasta de aglomerante P9 composta por cimento Portland, metacaulim (M), cinza de casca de arroz (CCA) e fíler calcário (FC): (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas



Fonte: Autora (2022)

Figura 53 - Micrografia da pasta de aglomerante P10 composta por cimento Portland, sílica ativa, cinza de casca de arroz e fíler calcário: (a) pasta de referência e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas



Fonte: Autora (2022)

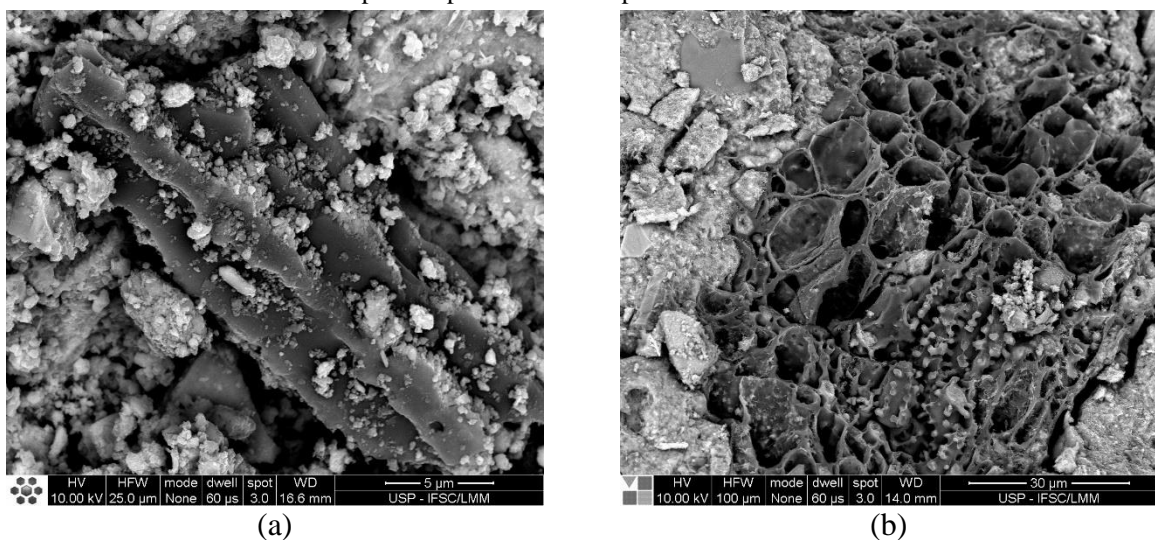
A partir das Figuras 44 a 53, nota-se que não houve grandes alterações na microestrutura das pastas de aglomerantes otimizadas pelo empacotamento de partículas quando comparadas às suas respectivas pastas de referência. Para todas as composições avaliadas, observa-se a presença de partículas provenientes das adições minerais utilizadas ou da hidratação do cimento, envolvidas por uma matriz densificada constituída pelo gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Destaca-se nas imagens, a presença de partículas não hidratadas de sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz e fíler calcário. Sabe-se, ainda, que as adições minerais reagem com o hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação do cimento, para formar silicato de cálcio hidratado secundário e, assim, aumentar a resistência mecânica do concreto. Dessa forma, a existência de partículas não hidratadas de adições minerais, nas amostras avaliadas aos 28 dias de idade, reforça a necessidade de se acompanhar o desenvolvimento da resistência à compressão de concretos produzidos com adições minerais em idades posteriores a 28 dias.

Para o fíler calcário, normalmente considerado quimicamente inerte, espera-se uma maior contribuição para o ganho de resistência mecânica do concreto devido a seu efeito fíler de preenchimento dos vazios da pasta. Para a sílica ativa, o metacaulim e a cinza de casca de arroz, além do efeito fíler, há o efeito químico proveniente da reação pozolânica, ou seja, da reação destas adições com o hidróxido de cálcio, advindo da hidratação do cimento. Estas reações formam silicatos de cálcio hidratados secundários que aumentam a resistência mecânica do concreto ao longo do tempo, conforme as adições minerais pozolânicas reagem.

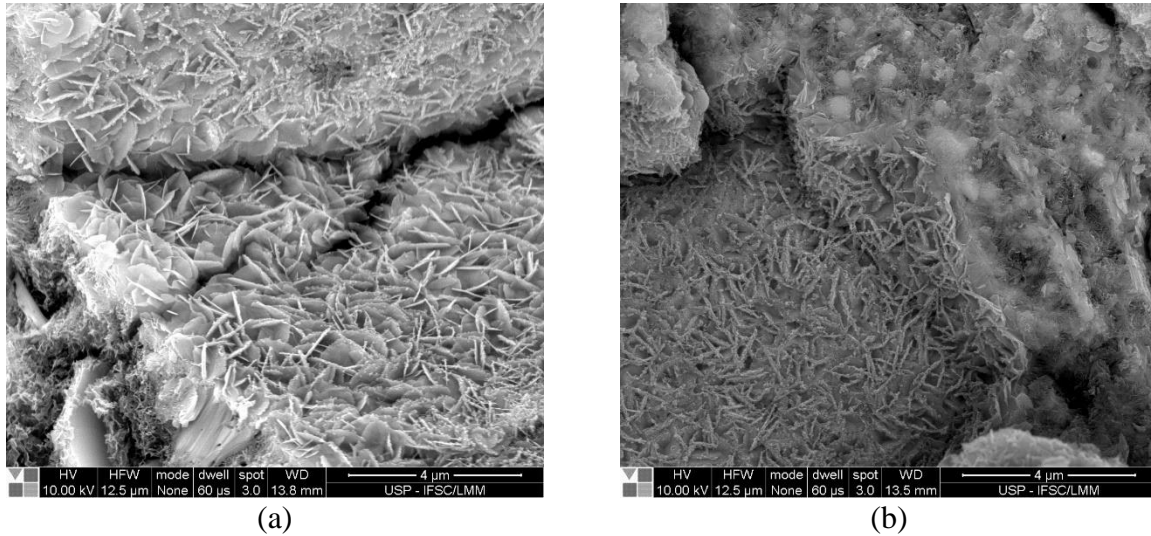
Na sequência, as Figuras 54 e 55 exibem alguns detalhes observados durante a realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura.

Figura 54 - Detalhes da morfologia da cinza de casca de arroz: (a) pasta de referência P2-R e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas P10-O



Fonte: Autora (2022)

Figura 55 - Detalhes das diferentes morfologias do C-S-H: (a) pasta de referência P10-R e (b) pasta otimizada pelo empacotamento de partículas P8-O



(a)

(b)

Fonte: Autora (2022)

Na Figura 54, nota-se que a partícula de cinza de casca de arroz tem elevada porosidade, conforme comentado por Neville (2016), apresenta coloração mais escura e possui dimensões superiores aos demais elementos da composição. Tais características levaram à produção de concretos em tons de cinza escuro e que demandaram grandes quantidades de superplastificante para que atingissem uma consistência adequada para moldagem dos corpos de prova.

Por fim, a Figura 55 mostra que o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) pode ser encontrado com morfologias variadas, corroborando com as informações encontradas na literatura. Mehta e Monteiro (2014) descrevem que o C-S-H não é um composto bem definido, com estrutura variando de partículas fibrosas a malhas reticuladas.

4.4.4 Porosidade aparente

A pasta de cimento hidratada é composta pelos produtos de hidratação e por diversos tipos de vazios que influenciam nas propriedades da pasta endurecida. Os vazios entre as camadas da estrutura do C-S-H variam de 1 a 4 nm (MEHTA; MONTEIRO, 2014), sendo muito pequenos para afetarem a resistência mecânica ou permeabilidade da pasta hidratada.

Os vazios capilares representam o espaço não preenchido entre os componentes sólidos da pasta de cimento hidratada. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), em uma pasta de cimento bem hidratada e com baixa relação água/cimento os vazios capilares variam de 10 a 50 nm, sendo que os vazios maiores que 50 nm são denominados de macroporos e influenciam a resistência mecânica e permeabilidade da pasta endurecida.

Os vazios de ar costumam apresentar forma esférica e é comum que uma pequena quantidade desses vazios fique aprisionada na pasta de cimento durante o processo de mistura. O ar aprisionado pode atingir até 3 mm de dimensão, sendo prejudicial para a resistência mecânica da pasta endurecida.

O ensaio de porosidade aparente realizado nas pastas de referência e otimizadas avalia a quantidade de vazios capilares e ar aprisionado nas composições avaliadas. A Tabela 25 contempla os resultados obtidos e as Figuras 56 a 58 trazem uma comparação gráfica da porosidade aparente entre as misturas otimizadas e suas respectivas composições de referência.

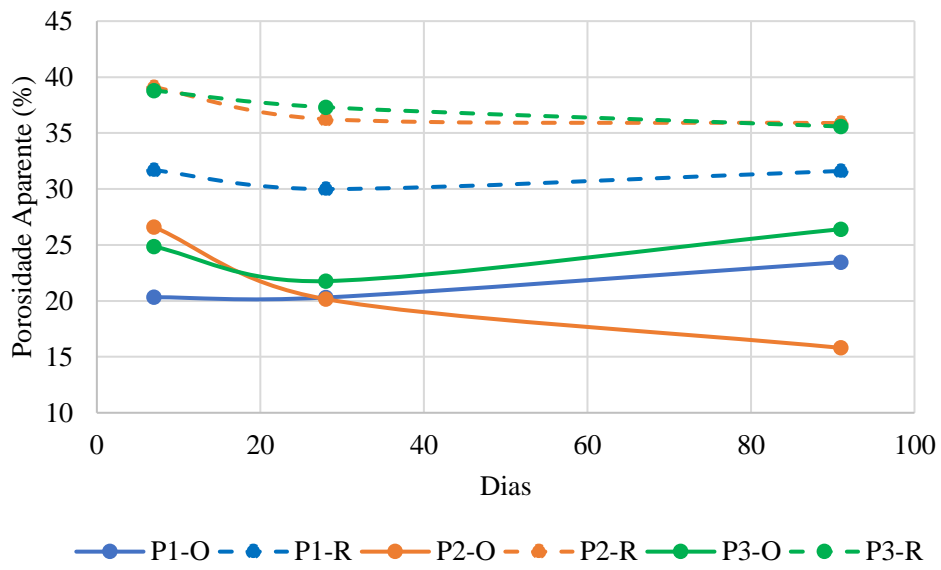
Tabela 25 - Resultados da porosidade aparente das pastas de aglomerantes

Pasta	7 dias			28 dias			91 dias		
	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)
P1-R	31,68	0,90	2,84	30,00	0,86	2,86	31,61	2,01	6,35
P1-O	20,33	0,24	1,20	20,30	0,83	4,09	23,46	0,88	3,74
P2-R	39,10	0,85	2,17	36,25	0,99	2,72	35,89	1,53	4,27
P2-O	26,60	2,04	7,65	20,16	1,07	5,32	15,80	0,58	3,65
P3-R	38,80	2,39	6,16	37,31	2,12	5,69	35,58	0,71	2,01
P3-O	24,85	1,42	5,71	21,77	1,34	6,17	26,41	1,11	4,21
P4-R	40,86	4,34	10,62	31,97	1,55	4,86	32,26	4,53	14,04
P4-O	33,81	1,03	3,04	30,16	1,56	5,18	25,61	3,18	12,40
P5-R	38,40	0,50	1,29	33,62	2,56	7,60	30,96	1,05	3,40
P5-O	28,80	1,15	4,00	30,81	3,66	11,87	24,89	1,43	5,74
P6-R	38,12	2,35	6,15	35,09	1,05	2,99	36,49	1,67	4,57
P6-O	39,43	0,18	0,47	38,72	0,61	1,58	36,84	1,56	4,25
P7-R	29,27	1,38	4,70	26,23	2,77	10,58	25,33	2,65	10,47
P7-O	23,33	0,22	0,96	15,89	2,08	13,09	18,80	1,01	5,38
P8-R	26,54	0,65	2,45	20,94	0,43	2,07	19,92	3,81	19,14
P8-O	25,01	1,21	4,82	17,34	0,29	1,64	24,47	1,85	7,54
P9-R	38,37	0,66	1,73	35,22	2,41	6,84	28,12	2,37	8,41
P9-O	38,85	0,48	1,25	33,58	0,65	1,93	22,65	2,15	9,48
P10-R	36,04	0,86	2,38	25,43	2,20	8,65	27,37	0,84	3,05
P10-O	27,99	1,76	6,29	20,44	1,98	9,67	15,25	1,72	11,26

DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação

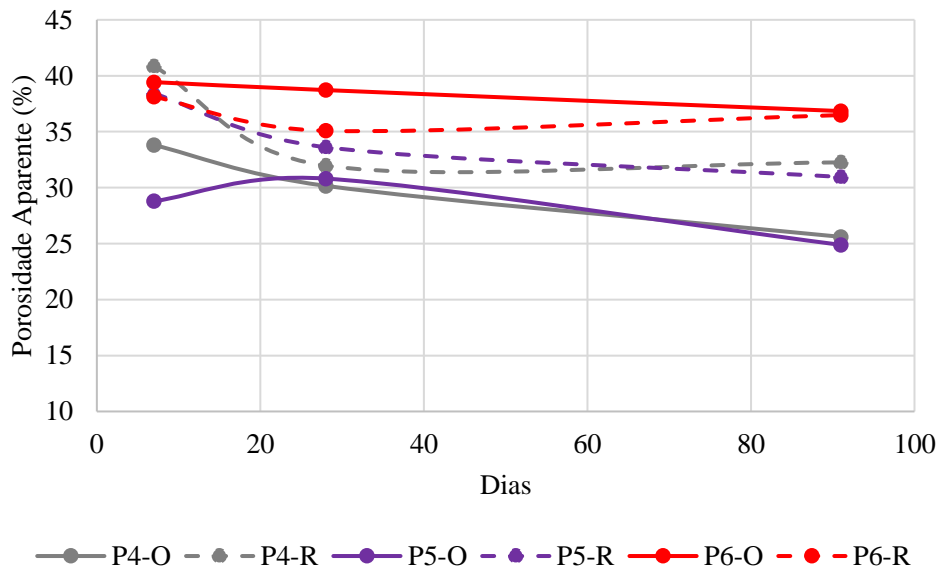
Fonte: Autora (2022)

Figura 56 - Porosidade aparente das composições ternárias com sílica ativa



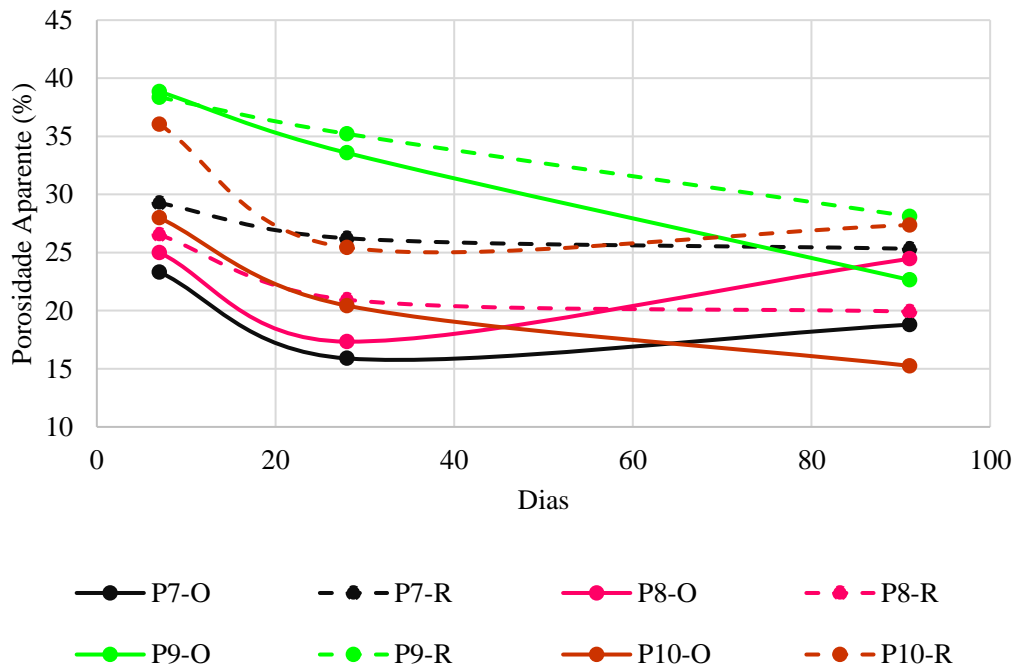
Fonte: Autora (2022)

Figura 57 - Porosidade aparente das composições ternárias sem sílica ativa



Fonte: Autora (2022)

Figura 58 - Porosidade aparente das composições quaternárias



Fonte: Autora (2022)

Da análise das Figuras 56 a 58 e da Tabela 25, percebe-se que houve uma redução da porosidade aparente para quase todas as composições otimizadas em comparação com suas respectivas misturas de referência. Este fato evidencia o refinamento de poros promovido pela otimização das misturas através da aplicação do empacotamento de partículas. Além disso, a redução da porosidade observada nas pastas de aglomerantes pode levar à produção de concretos com menor porosidade e permeabilidade e, conseqüentemente, maior resistência mecânica e durabilidade.

A partir da Figura 57 observa-se que a porosidade aparente da composição otimizada P6-O (cimento Portland, cinza de casca de arroz e fíler calcário) foi superior quando comparada à sua respectiva pasta de referência P6-R, para todas as idades de ensaio. A mistura P8-O (cimento Portland, sílica ativa, metacaulim e fíler calcário) obteve porosidade aparente superior quando comparada à P8-R aos 91 dias de idade, assim como a composição P9-O (cimento Portland, metacaulim, cinza de casca de arroz e fíler calcário) aos 7 dias quando comparada à P9-R. No entanto, conforme resultados do teste t de *Student* apresentados no Apêndice C, para o ensaio realizado aos 7 dias houve diferença significativa entre as composições P1, P2, P3, P5, P7 e P10. Para o ensaio aos 28 dias, as pastas P4, P5 e P9 podem ser consideradas estatisticamente iguais. Por fim, com relação ao ensaio realizado aos 91 dias, notou-se diferença significativa entre as misturas P1, P2, P3, P5, P7, P9 e P10.

Dessa forma, com relação às composições P6, P8 e P9, apenas o resultado encontrado aos 28 dias para as misturas P6-O e P6-R foi considerado estatisticamente diferente, ficando a pasta otimizada com maior quantidade de poros do que a sua respectiva composição de referência. Considera-se, portanto, que houve eficiência na aplicação do empacotamento de partículas (modelo de Alfred) quanto à redução da porosidade aparente das pastas de aglomerantes avaliadas.

As demais análises estatísticas – critério de *Chauvenet* e teste de *Tukey* – referentes aos resultados obtidos para o ensaio de porosidade aparente também estão dispostas no Apêndice C. Destaca-se que, pelo critério de *Chauvenet*, os dados coletados são considerados homogêneos.

4.5 CONCRETOS OTIMIZADOS

A partir das composições dos aglomerantes obtidas pelo empacotamento de partículas (Tabela 22) por meio do modelo de Alfred, determinou-se o consumo de materiais real dos concretos otimizados, como mostra a Tabela 26.

Tabela 26 - Consumo de materiais (em kg/m³) real dos concretos otimizados

Composição	Sigla	Materiais								
		CPII E32	SA	M	CCA	FC	Areia Fina	Areia Média	Brita 1	Água
Concreto 1	C1-O	277,60	64,80	120,27	-	-	386,67	580,01	850,68	171,07
Concreto 2	C2-O	288,71	66,62	-	88,83	-	380,71	571,07	839,42	167,62
Concreto 3	C3-O	350,42	65,21	-	-	46,18	385,96	580,26	851,76	171,02
Concreto 4	C4-O	279,33	-	93,11	93,11	-	389,77	586,01	859,38	172,55
Concreto 5	C5-O	280,61	-	140,30	-	46,77	385,07	578,24	848,94	171,06
Concreto 6	C6-O	316,96	-	-	90,56	45,28	381,97	571,69	839,82	168,47
Concreto 7	C7-O	269,07	55,52	67,27	56,55	-	386,76	579,50	851,38	169,89
Concreto 8	C8-O	271,59	62,97	72,83	-	45,27	383,49	575,30	844,61	169,18
Concreto 9	C9-O	271,61	-	67,90	67,90	45,27	385,29	577,31	846,88	169,63
Concreto 10	C10-O	263,93	61,31	-	70,66	43,99	381,74	572,61	840,59	167,61

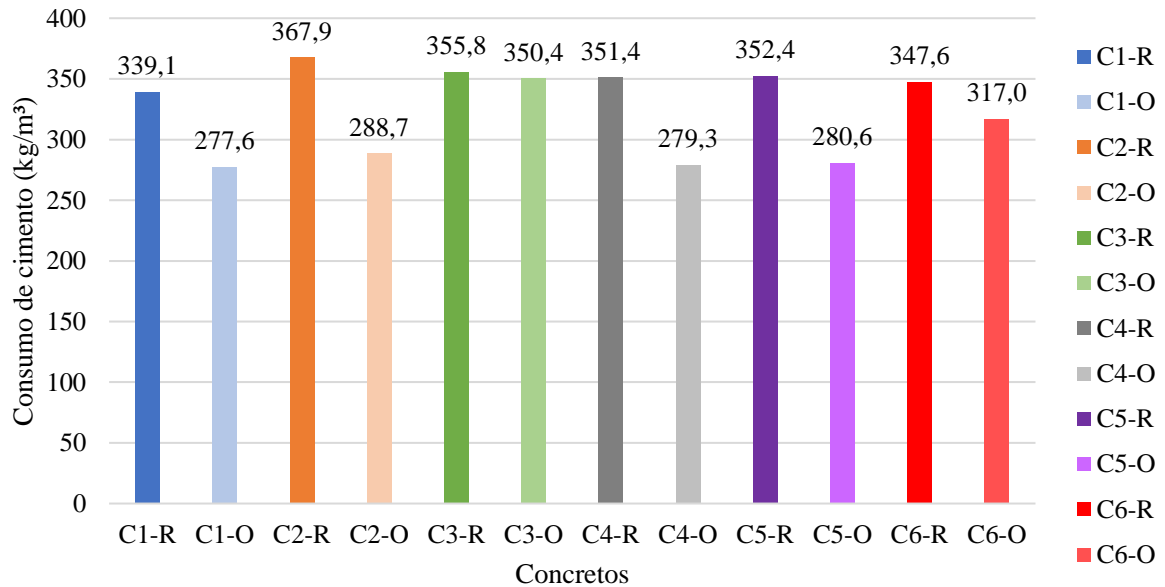
Nota: O - Otimizado

Fonte: Autora (2022)

Comparando os resultados da Tabela 26 com a Tabela 18 (referente aos consumo de materiais real dos concretos de referência), nota-se a redução do consumo de cimento para

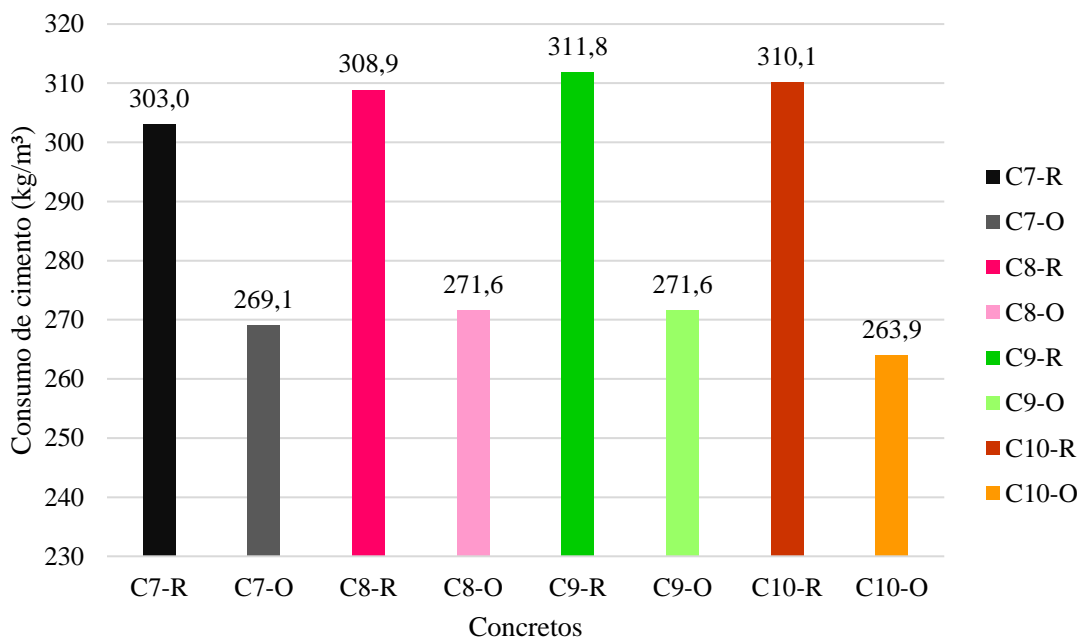
todas as misturas, como mostram as Figuras 59 e 60, ao mesmo tempo em que há o acréscimo do consumo das adições minerais.

Figura 59 - Comparação do consumo de cimento entre os concretos otimizados e de referência produzidos com aglomerante ternário



Fonte: Autora (2022)

Figura 60 – Comparação do consumo de cimento entre os concretos otimizados e de referência produzidos com aglomerante quaternário



Fonte: Autora (2022)

Dentre os concretos produzidos a partir de misturas ternárias otimizadas de aglomerantes (Figura 59), o concreto C2-O levou à maior redução (21,52%) no consumo de cimento Portland, quando comparado ao concreto C2-R. Da mesma forma, dos concretos produzidos com aglomerantes quaternários otimizadas (Figura 60), aquele que obteve maior queda no consumo de cimento Portland foi o C10-O, com uma diferença de 14,89% em comparação ao C10-R. Os concretos com menor redução no consumo de cimento foram o C3-O (1,51%) e o C7-O (11,20%), referentes às composições ternárias e quaternárias de aglomerantes otimizadas, respectivamente.

Em comparação com os concretos de referência, o maior consumo de adições minerais e a ligeira redução no consumo de água dos concretos otimizadas levou ao aumento da quantidade de aditivo superplastificante necessária para manter a trabalhabilidade desejada. Tal medida foi adotada visto que o valor do abatimento do tronco de cone – (120 ± 20) mm – foi mantido constante para todas as misturas de concreto produzidas (referência e otimizada).

4.6 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

Os concretos de referência e otimizadas foram avaliados no estado fresco pelos ensaios de abatimento do tronco de cone, massa específica e consumo de superplastificante. Os resultados obtidos estão dispostos nas Tabelas 27 e 28 para os concretos de referência e otimizadas, respectivamente. Esclarece-se que os concretos de referência foram produzidos e avaliados por Rossi [2023?].

Tabela 27 - Resultados para os concretos de referência no estado fresco

Concreto	Massa Específica (kg/m ³)	Abatimento (mm)	Consumo de superplastificante (kg/m ³)
C1-R	2364	100	4,07
C2-R	2553	70	3,31
C3-R	2479	235	2,85
C4-R	2447	190	4,57
C5-R	2463	123	3,00
C6-R	2419	227	2,09
C7-R	2399	100	3,79
C8-R	2455	-	3,86
C9-R	2476	190	4,52
C10-R	2454	200	3,88

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela 28 - Resultados para os concretos otimizados no estado fresco

Concreto	Massa Específica			Abatimento (mm)	Consumo de superplastificante (kg/m ³)
	Média (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV (%)		
C1-O	2451	46,80	1,91	80	6,11
C2-O	2403	10,57	0,44	107	4,91
C3-O	2451	12,00	0,49	123	3,68
C4-O	2473	12,72	0,51	-	10,06
C5-O	2451	28,22	1,15	237	7,58
C6-O	2415	23,88	0,99	250	5,39
C7-O	2436	39,26	1,61	115	5,92
C8-O	2425	8,37	0,35	162	5,16
C9-O	2432	18,71	0,77	213	7,88
C10-O	2402	21,56	0,90	230	6,07

DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação

Fonte: Autora (2022)

A partir das Tabelas 27 e 28, nota-se que não houve grande variação entre as massas específicas dos traços de concreto tanto de referência (com resultados variando de 2364 a 2553 kg/m³) quanto otimizados (com intervalo de 2402 a 2473 kg/m³). Os valores encontrados estão em conformidade com o que se espera para os concretos de alta resistência (LOPES, 2019). Além disso, os coeficientes de variação determinados para os concretos otimizados indicam baixa dispersão dos dados.

Com relação aos resultados de abatimento de tronco de cone, percebe-se que apenas os concretos C1-R, C5-R, C7-R, C2-O, C3-O e C7-O ficaram dentro da faixa estabelecida na etapa de dosagem (120 ± 20) mm. Não foi possível determinar o abatimento do tronco de cone para o concreto C8-R, pois este ficou bastante fluido, espalhando-se sobre a base de ensaio. Por outro lado, a composição C4-O ficou muito seca, aderindo ao cone e impossibilitando a determinação de seu abatimento. Quanto à produção dos concretos otimizados, a principal problemática observada foi a definição do consumo ideal de aditivo superplastificante para cada traço, considerando a variedade de materiais e quantidades utilizadas em cada composição.

Dessa forma, adotando o consumo de superplastificante dos concretos de referência como ponto de partida, foi-se acrescentando aditivo, gradativamente, até que os concretos atingissem a consistência adequada para o adensamento e moldagem dos corpos de prova. Ficou evidente, no entanto, a importância de um estudo prévio, por meio do ensaio de miniabatimento de Kantro (1980) e/ou de funil de Marsh, conforme NBR 7681-2:2013 (ABNT, 2013), para definir o teor ótimo de superplastificante a ser utilizado nos concretos. Cabe esclarecer que esta análise não foi realizada devido à grande quantidade de traços a

serem avaliados e ao tempo disponível para execução do programa experimental, além da situação agravada pela restrição imposta pela COVID-19 no período de desenvolvimento da pesquisa. De maneira geral, ainda que o abatimento do tronco de cone da maioria das composições não tenha ficado na faixa estabelecida em dosagem, os concretos produzidos mostraram-se coesos e sem exsudação (Figura 61a), possibilitando o adensamento correto (com o auxílio da mesa vibratória) e a adequada moldagem dos corpos de prova. (Figura 61b).

Figura 61 - Aspectos do concreto: (a) estado fresco e (b) corpo de prova



Fonte: Autora (2022)

Destaca-se ainda a perda da trabalhabilidade dos concretos otimizados quando comparados aos concretos de referência. Assim como observado por Oliveira *et al.* (2018) e por Lopes, Peçanha e Castro (2020), os concretos otimizados pelo empacotamento de partículas – modelo de Alfred – demandaram uma maior quantidade de superplastificante para atingirem a consistência adequada para a moldagem dos corpos de prova.

4.7 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

Os concretos de referência e otimizados foram avaliados no estado endurecido através dos ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico. Os tópicos a seguir contemplam os resultados obtidos e as discussões pertinentes ao trabalho.

4.7.1 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

As propriedades físicas dos concretos foram avaliadas nas idades de 28 e 91 dias. Os resultados obtidos referentes à absorção de água por imersão estão dispostos nas Tabelas 29 e 30 para os concretos de referência e otimizados, respectivamente. Os resultados referentes ao índice de vazios podem ser visualizados na Tabela 31 para os concretos de referência e na Tabela 32 para os concretos otimizados.

Tabela 29 - Resultados da absorção de água por imersão para os concretos de referência

Concreto	Absorção - 28 dias			Absorção - 91 dias		
	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)
C1-R	1,45	0,07	4,48	1,27	0,08	6,15
C2-R	2,21	0,26	11,57	1,96	0,05	2,57
C3-R	1,56	0,14	9,05	1,27	0,03	2,28
C4-R	2,69	0,07	2,42	2,39	0,03	1,21
C5-R	2,39	0,11	4,58	1,36	0,11	8,19
C6-R	2,90	0,32	11,16	2,62	0,34	12,99
C7-R	1,41	0,11	7,60	1,42	0,10	6,72
C8-R	1,28	0,06	4,69	1,24	0,02	1,40
C9-R	2,09	0,19	9,03	1,78	0,21	11,81
C10-R	2,03	0,12	5,74	1,98	0,18	9,05
DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação						

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela 30 - Resultados da absorção de água por imersão para os concretos otimizados

Concreto	Absorção - 28 dias			Absorção - 91 dias		
	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)
C1-O	1,29	0,08	6,32	1,14	0,04	3,89
C2-O	1,68	0,16	9,51	1,66	0,11	6,47
C3-O	1,26	0,10	7,57	1,24	0,07	6,03
C4-O	1,34	0,03	2,39	1,20	0,09	7,89
C5-O	1,36	0,05	3,86	1,07	0,05	4,74
C6-O	1,94	0,10	5,29	1,78	0,13	7,31
C7-O	1,66	0,20	11,83	1,65	0,07	4,43
C8-O	1,55	0,14	9,05	1,50	0,07	4,89
C9-O	1,93	0,06	3,01	1,79	0,06	3,40
C10-O	1,99	0,06	2,97	1,96	0,05	2,61
DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação						

Fonte: Autora (2022)

Tabela 31 - Resultados do índice de vazios para os concretos de referência

Concreto	Índice de vazios - 28 dias			Índice de vazios - 91 dias		
	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)
C1-R	3,11	0,18	5,65	3,11	0,18	5,65
C2-R	5,18	0,59	11,32	4,61	0,12	2,56
C3-R	3,71	0,32	8,66	3,03	0,10	3,43
C4-R	6,33	0,13	2,06	5,66	0,06	0,97
C5-R	5,68	0,26	4,56	3,26	0,28	8,47
C6-R	6,69	0,72	10,71	6,07	0,78	12,79
C7-R	3,32	0,26	7,69	3,39	0,22	6,57
C8-R	3,07	0,17	5,39	3,01	0,04	1,26
C9-R	4,95	0,45	9,06	4,23	0,51	11,95
C10-R	4,85	0,25	5,17	4,67	0,41	8,75
DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação						

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela 32 - Resultados do índice de vazios para os concretos otimizados

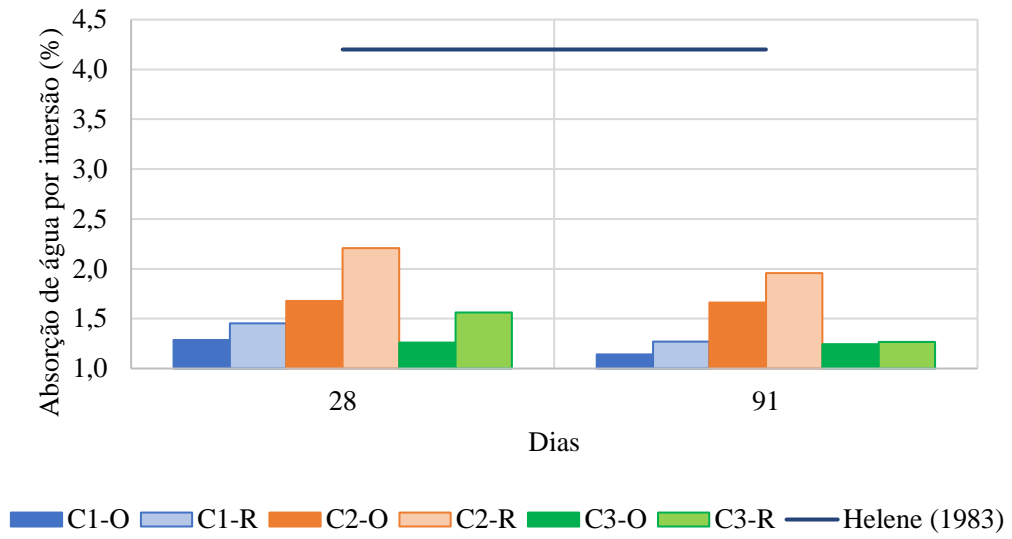
Concreto	Índice de vazios - 28 dias			Índice de vazios - 91 dias		
	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)
C1-O	3,08	0,20	6,50	2,73	0,12	4,37
C2-O	3,94	0,37	9,48	3,89	0,24	6,18
C3-O	3,03	0,24	7,89	2,97	0,17	5,71
C4-O	3,20	0,10	2,99	2,89	0,22	7,57
C5-O	3,27	0,14	4,17	2,56	0,12	4,71
C6-O	4,61	0,24	5,32	4,23	0,30	7,07
C7-O	3,90	0,45	11,66	3,83	0,23	5,94
C8-O	3,64	0,32	8,82	3,49	0,15	4,23
C9-O	4,56	0,16	3,42	4,24	0,15	3,55
C10-O	4,67	0,12	2,66	4,56	0,11	2,30

DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação

Fonte: Autora (2022)

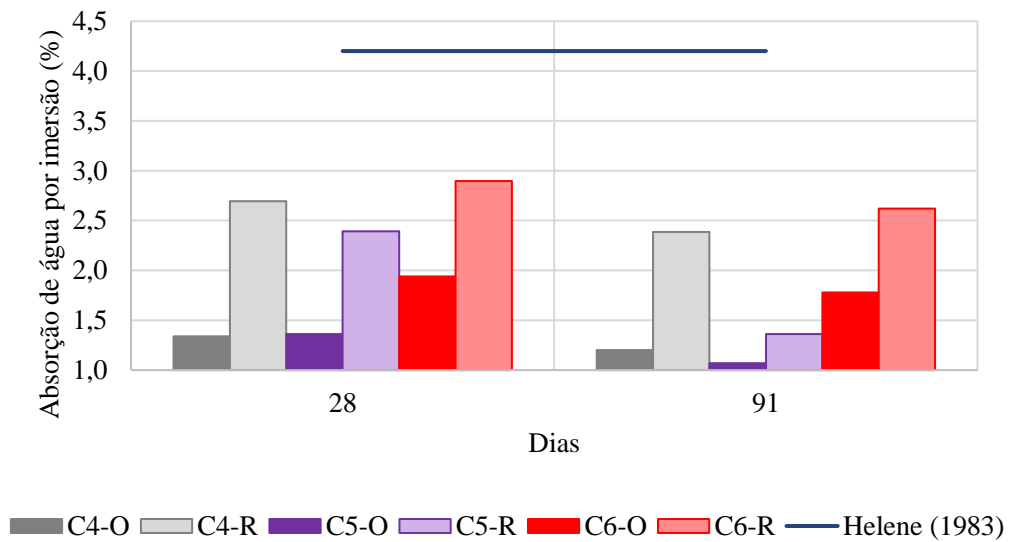
A durabilidade do concreto está diretamente relacionada à capacidade da água penetrar em seus poros e desencadear processos de deterioração do material. Diante disso, é importante conhecer propriedades como absorção de água e índice de vazios para estimar o desempenho do compósito ao longo do tempo. De acordo com Helene (1983), o concreto com absorção de água por imersão inferior a 4,2% pode ser considerado de boa durabilidade, enquanto valores acima de 6,3% são característicos de concretos deficientes. Em relação ao índice de vazios, o autor classifica como durável ou normal os compósitos com valores entre 10 e 15%, sendo que acima de 15% pode-se considerar o concreto como deficiente em durabilidade. As Figuras 62, 63 e 64 apresentam uma comparação gráfica da absorção de água por imersão entre os concretos produzidos com aglomerante otimizado e suas respectivas composições de referência. Do mesmo modo, as Figuras 65, 66 e 67 trazem a comparação gráfica para o índice de vazios.

Figura 62 - Resultados da absorção de água por imersão para os concretos produzidos com aglomerantes ternários com sílica ativa



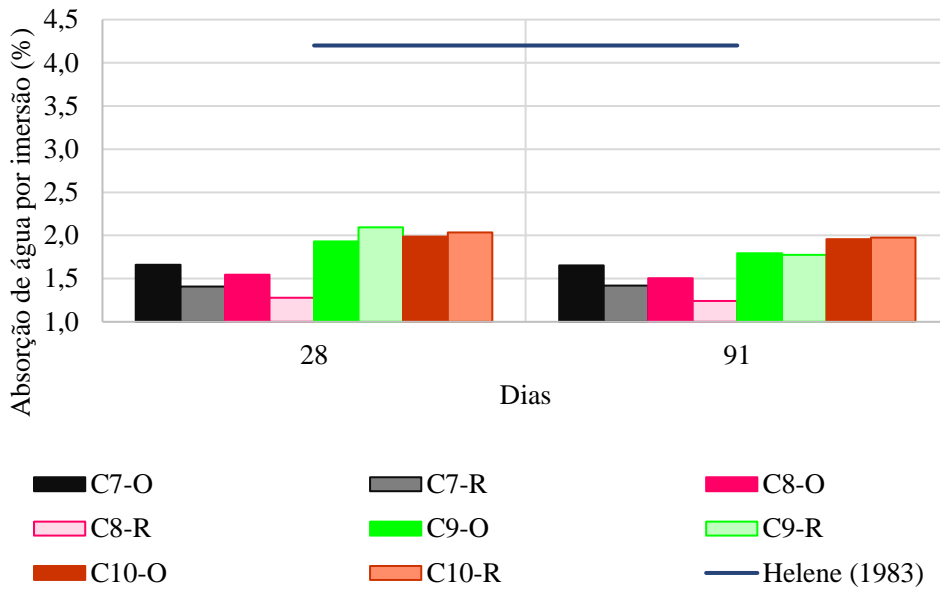
Fonte: Autora (2022)

Figura 63 - Resultados da absorção de água por imersão para os concretos produzidos com aglomerantes ternários sem sílica ativa



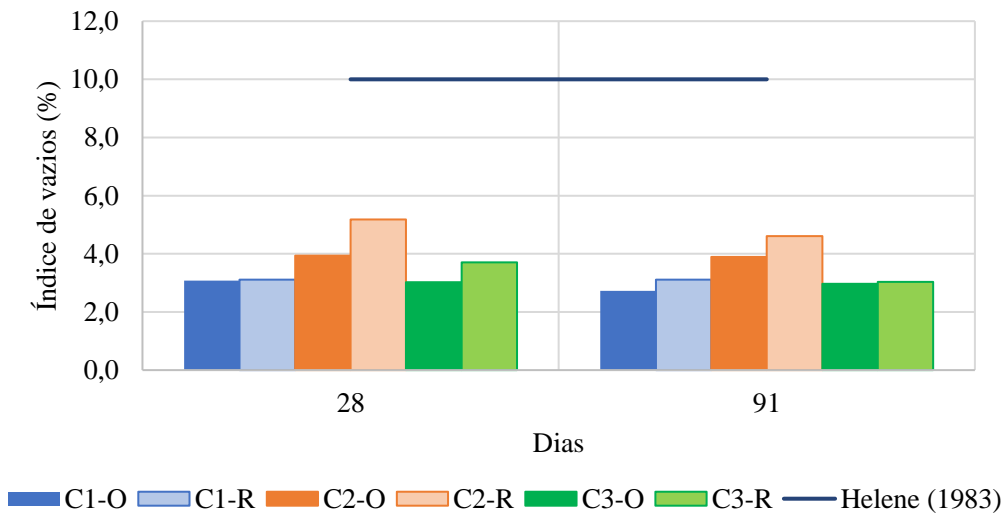
Fonte: Autora (2022)

Figura 64 - Resultados da absorção de água por imersão para os concretos produzidos com aglomerantes quaternários



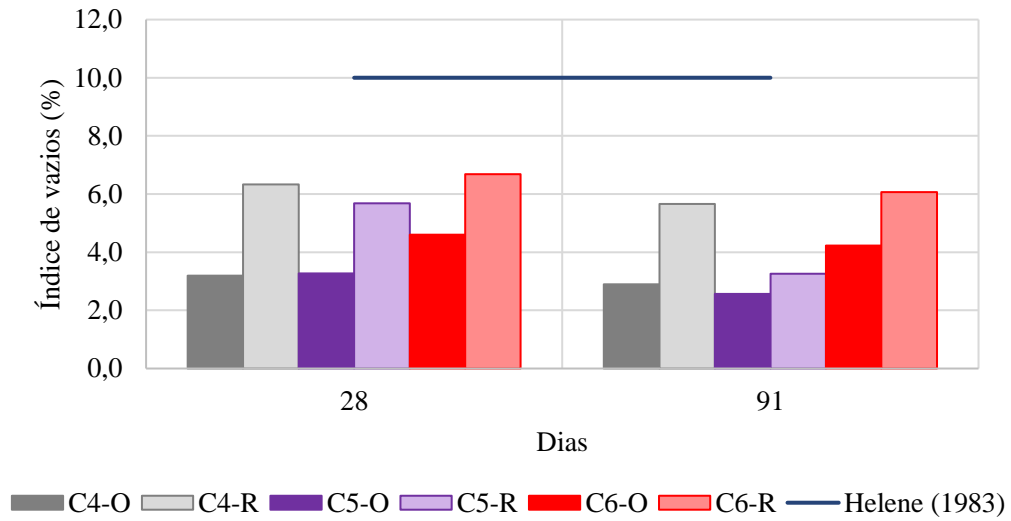
Fonte: Autora (2022)

Figura 65 – Resultados do índice de vazios para os concretos produzidos com aglomerantes ternários com sílica ativa



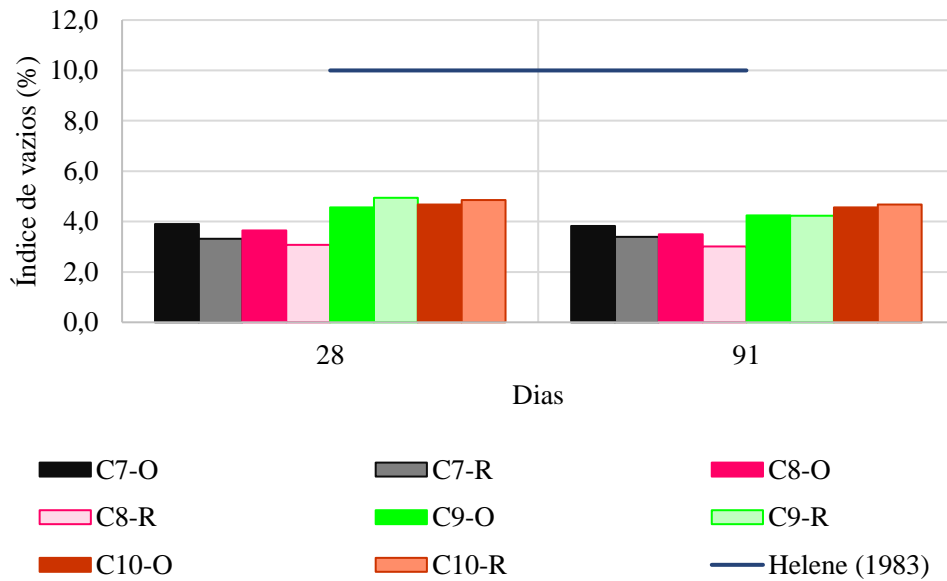
Fonte: Autora (2022)

Figura 66 - Resultados do índice de vazios para os concretos produzidos com aglomerantes ternários sem sílica ativa



Fonte: Autora (2022)

Figura 67 - Resultados do índice de vazios para os concretos produzidos com aglomerantes quaternários



Fonte: Autora (2022)

A partir dos dados expostos nas Tabelas 29 a 32 e nas Figuras 62 a 67, percebe-se que todos os concretos avaliados, tanto de referência quanto otimizados, podem ser considerados duráveis quanto aos parâmetros de absorção de água por imersão e índice de vazios definidos por Helene (1983). O bom desempenho das misturas pode ser atribuído à densificação da matriz cimentícia, proporcionada pela substituição parcial do cimento pelas adições minerais.

Comparando os resultados obtidos para as amostras com 91 dias de idade com aqueles determinados na idade de 28 dias, nota-se que houve a redução da absorção de água por imersão e do índice de vazios para todas as amostras. Evidencia-se, portanto, a continuidade das reações de hidratação do cimento e das adições minerais ao longo do tempo, de modo a tornar os concretos mais densos e, conseqüentemente, mais resistentes e duráveis.

Avaliando os concretos otimizados pelo empacotamento de partículas em comparação com as suas respectivas misturas de referência, nota-se a redução da absorção de água por imersão e do índice de vazios, tanto aos 28 quanto aos 91 dias de idade, para quase todas as amostras ensaiadas. A maior redução, de aproximadamente 50%, foi observada para a composição C4, com aglomerante constituído por cimento Portland composto com escória, metacaulim e cinza de casca de arroz.

Os resultados obtidos indicam que os aglomerantes ternários otimizados sem sílica ativa levaram à produção de concretos – C4-O, C5-O e C6-O – com uma matriz mais densa e com menor porosidade e absorção. Dessa forma, considera-se que as adições minerais pozolânicas utilizadas nessas misturas (metacaulim e cinza de casca de arroz) reagiram com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento e formaram silicato de cálcio hidratado adicional, reduzindo a porosidade da matriz e da zona de transição dos concretos.

Somando-se ao efeito químico proveniente da utilização das adições minerais, há o efeito físico decorrente da otimização das misturas pelo empacotamento de partículas. A aplicação do modelo de Alfred para o empacotamento faz com que os vazios existentes sejam preenchidos por partículas menores de maneira sucessiva, promovendo a redução da porosidade e a densificação da mistura. Assim como determinado no ensaio de porosidade aparente realizado para as pastas de aglomerante, os resultados obtidos para a absorção de água por imersão e para o índice de vazios também evidenciaram a eficiência do empacotamento de partículas na otimização dos concretos.

Os concretos otimizados constituídos por aglomerantes ternários com sílica ativa – C1-O, C2-O e C3-O – também apresentaram redução da absorção de água por imersão e do índice de vazios em comparação com os seus respectivos concretos de referência – C1-R, C2-R e C3-R, respectivamente. No entanto, a utilização de uma sílica ativa aglomerada pode ter prejudicado as reações de hidratação dessas misturas, não se obtendo o resultado esperado.

Com relação aos concretos otimizados produzidos a partir de aglomerantes quaternários, apenas a composição C10-O apresentou densificação da mistura quando comparada à composição C10-R. O concreto C7-O obteve um aumento significativo

(conforme análise estatística disponibilizada no Anexo C) da absorção de água por imersão aos 91 dias de idade em comparação com o C7-R. O desempenho do compósito C8-O, comparado ao C8-R, foi inferior para a absorção de água aos 28 e 91 dias e para o índice de vazios aos 91 dias de idade.

Destaca-se, ainda, que a aplicação do empacotamento de partículas mostrou-se mais eficiente para as composições de aglomerantes ternárias do que para as composições quaternárias, com relação às propriedades físicas avaliadas, isto é, para a absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos.

A análise estatística referente aos resultados obtidos para o ensaio de absorção de água por imersão encontra-se disposta no Apêndice D, enquanto a análise estatística dos resultados do ensaio de índice de vazios está disponibilizada no Apêndice E. Destaca-se que, pelo critério de *Chauvenet*, os dados coletados são considerados homogêneos. Além disso, aplicou-se o teste t de *Student* entre as composições otimizadas e suas respectivas composições de referência para avaliar a influência do empacotamento de partículas na absorção de água por imersão e no índice de vazios dos concretos.

A partir do teste t para a absorção de água por imersão, percebe-se que para o ensaio realizado aos 28 dias houve diferença significativa entre as composições C1, C2, C3, C4, C5, C6 e C8. Para o ensaio aos 91 dias, os concretos C1, C3, C9 e C10 podem ser considerados estatisticamente iguais. Por fim, considerando a aplicação do teste t para o índice de vazios aos 28 dias, notou-se diferença significativa entre as composições C2, C3, C4, C5 e C6. Aos 91 dias, os concretos C3, C7, C9 e C10 não apresentaram diferença significativa entre as amostras otimizadas e as suas respectivas referências.

A determinação da massa específica da amostra seca permite a classificação do concreto como leve, normal ou pesado, sendo o concreto normal o mais utilizado em obras correntes. Os resultados obtidos para as massas específicas da amostra seca podem ser visualizados na Tabela 33 para os concretos de referência e na Tabela 34 para os concretos otimizadas.

Tabela 33 - Resultados da massa específica da amostra seca para os concretos de referência

Concreto	Massa específica da amostra seca 28 dias			Massa específica da amostra seca 91 dias		
	Média (g/cm ³)	DP (g/cm ³)	CV (%)	Média (g/cm ³)	DP (g/cm ³)	CV (%)
C1-R	2,37	0,01	0,42	2,39	0,01	0,24
C2-R	2,35	0,01	0,49	2,36	0,01	0,24
C3-R	2,37	0,02	0,65	2,39	0,03	1,11
C4-R	2,35	0,02	0,65	2,37	0,00	0,00
C5-R	2,38	0,01	0,24	2,39	0,02	0,64
C6-R	2,31	0,02	0,66	2,31	0,01	0,25
C7-R	2,37	0,01	0,24	2,38	0,01	0,48
C8-R	2,40	0,02	0,72	2,42	0,01	0,48
C9-R	2,36	0,01	0,24	2,38	0,02	0,64
C10-R	2,38	0,01	0,24	2,38	0,01	0,24

DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela 34 - Resultados da massa específica da amostra seca para os concretos otimizados

Concreto	Massa específica da amostra seca 28 dias			Massa específica da amostra seca 91 dias		
	Média (g/cm ³)	DP (g/cm ³)	CV (%)	Média (g/cm ³)	DP (g/cm ³)	CV (%)
C1-O	2,40	0,00	0,20	2,39	0,01	0,60
C2-O	2,35	0,00	0,13	2,34	0,01	0,43
C3-O	2,40	0,01	0,38	2,39	0,01	0,34
C4-O	2,39	0,02	0,79	2,41	0,01	0,32
C5-O	2,40	0,01	0,31	2,40	0,02	0,63
C6-O	2,37	0,00	0,07	2,38	0,01	0,25
C7-O	2,35	0,01	0,26	2,31	0,07	2,81
C8-O	2,36	0,01	0,35	2,32	0,04	1,67
C9-O	2,36	0,01	0,52	2,36	0,01	0,22
C10-O	2,35	0,01	0,36	2,33	0,01	0,38

DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação

Fonte: Autora (2022)

A massa específica da amostra seca, disposta nas Tabelas 33 e 34, permite a classificação de todas as composições analisadas como concreto normal, de acordo com a NBR 8953:2015 (ABNT, 2015). Percebe-se que não houve grande variação entre os valores de massas específicas obtidos para as diferentes misturas, sendo que a C8-R apresentou maior densidade aos 91 dias.

As análises estatísticas referentes aos resultados obtidos para o ensaio de massa específica da amostra seca encontram-se dispostas no Apêndice F. Destaca-se que, pelo critério de *Chauvenet*, os dados coletados são considerados homogêneos. Além disso, aplicou-se o teste t de *Student* entre as composições otimizadas e suas respectivas composições de

referência para avaliar a influência do empacotamento de partículas na massa específica da amostra seca dos concretos.

Com base no teste t, para o ensaio realizado aos 28 dias, as composições C2, C4 e C9 podem ser consideradas estatisticamente iguais. Para o ensaio aos 91 dias, percebe-se diferença significativa entre os concretos C4, C6, C8 e C10.

4.7.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão é muitas vezes considerada a propriedade mais importante do concreto, de forma que sua especificação é indispensável para o projeto estrutural e para o controle de qualidade da obra. Usualmente, a idade especificada para a obtenção dessa propriedade em laboratório é 28 dias, pois considera-se que o processo de hidratação do cimento já foi quase totalmente concluído nesse período.

A incorporação de adições minerais ao concreto prolonga o processo de hidratação do aglomerante, já que as adições podem reagir com o hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação do cimento, e formar silicato de cálcio hidratado secundário, responsável pela resistência mecânica do compósito. Logo, nesses casos, é interessante avaliar o comportamento mecânico do material por um período prolongado (além dos 28 dias), para melhor acompanhar o desenvolvimento da resistência do concreto com adições minerais. Dessa forma, os concretos de referência e otimizados foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão aos 7, 28, 56 e 91 dias. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 35 para os concretos de referência e na Tabela 36 para os concretos otimizados. As Figuras 68 a 70 mostram uma análise visual comparativa entre os concretos otimizados pelo empacotamento de partículas e suas respectivas composições de referência.

Tabela 35 - Resultados da resistência à compressão para os concretos de referência

Concreto	7 dias		28 dias		56 dias		91 dias	
	Média (MPa)	DP (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)
C1-R	33,16	3,55	53,40	3,99	57,60	0,45	57,82	6,62
C2-R	31,24	1,96	45,15	0,30	56,85	2,28	64,89	4,44
C3-R	29,39	1,18	53,72	0,48	63,57	1,91	63,89	6,33
C4-R	37,95	4,53	60,10	1,99	58,38	3,45	65,29	4,28
C5-R	35,70	2,94	53,77	3,07	58,48	1,34	60,45	2,90
C6-R	26,83	0,70	40,11	3,42	48,07	2,21	51,00	0,90
C7-R	35,41	1,38	49,24	3,69	60,55	3,13	68,11	3,14
C8-R	31,70	2,58	53,99	1,82	64,90	2,01	73,00	2,00
C9-R	22,42	2,00	46,04	3,01	47,16	3,49	54,90	3,05
C10-R	18,89	1,60	45,07	5,66	59,52	0,34	65,39	0,47

DP – Desvio padrão

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

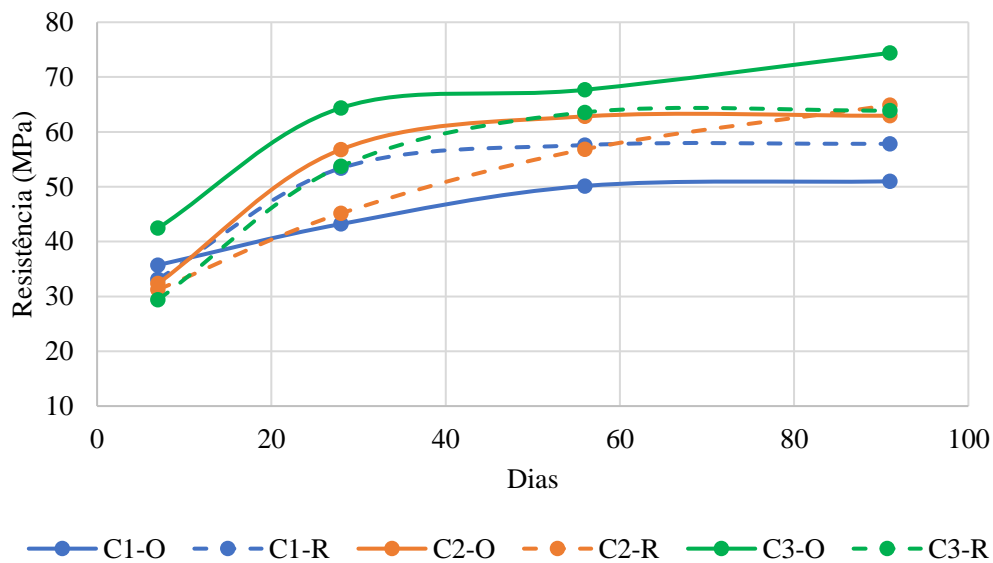
Tabela 36 - Resultados da resistência à compressão para os concretos otimizados

Concreto	7 dias		28 dias		56 dias		91 dias	
	Média (MPa)	DP (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)
C1-O	35,72	2,61	43,20	3,21	50,15	2,69	50,99	3,10
C2-O	32,35	3,68	56,79	4,06	62,83	2,72	62,95	4,29
C3-O	42,44	3,09	64,38	0,74	67,68	3,96	74,41	3,10
C4-O	38,29	1,14	48,67	1,83	50,08	3,15	55,57	0,91
C5-O	33,46	1,60	45,46	1,31	48,75	2,28	49,82	2,97
C6-O	29,44	0,49	44,67	0,55	51,95	1,49	54,55	0,87
C7-O	34,88	2,11	51,98	1,02	55,22	2,72	64,79	2,83
C8-O	31,79	2,27	49,95	2,07	50,54	5,52	63,70	4,24
C9-O	34,62	3,02	45,17	1,81	55,94	3,01	56,23	1,50
C10-O	32,87	1,30	53,74	0,59	64,24	1,85	65,64	1,72

DP – Desvio padrão

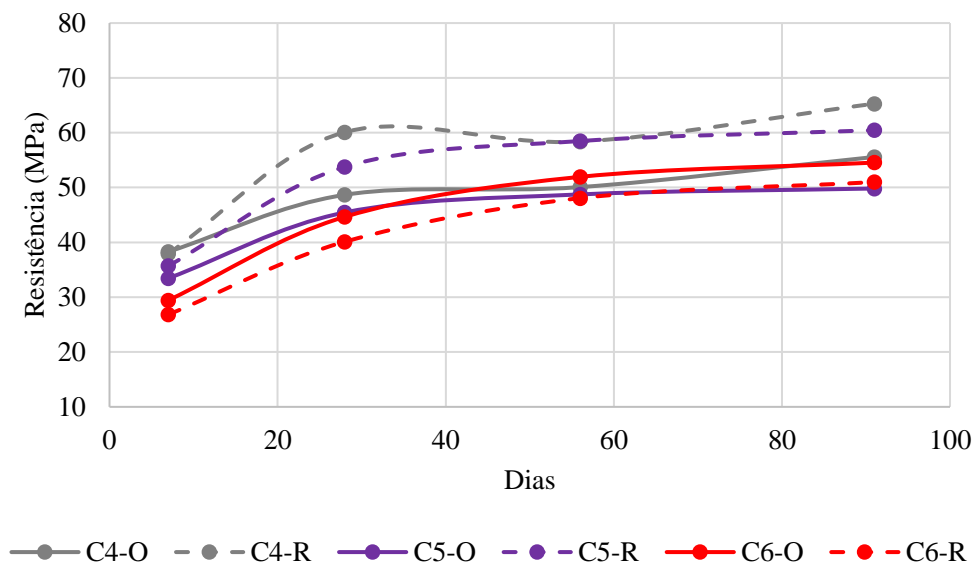
Fonte: Autora (2022)

Figura 68 - Resistência à compressão ao longo do tempo para os concretos com aglomerante ternário contendo sílica ativa



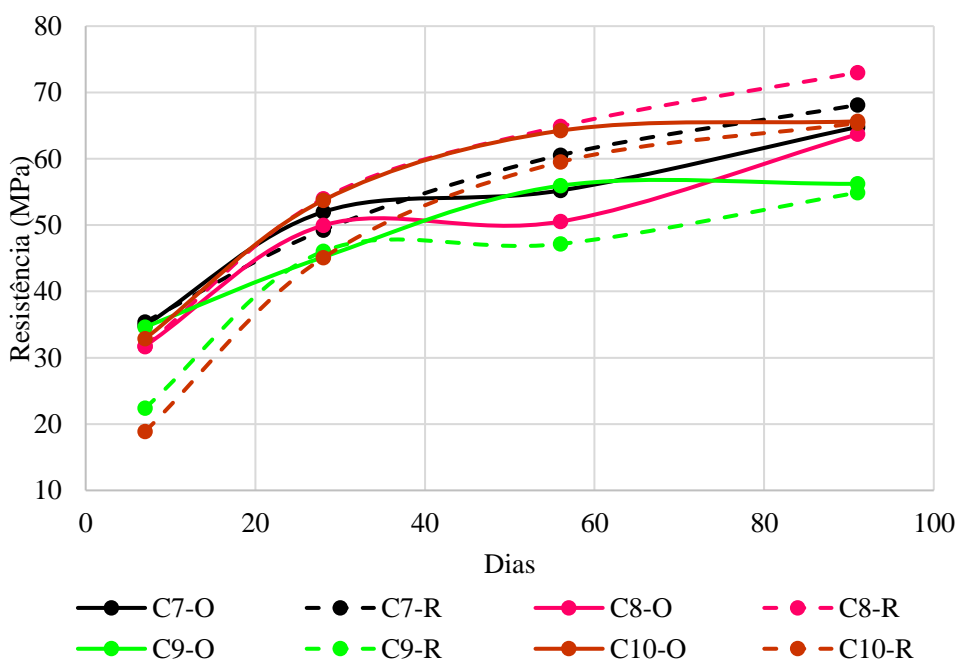
Fonte: Autora (2022)

Figura 69 - Resistência à compressão ao longo do tempo para os concretos com aglomerante ternário sem sílica ativa



Fonte: Autora (2022)

Figura 70 - Resistência à compressão ao longo do tempo para os concretos com aglomerante quaternário



Fonte: Autora (2022)

De maneira geral, analisando as Figuras 68 a 70, observou-se o aumento da resistência à compressão ao longo do tempo para todos os concretos avaliados, tanto de referência quanto otimizados. Considera-se, portanto, que houve continuidade nas reações de hidratação do cimento após a idade normalmente considerada como padrão de 28 dias.

Com relação aos concretos produzidos com aglomerante ternário contendo sílica ativa (Figura 68), a composição otimizada constituída por cimento Portland, sílica ativa e fíler calcário (C3-O) obteve o melhor desempenho mecânico, atingindo o valor de 74,41 MPa para a resistência à compressão aos 91 dias de idade. Nota-se ainda que o concreto C3-O apresentou resultados superiores à sua respectiva mistura de referência, C3-R, em todas as idades de ensaio. Em contrapartida, ainda sobre a Figura 68, a composição otimizada C1-O – cimento Portland, sílica ativa e metacaulim – atingiu apenas 50,99 MPa de resistência à compressão aos 91 dias de idade. O desempenho desta composição foi inferior aos resultados obtidos por sua respectiva mistura de referência, C1-R, em todas as idades avaliadas.

Comparando os resultados determinados para os concretos C1-O e C3-O, constata-se que o efeito físico do fíler calcário superou o efeito químico proveniente da reatividade do metacaulim, assim como observado por Vance *et al.* (2013). Além disso, é importante destacar que o consumo de cimento do concreto C1-O foi de 277,60 kg/m³ enquanto o consumo de cimento do C3-O foi de 350,42 kg/m³, o que impactou nos resultados obtidos para as duas composições.

Considerando os resultados expostos na Figura 69 para os concretos com aglomerante ternário sem sílica ativa, percebe-se que a composição de referência C4-R - cimento Portland, metacaulim e cinza de casca de arroz - obteve o melhor resultado do ensaio mecânico, superando o concreto otimizado C4-O em todas as idades e atingindo 65,29 MPa de resistência à compressão aos 91 dias.

A composição otimizada C5-O – cimento Portland, metacaulim e fíler calcário – demonstrou os piores resultados do ensaio mecânico em todas as idades de ensaio, quando comparada à C5-R, atingindo apenas 49,82 MPa de resistência à compressão aos 91 dias. Dessa forma, especula-se que o efeito químico advindo da reatividade da cinza de casca de arroz superou o efeito físico proporcionado pelas partículas de fíler calcário. Destaca-se ainda a diferença do consumo de cimento entre os concretos C4-R (351,41 kg/m³) e C5-O (280,61 kg/m³), de modo que, assim como para as composições com aglomerante ternário contendo sílica ativa, o concreto com maior consumo de cimento apresentou o melhor desempenho mecânico em termos de resistência à compressão.

A respeito dos resultados obtidos para as composições com aglomerante quaternário (Figura 70), a maior resistência à compressão aos 91 dias foi observada para o concreto de referência C8-R - cimento Portland, sílica ativa, metacaulim e fíler calcário - o qual atingiu 73,00 MPa. O pior desempenho foi verificado para a composição C9-R – cimento Portland, metacaulim, cinza de casca de arroz e fíler calcário (resistência à compressão de 54,90 MPa).

Para os concretos produzidos com aglomerante quaternário, aqueles que continham sílica ativa em sua composição apresentaram melhores resultados aos 91 dias do que os concretos C9-R e C9-O, produzidos sem sílica. Conclui-se, portanto, em conformidade com os resultados observados por Kuzielová *et al.* (2017), que a reatividade da sílica ativa foi superior à reatividade do metacaulim e da cinza de casca de arroz, contribuindo para o melhor desempenho mecânico dos concretos C7-R, C7-O, C8-R, C8-O, C10-R e C10-O.

Os estudos conduzidos por Oliveira *et al.* (2018) demonstraram que a aplicação do empacotamento de partículas, a partir do modelo de Alfred, levou ao aumento da resistência à compressão aos 28 dias para os concretos otimizados pelo empacotamento quando comparados aos concretos de referência. Em consonância, Lopes, Peçanha e Castro (2020) também observaram que a utilização do modelo de Alfred para a otimização das composições levava à produção de concretos com maior resistência à compressão aos 28 dias.

No entanto, os resultados apresentados nas Tabelas 35 e 36 apontam que metade dos concretos produzidos com aglomerante otimizado pelo empacotamento de partículas obtiveram resistência à compressão aos 28 dias inferior aos seus respectivos concretos de referência. Vale mencionar que, nos estudos de Oliveira *et al.* (2018) e Lopes, Peçanha e Castro (2020), o empacotamento de partículas foi aplicado para o concreto como um todo e foi utilizada apenas a sílica ativa como substituição parcial ao cimento. Na presente pesquisa foi avaliada a aplicação do empacotamento apenas aos constituintes do aglomerante e utilizou diferentes adições minerais em substituição parcial ao cimento.

A aplicação do empacotamento de partículas ao concreto faz com que a fração mais grossa da mistura, os agregados, também seja otimizada de forma que as menores partículas preencham os vazios entre as maiores de maneira sucessiva. Empregando o empacotamento apenas ao aglomerante, têm-se a produção de concretos com a fração grossa não otimizada e, possivelmente, mais porosa, impactando negativamente na resistência mecânica do compósito. Dessa forma, considera-se que a otimização pelo empacotamento de partículas apresente maiores benefícios quando aplicada ao concreto como um todo, assim como nos trabalhos desenvolvidos por Oliveira *et al.* (2018) e Lopes, Peçanha e Castro (2020), e não apenas ao aglomerante.

Os resultados obtidos para a resistência à compressão dos concretos com aglomerante otimizado pelo empacotamento de partículas não atenderam às expectativas baseadas na revisão da bibliografia. Entretanto, o objetivo de produzir concreto de uma maneira mais sustentável foi atingido, visto que a otimização dos aglomerantes pelo empacotamento levou à redução do consumo de cimento para todas as composições avaliadas.

Considerando ainda as análises estatísticas referentes ao ensaio de resistência à compressão apresentadas no Apêndice G, a maior parte das composições otimizadas foram avaliadas como estatisticamente semelhante às suas respectivas composições de referência. Entende-se, portanto, que a otimização dos aglomerantes pelo modelo de Alfred para o empacotamento de partículas foi eficiente, pois permitiu a produção de concretos com menor consumo de cimento e com resistência mecânica semelhante, ou superior, à resistência das misturas de referência.

4.7.3 Propriedades dinâmicas

Os métodos de ensaio não destrutivos (ENDs) possibilitam o acompanhamento de propriedades do material ao longo do tempo, por meio de medições realizadas em um mesmo corpo de prova. A partir do END de excitação por impulso, podem ser determinadas algumas propriedades do concreto como o módulo de elasticidade dinâmico flexional e longitudinal.

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado pela vibração de um corpo de prova de concreto com a aplicação de uma tensão insignificante, que não leva à microfissuração e nem promove a fluência do compósito (NEVILLE, 2016). Desse modo, o autor afirma que o módulo de elasticidade dinâmico se refere a efeitos quase totalmente elásticos e pode ser considerado aproximadamente igual ao módulo tangente inicial obtido no ensaio estático. Apesar disso, deve-se considerar que a heterogeneidade inerente ao concreto influencia de maneiras diferentes os módulos de elasticidade estático e dinâmico. Logo, não há uma relação simples entre os módulos, sendo que Mehta e Monteiro (2014) estimam que, para concretos de alta resistência, o módulo de elasticidade dinâmico seja 20% maior do que o módulo de elasticidade estático.

Otani e Pereira (2017) afirmam que o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal se aproxima do valor obtido em ensaio de compressão (módulo de elasticidade estático). Logo, os concretos de referência e otimizados foram submetidos ao ensaio de excitação por impulso para determinação dessa propriedade. Para acompanhar o desenvolvimento do módulo dinâmico longitudinal do concreto ao longo do tempo, os corpos de prova foram ensaiados nas idades de 1, 7, 28, 56, 70 e 91 dias. Os resultados estão dispostos na Tabela 37 para os concretos de referência e na Tabela 38 para os concretos otimizados. As Figuras 71 a 73 mostram uma análise visual comparativa entre os concretos otimizados pelo empacotamento de partículas e suas respectivas composições de referência.

Tabela 37 - Resultados para módulo de elasticidade dinâmico longitudinal dos concretos de referência

Idade	Propriedade	C1-R	C2-R	C3-R	C4-R	C5-R	C6-R	C7-R	C8-R	C9-R	C10-R
1 dia	EL (GPa)	28,02	31,58	43,24	49,78	46,86	42,60	34,84	41,36	33,44	30,66
	DP (GPa)	2,96	2,54	1,12	18,01	21,31	3,40	13,03	12,11	12,04	6,56
	CV (%)	10,57	8,03	2,60	36,19	45,48	7,99	37,41	29,28	36,02	21,38
7 dias	EL (GPa)	46,07	45,28	43,66	45,56	48,08	43,34	45,33	45,76	41,17	39,96
	DP (GPa)	0,52	1,02	0,53	2,66	3,58	5,43	1,60	1,12	2,22	2,35
	CV (%)	1,13	2,25	1,22	5,83	7,44	12,54	3,52	2,44	5,39	5,88
28 dias	EL (GPa)	52,58	52,01	50,02	53,05	51,00	45,83	50,40	50,77	45,77	49,34
	DP (GPa)	3,09	1,58	0,58	3,08	0,85	0,83	0,82	0,43	1,42	1,43
	CV (%)	5,88	3,04	1,15	5,81	1,67	1,82	1,63	0,85	3,10	2,91
56 dias	EL (GPa)	54,04	56,04	52,18	56,17	53,24	48,63	53,38	53,43	46,22	49,61
	DP (GPa)	2,90	1,86	0,25	0,73	0,26	1,20	0,69	0,93	1,64	0,73
	CV (%)	5,36	3,32	0,47	1,31	0,48	2,47	1,29	1,73	3,55	1,47
70 dias	EL (GPa)	55,31	57,03	52,32	56,99	53,07	49,39	53,41	53,97	48,16	51,06
	DP (GPa)	2,37	1,72	0,82	0,76	0,12	1,15	0,36	1,05	1,19	1,02
	CV (%)	4,29	3,01	1,57	1,34	0,22	2,33	0,68	1,95	2,47	1,99
91 dias	EL (GPa)	55,69	56,85	53,09	57,29	54,19	50,22	54,01	54,41	49,97	51,32
	DP (GPa)	1,74	1,95	0,03	0,92	0,10	0,96	0,77	1,19	1,67	0,24
	CV (%)	3,13	3,44	0,05	1,60	0,18	1,90	1,42	2,19	3,34	0,46

EL– Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

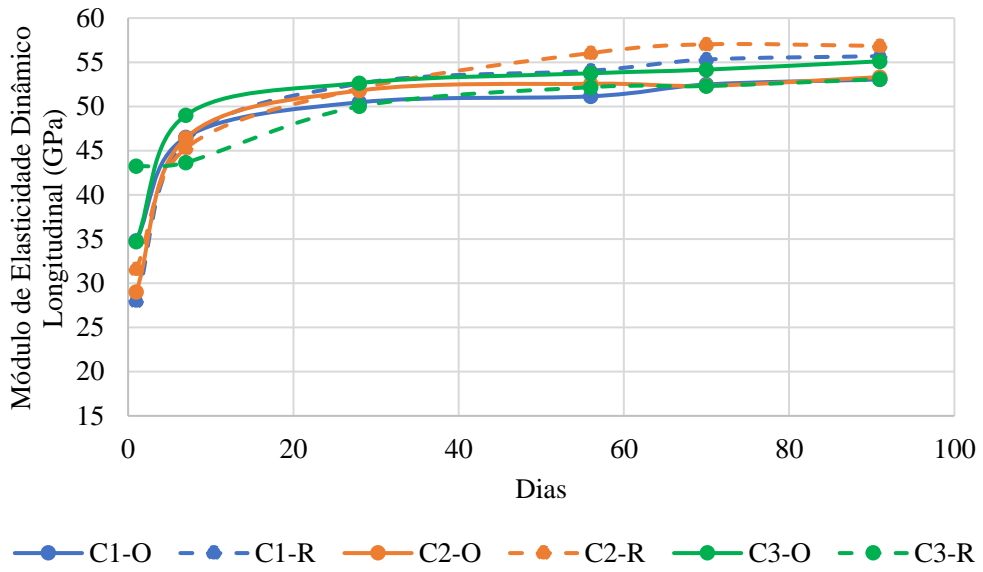
Tabela 38 - Resultados para módulo de elasticidade dinâmico longitudinal dos concretos otimizados

Idade	Propriedade	C1-O	C2-O	C3-O	C4-O	C5-O	C6-O	C7-O	C8-O	C9-O	C10-O
1 dia	EL (GPa)	34,81	29,01	34,72	29,66	27,03	23,11	27,18	26,42	20,98	19,11
	DP (GPa)	0,80	0,41	0,31	0,43	0,89	0,42	0,37	0,81	0,68	0,72
	CV (%)	2,30	1,41	0,90	1,46	3,29	1,84	1,36	3,05	3,23	3,77
7 dias	EL (GPa)	46,51	46,46	49,02	45,18	44,85	42,25	42,45	43,57	39,32	38,93
	DP (GPa)	0,85	0,70	0,32	1,14	0,73	3,26	1,03	2,14	0,48	0,67
	CV (%)	1,84	1,51	0,66	2,52	1,64	7,72	2,42	4,90	1,23	1,73
28 dias	EL (GPa)	50,47	51,80	52,65	49,29	49,74	51,27	46,19	48,78	44,72	43,61
	DP (GPa)	0,75	0,24	0,29	1,02	0,49	3,46	2,77	3,71	0,36	0,80
	CV (%)	1,48	0,46	0,56	2,06	0,98	6,75	5,99	7,61	0,82	1,84
56 dias	EL (GPa)	51,14	52,56	53,75	49,08	50,95	51,49	47,56	50,37	46,56	46,80
	DP (GPa)	1,57	0,47	0,58	1,82	0,93	0,82	2,75	3,81	0,53	0,26
	CV (%)	3,07	0,90	1,07	3,71	1,82	1,59	5,79	7,57	1,14	0,55
70 dias	EL (GPa)	52,48	52,33	54,16	50,84	50,65	51,29	48,03	50,60	49,63	49,70
	DP (GPa)	1,02	2,01	0,62	1,29	0,24	0,41	2,74	3,86	0,67	0,75
	CV (%)	1,95	3,83	1,14	2,54	0,47	0,79	5,71	7,63	1,35	1,50
91 dias	EL (GPa)	53,06	53,32	55,11	50,48	50,29	51,53	48,46	51,80	50,52	51,39
	DP (GPa)	1,28	0,51	0,79	1,87	2,33	0,48	3,11	4,15	2,30	0,27
	CV (%)	2,41	0,95	1,44	3,71	4,64	0,93	6,41	8,02	4,56	0,53

EL– Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação

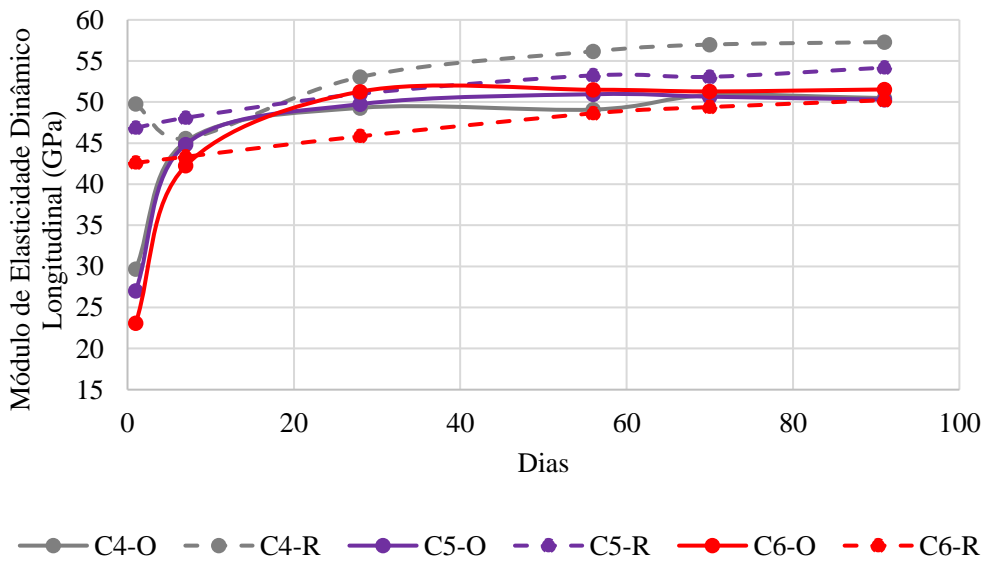
Fonte: Autora (2022)

Figura 71 - Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, ao longo do tempo, para os concretos com aglomerante ternário contendo sílica ativa



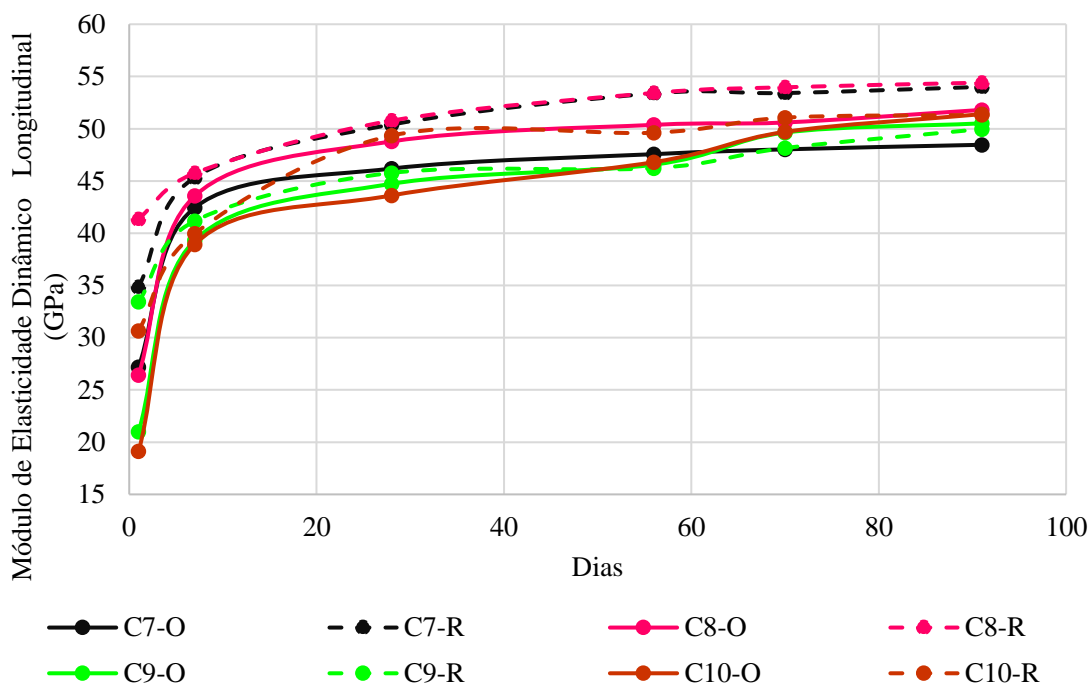
Fonte: Autora (2022)

Figura 72 - Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, ao longo do tempo, para os concretos com aglomerante ternário sem sílica ativa



Fonte: Autora (2022)

Figura 73 - Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, ao longo do tempo, para os concretos com aglomerante quaternário



Fonte: Autora (2022)

A partir das Figuras 71 a 73, nota-se que não houve grande variação entre os módulos de elasticidade dinâmico longitudinal para os diferentes traços de concreto. Constata-se, portanto, que as alterações nas composições dos aglomerantes não foram suficientes para interferir, de maneira significativa, nessa propriedade do compósito. Aos 91 dias de idade, os resultados variaram de 48,46 a 57,29 GPa para os concretos C7-O e C4-R, respectivamente.

Os agregados graúdos exercem grande influência no módulo de elasticidade do concreto. Dessa forma, a pequena variação dos resultados obtidos, para as diferentes composições avaliadas neste trabalho, pode ser atribuída ao fato de que o consumo de agregado graúdo foi mantido constante em todos os traços de concreto. Ademais, percebe-se certa estabilidade no módulo dinâmico das amostras após 28 dias de idade.

As análises estatísticas referentes aos resultados obtidos para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico longitudinal encontram-se dispostas no Apêndice H. Destaca-se que, pelo critério de *Chauvenet*, os dados coletados são considerados homogêneos. Além disso, aplicou-se o teste t de *Student* entre as composições otimizadas e suas respectivas composições de referência para avaliar a influência do empacotamento de partículas no módulo de elasticidade dinâmico longitudinal dos concretos.

A partir do teste t, para o ensaio realizado aos 7 dias, apenas a composição C3 apresentou diferença significativa em termos de módulo de elasticidade dinâmico. Aos 28 dias, as composições C3 e C10 foram avaliadas como estatisticamente diferentes. Para o ensaio aos 91 dias, os concretos C1, C6, C8, C9 e C10 podem ser considerados estatisticamente iguais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, aplicou-se o conceito de empacotamento de partículas, utilizando o modelo de Alfred, aos constituintes do aglomerante de concretos de alta resistência produzidos com a substituição parcial do cimento Portland por teores fixos de adições minerais. Para a maior parte das composições, determinou-se um módulo de distribuição (q) característico de concretos autoadensáveis. Além disso, observou-se a ausência de uma grande quantidade de partículas entre as dimensões de 0,1 a 1 μm .

Para otimizar os aglomerantes, fez-se necessário a imposição de restrições quanto às proporções de cimento e adições minerais, para assegurar uma quantidade mínima de cimento Portland e garantir que a incorporação das adições não prejudicasse em demasia a trabalhabilidade dos concretos. A otimização dos aglomerantes pelo empacotamento de partículas possibilitou a redução do consumo de cimento em relação às pastas de referência, produzidas apenas com a substituição em teores fixos, com valores de redução variando entre 8% e 28%.

Em geral, observou-se que a otimização dos aglomerantes a partir do modelo de Alfred para o empacotamento de partículas promoveu alterações nas propriedades das pastas e dos concretos. Com relação às pastas, percebeu-se que as composições otimizadas apresentaram maior viscosidade, menor porosidade aparente e pouca alteração em sua microestrutura, em comparação às misturas de referência.

Verificou-se em todas as pastas de aglomerantes a presença de partículas não hidratadas de adições minerais envoltas por uma densa matriz de C-S-H, reforçando a importância do acompanhamento da resistência mecânica dos concretos produzidos com adições minerais em idades avançadas. Ademais, notou-se a redução da porosidade aparente das pastas otimizadas pelo empacotamento de partículas, em comparação às suas respectivas composições de referência, evidenciando o refinamento dos poros (efeito fíler) promovido pela aplicação do modelo de Alfred às misturas e pela reação pozolânica das adições minerais.

Os concretos produzidos a partir dos aglomerantes otimizados apresentaram redução do consumo de cimento e aumento do consumo das adições minerais, em comparação aos concretos de referência. Tais modificações na composição dos aglomerantes levou ao aumento da quantidade de superplastificante necessário para assegurar a trabalhabilidade desejada para as misturas.

Considerando a avaliação dos concretos no estado fresco, as composições produzidas com aglomerante otimizado manifestaram perda da trabalhabilidade, evidenciada pelo

aumento do consumo de superplastificante, e pouca alteração em sua massa específica, quando comparadas às misturas de referência. Destaca-se que todas as misturas avaliadas se mostraram coesas e livres de exsudação, possibilitando o correto adensamento do concreto e a adequada moldagem dos corpos de prova.

Tratando das propriedades físicas dos concretos no estado endurecido, notou-se a redução da absorção de água por imersão e do índice de vazios dos concretos otimizados em comparação às misturas de referência. Além disso, todas as composições foram classificadas como duráveis. A respeito da massa específica da amostra seca, não houve grande variação entre os diferentes traços de concreto, de modo que todos os concretos avaliados foram categorizados como concreto normal.

Sobre a avaliação das propriedades mecânicas dos concretos, todas as composições apresentaram aumento da resistência à compressão ao longo do tempo, demonstrando a continuidade das reações de hidratação do cimento e das adições minerais. Os resultados obtidos para a resistência à compressão dos concretos otimizados foram estatisticamente semelhantes, ou superiores, aos valores observados para os concretos de referência.

Com relação ao módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, não houve variações significativas entre os diferentes traços de concreto. Além disso, percebeu-se uma estabilidade nos resultados após 28 dias de cura das amostras, de forma que a realização deste ensaio em idades posteriores pode ser dispensada.

Assim, para os materiais e condições aplicadas neste estudo, os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo atingidos os objetivos inicialmente propostos. Ademais, evidenciou-se o potencial do empacotamento de partículas para a produção de concretos com um menor consumo de cimento e com trabalhabilidade e resistência mecânica adequadas para a sua corrente utilização na construção civil, uma vez que foram utilizadas adições minerais consagradas e usuais no mercado.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguem algumas sugestões para dar continuidade ao trabalho e aprofundar os conhecimentos sobre o tema:

- Avaliar as propriedades reológicas das pastas de aglomerantes, tanto de referência quanto aquelas otimizadas com base no empacotamento de partículas.

- Avaliar as propriedades químicas das pastas de aglomerantes, de referência e otimizadas, a partir dos ensaios de calorimetria, difratometria de raios-X e termogravimetria.
- Avaliar a porosidade das pastas de aglomerantes, de referência e otimizadas, a partir da porosimetria por intrusão de mercúrio.
- Avaliar a microestrutura das pastas de aglomerantes, de referência e otimizadas, após 91 dias de cura.
- Avaliar o teor ótimo de superplastificante a ser utilizado nos concretos produzidos a partir dos aglomerantes otimizados pelo empacotamento de partículas.
- Avaliar a durabilidade dos concretos otimizados a partir de ensaios como: resistência à carbonatação, resistência à penetração de íons cloreto e resistência a sulfatos.
- Avaliar, economicamente, a viabilidade da aplicação do empacotamento de partículas na otimização de aglomerantes ternários e quaternários para a produção de concretos de alta resistência.
- Avaliar os concretos de referência e os concretos otimizados pelo empacotamento de partículas considerando a sustentabilidade do concreto, a partir de parâmetros como: índice de intensidade de ligantes e avaliação do ciclo de vida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCIN, P-C. Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**, Sherbrooke, v. 30, n. 9, p. 1349-1359, set. 2000.

_____. **High-performance concrete**. London and New York: E & FN SPON, 1998. 621 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C830-00**: Standard test methods for apparent porosity, liquid absorption, apparent specific gravity, and bulk density of refractory shapes by vacuum pressure. Pennsylvania, 2016. 5 p.

_____. **ASTM E1876**: Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. Pennsylvania, 2015. 17 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 14**: Cimento Portland – Análise química – Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2012. 10 p.

_____. **NBR NM 15**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

_____. **NBR NM 16**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

_____. **NBR NM 18**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012. 4 p.

_____. **NBR NM 22**: Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos – Análise química – Método de arbitragem. Rio de Janeiro, 2012. 18 p.

_____. **NBR NM 24**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003. 2 p.

_____. **NBR NM 25**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de álcalis disponíveis. Rio de Janeiro, 2003. 11 p.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

_____. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014. 4 p.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009 9 p.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019. 12 p.

_____. **NBR 7218**: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010. 3 p.

_____. **NBR 7681-2**: Calda de cimento para injeção - Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 4 p.

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019. 3 p.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015. 3 p.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco: Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008. 7 p.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012. 4 p.

_____. **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019, 27 p.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13956-2**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 2: Ensaio químicos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13956-3**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 3: Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13956-4**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 15894-3**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2010. 3 p.

_____. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto – Requisitos. Rio de Janeiro, 2009. 11 p.

_____. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015. 11 p.

_____. **NBR16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017. 4 p.

_____. **NBR 16607**: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018. 4 p.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

_____. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020. 5 p.

_____. **NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021. 7 p.

_____. **NBR 16917**: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021. 6 p.

_____. **NBR 16973**: Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021. 3 p.

_____. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022. 5 p.

BARBOZA, L. da S.; STORCH, I. S.; ALMEIDA FILHO, F. M. de. Concreto autoadensável ecoeficiente com baixo consumo de cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 59-71, 2020.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6118:2014**. 4ª ed. São Carlos: EDUFSCAR, 2014. 424 p.

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, p. 18-32, 2009.

CENTRO DE TECNOLOGIA DE EDIFICAÇÕES. *E-Tower*. Disponível em: <<https://cte.com.br/portfolio/sustentabilidade/e-tower>>. Acesso em: set. 2020.

CIMENTO.ORG. Cimento no Brasil. Disponível em: <<https://cimento.org/cimento-no-brasil/>>. Acesso em: set. 2020.

_____. Cimento no mundo. Disponível em: <<https://cimento.org/cimento-no-mundo-2013/>>. Acesso em: set. 2020.

CLÍMACO, J. C. T. de S. **Estruturas de concreto armado**: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação. 2ª ed. Brasília: FINATEC, 2008. 392 p.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. de M. R. Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 99-107, 2009.

FELTRIN, C. S.; ISAIA, G. C.; LÜBECK, A. Synergic effects between mineral admixtures on strength and microstructure of concretes. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 13, n. 6, e13604, 2020.

FELTRIN, C. S.; ISAIA, G. C. Propriedades do concreto com adição de fíler calcário dolomítico. **Revista de Ciência e Inovação do IF Farroupilha**, 2018.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive process control of crowded particulate suspensions**: applied to ceramic manufacturing. New York: Springer Science Business Media, 1994. 786 p.

GIONGO, J. S. **Concreto armado**: análises das resistências de seções transversais de elementos estruturais. São Carlos: 2019. 446 p.

HAACH, V. G.; CARRAZEDO, R.; OLIVEIRA, L. M. F.; CORRÊA, M. R. S. Application of acoustic tests to mechanical characterization of masonry mortars. **NDT & E International**, v. 59, p. 18-24, 2013.

HELENE. P. R. L. La agresividad del médio y la durabilidad del hormigón. **Hormigón**, AATH, n. 10, p. 25-35, ago. 1983.

HERMANN, A.; LANGARO, E. A.; SILVA, S. H. L. da; KLEIN, N. S. Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 48-65, 2016.

ILLSTON J. M.; DOMONE, P. L. J. **Construction materials: their nature and behaviour**. 3^a ed. London and New York: SPON PRESS, 2001. 583 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO13320**. Particle size analysis – Laser diffraction methods. 2020. 59 p.

JIAO, D.; SHI, C.; YUAN, Q.; AN, X.; LIU, Y.; LI, H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. **Cement and Concrete Composites**, Changsha and Beijing, v. 83, p. 146-159, out. 2017.

JUNG, S-H.; SARASWATHY, V.; KARTHICK, S.; KATHIRVEL, P.; KWON, S-J. Microstructure characteristics of fly ash concrete with rice husk ash and lime stone powder. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, 2018.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste - a miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.

KRUGER, P.; KOSSUTE, A. F.; CHINELATTO, A. S. A.; PEREIRA, E. Influência do teor de material pulverulento (<75 µm) do agregado miúdo de resíduos de construção e demolição em argamassas de cimento Portland. **Cerâmica**, v. 66, p. 507-515, 2020.

KUZIELOVÁ, E.; ŽEMLIČKA, M.; BARTONIČKOVÁ, E.; PALOU, M. T. The correlation between porosity and mechanical properties of multicomponent systems consisting of Portland cement-slag-silica fume-metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 306-314, 2017.

LONDERO, C. **Dosagem de concreto ecológico com base em empacotamento de partículas**. 2016. 151 p. Dissertação (Mestrado) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

LONDERO, C.; LENZ, L. A.; SANTOS, Í. 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. **Cerâmica**, n. 63, p. 22-33, 2017.

LOPES, H, M, T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland**. 2019. 174 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

LOPES, H. M. T.; PEÇANHA, A. C. C.; CASTRO, A. L. de. Considerações sobre a eficiência de misturas de concreto de cimento Portland com base no conceito de empacotamento de partículas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, e-12549, 2020.

LUZ, A. P.; BRAULIO, M. A. L.; PANDOLFELLI, V. C.; F.I.R.E. **Compendium Series – Refractory Castable Engineering**. 1ª ed. Baden-Baden: Göller Verlag GmbH, 2015. v. 1. 734p .

MEDEIROS, M. H. F. de; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 125-139, 2017.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. 2011. 151 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 4ª ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 751 p.

MENDES, G. A.; EFFTING, C.; SCHACKOW A. Argamassa autonivelante com adição de resíduos de mármore e granitos: propriedades físicas e mecânicas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 403-418, 2020.

MENDES, T. M.; REPETTE, W. L. Effect of nano-silica on Portland cement matrix. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 12, n. 6, p. 1383-1389, 2019.

MORETTI, J. P. **Incorporação de resíduo agroindustrial em matrizes cimentícias**. 2018. 180 p. Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

MOTA, J. M. F.; OLIVEIRA, R, A, de.; CARNEIRO, A. M. P. Durabilidade de argamassas com adição de metacaulim para reforço de alvenaria. **Revista Matéria**, Recife, v. 21, n. 4, p. 1105-1116, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912 p.

NOËL, M.; SANCHEZ, L.; FATHIFAZL, G. Recent advances in sustainable concrete for structural applications. **Sustainable Construction Materials & Technologies**, Las Vegas, v. 4, p. 1-10, aug, 2016.

OLIVEIRA, C. O. e; MACIEL, G. de F.; CASTRO, A. L. de; BARBOSA, M. P.; CAMPOS, R. S. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Revista Matéria**, v. 23, n. 1, e-11962, 2018.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas**: princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. 224 p.

OTANI, L. B.; PEREIRA, A. H. A. Determinação do módulo de elasticidade do concreto empregando a Técnica de Excitação por Impulso. Informativo técnico-científico ITC-07/ATCP Engenharia Física, 2017. 39 p.

PROSKE, T.; HAINER, S.; REZVANI, M.; GRAUBNER, C-A. Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents - Mix design principles and laboratory tests. **Cement and Concrete Research**, Darmstadt, v. 51, p. 38-46, set. 2013.

RAMACHANDRAN, V.S. **Concrete admixtures handbook**: properties, science and technology. 2ª ed. New Jersey: NOYES PUBLICATIONS, 1995. 1153 p.

ROSSI, M. L. **Análises experimental e numérica de vigas de aço revestidas de concreto de alta resistência com baixo consumo de cimento em situação de incêndio**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos [em elaboração].

SEQUEIRA, E. M.; GHISLENI, G. A influência da adição de fíler calcário em substituição parcial ao cimento em argamassa estabilizada de revestimento de paredes e tetos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 9, n. esp., p. 20-38, 2020.

SILVA, C. da; GODINHO, D. S. S.; RIBEIRO, A.; FERRONATO, A.; SANTOS NETO, A. B. S. dos; ANGIOLETTO, E. Influence of substitution of Portland cement CP-II-Z32 by refractory cement on residual properties of high-temperature concrete. **Cerâmica**, v. 66, p. 330-339, 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **SNIC: ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro, 2019. 64 p.

TUAN, N. V.; YE, G.; van BREUGEL, K.; FRAAIJ, A. L. A.; DAI, B. D. The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 2030-2035, 2011.

VANCE, K.; AGUAYO, M.; OEY, T.; SANT, G.; NEITHALATH, N. Hydration and strength development in ternary Portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin. **Cement & Concrete Composites**, v. 39, p. 93-103, 2013.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 196 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

YAO, Y.; ARORA, A.; NEITHALATH, N.; MOBASHER, B. Ultra high performance concrete – Materials formulations and serviceability based design. In: Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales, 5, 2018, Valencia. **Anais**. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, 2018. p. 1-13.

APÊNDICE A - TESTES ESTATÍSTICOS PARA MINIABATIMENTO DAS PASTAS DE AGLOMERANTES

As Tabelas A1 a A20 contêm os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para o miniabatimento das pastas de aglomerantes de referência e otimizadas, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas duas medidas de espalhamento de diâmetro, por tempo de ensaio, para cada pasta de aglomerante, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,15 para que o resultado seja considerado não duvidoso conforme o critério de *Chauvenet*.

Tabela A1 - Medidas estatísticas e resultados do critério de Chauvenet para miniabatimento da P1-R

P1-REFERÊNCIA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
15,1	0,71	OK	15,3	0,71	OK	15,0	0,71	OK
15,2	0,71	OK	15,9	0,71	OK	15,1	0,71	OK
Média	15,15 cm		Média	15,60 cm		Média	15,05 cm	
DP	0,07 cm		DP	0,42 cm		DP	0,07 cm	
CV	0,47 %		CV	2,72 %		CV	0,47 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A2 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatimento da P2-R

P2-REFERÊNCIA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
13,6	0,71	OK	16,2	0,71	OK	16,2	0,71	OK
13,5	0,71	OK	16,8	0,71	OK	16,1	0,71	OK
Média	13,55 cm		Média	16,50 cm		Média	16,15 cm	
DP	0,07 cm		DP	0,42 cm		DP	0,07 cm	
CV	0,52 %		CV	2,57 %		CV	0,44 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A3 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatimento da P3-R

P3-REFERÊNCIA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
15,5	0,71	OK	17,1	0,71	OK	17,9	0,71	OK
16,2	0,71	OK	17,3	0,71	OK	18,4	0,71	OK
Média	15,85 cm		Média	17,20 cm		Média	18,15 cm	
DP	0,49 cm		DP	0,14 cm		DP	0,35 cm	
CV	3,12 %		CV	0,82 %		CV	1,95 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A4 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatimento da P4-R

P4-REFERÊNCIA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
19,1	0,71	OK	19,1	0,71	OK	18,9	0,71	OK
19,3	0,71	OK	19,2	0,71	OK	19,2	0,71	OK
Média	19,20 cm		Média	19,15 cm		Média	19,05 cm	
DP	0,14 cm		DP	0,07 cm		DP	0,21 cm	
CV	0,74 %		CV	0,37 %		CV	1,11 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A5 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatimento da P5-R

P5-REFERÊNCIA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
19,5	0,71	OK	19,1	0,71	OK	18,7	0,71	OK
19,7	0,71	OK	19,7	0,71	OK	19,2	0,71	OK
Média	19,60 cm		Média	19,40 cm		Média	18,95 cm	
DP	0,14 cm		DP	0,42 cm		DP	0,35 cm	
CV	0,72 %		CV	2,19 %		CV	1,87 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A6 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatimento da P6-R

P6-REFERÊNCIA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
18,9	0,71	OK	18,9	0,71	OK	18,4	0,71	OK
19,2	0,71	OK	19,1	0,71	OK	19,8	0,71	OK
Média	19,05 cm		Média	19,00 cm		Média	19,10 cm	
DP	0,21 cm		DP	0,14 cm		DP	0,99 cm	
CV	1,11 %		CV	0,74 %		CV	5,18 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A7 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatimento da P7-R

P7-REFERÊNCIA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
15,1	0,71	OK	15,2	0,71	OK	9,9	0,71	OK
15,2	0,71	OK	16,3	0,71	OK	9,4	0,71	OK
Média	15,15 cm		Média	15,75 cm		Média	9,65 cm	
DP	0,07 cm		DP	0,78 cm		DP	0,35 cm	
CV	0,47 %		CV	4,94 %		CV	3,66 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A8 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatimento da P8-R

P8-REFERÊNCIA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
15,9	0,71	OK	17,1	0,71	OK	16,5	0,71	OK
16,2	0,71	OK	17,2	0,71	OK	15,5	0,71	OK
Média	16,05 cm		Média	17,15 cm		Média	16,00 cm	
DP	0,21 cm		DP	0,07 cm		DP	0,71 cm	
CV	1,32 %		CV	0,41 %		CV	4,42 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A9 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatimento da P9-R

P9-REFERÊNCIA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
19,5	0,71	OK	20,5	0,71	OK	19,8	0,71	OK
20,7	0,71	OK	20,7	0,71	OK	20,1	0,71	OK
Média	20,10 cm		Média	20,60 cm		Média	19,95 cm	
DP	0,85 cm		DP	0,14 cm		DP	0,21 cm	
CV	4,22 %		CV	0,69 %		CV	1,06 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A10 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatimento da P10-R

P10-REFERÊNCIA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
16,1	0,71	OK	18,7	0,71	OK	17,7	0,71	OK
16,5	0,71	OK	19,3	0,71	OK	19,1	0,71	OK
Média	16,30 cm		Média	19,00 cm		Média	18,40 cm	
DP	0,28 cm		DP	0,42 cm		DP	0,99 cm	
CV	1,74 %		CV	2,23 %		CV	5,38 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A11 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatimento da P1-O

P1-OTIMIZADA					
0 MINUTOS			30 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
9,9	0,71	OK	8,4	0,71	OK
10,1	0,71	OK	8,5	0,71	OK
Média	10,00 cm		Média	8,45 cm	
DP	0,14 cm		DP	0,07 cm	
CV	1,41 %		CV	0,84 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela A12 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatemento da P2-O

P2-OTIMIZADA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
12,2	0,71	OK	14,0	0,71	OK	8,8	0,71	OK
11,9	0,71	OK	14,4	0,71	OK	9,4	0,71	OK
Média	12,05 cm		Média	14,20 cm		Média	9,10 cm	
DP	0,21 cm		DP	0,28 cm		DP	0,42 cm	
CV	1,76 %		CV	1,99 %		CV	4,66 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A13 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatemento da P3-O

P3-OTIMIZADA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
12,2	0,00	OK	15,0	0,71	OK	14,9	0,71	OK
12,2	0,00	OK	14,7	0,71	OK	15,6	0,71	OK
Média	12,20 cm		Média	14,85 cm		Média	15,25 cm	
DP	0,00 cm		DP	0,21 cm		DP	0,49 cm	
CV	0,00 %		CV	1,43 %		CV	3,25 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A14 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatemento da P4-O

P4-OTIMIZADA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
17,6	0,71	OK	17,1	0,71	OK	16,4	0,71	OK
18,3	0,71	OK	17,9	0,71	OK	17,9	0,71	OK
Média	17,95 cm		Média	17,50 cm		Média	17,15 cm	
DP	0,49 cm		DP	0,57 cm		DP	1,06 cm	
CV	2,76 %		CV	3,23 %		CV	6,18 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A15 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatimento da P5-O

P5-OTIMIZADA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
19,2	0,71	OK	18,6	0,71	OK	17,4	0,71	OK
20,1	0,71	OK	18,4	0,71	OK	17,6	0,71	OK
Média	19,65 cm		Média	18,50 cm		Média	17,50 cm	
DP	0,64 cm		DP	0,14 cm		DP	0,14 cm	
CV	3,24 %		CV	0,76 %		CV	0,81 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A16 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatimento da P6-O

P6-OTIMIZADA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
18,2	0,71	OK	18,1	0,71	OK	18,4	0,71	OK
18,4	0,71	OK	18,3	0,71	OK	19,4	0,71	OK
Média	18,30 cm		Média	18,20 cm		Média	18,90 cm	
DP	0,14 cm		DP	0,14 cm		DP	0,71 cm	
CV	0,77 %		CV	0,78 %		CV	3,74 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A17 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatimento da P7-O

P7-OTIMIZADA					
0 MINUTOS			30 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
13,9	0,71	OK	14,1	0,71	OK
12,4	0,71	OK	13,8	0,71	OK
Média	13,15 cm		Média	13,95 cm	
DP	1,06 cm		DP	0,21 cm	
CV	8,07 %		CV	1,52 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela A18 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatemento da P8-O

P8-OTIMIZADA					
0 MINUTOS			30 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
12,9	0,71	OK	11,9	0,71	OK
13,7	0,71	OK	11,7	0,71	OK
Média	13,30 cm		Média	11,80 cm	
DP	0,57 cm		DP	0,14 cm	
CV	4,25 %		CV	1,20 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela A19 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatemento da P9-O

P9-OTIMIZADA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
18,1	0,71	OK	17,9	0,71	OK	17,9	0,71	OK
18,4	0,71	OK	18,9	0,71	OK	18,9	0,71	OK
Média	18,25 cm		Média	18,40 cm		Média	18,40 cm	
DP	0,21 cm		DP	0,71 cm		DP	0,71 cm	
CV	1,16 %		CV	3,84 %		CV	3,84 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela A20 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para miniabatemento da P10-O

P10-OTIMIZADA								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Φ (cm)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
15,6	0,71	OK	16,6	0,71	OK	15,9	0,71	OK
14,8	0,71	OK	17,4	0,71	OK	17,2	0,71	OK
Média	15,20 cm		Média	17,00 cm		Média	16,55 cm	
DP	0,57 cm		DP	0,57 cm		DP	0,92 cm	
CV	3,72 %		CV	3,33 %		CV	5,55 %	
Φ - Diâmetro; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Nas Tabelas A21 a A24 são apresentados os detalhes do teste de *Tukey* para o miniabatemento realizado no tempo de 0 minutos. Da mesma forma, as Tabelas A25 a A28 apresentam os resultados do teste de *Tukey* para o miniabatemento realizado no tempo de 30 minutos e as Tabelas A29 a A32 para o ensaio efetuado após 60 minutos de preparo da amostra.

Esclarece-se que para a análise do teste de *Tukey* foi utilizado o *software* PAST 4.03, sendo adotado um nível de significância $\alpha=0,05$. Nas Tabelas, abaixo da diagonal principal estão os valores Q de *Tukey* e acima da diagonal principal constam os valores P. Além disso, os pares que apresentaram diferença significativa estão destacados em rosa.

Tabela A21 - Resultados do teste de *Tukey* para o miniabatimento no tempo de 0 minutos para as pastas de referência ternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 0 MINUTOS - PASTAS DE REFERÊNCIA TERNÁRIAS						
	P1-R	P2-R	P3-R	P4-R	P5-R	P6-R
P1-R	-	0,004063	0,156600	0,000020	0,000011	0,000026
P2-R	9,505000	-	0,000562	0,000003	0,000002	0,000003
P3-R	4,159000	13,660000	-	0,000066	0,000033	0,000086
P4-R	24,060000	33,570000	19,900000	-	0,585200	0,984000
P5-R	26,440000	35,940000	22,280000	2,376000	-	0,314700
P6-R	23,170000	32,670000	19,010000	0,891100	3,267000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela A22 - Resultados do teste de *Tukey* para o miniabatimento no tempo de 0 minutos para as pastas de referência quaternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 0 MINUTOS - PASTAS DE REFERÊNCIA QUATERNÁRIAS				
	P7-R	P8-R	P9-R	P10-R
P7-R	-	0,337000	0,001490	0,199800
P8-R	2,761000	-	0,003221	0,944000
P9-R	15,190000	12,420000	-	0,004101
P10-R	3,528000	0,767000	11,660000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela A23 - Resultados do teste de *Tukey* para o miniabatimento no tempo de 0 minutos para as pastas otimizadas ternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 0 MINUTOS - PASTAS OTIMIZADAS TERNÁRIAS						
	P1-O	P2-O	P3-O	P4-O	P5-O	P6-O
P1-O	-	0,008255	0,005758	0,000003	0,000002	0,000003
P2-O	8,283000	-	0,997200	0,000021	0,000004	0,000015
P3-O	8,889000	0,606100	-	0,000025	0,000005	0,000017
P4-O	32,120000	23,840000	23,230000	-	0,020560	0,902400
P5-O	38,990000	30,710000	30,100000	6,869000	-	0,056980
P6-O	33,540000	25,250000	24,650000	1,414000	5,455000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela A24 - Resultados do teste de *Tukey* para o miniabatimento no tempo de 0 minutos para as pastas otimizadas quaternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 0 MINUTOS - PASTAS OTIMIZADAS QUATERNÁRIAS				
	P7-O	P8-O	P9-O	P10-O
P7-O	-	0,995500	0,005617	0,119200
P8-O	0,315400	-	0,006279	0,146300
P9-O	10,720000	10,410000	-	0,035130
P10-O	4,310000	3,994000	6,412000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela A25 - Resultados do teste de *Tukey* para o miniabatimento no tempo de 30 minutos para as pastas de referência ternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 30 MINUTOS - PASTAS DE REFERÊNCIA TERNÁRIAS						
	P1-R	P2-R	P3-R	P4-R	P5-R	P6-R
P1-R	-	0,167200	0,015950	0,000224	0,000152	0,000286
P2-R	4,076000	-	0,338600	0,001157	0,000701	0,001592
P3-R	7,247000	3,170000	-	0,005954	0,003168	0,008943
P4-R	16,080000	12,000000	8,832000	-	0,957200	0,995200
P5-R	17,210000	13,130000	9,964000	1,132000	-	0,786300
P6-R	15,400000	11,320000	8,152000	0,679400	1,812000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela A26 - Resultados do teste de *Tukey* para o miniabatimento no tempo de 30 minutos para as pastas de referência quaternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 30 MINUTOS - PASTAS DE REFERÊNCIA QUATERNÁRIAS				
	P7-R	P8-R	P9-R	P10-R
P7-R	-	0,112500	0,001469	0,006731
P8-R	4,400000	-	0,005387	0,048440
P9-R	15,240000	10,840000	-	0,076240
P10-R	10,210000	5,814000	5,028000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela A27 - Resultados do teste de *Tukey* para o miniabatimento no tempo de 30 minutos para as pastas otimizadas ternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 30 MINUTOS - PASTAS OTIMIZADAS TERNÁRIAS						
	P1-O	P2-O	P3-O	P4-O	P5-O	P6-O
P1-O	-	0,000007	0,000004	0,000001	0,000001	0,000001
P2-O	28,460000	-	0,327000	0,000205	0,000044	0,000068
P3-O	31,670000	3,217000	-	0,000707	0,000115	0,000188
P4-O	44,790000	16,330000	13,110000	-	0,084040	0,270700
P5-O	49,730000	21,280000	18,060000	4,949000	-	0,884800
P6-O	48,250000	19,790000	16,580000	3,464000	1,485000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela A28 - Resultados do teste de *Tukey* para o miniabatimento no tempo de 30 minutos para as pastas otimizadas quaternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 30 MINUTOS - PASTAS OTIMIZADAS QUATERNÁRIAS				
	P7-O	P8-O	P9-O	P10-O
P7-O	-	0,034190	0,002428	0,010010
P8-O	6,464000	-	0,000521	0,001331
P9-O	13,380000	19,840000	-	0,127200
P10-O	9,170000	15,630000	4,209000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela A29 - Resultados do teste de *Tukey* para o miniabatimento no tempo de 60 minutos para as pastas de referência ternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 60 MINUTOS - PASTAS DE REFERÊNCIA TERNÁRIAS						
	P1-R	P2-R	P3-R	P4-R	P5-R	P6-R
P1-R	-	0,292900	0,004136	0,001046	0,001202	0,000976
P2-R	3,361000	-	0,035020	0,005850	0,007002	0,005356
P3-R	9,473000	6,112000	-	0,458600	0,561100	0,411900
P4-R	12,220000	8,862000	2,750000	-	0,999900	1,000000
P5-R	11,920000	8,557000	2,445000	0,305600	-	0,999200
P6-R	12,380000	9,015000	2,903000	0,152800	0,458400	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela A30 - Resultados do teste de *Tukey* para o miniabatimento no tempo de 60 minutos para as pastas de referência quaternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 60 MINUTOS - PASTAS DE REFERÊNCIA QUATERNÁRIAS				
	P7-R	P8-R	P9-R	P10-R
P7-R	-	0,002050	0,000311	0,000586
P8-R	13,980000	-	0,012130	0,065490
P9-R	22,680000	8,698000	-	0,216000
P10-R	19,270000	5,285000	3,413000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela A31 - Resultados do teste de *Tukey* para o miniabatimento no tempo de 60 minutos para as pastas otimizadas ternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 60 MINUTOS - PASTAS OTIMIZADAS TERNÁRIAS					
	P2-O	P3-O	P4-O	P5-O	P6-O
P2-O	-	0,001153	0,000317	0,000257	0,000118
P3-O	13,520000	-	0,142200	0,081990	0,012330
P4-O	17,690000	4,176000	-	0,978100	0,181100
P5-O	18,460000	4,945000	0,769300	-	0,318300
P6-O	21,540000	8,022000	3,846000	3,077000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela A32 - Resultados do teste de *Tukey* para o miniabatimento no tempo de 60 minutos para as pastas otimizadas quaternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 60 MINUTOS - PASTAS OTIMIZADAS QUATERNÁRIAS		
	P9-O	P10-O
P9-O	-	0,152700
P10-O	3,190000	-

Fonte: Autora (2022)

A Tabela A33 apresenta os resultados do teste t de *Student* para o miniabatimento de cada pasta de aglomerante nos tempos de ensaio de 0, 30 e 60 minutos.

Tabela A33 - Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas no miniabatimento das pastas de aglomerantes

TESTE ESTATÍSTICO - MINIABATIMENTO								
0 MINUTOS			30 MINUTOS			60 MINUTOS		
Pasta	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva	Pasta	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva	Pasta	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva
P1-R e P1-O	0,000471	Sim	P1-R e P1-O	0,001804	Sim	P1-R e P1-O	-	-
P2-R e P2-O	0,010929	Sim	P2-R e P2-O	0,023704	Sim	P2-R e P2-O	0,001856	Sim
P3-R e P3-O	0,009070	Sim	P3-R e P3-O	0,005834	Sim	P3-R e P3-O	0,021297	Sim
P4-R e P4-O	0,075342	Não	P4-R e P4-O	0,054825	Não	P4-R e P4-O	0,130960	Não
P5-R e P5-O	0,923528	Não	P5-R e P5-O	0,104467	Não	P5-R e P5-O	0,032796	Sim
P6-R e P6-O	0,053208	Não	P6-R e P6-O	0,029857	Sim	P6-R e P6-O	0,397099	Não
P7-R e P7-O	0,116978	Não	P7-R e P7-O	0,087364	Não	P7-R e P7-O	-	-
P8-R e P8-O	0,023292	Sim	P8-R e P8-O	0,000436	Sim	P8-R e P8-O	-	-
P9-R e P9-O	0,095946	Não	P9-R e P9-O	0,049745	Sim	P9-R e P9-O	0,097172	Não
P10-R e P10-O	0,133079	Não	P10-R e P10-O	0,057191	Não	P10-R e P10-O	0,192401	Não

Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE B – ESPECTROSCOPIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA DAS PASTAS DE AGLOMERANTES

As Figuras B1 a B6 apresentam a espectroscopia de dispersão de energia (EDS) realizada nas pastas de aglomerantes.

Figura B1 – EDS para a pasta de referência P1-R: (a) micrografia da P1-R, (b) microanálise do C-S-H, (c) microanálise do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e (d) microanálise da sílica ativa

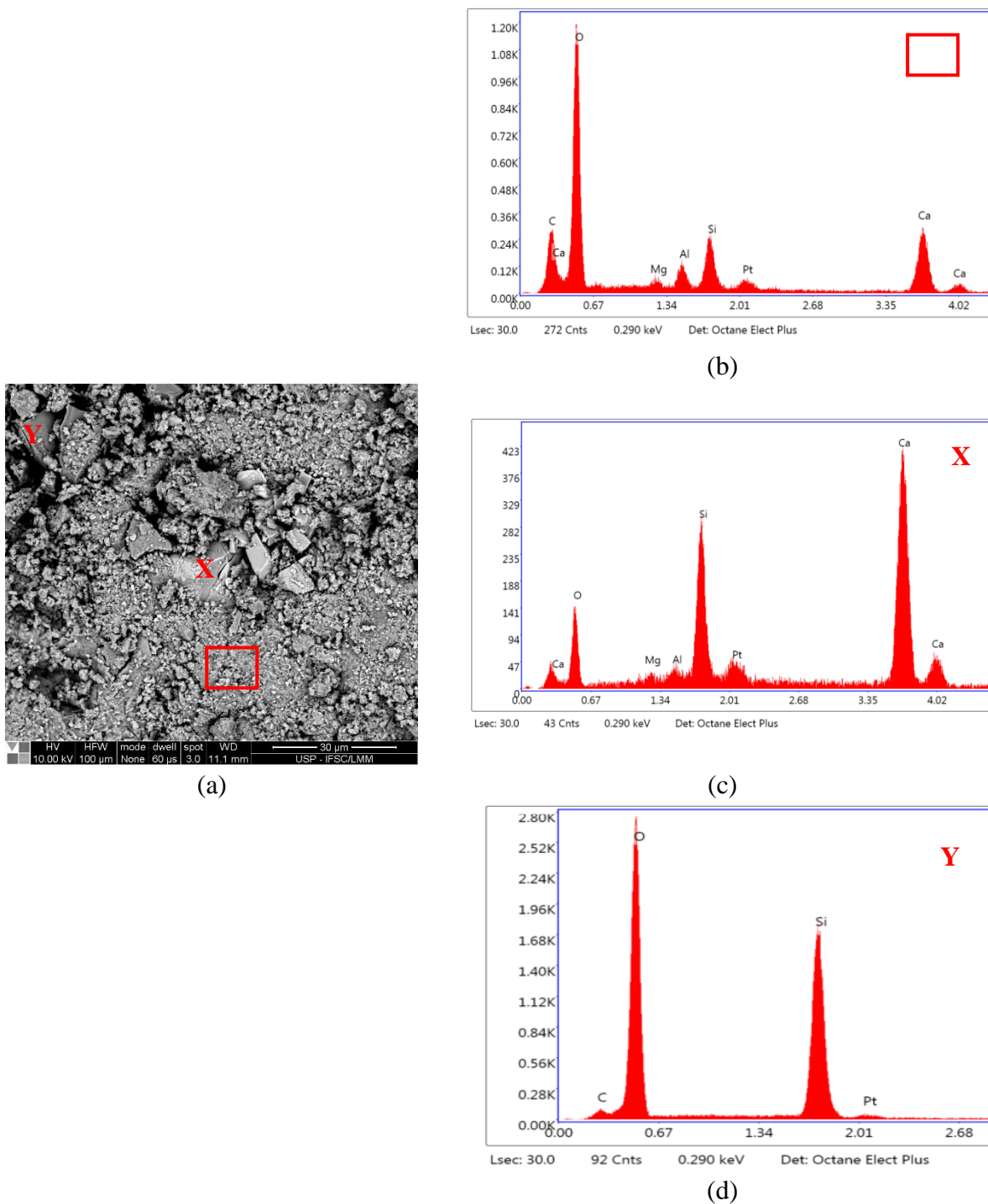
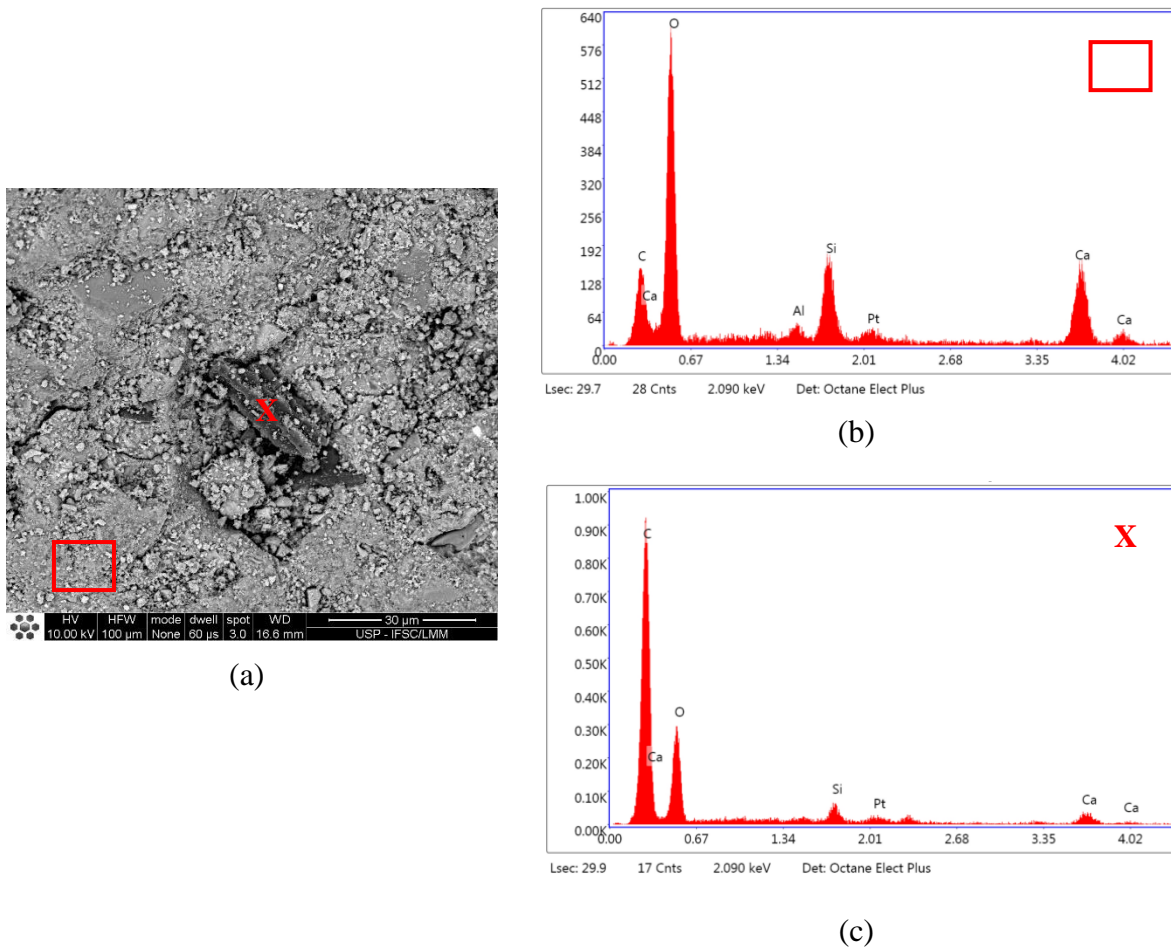
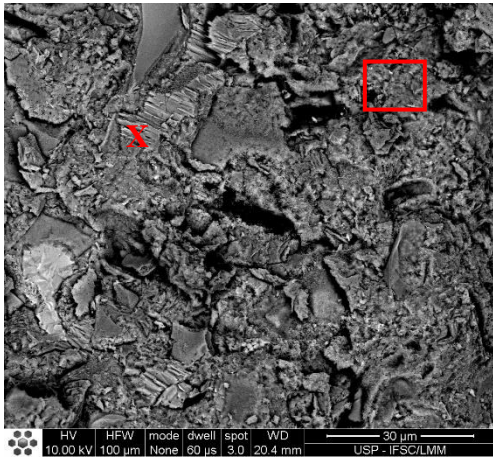


Figura B2 – EDS para a pasta a pasta de referência P2-R: (a) micrografia da P2-R, (b) microanálise do C-S-H e (c) microanálise da cinza de casca de arroz

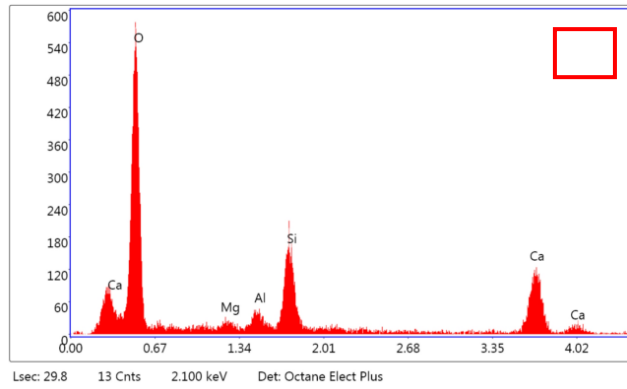


Fonte: Autora (2022)

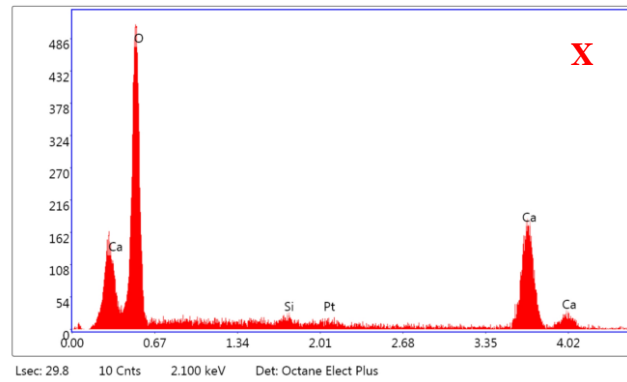
Figura B3 – EDS para a pasta a pasta de referência P3-R: (a) micrografia da P3-R, (b) microanálise do C-S-H e (c) microanálise do fíler calcário



(a)



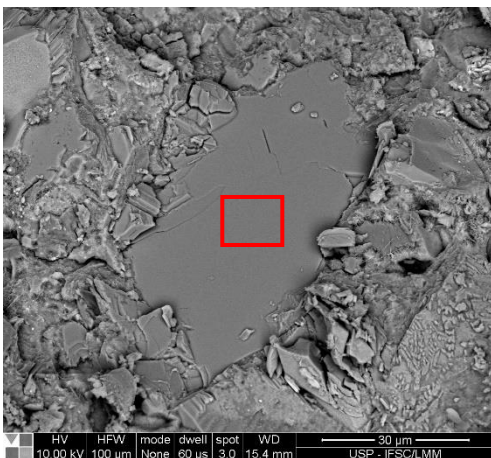
(b)



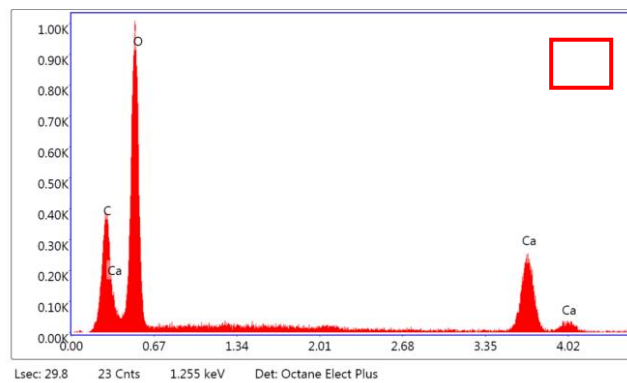
(c)

Fonte: Autora (2022)

Figura B4 – EDS para a pasta a pasta de referência P4-R: (a) micrografia da P4-R e (b) microanálise do Ca(OH)₂



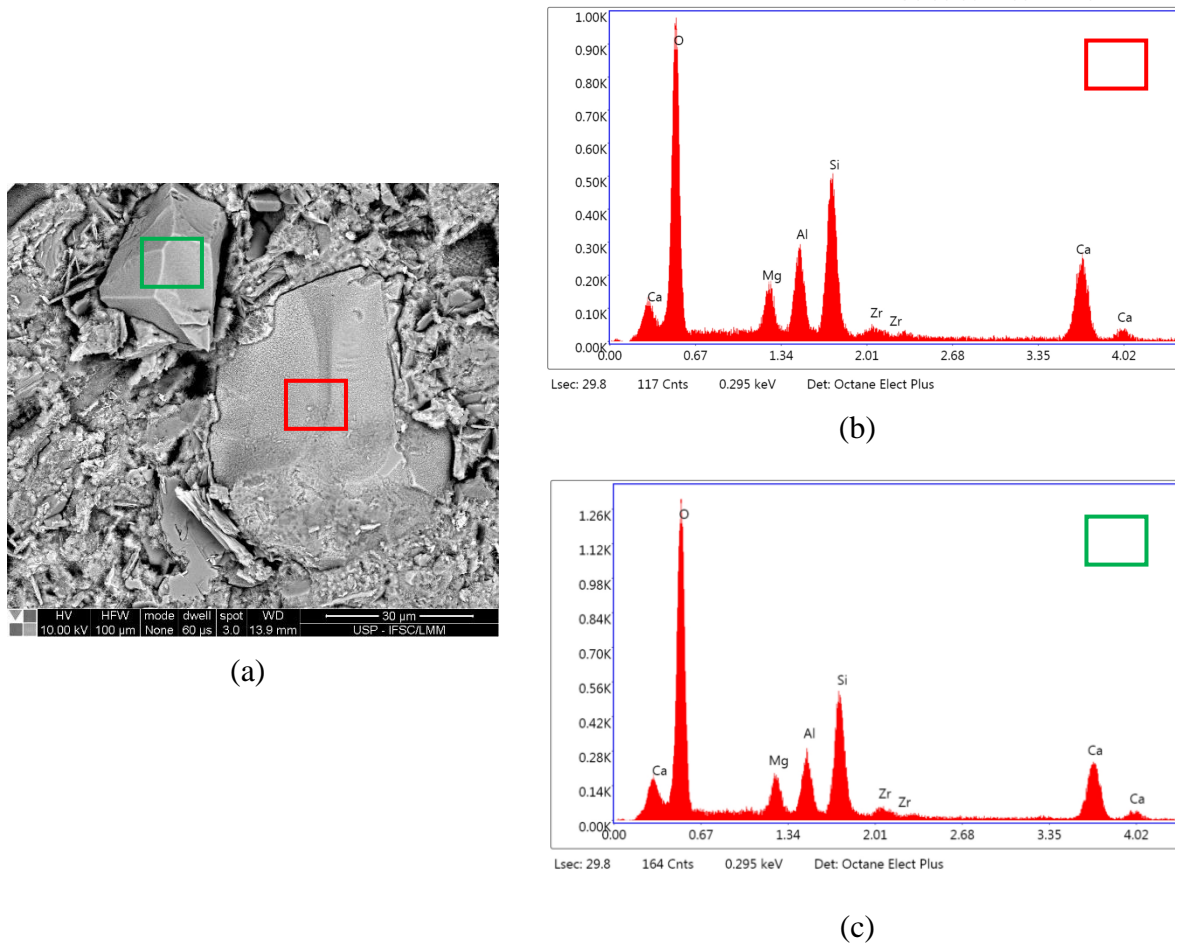
(a)



(b)

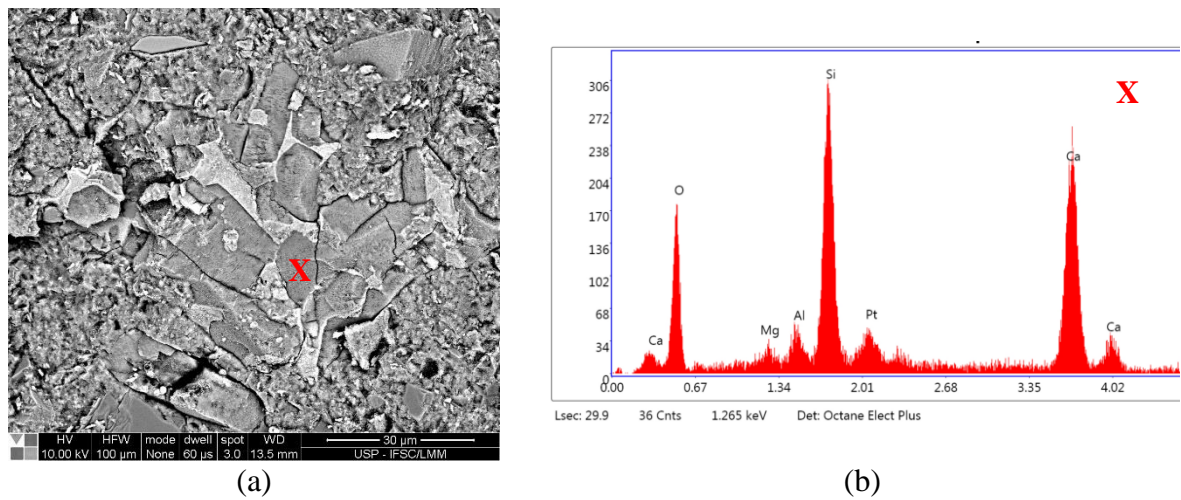
Fonte: Autora (2022)

Figura B5 – EDS para a pasta a pasta de referência P6-R: (a) micrografia da P6-R, (b) microanálise do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e (c) microanálise do fíler calcário



Fonte: Autora (2022)

Figura B6 – EDS para a pasta a pasta de referência P8-R: (a) micrografia da P8-R e (b) microanálise da sílica ativa



Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE C - TESTES ESTATÍSTICOS PARA POROSIDADE APARENTE DAS PASTAS DE AGLOMERANTES

As Tabelas C1 a C20 contêm os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a porosidade aparente das pastas de aglomerantes de referência e otimizadas, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas dessa propriedade, por idade de ensaio, para cada pasta de aglomerante, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso conforme o critério de *Chauvenet*.

Tabela C1 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P1-R

P1 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado
32,01	0,37	OK	30,90	1,05	OK	33,91	1,15	OK
30,66	1,13	OK	29,89	0,12	OK	30,70	0,45	OK
32,36	0,76	OK	29,19	0,94	OK	30,22	0,69	OK
Média	31,68 %		Média	30,00 %		Média	31,61 %	
DP	0,90 %		DP	0,86 %		DP	2,01 %	
CV	2,84 %		CV	2,86 %		CV	6,35 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C2 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P2-R

P2 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado
39,50	0,47	OK	37,27	1,04	OK	34,43	0,95	OK
39,67	0,67	OK	35,31	0,95	OK	35,75	0,09	OK
38,13	1,15	OK	36,16	0,09	OK	37,49	1,04	OK
Média	39,10 %		Média	36,25 %		Média	35,89 %	
DP	0,85 %		DP	0,99 %		DP	1,53 %	
CV	2,17 %		CV	2,72 %		CV	4,27 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C3 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P3-R

P3 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado
37,27	0,64	OK	37,31	0,00	OK	35,95	0,52	OK
37,57	0,51	OK	39,43	1,00	OK	34,76	1,15	OK
41,55	1,15	OK	35,18	1,00	OK	36,04	0,63	OK
Média	38,80 %		Média	37,31 %		Média	35,58 %	
DP	2,39 %		DP	2,12 %		DP	0,71 %	
CV	6,16 %		CV	5,69 %		CV	2,01 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C4 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P4-R

P4 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado
38,47	0,55	OK	32,82	0,55	OK	27,07	1,15	OK
38,24	0,60	OK	32,91	0,61	OK	35,42	0,70	OK
45,87	1,15	OK	30,18	1,15	OK	34,29	0,45	OK
Média	40,86 %		Média	31,97 %		Média	32,26 %	
DP	4,34 %		DP	1,55 %		DP	4,53 %	
CV	10,62 %		CV	4,86 %		CV	14,04 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C5 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P5-R

P5 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado
38,09	0,63	OK	31,00	1,02	OK	32,08	1,07	OK
38,14	0,53	OK	33,74	0,05	OK	30,00	0,91	OK
38,98	1,15	OK	36,11	0,97	OK	30,78	0,16	OK
Média	38,40 %		Média	33,62 %		Média	30,96 %	
DP	0,50 %		DP	2,56 %		DP	1,05 %	
CV	1,29 %		CV	7,60 %		CV	3,40 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C6 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P6-R

P6 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
40,81	1,15	OK	35,12	0,03	OK	35,25	0,74	OK
37,07	0,45	OK	34,02	1,02	OK	35,83	0,39	OK
36,48	0,70	OK	36,12	0,98	OK	38,39	1,14	OK
Média	38,12 %		Média	35,09 %		Média	36,49 %	
DP	2,35 %		DP	1,05 %		DP	1,67 %	
CV	6,15 %		CV	2,99 %		CV	4,57 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C7 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P7-R

P7 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
29,20	0,05	OK	27,09	0,31	OK	27,80	0,93	OK
30,67	1,02	OK	28,48	0,81	OK	22,53	1,06	OK
27,92	0,97	OK	23,13	1,12	OK	25,65	0,12	OK
Média	29,27 %		Média	26,23 %		Média	25,33 %	
DP	1,38 %		DP	2,77 %		DP	2,65 %	
CV	4,70 %		CV	10,58 %		CV	10,47 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C8 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P8-R

P8 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
25,79	1,15	OK	20,51	1,01	OK	24,32	1,15	OK
26,93	0,60	OK	20,96	0,03	OK	17,77	0,57	OK
26,89	0,55	OK	21,37	0,99	OK	17,68	0,59	OK
Média	26,54 %		Média	20,94 %		Média	19,92 %	
DP	0,65 %		DP	0,43 %		DP	3,81 %	
CV	2,45 %		CV	2,07 %		CV	19,14 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C9 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P9-R

P9 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
39,14	1,15	OK	33,53	0,70	OK	29,43	0,55	OK
37,98	0,60	OK	34,15	0,44	OK	25,39	1,15	OK
38,00	0,56	OK	37,98	1,14	OK	29,54	0,60	OK
Média	38,37 %		Média	35,22 %		Média	28,12 %	
DP	0,66 %		DP	2,41 %		DP	2,37 %	
CV	1,73 %		CV	6,84 %		CV	8,41 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C10 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P10-R

P10 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
35,97	0,08	OK	23,26	0,99	OK	28,30	1,10	OK
35,22	0,96	OK	25,38	0,02	OK	26,67	0,85	OK
36,93	1,04	OK	27,66	1,01	OK	27,16	0,26	OK
Média	36,04 %		Média	25,43 %		Média	27,37 %	
DP	0,86 %		DP	2,20 %		DP	0,84 %	
CV	2,38 %		CV	8,65 %		CV	3,05 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C11 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P1-O

P1 - OTIMIZADA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
20,28	0,20	OK	21,19	1,07	OK	22,47	1,13	OK
20,59	1,08	OK	20,16	0,16	OK	24,15	0,79	OK
20,11	0,89	OK	19,55	0,91	OK	23,76	0,34	OK
Média	20,33 %		Média	20,30 %		Média	23,46 %	
DP	0,24 %		DP	0,83 %		DP	0,88 %	
CV	1,20 %		CV	4,09 %		CV	3,74 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C12 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P2-O

P2 - OTIMIZADA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
24,30	1,13	OK	21,35	1,10	OK	15,52	0,48	OK
27,30	0,35	OK	19,88	0,26	OK	15,41	0,67	OK
28,18	0,78	OK	19,25	0,85	OK	16,46	1,15	OK
Média	26,60 %		Média	20,16 %		Média	15,80 %	
DP	2,04 %		DP	1,07 %		DP	0,58 %	
CV	7,65 %		CV	5,32 %		CV	3,65 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C13 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P3-O

P3 - OTIMIZADA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
24,50	0,24	OK	20,90	0,64	OK	26,47	0,06	OK
23,63	0,86	OK	23,31	1,15	OK	27,49	0,97	OK
26,40	1,10	OK	21,09	0,51	OK	25,27	1,03	OK
Média	24,85 %		Média	21,77 %		Média	26,41 %	
DP	1,42 %		DP	1,34 %		DP	1,11 %	
CV	5,71 %		CV	6,17 %		CV	4,21 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C14 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P4-O

P4 - OTIMIZADA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
32,89	0,89	OK	31,46	0,83	OK	22,69	0,92	OK
33,61	0,19	OK	30,60	0,28	OK	28,99	1,06	OK
34,92	1,08	OK	28,43	1,11	OK	25,15	0,14	OK
Média	33,81 %		Média	30,16 %		Média	25,61 %	
DP	1,03 %		DP	1,56 %		DP	3,18 %	
CV	3,04 %		CV	5,18 %		CV	12,40 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C15 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P5-O

P5 - OTIMIZADA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado
27,49	1,14	OK	28,26	0,70	OK	26,24	0,95	OK
29,66	0,74	OK	29,17	0,45	OK	25,03	0,10	OK
29,25	0,39	OK	35,00	1,15	OK	23,39	1,05	OK
Média	28,80 %		Média	30,81 %		Média	24,89 %	
DP	1,15 %		DP	3,66 %		DP	1,43 %	
CV	4,00 %		CV	11,87 %		CV	5,74 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C16 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P6-O

P6 - OTIMIZADA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado
39,39	0,24	OK	39,43	1,15	OK	38,23	0,88	OK
39,63	1,10	OK	38,41	0,50	OK	35,15	1,09	OK
39,27	0,86	OK	38,32	0,65	OK	37,16	0,20	OK
Média	39,43 %		Média	38,72 %		Média	36,84 %	
DP	0,18 %		DP	0,61 %		DP	1,56 %	
CV	0,47 %		CV	1,58 %		CV	4,25 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C17 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P7-O

P7 - OTIMIZADA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Crítério de Chauvenet	Resultado
23,35	0,12	OK	18,29	1,15	OK	18,76	0,04	OK
23,09	1,05	OK	14,53	0,65	OK	19,83	1,02	OK
23,54	0,94	OK	14,86	0,50	OK	17,81	0,98	OK
Média	23,33 %		Média	15,89 %		Média	18,80 %	
DP	0,22 %		DP	2,08 %		DP	1,01 %	
CV	0,96 %		CV	13,09 %		CV	5,38 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C18 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P8-O

P8 - OTIMIZADA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
26,09	0,90	OK	17,01	1,14	OK	24,15	0,17	OK
25,22	0,18	OK	17,46	0,42	OK	26,45	1,07	OK
23,71	1,08	OK	17,54	0,72	OK	22,80	0,90	OK
Média	25,01 %		Média	17,34 %		Média	24,47 %	
DP	1,21 %		DP	0,29 %		DP	1,85 %	
CV	4,82 %		CV	1,64 %		CV	7,54 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C19 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P9-O

P9 - OTIMIZADA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
38,34	1,05	OK	33,23	0,53	OK	21,63	0,48	OK
39,31	0,94	OK	34,33	1,15	OK	21,20	0,67	OK
38,91	0,11	OK	33,18	0,62	OK	25,12	1,15	OK
Média	38,85 %		Média	33,58 %		Média	22,65 %	
DP	0,48 %		DP	0,65 %		DP	2,15 %	
CV	1,25 %		CV	1,93 %		CV	9,48 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela C20 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para porosidade aparente da P10-O

P10 - OTIMIZADA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	P (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
28,83	0,48	OK	22,43	1,01	OK	16,95	0,99	OK
29,17	0,67	OK	20,40	0,02	OK	15,29	0,02	OK
25,97	1,15	OK	18,48	0,99	OK	13,52	1,01	OK
Média	27,99 %		Média	20,44 %		Média	15,25 %	
DP	1,76 %		DP	1,98 %		DP	1,72 %	
CV	6,29 %		CV	9,67 %		CV	11,26 %	
P - Porosidade aparente; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Nas Tabelas C21 a C24 são apresentados os detalhes do teste de *Tukey* para a porosidade aparente realizada aos 7 dias. Da mesma forma, as Tabelas C25 a C28 apresentam os resultados do teste de *Tukey* para a porosidade aparente realizada aos 28 dias e as Tabelas C29 a C32 para o ensaio efetuado aos 91 dias.

Esclarece-se que para a análise do teste de *Tukey* foi utilizado o *software* PAST 4.03, sendo adotado um nível de significância $\alpha=0,05$. Nas Tabelas, abaixo da diagonal principal estão os valores Q de *Tukey* e acima da diagonal principal constam os valores P. Além disso, os pares que apresentaram diferença significativa estão destacados em rosa.

Tabela C21 - Resultados do teste de *Tukey* para a porosidade aparente aos 7 dias das pastas de referência ternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 7 DIAS - PASTAS DE REFERÊNCIA TERNÁRIAS						
	P1-R	P2-R	P3-R	P4-R	P5-R	P6-R
P1-R	-	0,018530	0,024340	0,003909	0,034650	0,044660
P2-R	5,582000	-	1,000000	0,929300	0,998800	0,994200
P3-R	5,354000	0,228100	-	0,873400	0,999900	0,999000
P4-R	6,906000	1,324000	1,552000	-	0,776600	0,695100
P5-R	5,059000	0,523900	0,295800	1,847000	-	1,000000
P6-R	4,845000	0,737000	0,508900	2,061000	0,213100	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela C22 - Resultados do teste de *Tukey* para a porosidade aparente aos 7 dias das pastas de referência quaternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 7 DIAS - PASTAS DE REFERÊNCIA QUATERNÁRIAS				
	P7-R	P8-R	P9-R	P10-R
P7-R	-	0,029670	0,000010	0,000094
P8-R	5,058000	-	0,000001	0,000008
P9-R	16,900000	21,960000	-	0,061080
P10-R	12,570000	17,630000	4,328000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela C23 - Resultados do teste de *Tukey* para a porosidade aparente aos 7 dias das pastas otimizadas ternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 7 DIAS - PASTAS OTIMIZADAS TERNÁRIAS						
	P1-O	P2-O	P3-O	P4-O	P5-O	P6-O
P1-O	-	0,000377	0,006080	0,000000	0,000019	0,000000
P2-O	9,053000	-	0,507000	0,000098	0,283000	0,000000
P3-O	6,525000	2,528000	-	0,000011	0,015810	0,000000
P4-O	19,470000	10,420000	12,950000	-	0,002693	0,001004
P5-O	12,240000	3,188000	5,716000	7,232000	-	0,000002
P6-O	27,600000	18,540000	21,070000	8,123000	15,360000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela C24 - Resultados do teste de *Tukey* para a porosidade aparente aos 7 dias das pastas otimizadas quaternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 7 DIAS - PASTAS OTIMIZADAS QUATERNÁRIAS				
	P7-O	P8-O	P9-O	P10-O
P7-O	-	0,310400	0,000001	0,003639
P8-O	2,649000	-	0,000001	0,042050
P9-O	24,480000	21,830000	-	0,000009
P10-O	7,352000	4,703000	17,130000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela C25 - Resultados do teste de *Tukey* para a porosidade aparente aos 28 dias das pastas de referência ternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS - PASTAS DE REFERÊNCIA TERNÁRIAS						
	P1-R	P2-R	P3-R	P4-R	P5-R	P6-R
P1-R	-	0,005715	0,001608	0,687600	0,147400	0,024250
P2-R	6,578000	-	0,964300	0,067260	0,417400	0,948500
P3-R	7,693000	1,115000	-	0,017860	0,136400	0,584000
P4-R	2,079000	4,498000	5,613000	-	0,817200	0,258700
P5-R	3,811000	2,766000	3,881000	1,732000	-	0,875000
P6-R	5,358000	1,220000	2,335000	3,278000	1,546000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela C26 - Resultados do teste de *Tukey* para a porosidade aparente aos 28 dias das pastas de referência quaternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS - PASTAS DE REFERÊNCIA QUATERNÁRIAS				
	P7-R	P8-R	P9-R	P10-R
P7-R	-	0,065830	0,004038	0,966700
P8-R	4,253000	-	0,000181	0,125000
P9-R	7,229000	11,480000	-	0,002364
P10-R	0,643600	3,609000	7,873000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela C27 - Resultados do teste de *Tukey* para a porosidade aparente aos 28 dias das pastas otimizadas ternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS - PASTAS OTIMIZADAS TERNÁRIAS						
	P1-O	P2-O	P3-O	P4-O	P5-O	P6-O
P1-O	-	1,000000	0,913300	0,000266	0,000145	0,000000
P2-O	0,133400	-	0,879400	0,000233	0,000128	0,000000
P3-O	1,397000	1,530000	-	0,001150	0,000595	0,000001
P4-O	9,396000	9,529000	7,999000	-	0,997500	0,000975
P5-O	10,010000	10,150000	8,615000	0,616000	-	0,001916
P6-O	17,550000	17,680000	16,150000	8,151000	7,535000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela C28 - Resultados do teste de *Tukey* para a porosidade aparente aos 28 dias das pastas otimizadas quaternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS - PASTAS OTIMIZADAS QUATERNÁRIAS				
	P7-O	P8-O	P9-O	P10-O
P7-O	-	0,646000	0,000002	0,022920
P8-O	1,691000	-	0,000004	0,122200
P9-O	20,720000	19,030000	-	0,000021
P10-O	5,323000	3,632000	15,400000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela C29 - Resultados do teste de *Tukey* para a porosidade aparente aos 91 dias das pastas de referência ternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS - PASTAS DE REFERÊNCIA TERNÁRIAS						
	P1-R	P2-R	P3-R	P4-R	P5-R	P6-R
P1-R	-	0,267400	0,334600	0,999100	0,999100	0,166400
P2-R	3,245000	-	1,000000	0,422400	0,158800	0,999400
P3-R	3,013000	0,232500	-	0,510200	0,203700	0,995800
P4-R	0,492900	2,752000	2,520000	-	0,978300	0,277600
P5-R	0,497900	3,743000	3,511000	0,990800	-	0,095310
P6-R	3,700000	0,454900	0,687500	3,207000	4,198000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela C30 - Resultados do teste de *Tukey* para a porosidade aparente aos 91 dias das pastas de referência quaternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS - PASTAS DE REFERÊNCIA QUATERNÁRIAS				
	P7-R	P8-R	P9-R	P10-R
P7-R	-	0,132600	0,589200	0,779000
P8-R	3,549000	-	0,021620	0,034770
P9-R	1,835000	5,384000	-	0,984800
P10-R	1,347000	4,896000	0,488300	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela C31 - Resultados do teste de *Tukey* para a porosidade aparente aos 91 dias das pastas otimizadas ternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS - PASTAS OTIMIZADAS TERNÁRIAS						
	P1-O	P2-O	P3-O	P4-O	P5-O	P6-O
P1-O	-	0,001272	0,325200	0,631600	0,895000	0,000005
P2-O	7,906000	-	0,000060	0,000130	0,000271	0,000000
P3-O	3,043000	10,950000	-	0,990300	0,867700	0,000071
P4-O	2,218000	10,120000	0,825300	-	0,993900	0,000034
P5-O	1,472000	9,377000	1,572000	0,746200	-	0,000018
P6-O	13,810000	21,720000	10,770000	11,590000	12,340000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela C32 - Resultados do teste de *Tukey* para a porosidade aparente aos 91 dias das pastas otimizadas quaternárias

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS - PASTAS OTIMIZADAS QUATERNÁRIAS				
	P7-O	P8-O	P9-O	P10-O
P7-O	-	0,016470	0,098300	0,132800
P8-O	5,669000	-	0,596100	0,000838
P9-O	3,851000	1,817000	-	0,003497
P10-O	3,548000	9,217000	7,399000	-

Fonte: Autora (2022)

A Tabela C33 apresenta os resultados do teste t de *Student* para a porosidade aparente de cada pasta de aglomerante nas idades de 7, 28 e 91 dias.

Tabela C33 - Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na porosidade aparente das pastas de aglomerantes

TESTE ESTATÍSTICO - POROSIDADE APARENTE								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
Pasta	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva	Pasta	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva	Pasta	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva
P1-R e P1-O	0,000030	Sim	P1-R e P1-O	0,000148	Sim	P1-R e P1-O	0,002990	Sim
P2-R e P2-O	0,000602	Sim	P2-R e P2-O	0,000044	Sim	P2-R e P2-O	0,000029	Sim
P3-R e P3-O	0,000964	Sim	P3-R e P3-O	0,000430	Sim	P3-R e P3-O	0,000274	Sim
P4-R e P4-O	0,051962	Não	P4-R e P4-O	0,228563	Não	P4-R e P4-O	0,105589	Não
P5-R e P5-O	0,000187	Sim	P5-R e P5-O	0,337114	Não	P5-R e P5-O	0,004055	Sim
P6-R e P6-O	0,389211	Não	P6-R e P6-O	0,006578	Sim	P6-R e P6-O	0,801109	Não
P7-R e P7-O	0,001801	Sim	P7-R e P7-O	0,006690	Sim	P7-R e P7-O	0,016359	Sim
P8-R e P8-O	0,125222	Não	P8-R e P8-O	0,000272	Sim	P8-R e P8-O	0,136524	Não
P9-R e P9-O	0,366679	Não	P9-R e P9-O	0,318719	Não	P9-R e P9-O	0,041329	Sim
P10-R e P10-O	0,002062	Sim	P10-R e P10-O	0,043040	Sim	P10-R e P10-O	0,000389	Sim

Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE D - TESTES ESTATÍSTICOS PARA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DOS CONCRETOS

As Tabelas D1 a D20 contêm os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para o ensaio de absorção de água por imersão dos concretos de referência e otimizados, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas de absorção, por idade de ensaio, para cada traço de concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso conforme o critério de *Chauvenet*.

Tabela D1 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C1-R

C1 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
1,39	0,97	OK	1,22	0,64	OK
1,52	1,02	OK	1,23	0,51	OK
1,45	0,05	OK	1,36	1,15	OK
Média	1,45 %		Média	1,27 %	
DP	0,07 %		DP	0,08 %	
CV	4,48 %		CV	6,15 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela D2 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C2-R

C2 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,19	0,07	OK	1,91	0,93	OK
1,96	0,97	OK	1,95	0,13	OK
2,47	1,03	OK	2,01	1,06	OK
Média	2,21 %		Média	1,96 %	
DP	0,26 %		DP	0,05 %	
CV	11,57 %		CV	2,57 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela D3 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C3-R

C3 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
1,40	1,15	OK	1,25	0,58	OK
1,64	0,54	OK	1,25	0,58	OK
1,65	0,61	OK	1,30	1,15	OK
Média	1,56 %		Média	1,27 %	
DP	0,14 %		DP	0,03 %	
CV	9,05 %		CV	2,28 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela D4 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C4-R

C4 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,63	0,97	OK	2,42	1,15	OK
2,69	0,05	OK	2,37	0,58	OK
2,76	1,02	OK	2,37	0,58	OK
Média	2,69 %		Média	2,39 %	
DP	0,07 %		DP	0,03 %	
CV	2,42 %		CV	1,21 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela D5 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C5-R

C5 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,48	0,79	OK	1,24	1,08	OK
2,43	0,33	OK	1,38	0,18	OK
2,27	1,12	OK	1,46	0,90	OK
Média	2,39 %		Média	1,36 %	
DP	0,11 %		DP	0,11 %	
CV	4,58 %		CV	8,19 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela D6 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C6-R

C6 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,55	1,07	OK	2,27	1,03	OK
3,19	0,91	OK	2,64	0,06	OK
2,95	0,16	OK	2,95	0,97	OK
Média	2,90 %		Média	2,62 %	
DP	0,32 %		DP	0,34 %	
CV	11,16 %		CV	12,99 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela D7 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C7-R

C7 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
1,50	0,87	OK	1,31	1,15	OK
1,43	0,22	OK	1,48	0,63	OK
1,29	1,09	OK	1,47	0,52	OK
Média	1,41 %		Média	1,42 %	
DP	0,11 %		DP	0,10 %	
CV	7,60 %		CV	6,72 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela D8 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C8-R

C8 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Absorção (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
1,34	1,00	OK	1,26	1,15	OK
1,28	0,00	OK	1,23	0,58	OK
1,22	1,00	OK	1,23	0,58	OK
Média	1,28 %		Média	1,24 %	
DP	0,06 %		DP	0,02 %	
CV	4,69 %		CV	1,40 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela D9 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C9-R

C9 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
1,88	1,13	OK	1,54	1,13	OK
2,24	0,78	OK	1,85	0,35	OK
2,16	0,35	OK	1,94	0,78	OK
Média	2,09 %		Média	1,78 %	
DP	0,19 %		DP	0,21 %	
CV	9,03 %		CV	11,81 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela D10 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C10-R

C10 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
2,16	1,08	OK	1,78	1,10	OK
1,93	0,88	OK	2,02	0,24	OK
2,01	0,20	OK	2,13	0,86	OK
Média	2,03 %		Média	1,98 %	
DP	0,12 %		DP	0,18 %	
CV	5,74 %		CV	9,05 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela D11 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C1-O

C1 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
1,33	0,52	OK	1,10	0,90	OK
1,34	0,63	OK	1,13	0,17	OK
1,19	1,15	OK	1,19	1,07	OK
Média	1,29 %		Média	1,14 %	
DP	0,08 %		DP	0,04 %	
CV	6,32 %		CV	3,89 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela D12 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C2-O

C2 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
1,83	0,94	OK	1,54	1,15	OK
1,70	0,12	OK	1,71	0,48	OK
1,51	1,05	OK	1,73	0,67	OK
Média	1,68 %		Média	1,66 %	
DP	0,16 %		DP	0,11 %	
CV	9,51 %		CV	6,47 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela D13 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C3-O

C3 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
1,18	0,87	OK	1,18	0,89	OK
1,36	1,09	OK	1,33	1,08	OK
1,24	0,22	OK	1,23	0,19	OK
Média	1,26 %		Média	1,24 %	
DP	0,10 %		DP	0,07 %	
CV	7,57 %		CV	6,03 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela D14 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C4-O

C4 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
1,30	1,07	OK	1,27	0,71	OK
1,34	0,17	OK	1,13	0,71	OK
1,37	0,91	OK	-	-	-
Média	1,34 %		Média	1,20 %	
DP	0,03 %		DP	0,09 %	
CV	2,39 %		CV	7,89 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela D15 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C5-O

C5 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
1,32	0,72	OK	1,09	0,45	OK
1,34	0,42	OK	1,01	1,15	OK
1,42	1,14	OK	1,10	0,70	OK
Média	1,36 %		Média	1,07 %	
DP	0,05 %		DP	0,05 %	
CV	3,86 %		CV	4,74 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela D16 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C6-O

C6 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
1,83	1,12	OK	1,85	0,56	OK
1,97	0,32	OK	1,63	1,15	OK
2,02	0,80	OK	1,86	0,60	OK
Média	1,94 %		Média	1,78 %	
DP	0,10 %		DP	0,13 %	
CV	5,29 %		CV	7,31 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela D17 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C7-O

C7 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
1,61	0,26	OK	1,74	1,14	OK
1,88	1,10	OK	1,60	0,72	OK
1,49	0,85	OK	1,62	0,42	OK
Média	1,66 %		Média	1,65 %	
DP	0,20 %		DP	0,07 %	
CV	11,83 %		CV	4,43 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela D18 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C8-O

C8 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
1,55	0,02	OK	1,57	0,97	OK
1,69	0,99	OK	1,43	1,03	OK
1,41	1,01	OK	1,51	0,06	OK
Média	1,55 %		Média	1,50 %	
DP	0,14 %		DP	0,07 %	
CV	9,05 %		CV	4,89 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela D19 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C9-O

C9 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
1,89	0,69	OK	1,85	0,95	OK
2,00	1,15	OK	1,73	1,05	OK
1,90	0,46	OK	1,80	0,10	OK
Média	1,93 %		Média	1,79 %	
DP	0,06 %		DP	0,06 %	
CV	3,01 %		CV	3,40 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela D20 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para absorção do C10-O

C10 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Absorção (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
1,93	0,99	OK	2,01	1,07	OK
1,99	0,03	OK	1,91	0,91	OK
2,05	1,01	OK	1,95	0,17	OK
Média	1,99 %		Média	1,96 %	
DP	0,06 %		DP	0,05 %	
CV	2,97 %		CV	2,61 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Nas Tabelas D21 a D24 são apresentados os detalhes do teste de *Tukey* para o ensaio de absorção realizado aos 28 dias. Da mesma forma, as Tabelas D25 a D28 apresentam os resultados do teste de *Tukey* para o ensaio de absorção realizado aos 91 dias.

Esclarece-se que para a análise do teste de *Tukey* foi utilizado o *software* PAST 4.03, sendo adotado um nível de significância $\alpha=0,05$. Nas Tabelas, abaixo da diagonal principal estão os valores Q de *Tukey* e acima da diagonal principal constam os valores P. Além disso, os pares que apresentaram diferença significativa estão destacados em rosa.

Tabela D21 - Resultados do teste de *Tukey* para absorção aos 28 dias dos concretos de referência com aglomerante ternário

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTE TERNÁRIO						
	C1-R	C2-R	C3-R	C4-R	C5-R	C6-R
C1-R	-	0,003633	0,975700	0,000038	0,000546	0,000008
C2-R	6,970000	-	0,011930	0,066950	0,818900	0,007170
C3-R	1,018000	5,952000	-	0,000095	0,001633	0,000018
C4-R	11,470000	4,502000	10,450000	-	0,414100	0,764200
C5-R	8,696000	1,727000	7,679000	2,775000	-	0,055850
C6-R	13,350000	6,384000	12,340000	1,881000	4,657000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela D22 - Resultados do teste de *Tukey* para absorção aos 28 dias dos concretos de referência com aglomerante quaternário

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTE QUATERNÁRIO				
	C7-R	C8-R	C9-R	C10-R
C7-R	-	0,757000	0,059640	0,064590
C8-R	1,419000	-	0,027910	0,029890
C9-R	5,446000	6,864000	-	0,999600
C10-R	5,308000	6,727000	0,137300	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela D23 - Resultados do teste de *Tukey* para absorção aos 28 dias dos concretos otimizados com aglomerante ternário

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTE TERNÁRIO						
	C1-O	C2-O	C3-O	C4-O	C5-O	C6-O
C1-O	-	0,003090	0,999200	0,985400	0,928800	0,000028
C2-O	7,111000	-	0,001796	0,008821	0,014540	0,053020
C3-O	0,482100	7,593000	-	0,915800	0,790900	0,000018
C4-O	0,904000	6,207000	1,386000	-	0,999600	0,000062
C5-O	1,326000	5,786000	1,808000	0,421900	-	0,000092
C6-O	11,810000	4,701000	12,290000	10,910000	10,490000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela D24 - Resultados do teste de *Tukey* para absorção aos 28 dias dos concretos otimizados com aglomerante quaternário

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS				
CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTE QUATERNÁRIO				
	C7-O	C8-O	C9-O	C10-O
C7-O	-	0,731000	0,123800	0,055560
C8-O	1,474000	-	0,028650	0,013280
C9-O	3,619000	5,093000	-	0,938700
C10-O	4,423000	5,897000	0,804200	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela D25 - Resultados do teste de *Tukey* para absorção aos 91 dias dos concretos de referência com aglomerante ternário

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS						
CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTE TERNÁRIO						
	C1-R	C2-R	C3-R	C4-R	C5-R	C6-R
C1-R	-	0,001390	1,000000	0,000013	0,974900	0,000002
C2-R	7,825000	-	0,001333	0,041840	0,004418	0,001865
C3-R	0,037990	7,863000	-	0,000012	0,970700	0,000002
C4-R	12,730000	4,900000	12,760000	-	0,000031	0,456700
C5-R	1,026000	6,800000	1,064000	11,700000	-	0,000004
C6-R	15,380000	7,559000	15,420000	2,659000	14,360000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela D26 - Resultados do teste de *Tukey* para absorção aos 91 dias dos concretos de referência com aglomerante quaternário

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS				
CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTE QUATERNÁRIO				
	C7-R	C8-R	C9-R	C10-R
C7-R	-	0,475800	0,067610	0,007014
C8-R	2,133000	-	0,008680	0,001206
C9-R	4,226000	6,359000	-	0,394100
C10-R	6,596000	8,729000	2,370000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela D27 - Resultados do teste de *Tukey* para absorção aos 91 dias dos concretos otimizados com aglomerante ternário

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS						
CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTE TERNÁRIO						
	C1-O	C2-O	C3-O	C4-O	C5-O	C6-O
C1-O	-	0,000192	0,684600	0,971800	0,903500	0,000027
C2-O	10,180000	-	0,001401	0,001454	0,000057	0,580100
C3-O	2,088000	8,090000	-	0,990600	0,206900	0,000153
C4-O	1,050000	8,053000	0,817000	-	0,585900	0,000196
C5-O	1,435000	11,610000	3,523000	2,334000	-	0,000010
C6-O	12,530000	2,349000	10,440000	10,150000	13,960000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela D28 - Resultados do teste de *Tukey* para absorção aos 91 dias dos concretos otimizados com aglomerante quaternário

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS				
CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTE QUATERNÁRIO				
	C7-O	C8-O	C9-O	C10-O
C7-O	-	0,084340	0,110000	0,001971
C8-O	4,005000	-	0,002629	0,000124
C9-O	3,738000	7,743000	-	0,059100
C10-O	8,099000	12,100000	4,361000	-

Fonte: Autora (2022)

A Tabela D29 apresenta os resultados do teste t de *Student* para o ensaio de absorção de cada traço de concreto nas idades de 28 e 91 dias.

Tabela D29 - Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na absorção dos concretos

TESTE ESTATÍSTICO - ABSORÇÃO					
28 DIAS			91 DIAS		
Concreto	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva	Concreto	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva
C1-R e C1-O	0,048879	Sim	C1-R e C1-O	0,069300	Não
C2-R e C2-O	0,038586	Sim	C2-R e C2-O	0,012725	Sim
C3-R e C3-O	0,036894	Sim	C3-R e C3-O	0,653082	Não
C4-R e C4-O	0,000005	Sim	C4-R e C4-O	0,000212	Sim
C5-R e C5-O	0,000124	Sim	C5-R e C5-O	0,014674	Sim
C6-R e C6-O	0,008158	Sim	C6-R e C6-O	0,016065	Sim
C7-R e C7-O	0,120205	Não	C7-R e C7-O	0,028199	Sim
C8-R e C8-O	0,038716	Sim	C8-R e C8-O	0,003792	Sim
C9-R e C9-O	0,225512	Não	C9-R e C9-O	0,906991	Não
C10-R e C10-O	0,582784	Não	C10-R e C10-O	0,859526	Não

Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE E - TESTES ESTATÍSTICOS PARA ÍNDICE DE VAZIOS DOS CONCRETOS

As Tabelas E1 a E20 contêm os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para o ensaio de índice de vazios dos concretos de referência e otimizados, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas de índice de vazios, por idade de ensaio, para cada traço de concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso conforme o critério de *Chauvenet*.

Tabela E1 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C1-R

C1 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,91	1,14	OK	2,91	1,14	OK
3,18	0,40	OK	3,18	0,40	OK
3,24	0,74	OK	3,24	0,74	OK
Média	3,11 %		Média	3,11 %	
DP	0,18 %		DP	0,18 %	
CV	5,65 %		CV	5,65 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela E2 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C2-R

C2 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
5,13	0,09	OK	4,51	0,85	OK
4,62	0,95	OK	4,58	0,25	OK
5,79	1,04	OK	4,74	1,10	OK
Média	5,18 %		Média	4,61 %	
DP	0,59 %		DP	0,12 %	
CV	11,32 %		CV	2,56 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela E3 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C3-R

C3 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
3,34	1,15	OK	2,97	0,58	OK
3,87	0,50	OK	2,97	0,58	OK
3,92	0,65	OK	3,15	1,15	OK
Média	3,71 %		Média	3,03 %	
DP	0,32 %		DP	0,10 %	
CV	8,66 %		CV	3,43 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela E4 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C4-R

C4 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
6,23	0,79	OK	5,72	1,15	OK
6,29	0,33	OK	5,62	0,67	OK
6,48	1,12	OK	5,63	0,48	OK
Média	6,33 %		Média	5,66 %	
DP	0,13 %		DP	0,06 %	
CV	2,06 %		CV	0,97 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela E5 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C5-R

C5 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
5,88	0,76	OK	2,97	1,05	OK
5,78	0,37	OK	3,29	0,11	OK
5,39	1,13	OK	3,52	0,94	OK
Média	5,68 %		Média	3,26 %	
DP	0,26 %		DP	0,28 %	
CV	4,56 %		CV	8,47 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela E6 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C6-R

C6 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
5,91	1,08	OK	5,27	1,03	OK
7,32	0,88	OK	6,11	0,06	OK
6,83	0,20	OK	6,82	0,97	OK
Média	6,69 %		Média	6,07 %	
DP	0,72 %		DP	0,78 %	
CV	10,71 %		CV	12,79 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela E7 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C7-R

C7 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
3,54	0,86	OK	3,13	1,15	OK
3,38	0,23	OK	3,52	0,60	OK
3,04	1,10	OK	3,51	0,55	OK
Média	3,32 %		Média	3,39 %	
DP	0,26 %		DP	0,22 %	
CV	7,69 %		CV	6,57 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela E8 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C8-R

C8 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
3,23	0,95	OK	3,05	1,14	OK
3,09	0,10	OK	2,99	0,44	OK
2,90	1,05	OK	2,98	0,70	OK
Média	3,07 %		Média	3,01 %	
DP	0,17 %		DP	0,04 %	
CV	5,39 %		CV	1,26 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela E9 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C9-R

C9 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
4,44	1,13	OK	3,65	1,14	OK
5,29	0,77	OK	4,44	0,42	OK
5,11	0,36	OK	4,59	0,72	OK
Média	4,95 %		Média	4,23 %	
DP	0,45 %		DP	0,51 %	
CV	9,06 %		CV	11,95 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela E10 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C10-R

C10 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
5,11	1,04	OK	4,21	1,13	OK
4,61	0,96	OK	4,81	0,34	OK
4,83	0,08	OK	4,99	0,78	OK
Média	4,85 %		Média	4,67 %	
DP	0,25 %		DP	0,41 %	
CV	5,17 %		CV	8,75 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela E11 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C1-O

C1 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
3,19	0,53	OK	2,61	0,96	OK
3,21	0,62	OK	2,72	0,08	OK
2,85	1,15	OK	2,85	1,04	OK
Média	3,08 %		Média	2,73 %	
DP	0,20 %		DP	0,12 %	
CV	6,50 %		CV	4,37 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela E12 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C2-O

C2 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
4,29	0,95	OK	3,62	1,14	OK
3,98	0,10	OK	4,00	0,43	OK
3,55	1,05	OK	4,06	0,71	OK
Média	3,94 %		Média	3,89 %	
DP	0,37 %		DP	0,24 %	
CV	9,48 %		CV	6,18 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela E13 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C3-O

C3 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
2,81	0,89	OK	2,82	0,88	OK
3,29	1,08	OK	3,15	1,09	OK
2,98	0,19	OK	2,93	0,21	OK
Média	3,03 %		Média	2,97 %	
DP	0,24 %		DP	0,17 %	
CV	7,89 %		CV	5,71 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela E14 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C4-O

C4 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
3,09	1,13	OK	3,05	0,71	OK
3,23	0,38	OK	2,74	0,71	OK
3,27	0,76	OK	-	-	-
Média	3,20 %		Média	2,89 %	
DP	0,10 %		DP	0,22 %	
CV	2,99 %		CV	7,57 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela E15 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C5-O

C5 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
3,17	0,74	OK	2,60	0,30	OK
3,21	0,40	OK	2,43	1,12	OK
3,42	1,14	OK	2,66	0,82	OK
Média	3,27 %		Média	2,56 %	
DP	0,14 %		DP	0,12 %	
CV	4,17 %		CV	4,71 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela E16 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C6-O

C6 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
4,33	1,12	OK	4,39	0,55	OK
4,69	0,33	OK	3,88	1,15	OK
4,80	0,79	OK	4,41	0,60	OK
Média	4,61 %		Média	4,23 %	
DP	0,24 %		DP	0,30 %	
CV	5,32 %		CV	7,07 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela E17 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C7-O

C7 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de Chauvenet	Resultado
3,79	0,24	OK	4,08	1,10	OK
4,40	1,10	OK	3,77	0,24	OK
3,51	0,86	OK	3,63	0,86	OK
Média	3,90 %		Média	3,83 %	
DP	0,45 %		DP	0,23 %	
CV	11,66 %		CV	5,94 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela E18 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C8-O

C8 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
3,64	0,01	OK	3,65	1,12	OK
3,97	1,01	OK	3,37	0,80	OK
3,33	0,99	OK	3,44	0,32	OK
Média	3,64 %		Média	3,49 %	
DP	0,32 %		DP	0,15 %	
CV	8,82 %		CV	4,23 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela E19 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C9-O

C9 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
4,44	0,78	OK	4,39	0,98	OK
4,74	1,13	OK	4,08	1,02	OK
4,51	0,34	OK	4,24	0,04	OK
Média	4,56 %		Média	4,24 %	
DP	0,16 %		DP	0,15 %	
CV	3,42 %		CV	3,55 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela E20 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para índice de vazios do C10-O

C10 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Índice de vazios (%)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
4,55	0,95	OK	4,68	1,11	OK
4,66	0,10	OK	4,47	0,84	OK
4,80	1,04	OK	4,53	0,27	OK
Média	4,67 %		Média	4,56 %	
DP	0,12 %		DP	0,11 %	
CV	2,66 %		CV	2,30 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Nas Tabelas E21 a E24 são apresentados os detalhes do teste de *Tukey* para o ensaio de índice de vazios realizado aos 28 dias. Da mesma forma, as Tabelas E25 a E28 apresentam os resultados do teste de *Tukey* para o ensaio de índice de vazios realizado aos 91 dias.

Esclarece-se que para a análise do teste de *Tukey* foi utilizado o *software* PAST 4.03, sendo adotado um nível de significância $\alpha=0,05$. Nas Tabelas, abaixo da diagonal principal estão os valores Q de *Tukey* e acima da diagonal principal constam os valores P. Além disso, os pares que apresentaram diferença significativa estão destacados em rosa.

Tabela E21 - Resultados do teste de *Tukey* para índice de vazios aos 28 dias dos concretos de referência com aglomerante ternário

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTE TERNÁRIO						
	C1-R	C2-R	C3-R	C4-R	C5-R	C6-R
C1-R	-	0,000692	0,535600	0,000009	0,000089	0,000003
C2-R	8,471000	-	0,011060	0,051830	0,695300	0,009264
C3-R	2,455000	6,016000	-	0,000073	0,001057	0,000020
C4-R	13,190000	4,720000	10,740000	-	0,456400	0,901600
C5-R	10,530000	2,060000	8,076000	2,660000	-	0,105900
C6-R	14,640000	6,166000	12,180000	1,446000	4,106000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela E22 - Resultados do teste de *Tukey* para índice de vazios aos 28 dias dos concretos de referência com aglomerante quaternário

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTE QUATERNÁRIO				
	C7-R	C8-R	C9-R	C10-R
C7-R	-	0,747100	0,000710	0,001074
C8-R	1,432000	-	0,000266	0,000387
C9-R	9,443000	10,880000	-	0,977400
C10-R	8,882000	10,310000	0,561200	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela E23 - Resultados do teste de *Tukey* para índice de vazios aos 28 dias dos concretos otimizados com aglomerante ternário

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTE TERNÁRIO						
	C1-O	C2-O	C3-O	C4-O	C5-O	C6-O
C1-O	-	0,007295	0,999600	0,989400	0,920900	0,000043
C2-O	6,369000	-	0,004466	0,019820	0,036900	0,039140
C3-O	0,421300	6,790000	-	0,940900	0,799200	0,000030
C4-O	0,842600	5,526000	1,264000	-	0,998900	0,000093
C5-O	1,363000	5,006000	1,784000	0,520400	-	0,000152
C6-O	11,330000	4,956000	11,750000	10,480000	9,962000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela E24 - Resultados do teste de *Tukey* para índice de vazios aos 28 dias dos concretos otimizados com aglomerante quaternário

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS				
CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTE QUATERNÁRIO				
	C7-O	C8-O	C9-O	C10-O
C7-O	-	0,727400	0,095080	0,050970
C8-O	1,484000	-	0,021940	0,012150
C9-O	3,885000	5,368000	-	0,969400
C10-O	4,510000	5,993000	0,624700	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela E25 - Resultados do teste de *Tukey* para índice de vazios aos 91 dias dos concretos de referência com aglomerante ternário

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS						
CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTE TERNÁRIO						
	C1-R	C2-R	C3-R	C4-R	C5-R	C6-R
C1-R	-	0,002196	0,999700	0,000014	0,994000	0,000003
C2-R	7,413000	-	0,001415	0,030240	0,005122	0,002797
C3-R	0,395400	7,809000	-	0,000010	0,961400	0,000002
C4-R	12,590000	5,173000	12,980000	-	0,000027	0,708600
C5-R	0,741300	6,672000	1,137000	11,840000	-	0,000005
C6-R	14,610000	7,199000	15,010000	2,026000	13,870000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela E26 - Resultados do teste de *Tukey* para índice de vazios aos 91 dias dos concretos de referência com aglomerante quaternário

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS				
CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTE QUATERNÁRIO				
	C7-R	C8-R	C9-R	C10-R
C7-R	-	0,558000	0,067200	0,007881
C8-R	1,915000	-	0,010540	0,001578
C9-R	4,232000	6,147000	-	0,440000
C10-R	6,466000	8,381000	2,234000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela E27 - Resultados do teste de *Tukey* para índice de vazios aos 91 dias dos concretos otimizados com aglomerante ternário

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS						
CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTE TERNÁRIO						
	C1-O	C2-O	C3-O	C4-O	C5-O	C6-O
C1-O	-	0,000242	0,703000	0,937100	0,914400	0,000023
C2-O	9,923000	-	0,001733	0,002333	0,000072	0,397200
C3-O	2,041000	7,882000	-	0,998600	0,227300	0,000120
C4-O	1,281000	7,595000	0,545200	-	0,511400	0,000200
C5-O	1,389000	11,310000	3,430000	2,523000	-	0,000008
C6-O	12,760000	2,835000	10,720000	10,130000	14,150000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela E28 - Resultados do teste de *Tukey* para índice de vazios aos 91 dias dos concretos otimizados com aglomerante quaternário

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS				
CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTE QUATERNÁRIO				
	C7-O	C8-O	C9-O	C10-O
C7-O	-	0,132400	0,063930	0,002815
C8-O	3,551000	-	0,002441	0,000215
C9-O	4,282000	7,833000	-	0,157000
C10-O	7,659000	11,210000	3,377000	-

Fonte: Autora (2022)

A Tabela E29 apresenta os resultados do teste t de *Student* para o ensaio de índice de vazios de cada traço de concreto nas idades de 28 e 91 dias.

Tabela E29 - Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas no índice de vazios dos concretos

TESTE ESTATÍSTICO - ÍNDICE DE VAZIOS					
28 DIAS			91 DIAS		
Concreto	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva	Concreto	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva
C1-R e C1-O	0,863655	Não	C1-R e C1-O	0,035249	Sim
C2-R e C2-O	0,036572	Sim	C2-R e C2-O	0,009695	Sim
C3-R e C3-O	0,041854	Sim	C3-R e C3-O	0,617456	Não
C4-R e C4-O	0,000005	Sim	C4-R e C4-O	0,000190	Sim
C5-R e C5-O	0,000138	Sim	C5-R e C5-O	0,015966	Sim
C6-R e C6-O	0,008870	Sim	C6-R e C6-O	0,018558	Sim
C7-R e C7-O	0,127597	Não	C7-R e C7-O	0,073698	Não
C8-R e C8-O	0,052080	Não	C8-R e C8-O	0,005404	Sim
C9-R e C9-O	0,235206	Não	C9-R e C9-O	0,971616	Não
C10-R e C10-O	0,333228	Não	C10-R e C10-O	0,676399	Não

Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE F - TESTES ESTATÍSTICOS PARA MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SECA DOS CONCRETOS

As Tabelas F1 a F20 contêm os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para o ensaio de massa específica da amostra secas dos concretos de referência e otimizados, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas de massa específica da amostra seca, por idade de ensaio, para cada traço de concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso conforme o critério de *Chauvenet*.

Tabela F1 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C1-R

C1 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,37	0,00	OK	2,39	0,58	OK
2,38	1,00	OK	2,39	0,58	OK
2,36	1,00	OK	2,38	1,15	OK
Média	2,37 g/cm ³		Média	2,39 g/cm ³	
DP	0,01 g/cm ³		DP	0,01 g/cm ³	
CV	0,42 %		CV	0,24 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela F2 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C2-R

C2 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,34	0,58	OK	2,36	0,58	OK
2,36	1,15	OK	2,36	0,58	OK
2,34	0,58	OK	2,35	1,15	OK
Média	2,35 g/cm ³		Média	2,36 g/cm ³	
DP	0,01 g/cm ³		DP	0,01 g/cm ³	
CV	0,49 %		CV	0,24 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela F3 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C3-R

C3 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,38	0,87	OK	2,37	0,76	OK
2,35	1,09	OK	2,38	0,38	OK
2,37	0,22	OK	2,42	1,13	OK
Média	2,37 g/cm ³		Média	2,39 g/cm ³	
DP	0,02 g/cm ³		DP	0,03 g/cm ³	
CV	0,65 %		CV	1,11 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela F4 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C4-R

C4 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,37	1,09	OK	2,37	0,00	OK
2,34	0,87	OK	2,37	0,00	OK
2,35	0,22	OK	2,37	0,00	OK
Média	2,35 g/cm ³		Média	2,37 g/cm ³	
DP	0,02 g/cm ³		DP	0,00 g/cm ³	
CV	0,65 %		CV	0,00 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela F5 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C5-R

C5 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,37	1,15	OK	2,39	0,22	OK
2,38	0,58	OK	2,38	0,87	OK
2,38	0,58	OK	2,41	1,09	OK
Média	2,38 g/cm ³		Média	2,39 g/cm ³	
DP	0,01 g/cm ³		DP	0,02 g/cm ³	
CV	0,24 %		CV	0,64 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela F6 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C6-R

C6 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,32	0,87	OK	2,32	1,15	OK
2,29	1,09	OK	2,31	0,58	OK
2,31	0,22	OK	2,31	0,58	OK
Média	2,31 g/cm ³		Média	2,31 g/cm ³	
DP	0,02 g/cm ³		DP	0,01 g/cm ³	
CV	0,66 %		CV	0,25 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela F7 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C7-R

C7 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,36	1,15	OK	2,39	0,58	OK
2,37	0,58	OK	2,37	1,15	OK
2,37	0,58	OK	2,39	0,58	OK
Média	2,37 g/cm ³		Média	2,38 g/cm ³	
DP	0,01 g/cm ³		DP	0,01 g/cm ³	
CV	0,24 %		CV	0,48 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela F8 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C8-R

C8 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,41	0,58	OK	2,43	0,58	OK
2,41	0,58	OK	2,43	0,58	OK
2,38	1,15	OK	2,41	1,15	OK
Média	2,40 g/cm ³		Média	2,42 g/cm ³	
DP	0,02 g/cm ³		DP	0,01 g/cm ³	
CV	0,72 %		CV	0,48 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela F9 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C9-R

C9 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,36	0,58	OK	2,38	0,22	OK
2,36	0,58	OK	2,39	0,87	OK
2,37	1,15	OK	2,36	1,09	OK
Média	2,36 g/cm ³		Média	2,38 g/cm ³	
DP	0,01 g/cm ³		DP	0,02 g/cm ³	
CV	0,24 %		CV	0,64 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela F10 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C10-R

C10 - REFERÊNCIA					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,37	1,15	OK	2,37	1,15	OK
2,38	0,58	OK	2,38	0,58	OK
2,38	0,58	OK	2,38	0,58	OK
Média	2,38 g/cm ³		Média	2,38 g/cm ³	
DP	0,01 g/cm ³		DP	0,01 g/cm ³	
CV	0,24 %		CV	0,24 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela F11 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C1-O

C1 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,40	0,82	OK	2,37	1,15	OK
2,40	0,30	OK	2,40	0,58	OK
2,39	1,12	OK	2,40	0,57	OK
Média	2,40 g/cm ³		Média	2,39 g/cm ³	
DP	0,00 g/cm ³		DP	0,01 g/cm ³	
CV	0,20 %		CV	0,60 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela F12 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C2-O

C2 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,35	0,37	OK	2,35	0,91	OK
2,34	1,13	OK	2,33	1,07	OK
2,35	0,76	OK	2,34	0,16	OK
Média	2,35 g/cm ³		Média	2,34 g/cm ³	
DP	0,00 g/cm ³		DP	0,01 g/cm ³	
CV	0,13 %		CV	0,43 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela F13 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C3-O

C3 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,39	1,14	OK	2,39	1,10	OK
2,41	0,71	OK	2,38	0,85	OK
2,41	0,43	OK	2,38	0,25	OK
Média	2,40 g/cm ³		Média	2,39 g/cm ³	
DP	0,01 g/cm ³		DP	0,01 g/cm ³	
CV	0,38 %		CV	0,34 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela F14 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C4-O

C4 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,37	1,06	OK	2,40	0,71	OK
2,41	0,93	OK	2,41	0,71	OK
2,39	0,13	OK	-	-	-
Média	2,39 g/cm ³		Média	2,41 g/cm ³	
DP	0,02 g/cm ³		DP	0,01 g/cm ³	
CV	0,79 %		CV	0,32 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela F15 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C5-O

C5 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,39	0,91	OK	2,38	1,12	OK
2,40	0,16	OK	2,40	0,31	OK
2,41	1,07	OK	2,41	0,81	OK
Média	2,40 g/cm ³		Média	2,40 g/cm ³	
DP	0,01 g/cm ³		DP	0,02 g/cm ³	
CV	0,31 %		CV	0,63 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela F16 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C6-O

C6 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,37	0,67	OK	2,37	0,71	OK
2,37	1,15	OK	2,38	1,14	OK
2,37	0,48	OK	2,38	0,43	OK
Média	2,37 g/cm ³		Média	2,38 g/cm ³	
DP	0,00 g/cm ³		DP	0,01 g/cm ³	
CV	0,07 %		CV	0,25 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela F17 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C7-O

C7 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,35	1,05	OK	2,35	0,51	OK
2,34	0,94	OK	2,36	0,65	OK
2,35	0,12	OK	2,24	1,15	OK
Média	2,35 g/cm ³		Média	2,31 g/cm ³	
DP	0,01 g/cm ³		DP	0,07 g/cm ³	
CV	0,26 %		CV	2,81 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela F18 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C8-O

C8 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,35	0,84	OK	2,32	0,02	OK
2,35	0,27	OK	2,36	1,01	OK
2,37	1,11	OK	2,28	0,99	OK
Média	2,36 g/cm ³		Média	2,32 g/cm ³	
DP	0,01 g/cm ³		DP	0,04 g/cm ³	
CV	0,35 %		CV	1,67 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela F19 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C9-O

C9 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,35	1,14	OK	2,37	1,11	OK
2,37	0,74	OK	2,36	0,28	OK
2,37	0,39	OK	2,36	0,83	OK
Média	2,36 g/cm ³		Média	2,36 g/cm ³	
DP	0,01 g/cm ³		DP	0,01 g/cm ³	
CV	0,52 %		CV	0,22 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Tabela F20 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para massa específica da amostra seca do C10-O

C10 - OTIMIZADO					
28 DIAS			91 DIAS		
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
2,36	1,15	OK	2,33	0,65	OK
2,35	0,50	OK	2,34	1,15	OK
2,34	0,65	OK	2,33	0,50	OK
Média	2,35 g/cm ³		Média	2,33 g/cm ³	
DP	0,01 g/cm ³		DP	0,01 g/cm ³	
CV	0,36 %		CV	0,38 %	
DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação					

Fonte: Autora (2022)

Nas Tabelas F21 a F24 são apresentados os detalhes do teste de *Tukey* para o ensaio de massa específica da amostra seca realizado aos 28 dias. Da mesma forma, as Tabelas F25 a F28 apresentam os resultados do teste de *Tukey* para o ensaio de massa específica da amostra seca realizado aos 91 dias.

Esclarece-se que para a análise do teste de *Tukey* foi utilizado o *software* PAST 4.03, sendo adotado um nível de significância $\alpha=0,05$. Nas Tabelas, abaixo da diagonal principal estão os valores Q de *Tukey* e acima da diagonal principal constam os valores P. Além disso, os pares que apresentaram diferença significativa estão destacados em rosa.

Tabela F21 - Resultados do teste de *Tukey* para massa específica da amostra seca aos 28 dias dos concretos de referência com aglomerante ternário

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTE TERNÁRIO						
	C1-R	C2-R	C3-R	C4-R	C5-R	C6-R
C1-R	-	0,284000	0,999400	0,608700	0,985000	0,000578
C2-R	3,184000	-	0,430800	0,985000	0,107400	0,021490
C3-R	0,454900	2,729000	-	0,786800	0,920600	0,000937
C4-R	2,274000	0,909700	1,819000	-	0,284000	0,007302
C5-R	0,909700	4,094000	1,365000	3,184000	-	0,000228
C6-R	8,642000	5,458000	8,187000	6,368000	9,552000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela F22 - Resultados do teste de *Tukey* para massa específica da amostra seca aos 28 dias dos concretos de referência com aglomerante quaternário

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTE QUATERNÁRIO				
	C7-R	C8-R	C9-R	C10-R
C7-R	-	0,014920	0,975500	0,629800
C8-R	5,774000	-	0,008746	0,081320
C9-R	0,577400	6,351000	-	0,414100
C10-R	1,732000	4,041000	2,309000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela F23 - Resultados do teste de *Tukey* para massa específica da amostra seca aos 28 dias dos concretos otimizados com aglomerante ternário

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTE TERNÁRIO						
	C1-O	C2-O	C3-O	C4-O	C5-O	C6-O
C1-O	-	0,001126	0,970000	0,970000	0,998700	0,087120
C2-O	8,018000	-	0,000364	0,003721	0,000635	0,159000
C3-O	1,069000	9,087000	-	0,664000	0,998700	0,024600
C4-O	1,069000	6,949000	2,138000	-	0,858300	0,277700
C5-O	0,534500	8,552000	0,534500	1,604000	-	0,046540
C6-O	4,276000	3,742000	5,345000	3,207000	4,811000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela F24 - Resultados do teste de *Tukey* para massa específica da amostra seca aos 28 dias dos concretos otimizados com aglomerante quaternário

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS				
CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTE QUATERNÁRIO				
	C7-O	C8-O	C9-O	C10-O
C7-O	-	0,629800	0,250300	0,975500
C8-O	1,732000	-	0,845200	0,845200
C9-O	2,887000	1,155000	-	0,414100
C10-O	0,577400	1,155000	2,309000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela F25 - Resultados do teste de *Tukey* para massa específica da amostra seca aos 91 dias dos concretos de referência com aglomerante ternário

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS						
CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTE TERNÁRIO						
	C1-R	C2-R	C3-R	C4-R	C5-R	C6-R
C1-R	-	0,125000	0,999500	0,639100	0,987100	0,000201
C2-R	3,959000	-	0,075520	0,807800	0,044990	0,015740
C3-R	0,439900	4,399000	-	0,464000	0,999500	0,000131
C4-R	2,200000	1,760000	2,640000	-	0,314200	0,002040
C5-R	0,879900	4,839000	0,439900	3,080000	-	0,000086
C6-R	9,679000	5,719000	10,120000	7,479000	10,560000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela F26 - Resultados do teste de *Tukey* para massa específica da amostra seca aos 91 dias dos concretos de referência com aglomerante quaternário

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS				
CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTE QUATERNÁRIO				
	C7-R	C8-R	C9-R	C10-R
C7-R	-	0,012070	0,891500	0,891500
C8-R	6,000000	-	0,004917	0,004917
C9-R	1,000000	7,000000	-	1,000000
C10-R	1,000000	7,000000	0,000000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela F27 - Resultados do teste de *Tukey* para massa específica da amostra seca aos 91 dias dos concretos otimizados com aglomerante ternário

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS						
CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTE TERNÁRIO						
	C1-O	C2-O	C3-O	C4-O	C5-O	C6-O
C1-O	-	0,002462	0,976500	0,709700	0,976500	0,714600
C2-O	7,543000	-	0,007252	0,000713	0,000886	0,022360
C3-O	1,006000	6,537000	-	0,367700	0,714600	0,976500
C4-O	2,024000	8,771000	2,924000	-	0,962600	0,151300
C5-O	1,006000	8,549000	2,011000	1,124000	-	0,338000
C6-O	2,011000	5,532000	1,006000	3,823000	3,017000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela F28 - Resultados do teste de *Tukey* para massa específica da amostra seca aos 91 dias dos concretos otimizados com aglomerante quaternário

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS				
CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTE QUATERNÁRIO				
	C7-O	C8-O	C9-O	C10-O
C7-O	-	0,999600	0,499000	0,951200
C8-O	0,147800	-	0,555200	0,973800
C9-O	2,070000	1,922000	-	0,784800
C10-O	0,739200	0,591400	1,331000	-

Fonte: Autora (2022)

A Tabela F29 apresenta os resultados do teste t de *Student* para o ensaio de massa específica da amostra seca de cada traço de concreto nas idades de 28 e 91 dias.

Tabela F29 - Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na massa específica da amostra seca dos concretos

TESTE ESTATÍSTICO - MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SECA					
28 DIAS			91 DIAS		
Concreto	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva	Concreto	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva
C1-R e C1-O	0,012192	Sim	C1-R e C1-O	0,981969	Não
C2-R e C2-O	0,987295	Não	C2-R e C2-O	0,082968	Não
C3-R e C3-O	0,024578	Sim	C3-R e C3-O	0,803337	Não
C4-R e C4-O	0,062939	Não	C4-R e C4-O	0,003000	Sim
C5-R e C5-O	0,013060	Sim	C5-R e C5-O	0,846937	Não
C6-R e C6-O	0,001725	Sim	C6-R e C6-O	0,000178	Sim
C7-R e C7-O	0,013661	Sim	C7-R e C7-O	0,147606	Não
C8-R e C8-O	0,018051	Sim	C8-R e C8-O	0,011987	Sim
C9-R e C9-O	0,847593	Não	C9-R e C9-O	0,261672	Não
C10-R e C10-O	0,011174	Sim	C10-R e C10-O	0,001711	Sim

Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE G - TESTES ESTATÍSTICOS PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS

As Tabelas G1 a G20 contêm os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência à compressão dos concretos de referência e otimizados, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas de resistência à compressão, por idade de ensaio, para cada traço de concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso conforme o critério de *Chauvenet*.

Tabela G1 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C1-R

C1 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
31,15	0,57	OK	51,97	0,36	OK	61,59	0,57	OK
37,25	1,15	OK	57,91	1,13	OK	61,69	0,58	OK
31,07	0,59	OK	50,32	0,77	OK	50,18	1,15	OK
Média	33,16 MPa		Média	53,40 MPa		Média	57,82 MPa	
DP	3,55 MPa		DP	3,99 MPa		DP	6,62 MPa	
CV	10,69 %		CV	7,48 %		CV	11,44 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G2 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C2-R

C2 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
29,18	1,05	OK	44,80	1,14	OK	59,77	1,15	OK
31,47	0,12	OK	45,36	0,70	OK	67,21	0,52	OK
33,07	0,94	OK	45,28	0,44	OK	67,69	0,63	OK
Média	31,24 MPa		Média	45,15 MPa		Média	64,89 MPa	
DP	1,96 MPa		DP	0,30 MPa		DP	4,44 MPa	
CV	6,26 %		CV	0,67 %		CV	6,84 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G3 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C3-R

C3 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
28,55	0,72	OK	54,24	1,09	OK	56,68	1,14	OK
28,89	0,43	OK	53,62	0,21	OK	66,43	0,40	OK
30,74	1,14	OK	53,30	0,88	OK	68,56	0,74	OK
Média	29,39 MPa		Média	53,72 MPa		Média	63,89 MPa	
DP	1,18 MPa		DP	0,48 MPa		DP	6,33 MPa	
CV	4,01 %		CV	0,89 %		CV	9,91 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G4 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C4-R

C4 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
41,72	0,83	OK	61,66	0,79	OK	62,02	0,76	OK
32,92	1,11	OK	57,86	1,13	OK	70,14	1,13	OK
39,20	0,28	OK	60,77	0,34	OK	63,71	0,37	OK
Média	37,95 MPa		Média	60,10 MPa		Média	65,29 MPa	
DP	4,53 MPa		DP	1,99 MPa		DP	4,28 MPa	
CV	11,94 %		CV	3,31 %		CV	6,56 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G5 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C5-R

C5 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
32,41	1,12	OK	55,02	0,41	OK	57,13	1,15	OK
36,62	0,31	OK	50,27	1,14	OK	62,47	0,70	OK
38,08	0,81	OK	56,01	0,73	OK	61,75	0,45	OK
Média	35,70 MPa		Média	53,77 MPa		Média	60,45 MPa	
DP	2,94 MPa		DP	3,07 MPa		DP	2,90 MPa	
CV	8,25 %		CV	5,71 %		CV	4,79 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G6 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C6-R

C6 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
27,24	0,58	OK	36,23	1,13	OK	50,02	1,09	OK
26,02	1,15	OK	41,42	0,38	OK	51,79	0,88	OK
27,23	0,57	OK	42,68	0,75	OK	51,18	0,20	OK
Média	26,83 MPa		Média	40,11 MPa		Média	51,00 MPa	
DP	0,70 MPa		DP	3,42 MPa		DP	0,90 MPa	
CV	2,61 %		CV	8,52 %		CV	1,76 %	
σ - Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G7 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C7-R

C7 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
34,69	0,52	OK	52,12	0,78	OK	69,00	0,28	OK
37,00	1,15	OK	45,08	1,13	OK	70,70	0,83	OK
34,54	0,63	OK	50,52	0,35	OK	64,62	1,11	OK
Média	35,41 MPa		Média	49,24 MPa		Média	68,11 MPa	
DP	1,38 MPa		DP	3,69 MPa		DP	3,14 MPa	
CV	3,89 %		CV	7,49 %		CV	4,61 %	
σ - Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G8 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C8-R

C8 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
31,94	0,09	OK	51,89	1,15	OK	71,39	0,81	OK
34,15	0,95	OK	55,08	0,60	OK	75,24	1,12	OK
29,00	1,04	OK	54,99	0,55	OK	72,38	0,31	OK
Média	31,70 MPa		Média	53,99 MPa		Média	73,00 MPa	
DP	2,58 MPa		DP	1,82 MPa		DP	2,00 MPa	
CV	8,15 %		CV	3,36 %		CV	2,74 %	
σ - Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G9 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C9-R

C9 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
23,84	0,71	OK	49,51	1,15	OK	52,12	0,91	OK
20,13	1,14	OK	44,53	0,50	OK	58,16	1,07	OK
23,3	0,44	OK	44,08	0,65	OK	54,41	0,16	OK
Média	22,42 MPa		Média	46,04 MPa		Média	54,90 MPa	
DP	2,00 MPa		DP	3,01 MPa		DP	3,05 MPa	
CV	8,94 %		CV	6,55 %		CV	5,55 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G10 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C10-R

C10 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
20,11	0,76	OK	38,62	1,14	OK	65,89	1,06	OK
19,48	0,37	OK	49,18	0,73	OK	65,32	0,14	OK
17,07	1,13	OK	47,41	0,41	OK	64,95	0,92	OK
Média	18,89 MPa		Média	45,07 MPa		Média	65,39 MPa	
DP	1,60 MPa		DP	5,66 MPa		DP	0,47 MPa	
CV	8,50 %		CV	12,55 %		CV	0,72 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G11 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C1-O

C1 - OTIMIZADO								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
36,16	0,17	OK	45,17	0,61	OK	52,17	0,38	OK
32,92	1,07	OK	39,50	1,15	OK	53,32	0,75	OK
38,08	0,90	OK	44,94	0,54	OK	47,47	1,13	OK
Média	35,72 MPa		Média	43,20 MPa		Média	50,99 MPa	
DP	2,61 MPa		DP	3,21 MPa		DP	3,10 MPa	
CV	7,30 %		CV	7,43 %		CV	6,08 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela G12 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C2-O

C2 - OTIMIZADO								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
28,16	1,14	OK	53,52	0,80	OK	67,72	1,11	OK
33,86	0,41	OK	55,51	0,31	OK	61,7	0,29	OK
35,04	0,73	OK	61,33	1,12	OK	59,42	0,82	OK
Média	32,35 MPa		Média	56,79 MPa		Média	62,95 MPa	
DP	3,68 MPa		DP	4,06 MPa		DP	4,29 MPa	
CV	11,37 %		CV	7,15 %		CV	6,81 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela G13 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C3-O

C3 - OTIMIZADO								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
44,02	0,51	OK	64,37	0,01	OK	75,74	0,43	OK
38,88	1,15	OK	65,12	1,01	OK	70,87	1,14	OK
44,43	0,64	OK	63,65	0,99	OK	76,62	0,71	OK
Média	42,44 MPa		Média	64,38 MPa		Média	74,41 MPa	
DP	3,09 MPa		DP	0,74 MPa		DP	3,10 MPa	
CV	7,29 %		CV	1,14 %		CV	4,16 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela G14 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C4-O

C4 - OTIMIZADO								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
39,47	1,04	OK	50,46	0,98	OK	55,41	0,18	OK
37,19	0,96	OK	48,75	0,04	OK	54,76	0,90	OK
38,2	0,08	OK	46,81	1,02	OK	56,55	1,08	OK
Média	38,29 MPa		Média	48,67 MPa		Média	55,57 MPa	
DP	1,14 MPa		DP	1,83 MPa		DP	0,91 MPa	
CV	2,98 %		CV	3,75 %		CV	1,63 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela G15 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C5-O

C5 - OTIMIZADO								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
32,37	0,68	OK	44,99	0,36	OK	47,16	0,90	OK
35,3	1,15	OK	44,44	0,77	OK	53,02	1,08	OK
32,7	0,47	OK	46,94	1,13	OK	49,28	0,18	OK
Média	33,46 MPa		Média	45,46 MPa		Média	49,82 MPa	
DP	1,60 MPa		DP	1,31 MPa		DP	2,97 MPa	
CV	4,80 %		CV	2,89 %		CV	5,96 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela G16 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C6-O

C6 - OTIMIZADO								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
30,00	1,15	OK	44,44	0,41	OK	53,55	1,15	OK
29,22	0,46	OK	44,27	0,73	OK	55,09	0,62	OK
29,11	0,69	OK	45,29	1,14	OK	55,02	0,54	OK
Média	29,44 MPa		Média	44,67 MPa		Média	54,55 MPa	
DP	0,49 MPa		DP	0,55 MPa		DP	0,87 MPa	
CV	1,65 %		CV	1,22 %		CV	1,59 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela G17 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C7-O

C7 - OTIMIZADO								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
37,08	1,05	OK	51,79	0,19	OK	65,58	0,28	OK
34,67	0,10	OK	53,09	1,08	OK	67,15	0,83	OK
32,88	0,95	OK	51,07	0,89	OK	61,65	1,11	OK
Média	34,88 MPa		Média	51,98 MPa		Média	64,79 MPa	
DP	2,11 MPa		DP	1,02 MPa		DP	2,83 MPa	
CV	6,04 %		CV	1,97 %		CV	4,37 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela G18 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C8-O

C8 - OTIMIZADO								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
32,79	0,44	OK	50,52	0,27	OK	60,36	0,79	OK
33,38	0,70	OK	51,68	0,83	OK	68,47	1,13	OK
29,19	1,14	OK	47,65	1,11	OK	62,27	0,34	OK
Média	31,79 MPa		Média	49,95 MPa		Média	63,70 MPa	
DP	2,27 MPa		DP	2,07 MPa		DP	4,24 MPa	
CV	7,14 %		CV	4,15 %		CV	6,66 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela G19 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C9-O

C9 - OTIMIZADO								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
36,48	0,62	OK	44,79	0,21	OK	57,94	1,14	OK
31,14	1,15	OK	47,14	1,09	OK	55,13	0,73	OK
36,24	0,54	OK	43,57	0,88	OK	55,61	0,41	OK
Média	34,62 MPa		Média	45,17 MPa		Média	56,23 MPa	
DP	3,02 MPa		DP	1,81 MPa		DP	1,50 MPa	
CV	8,71 %		CV	4,02 %		CV	2,67 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela G20 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para resistência à compressão do C10-O

C10 - OTIMIZADO								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	σ (MPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
33,55	0,52	OK	53,52	0,37	OK	66,70	0,61	OK
33,7	0,63	OK	54,41	1,13	OK	63,65	1,15	OK
31,37	1,15	OK	53,29	0,76	OK	66,57	0,54	OK
Média	32,87 MPa		Média	53,74 MPa		Média	65,64 MPa	
DP	1,30 MPa		DP	0,59 MPa		DP	1,72 MPa	
CV	3,97 %		CV	1,10 %		CV	2,63 %	
σ- Resistência à compressão; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Nas Tabelas G21 a G24 são apresentados os detalhes do teste de *Tukey* para o ensaio de resistência à compressão realizado aos 7 dias. Da mesma forma, as Tabelas G25 a G28 apresentam os resultados do teste de *Tukey* para o ensaio de resistência à compressão realizado aos 28 dias e as Tabelas G29 a G32 para o ensaio efetuado aos 91 dias.

Esclarece-se que para a análise do teste de *Tukey* foi utilizado o *software* PAST 4.03, sendo adotado um nível de significância $\alpha=0,05$. Nas Tabelas, abaixo da diagonal principal estão os valores Q de *Tukey* e acima da diagonal principal constam os valores P. Além disso, os pares que apresentaram diferença significativa estão destacados em rosa.

Tabela G21 - Resultados do teste de *Tukey* para a resistência à compressão aos 7 dias para os concretos de referência com aglomerantes ternários

TESTE ESTATÍSTICO - 7 DIAS - CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTES TERNÁRIOS						
	C1-R	C2-R	C3-R	C4-R	C5-R	C6-R
C1-R	-	0,955000	0,591300	0,354800	0,868700	0,134200
C2-R	1,180000	-	0,961300	0,103100	0,423900	0,435800
C3-R	2,317000	1,137000	-	0,027030	0,135800	0,865700
C4-R	2,949000	4,130000	5,267000	-	0,916900	0,004193
C5-R	1,568000	2,748000	3,885000	1,381000	-	0,021360
C6-R	3,896000	2,715000	1,578000	6,845000	5,464000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G22 - Resultados do teste de *Tukey* para a resistência à compressão aos 7 dias para os concretos de referência com aglomerantes quaternários

TESTE ESTATÍSTICO - 7 DIAS - CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTES QUATERNÁRIOS				
	C7-R	C8-R	C9-R	C10-R
C7-R	-	0,168700	0,000174	0,000030
C8-R	3,303000	-	0,001751	0,000191
C9-R	11,550000	8,248000	-	0,196200
C10-R	14,700000	11,390000	3,146000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G23 - Resultados do teste de *Tukey* para a resistência à compressão aos 7 dias para os concretos otimizados com aglomerantes ternários

TESTE ESTATÍSTICO - 7 DIAS - CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTES TERNÁRIOS						
	C1-O	C2-O	C3-O	C4-O	C5-O	C6-O
C1-O	-	0,538200	0,042330	0,769500	0,845100	0,062170
C2-O	2,449000	-	0,002386	0,083200	0,991400	0,672600
C3-O	4,891000	7,339000	-	0,331300	0,005993	0,000251
C4-O	1,867000	4,316000	3,024000	-	0,203200	0,006769
C5-O	1,646000	0,802600	6,537000	3,513000	-	0,364700
C6-O	4,566000	2,117000	9,456000	6,433000	2,919000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela G24 - Resultados do teste de *Tukey* para a resistência à compressão aos 7 dias para os concretos otimizados com aglomerantes quaternários

TESTE ESTATÍSTICO - 7 DIAS - CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTES QUATERNÁRIOS				
	C7-O	C8-O	C9-O	C10-O
C7-O	-	0,393800	0,999000	0,706700
C8-O	2,371000	-	0,461100	0,932500
C9-O	0,196900	2,174000	-	0,781300
C10-O	1,537000	0,833800	1,340000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela G25 - Resultados do teste de *Tukey* para a resistência à compressão aos 28 dias para os concretos de referência com aglomerantes ternários

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS - CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTES TERNÁRIOS						
	C1-R	C2-R	C3-R	C4-R	C5-R	C6-R
C1-R	-	0,021760	1,000000	0,073680	1,000000	0,000504
C2-R	5,448000	-	0,016910	0,000167	0,016300	0,246900
C3-R	0,211200	5,659000	-	0,094090	1,000000	0,000405
C4-R	4,421000	9,869000	4,209000	-	0,097480	0,000009
C5-R	0,242000	5,690000	0,030810	4,178000	-	0,000392
C6-R	8,773000	3,325000	8,984000	13,190000	9,015000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G26 - Resultados do teste de *Tukey* para a resistência à compressão aos 28 dias para os concretos de referência com aglomerantes quaternários

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS - CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTES QUATERNÁRIOS				
	C7-R	C8-R	C9-R	C10-R
C7-R	-	0,466300	0,738100	0,564800
C8-R	2,159000	-	0,124300	0,080120
C9-R	1,456000	3,615000	-	0,988700
C10-R	1,897000	4,056000	0,441300	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G27 - Resultados do teste de *Tukey* para a resistência à compressão aos 28 dias para os concretos otimizados com aglomerantes ternários

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS - CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTES TERNÁRIOS						
	C1-O	C2-O	C3-O	C4-O	C5-O	C6-O
C1-O	-	0,000136	0,000001	0,111600	0,836800	0,968000
C2-O	10,080000	-	0,017380	0,010980	0,000738	0,000400
C3-O	15,720000	5,636000	-	0,000032	0,000005	0,000003
C4-O	4,060000	6,022000	11,660000	-	0,562800	0,346900
C5-O	1,673000	8,410000	14,050000	2,388000	-	0,998000
C6-O	1,086000	8,996000	14,630000	2,974000	0,586400	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela G28 - Resultados do teste de *Tukey* para a resistência à compressão aos 28 dias para os concretos otimizados com aglomerantes quaternários

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS - CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTES QUATERNÁRIOS				
	C7-O	C8-O	C9-O	C10-O
C7-O	-	0,401100	0,002363	0,514300
C8-O	2,349000	-	0,018880	0,058130
C9-O	7,874000	5,525000	-	0,000513
C10-O	2,029000	4,378000	9,903000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela G29 - Resultados do teste de *Tukey* para a resistência à compressão aos 91 dias para os concretos de referência com aglomerantes ternários

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS - CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTES TERNÁRIOS						
	C1-R	C2-R	C3-R	C4-R	C5-R	C6-R
C1-R	-	0,471900	0,619200	0,417100	0,979800	0,507200
C2-R	2,619000	-	0,999800	1,000000	0,845600	0,031200
C3-R	2,248000	0,370400	-	0,998900	0,938900	0,048500
C4-R	2,767000	0,148200	0,518600	-	0,796200	0,026140
C5-R	0,974200	1,645000	1,274000	1,793000	-	0,205700
C6-R	2,528000	5,146000	4,776000	5,295000	3,502000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G30 - Resultados do teste de *Tukey* para a resistência à compressão aos 91 dias para os concretos de referência com aglomerantes quaternários

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS - CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTES QUATERNÁRIOS				
	C7-R	C8-R	C9-R	C10-R
C7-R	-	0,137900	0,000698	0,544500
C8-R	3,510000	-	0,000075	0,020110
C9-R	9,468000	12,980000	-	0,003164
C10-R	1,950000	5,459000	7,519000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela G31 - Resultados do teste de *Tukey* para a resistência à compressão aos 91 dias para os concretos otimizados com aglomerantes ternários

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS - CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTES TERNÁRIOS						
	C1-O	C2-O	C3-O	C4-O	C5-O	C6-O
C1-O	-	0,002421	0,000004	0,402000	0,995000	0,645100
C2-O	7,326000	-	0,003421	0,065840	0,001098	0,031380
C3-O	14,350000	7,022000	-	0,000035	0,000002	0,000021
C4-O	2,810000	4,517000	11,540000	-	0,200800	0,997300
C5-O	0,714700	8,041000	15,060000	3,524000	-	0,371200
C6-O	2,185000	5,142000	12,160000	0,624800	2,900000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela G32 - Resultados do teste de *Tukey* para a resistência à compressão aos 91 dias para os concretos otimizados com aglomerantes quaternários

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS - CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTES QUATERNÁRIOS				
	C7-O	C8-O	C9-O	C10-O
C7-O	-	0,961600	0,023220	0,981300
C8-O	0,677700	-	0,045130	0,829500
C9-O	5,310000	4,632000	-	0,014090
C10-O	0,524800	1,202000	5,834000	-

Fonte: Autora (2022)

A Tabela G33 apresenta os resultados do teste t de *Student* para o ensaio de resistência à compressão de cada traço de concreto nas idades de 7, 28 e 91 dias.

Tabela G33 - Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na resistência à compressão dos concretos

TESTE ESTATÍSTICO - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO								
Concreto	7 DIAS		Concreto	28 DIAS		Concreto	91 DIAS	
	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva		P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva		P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva
C1-R e C1-O	0,370141	Não	C1-R e C1-O	0,026100	Sim	C1-R e C1-O	0,180574	Não
C2-R e C2-O	0,667542	Não	C2-R e C2-O	0,007740	Sim	C2-R e C2-O	0,614550	Não
C3-R e C3-O	0,002404	Sim	C3-R e C3-O	0,000030	Sim	C3-R e C3-O	0,061053	Não
C4-R e C4-O	0,905809	Não	C4-R e C4-O	0,001843	Sim	C4-R e C4-O	0,018410	Sim
C5-R e C5-O	0,310376	Não	C5-R e C5-O	0,012524	Sim	C5-R e C5-O	0,011339	Sim
C6-R e C6-O	0,006059	Sim	C6-R e C6-O	0,084821	Não	C6-R e C6-O	0,007902	Sim
C7-R e C7-O	0,732373	Não	C7-R e C7-O	0,282517	Não	C7-R e C7-O	0,246103	Não
C8-R e C8-O	0,966007	Não	C8-R e C8-O	0,064276	Não	C8-R e C8-O	0,026353	Sim
C9-R e C9-O	0,004304	Sim	C9-R e C9-O	0,689336	Não	C9-R e C9-O	0,535184	Não
C10-R e C10-O	0,000303	Sim	C10-R e C10-O	0,057529	Não	C10-R e C10-O	0,818263	Não

Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE H - TESTES ESTATÍSTICOS PARA MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO LONGITUDINAL DOS CONCRETOS

As Tabelas H1 a H20 contêm os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal (E_L) dos concretos de referência e otimizados, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas de módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, por idade de ensaio, para cada traço de concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso conforme o critério de *Chauvenet*.

Tabela H1 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C1-R

C1 - REFERÊNCIA								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
27,08	0,32	OK	46,22	0,30	OK	55,65	0,99	OK
31,34	1,12	OK	46,49	0,82	OK	49,47	1,01	OK
25,64	0,80	OK	45,49	1,12	OK	52,62	0,01	OK
Média	28,02 GPa		Média	46,07 GPa		Média	52,58 GPa	
DP	2,96 GPa		DP	0,52 GPa		DP	3,09 GPa	
CV	10,57%		CV	1,13%		CV	5,88%	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
57,23	1,10	OK	58,04	1,15	OK	57,68	1,14	OK
53,34	0,24	OK	53,72	0,67	OK	54,42	0,73	OK
51,56	0,86	OK	54,17	0,48	OK	54,97	0,41	OK
Média	54,04 GPa		Média	55,31 GPa		Média	55,69 GPa	
DP	2,90 GPa		DP	2,37 GPa		DP	1,74 GPa	
CV	5,36%		CV	4,29%		CV	3,13%	

E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H2 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C2-R

C2 - REFERÊNCIA								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
30,34	0,49	OK	46,25	0,95	OK	53,16	0,73	OK
34,50	1,15	OK	45,36	0,09	OK	50,21	1,14	OK
29,91	0,66	OK	44,22	1,04	OK	52,66	0,41	OK
Média	31,58 GPa		Média	45,28 GPa		Média	52,01 GPa	
DP	2,54 GPa		DP	1,02 GPa		DP	1,58 GPa	
CV	8,03 %		CV	2,25 %		CV	3,04 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
55,10	0,51	OK	55,22	1,05	OK	55,72	0,58	OK
58,19	1,15	OK	57,23	0,11	OK	59,11	1,15	OK
54,85	0,64	OK	58,64	0,94	OK	55,72	0,58	OK
Média	56,04 GPa		Média	57,03 GPa		Média	56,85 GPa	
DP	1,86 GPa		DP	1,72 GPa		DP	1,95 GPa	
CV	3,32 %		CV	3,01 %		CV	3,44 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H3 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C3-R

C3 - REFERÊNCIA								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
43,10	0,13	OK	44,27	1,13	OK	50,42	0,70	OK
44,43	1,06	OK	43,47	0,36	OK	50,27	0,44	OK
42,20	0,93	OK	43,25	0,77	OK	49,36	1,14	OK
Média	43,24 GPa		Média	43,66 GPa		Média	50,02 GPa	
DP	1,12 GPa		DP	0,53 GPa		DP	0,58 GPa	
CV	2,60 %		CV	1,22 %		CV	1,15 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
52,45	1,10	OK	53,19	1,07	OK	53,11	0,86	OK
51,97	0,86	OK	52,20	0,15	OK	53,06	1,10	OK
52,12	0,24	OK	51,57	0,92	OK	53,10	0,23	OK
Média	52,18 GPa		Média	52,32 GPa		Média	53,09 GPa	
DP	0,25 GPa		DP	0,82 GPa		DP	0,03 GPa	
CV	0,47 %		CV	1,57 %		CV	0,05 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H4 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C4-R

C4 - REFERÊNCIA								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
29,12	1,15	OK	48,59	1,14	OK	56,12	0,99	OK
62,22	0,69	OK	43,64	0,72	OK	53,09	0,01	OK
57,99	0,46	OK	44,45	0,42	OK	49,96	1,01	OK
Média	49,78 GPa		Média	45,56 GPa		Média	53,05 GPa	
DP	18,01 GPa		DP	2,66 GPa		DP	3,08 GPa	
CV	36,19 %		CV	5,83 %		CV	5,81 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
57,01	1,14	OK	57,86	1,14	OK	58,10	0,88	OK
55,64	0,72	OK	56,65	0,44	OK	56,29	1,09	OK
55,86	0,42	OK	56,45	0,70	OK	57,48	0,21	OK
Média	56,17 GPa		Média	56,99 GPa		Média	57,29 GPa	
DP	0,73 GPa		DP	0,76 GPa		DP	0,92 GPa	
CV	1,31 %		CV	1,34 %		CV	1,60 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H5 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C5-R

C5 - REFERÊNCIA								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
63,98	0,80	OK	52,21	1,15	OK	51,93	1,09	OK
53,62	0,32	OK	45,98	0,59	OK	50,82	0,21	OK
22,99	1,12	OK	46,06	0,57	OK	50,26	0,88	OK
Média	46,86 GPa		Média	48,08 GPa		Média	51,00 GPa	
DP	21,31 GPa		DP	3,58 GPa		DP	0,85 GPa	
CV	45,48 %		CV	7,44 %		CV	1,67 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
53,39	0,58	OK	53,06	0,10	OK	54,30	1,05	OK
52,95	1,15	OK	52,96	0,95	OK	54,18	0,12	OK
53,39	0,57	OK	53,19	1,05	OK	54,10	0,94	OK
Média	53,24 GPa		Média	53,07 GPa		Média	54,19 GPa	
DP	0,26 GPa		DP	0,12 GPa		DP	0,10 GPa	
CV	0,48 %		CV	0,22 %		CV	0,18 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H6 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C6-R

C6 - REFERÊNCIA								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
40,47	0,63	OK	49,34	1,10	OK	45,96	0,15	OK
46,52	1,15	OK	41,96	0,25	OK	46,60	0,91	OK
40,80	0,53	OK	38,73	0,85	OK	44,94	1,07	OK
Média	42,60 GPa		Média	43,34 GPa		Média	45,83 GPa	
DP	3,40 GPa		DP	5,43 GPa		DP	0,83 GPa	
CV	7,99 %		CV	12,54 %		CV	1,82 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
48,98	0,29	OK	49,87	0,42	OK	49,80	0,44	OK
49,62	0,82	OK	50,23	0,72	OK	51,32	1,15	OK
47,29	1,11	OK	48,08	1,14	OK	49,55	0,70	OK
Média	48,63 GPa		Média	49,39 GPa		Média	50,22 GPa	
DP	1,20 GPa		DP	1,15 GPa		DP	0,96 GPa	
CV	2,47 %		CV	2,33 %		CV	1,90 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H7 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C7-R

C7 - REFERÊNCIA								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
22,13	0,98	OK	45,77	0,27	OK	49,75	0,79	OK
34,23	0,05	OK	43,57	1,11	OK	50,13	0,33	OK
48,18	1,02	OK	46,67	0,83	OK	51,32	1,12	OK
Média	34,84 GPa		Média	45,33 GPa		Média	50,40 GPa	
DP	13,03 GPa		DP	1,60 GPa		DP	0,82 GPa	
CV	37,41 %		CV	3,52 %		CV	1,63 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
53,80	0,60	OK	53,82	1,11	OK	53,40	0,79	OK
52,58	1,15	OK	53,12	0,83	OK	53,75	0,33	OK
53,77	0,56	OK	53,31	0,29	OK	54,87	1,12	OK
Média	53,38 GPa		Média	53,41 GPa		Média	54,01 GPa	
DP	0,69 GPa		DP	0,36 GPa		DP	0,77 GPa	
CV	1,29 %		CV	0,68 %		CV	1,42 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H8 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C8-R

C8 - REFERÊNCIA								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
27,38	1,15	OK	46,99	1,10	OK	51,20	0,98	OK
48,03	0,55	OK	45,49	0,24	OK	50,33	1,02	OK
48,66	0,60	OK	44,80	0,86	OK	50,79	0,04	OK
Média	41,36 GPa		Média	45,76 GPa		Média	50,77 GPa	
DP	12,11 GPa		DP	1,12 GPa		DP	0,43 GPa	
CV	29,28 %		CV	2,44 %		CV	0,85 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
54,48	1,14	OK	55,18	1,15	OK	55,65	1,05	OK
52,75	0,73	OK	53,27	0,66	OK	53,28	0,95	OK
53,05	0,41	OK	53,46	0,49	OK	54,30	0,10	OK
Média	53,43 GPa		Média	53,97 GPa		Média	54,41 GPa	
DP	0,93 GPa		DP	1,05 GPa		DP	1,19 GPa	
CV	1,73 %		CV	1,95 %		CV	2,19 %	

E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H9 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C9-R

C9 - REFERÊNCIA								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
47,18	1,14	OK	41,85	0,30	OK	46,22	0,31	OK
28,43	0,42	OK	38,69	1,12	OK	44,18	1,12	OK
24,71	0,72	OK	42,97	0,81	OK	46,91	0,81	OK
Média	33,44 GPa		Média	41,17 GPa		Média	45,77 GPa	
DP	12,04 GPa		DP	2,22 GPa		DP	1,42 GPa	
CV	36,02 %		CV	5,39 %		CV	3,10 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
47,88	1,01	OK	49,37	1,02	OK	50,52	0,33	OK
46,20	0,02	OK	46,99	0,98	OK	48,09	1,12	OK
44,60	0,99	OK	48,12	0,03	OK	51,29	0,79	OK
Média	46,22 GPa		Média	48,16 GPa		Média	49,97 GPa	
DP	1,64 GPa		DP	1,19 GPa		DP	1,67 GPa	
CV	3,55 %		CV	2,47 %		CV	3,34 %	

E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H10 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C10-R

C10 - REFERÊNCIA								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
25,85	0,73	OK	40,16	0,08	OK	50,46	0,78	OK
38,13	1,14	OK	37,52	1,04	OK	47,73	1,13	OK
28,01	0,40	OK	42,21	0,96	OK	49,84	0,35	OK
Média	30,66 GPa		Média	39,96 GPa		Média	49,34 GPa	
DP	6,56 GPa		DP	2,35 GPa		DP	1,43 GPa	
CV	21,38 %		CV	5,88 %		CV	2,91 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
50,29	0,93	OK	50,89	0,17	OK	51,05	1,15	OK
49,71	0,13	OK	50,15	0,90	OK	51,45	0,53	OK
48,85	1,06	OK	52,16	1,08	OK	51,47	0,62	OK
Média	49,61 GPa		Média	51,06 GPa		Média	51,32 GPa	
DP	0,73 GPa		DP	1,02 GPa		DP	0,24 GPa	
CV	1,47 %		CV	1,99 %		CV	0,46 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H11 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C1-O

C1 - OTIMIZADO								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
35,15	0,43	OK	47,09	0,69	OK	50,48	0,02	OK
35,38	0,72	OK	46,90	0,46	OK	51,21	0,99	OK
33,90	1,14	OK	45,53	1,15	OK	49,71	1,01	OK
Média	34,81 GPa		Média	46,51 GPa		Média	50,47 GPa	
DP	0,80 GPa		DP	0,85 GPa		DP	0,75 GPa	
CV	2,30 %		CV	1,84 %		CV	1,48 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
49,49	1,05	OK	53,05	0,56	OK	53,46	0,31	OK
52,62	0,94	OK	53,09	0,60	OK	54,09	0,81	OK
51,32	0,11	OK	51,30	1,15	OK	51,63	1,12	OK
Média	51,14 GPa		Média	52,48 GPa		Média	53,06 GPa	
DP	1,57 GPa		DP	1,02 GPa		DP	1,28 GPa	
CV	3,07 %		CV	1,95 %		CV	2,41 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela H12 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C2-O

C2 - OTIMIZADO								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
29,42	1,00	OK	47,26	1,14	OK	51,76	0,17	OK
28,60	1,00	OK	46,15	0,43	OK	52,06	1,07	OK
29,02	0,01	OK	45,96	0,71	OK	51,58	0,90	OK
Média	29,01 GPa		Média	46,46 GPa		Média	51,80 GPa	
DP	0,41 GPa		DP	0,70 GPa		DP	0,24 GPa	
CV	1,41 %		CV	1,51 %		CV	0,46 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
53,08	1,11	OK	54,09	0,88	OK	53,91	1,15	OK
52,43	0,27	OK	52,75	0,21	OK	52,99	0,65	OK
52,17	0,84	OK	50,15	1,09	OK	53,07	0,50	OK
Média	52,56 GPa		Média	52,33 GPa		Média	53,32 GPa	
DP	0,47 GPa		DP	2,01 GPa		DP	0,51 GPa	
CV	0,90 %		CV	3,83 %		CV	0,95 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela H13 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C3-O

C3 - OTIMIZADO								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
34,87	0,48	OK	49,39	1,14	OK	52,83	0,62	OK
34,36	1,15	OK	48,79	0,71	OK	52,81	0,54	OK
34,93	0,67	OK	48,88	0,43	OK	52,32	1,15	OK
Média	34,72 GPa		Média	49,02 GPa		Média	52,65 GPa	
DP	0,31 GPa		DP	0,32 GPa		DP	0,29 GPa	
CV	0,90 %		CV	0,66 %		CV	0,56 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
54,39	1,11	OK	54,70	0,87	OK	55,47	0,45	OK
53,26	0,84	OK	54,30	0,22	OK	54,20	1,15	OK
53,60	0,26	OK	53,49	1,09	OK	55,66	0,70	OK
Média	53,75 GPa		Média	54,16 GPa		Média	55,11 GPa	
DP	0,58 GPa		DP	0,62 GPa		DP	0,79 GPa	
CV	1,07 %		CV	1,14 %		CV	1,44 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela H14 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C4-O

C4 - OTIMIZADO								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
30,04	0,87	OK	45,17	0,01	OK	49,04	0,24	OK
29,19	1,09	OK	44,04	1,00	OK	48,42	0,86	OK
29,76	0,23	OK	46,32	1,00	OK	50,41	1,10	OK
Média	29,66 GPa		Média	45,18 GPa		Média	49,29 GPa	
DP	0,43 GPa		DP	1,14 GPa		DP	1,02 GPa	
CV	1,46 %		CV	2,52 %		CV	2,06 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
50,92	1,01	OK	51,53	0,54	OK	50,49	0,01	OK
49,05	0,02	OK	49,34	1,15	OK	48,60	1,00	OK
47,28	0,99	OK	51,63	0,62	OK	52,34	1,00	OK
Média	49,08 GPa		Média	50,84 GPa		Média	50,48 GPa	
DP	1,82 GPa		DP	1,29 GPa		DP	1,87 GPa	
CV	3,71 %		CV	2,54 %		CV	3,71 %	

E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação

Fonte: Autora (2022)

Tabela H15 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C5-O

C5 - OTIMIZADO								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
27,11	0,10	OK	44,01	1,14	OK	49,22	1,07	OK
27,87	0,95	OK	45,38	0,72	OK	50,19	0,92	OK
26,10	1,04	OK	45,16	0,43	OK	49,82	0,15	OK
Média	27,03 GPa		Média	44,85 GPa		Média	49,74 GPa	
DP	0,89 GPa		DP	0,73 GPa		DP	0,49 GPa	
CV	3,29 %		CV	1,64 %		CV	0,98 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
49,90	1,13	OK	50,52	0,56	OK	48,40	0,81	OK
51,27	0,35	OK	50,51	0,60	OK	52,90	1,12	OK
51,67	0,78	OK	50,93	1,15	OK	49,58	0,31	OK
Média	50,95 GPa		Média	50,65 GPa		Média	50,29 GPa	
DP	0,93 GPa		DP	0,24 GPa		DP	2,33 GPa	
CV	1,82 %		CV	0,47 %		CV	4,64 %	

E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação

Fonte: Autora (2022)

Tabela H16 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C6-O

C6 - OTIMIZADO								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
22,82	0,68	OK	38,50	1,15	OK	48,72	0,74	OK
23,60	1,15	OK	44,41	0,67	OK	49,88	0,40	OK
22,91	0,47	OK	43,83	0,48	OK	55,21	1,14	OK
Média	23,11 GPa		Média	42,25 GPa		Média	51,27 GPa	
DP	0,42 GPa		DP	3,26 GPa		DP	3,46 GPa	
CV	1,84 %		CV	7,72 %		CV	6,75 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
50,55	1,15	OK	51,74	1,11	OK	51,03	1,05	OK
52,00	0,62	OK	51,17	0,29	OK	51,58	0,10	OK
51,93	0,54	OK	50,95	0,83	OK	51,98	0,95	OK
Média	51,49 GPa		Média	51,29 GPa		Média	51,53 GPa	
DP	0,82 GPa		DP	0,41 GPa		DP	0,48 GPa	
CV	1,59 %		CV	0,79 %		CV	0,93 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela H17 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C7-O

C7 - OTIMIZADO								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
26,95	0,62	OK	43,19	0,72	OK	43,11	1,11	OK
27,60	1,15	OK	42,88	0,42	OK	48,47	0,83	OK
26,98	0,53	OK	41,28	1,14	OK	46,98	0,29	OK
Média	27,18 GPa		Média	42,45 GPa		Média	46,19 GPa	
DP	0,37 GPa		DP	1,03 GPa		DP	2,77 GPa	
CV	1,36 %		CV	2,42 %		CV	5,99 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
44,59	1,08	OK	45,11	1,06	OK	45,14	1,07	OK
50,02	0,89	OK	50,55	0,92	OK	51,29	0,91	OK
48,08	0,19	OK	48,42	0,15	OK	48,96	0,16	OK
Média	47,56 GPa		Média	48,03 GPa		Média	48,46 GPa	
DP	2,75 GPa		DP	2,74 GPa		DP	3,11 GPa	
CV	5,79 %		CV	5,71 %		CV	6,41 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela H18 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C8-O

C8 - OTIMIZADO								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
27,32	1,12	OK	45,94	1,11	OK	52,12	0,90	OK
25,76	0,82	OK	41,78	0,84	OK	44,78	1,08	OK
26,18	0,30	OK	42,99	0,27	OK	49,45	0,18	OK
Média	26,42 GPa		Média	43,57 GPa		Média	48,78 GPa	
DP	0,81 GPa		DP	2,14 GPa		DP	3,71 GPa	
CV	3,05 %		CV	4,90 %		CV	7,61 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
53,92	0,93	OK	54,14	0,92	OK	54,72	0,70	OK
46,34	1,06	OK	46,48	1,07	OK	47,05	1,14	OK
50,85	0,12	OK	51,17	0,15	OK	53,64	0,44	OK
Média	50,37 GPa		Média	50,60 GPa		Média	51,80 GPa	
DP	3,81 GPa		DP	3,86 GPa		DP	4,15 GPa	
CV	7,57 %		CV	7,63 %		CV	8,02 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela H19 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C9-O

C9 - OTIMIZADO								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
20,54	0,65	OK	39,45	0,27	OK	44,31	1,15	OK
20,65	0,50	OK	38,78	1,11	OK	44,98	0,69	OK
21,76	1,15	OK	39,72	0,84	OK	44,89	0,46	OK
Média	20,98 GPa		Média	39,32 GPa		Média	44,72 GPa	
DP	0,68 GPa		DP	0,48 GPa		DP	0,36 GPa	
CV	3,23 %		CV	1,23 %		CV	0,82 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
46,96	0,76	OK	49,55	0,12	OK	48,98	0,67	OK
45,96	1,13	OK	49,01	0,94	OK	49,41	0,48	OK
46,76	0,37	OK	50,33	1,05	OK	53,17	1,15	OK
Média	46,56 GPa		Média	49,63 GPa		Média	50,52 GPa	
DP	0,53 GPa		DP	0,67 GPa		DP	2,30 GPa	
CV	1,14 %		CV	1,35 %		CV	4,56 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Tabela H20 - Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para E_L do C10-O

C10 - OTIMIZADO								
1 DIA			7 DIAS			28 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
19,16	0,06	OK	39,02	0,13	OK	43,73	0,15	OK
19,81	0,97	OK	39,56	0,93	OK	44,35	0,92	OK
18,37	1,03	OK	38,22	1,06	OK	42,76	1,06	OK
Média	19,11 GPa		Média	38,93 GPa		Média	43,61 GPa	
DP	0,72 GPa		DP	0,67 GPa		DP	0,80 GPa	
CV	3,77 %		CV	1,73 %		CV	1,84 %	
56 DIAS			70 DIAS			91 DIAS		
E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado	E_L (GPa)	Critério de <i>Chauvenet</i>	Resultado
46,97	0,65	OK	49,40	0,39	OK	51,22	0,63	OK
46,50	1,15	OK	50,55	1,14	OK	51,71	1,15	OK
46,93	0,50	OK	49,14	0,74	OK	51,25	0,52	OK
Média	46,80 GPa		Média	49,70 GPa		Média	51,39 GPa	
DP	0,26 GPa		DP	0,75 GPa		DP	0,27 GPa	
CV	0,55 %		CV	1,50 %		CV	0,53 %	
E_L – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação								

Fonte: Autora (2022)

Nas Tabelas H21 a H24 são apresentados os detalhes do teste de *Tukey* para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico longitudinal aos 7 dias. Da mesma forma, as Tabelas H25 a H28 apresentam os resultados do teste de *Tukey* para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico longitudinal realizado aos 28 dias e as Tabelas H29 a H32 para o ensaio efetuado aos 91 dias.

Esclarece-se que para a análise do teste de *Tukey* foi utilizado o *software* PAST 4.03, sendo adotado um nível de significância $\alpha=0,05$. Nas Tabelas, abaixo da diagonal principal estão os valores Q de *Tukey* e acima da diagonal principal constam os valores P. Além disso, os pares que apresentaram diferença significativa estão destacados em rosa.

Tabela H21 - Resultados do teste de *Tukey* para E_L aos 7 dias para os concretos de referência com aglomerantes ternários

TESTE ESTATÍSTICO - 7 DIAS - CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTES TERNÁRIOS						
	C1-R	C2-R	C3-R	C4-R	C5-R	C6-R
C1-R	-	0,999300	0,906000	0,999900	0,952200	0,853900
C2-R	0,469400	-	0,981200	1,000000	0,838400	0,959700
C3-R	1,428000	0,958500	-	0,962700	0,469200	1,000000
C4-R	0,301000	0,168300	1,127000	-	0,887900	0,930600
C5-R	1,198000	1,668000	2,626000	1,499000	-	0,399800
C6-R	1,618000	1,149000	0,190100	1,317000	2,816000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H22 - Resultados do teste de *Tukey* para E_L aos 7 dias para os concretos de referência com aglomerantes quaternários

TESTE ESTATÍSTICO - 7 DIAS - CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTES QUATERNÁRIOS				
	C7-R	C8-R	C9-R	C10-R
C7-R	-	0,992200	0,101100	0,033600
C8-R	0,388500	-	0,068590	0,023010
C9-R	3,823000	4,212000	-	0,860200
C10-R	4,931000	5,319000	1,107000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H23 - Resultados do teste de *Tukey* para E_L aos 7 dias para os concretos otimizados com aglomerantes ternários

TESTE ESTATÍSTICO - 7 DIAS - CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTES TERNÁRIOS						
	C1-O	C2-O	C3-O	C4-O	C5-O	C6-O
C1-O	-	1,000000	0,380200	0,882200	0,759600	0,043400
C2-O	0,057160	-	0,361100	0,897200	0,780600	0,046440
C3-O	2,873000	2,930000	-	0,076050	0,049030	0,001522
C4-O	1,520000	1,463000	4,393000	-	0,999800	0,240800
C5-O	1,894000	1,837000	4,767000	0,373400	-	0,346300
C6-O	4,870000	4,812000	7,743000	3,349000	2,976000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela H24 - Resultados do teste de *Tukey* para E_L aos 7 dias para os concretos otimizados com aglomerantes quaternários

TESTE ESTATÍSTICO - 7 DIAS - CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTES QUATERNÁRIOS				
	C7-O	C8-O	C9-O	C10-O
C7-O	-	0,704200	0,061680	0,036500
C8-O	1,544000	-	0,013730	0,008441
C9-O	4,318000	5,862000	-	0,981000
C10-O	4,846000	6,390000	0,528300	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela H25 - Resultados do teste de *Tukey* para E_L aos 28 dias para os concretos de referência com aglomerantes ternários

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS – CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTES TERNÁRIOS						
	C1-R	C2-R	C3-R	C4-R	C5-R	C6-R
C1-R	-	0,999100	0,617000	0,999600	0,915700	0,012220
C2-R	0,501200	-	0,810200	0,984300	0,986700	0,022200
C3-R	2,254000	1,753000	-	0,451500	0,987900	0,170400
C4-R	0,419100	0,920300	2,673000	-	0,791800	0,007446
C5-R	1,386000	0,885200	0,867600	1,805000	-	0,063620
C6-R	5,932000	5,431000	3,678000	6,351000	4,546000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H26 - Resultados do teste de *Tukey* para E_L aos 28 dias para os concretos de referência com aglomerantes quaternários

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS - CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTES QUATERNÁRIOS				
	C7-R	C8-R	C9-R	C10-R
C7-R	-	0,974800	0,004042	0,662400
C8-R	0,582800	-	0,002486	0,440400
C9-R	7,228000	7,811000	-	0,017940
C10-R	1,650000	2,232000	5,579000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H27 - Resultados do teste de *Tukey* para E_L aos 28 dias para os concretos otimizados com aglomerantes ternários

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS – CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTES TERNÁRIOS						
	C1-O	C2-O	C3-O	C4-O	C5-O	C6-O
C1-O	-	0,883900	0,524700	0,926700	0,990500	0,984900
C2-O	1,514000	-	0,980300	0,388000	0,583900	0,997700
C3-O	2,483000	0,969000	-	0,146100	0,252000	0,867900
C4-O	1,336000	2,850000	3,819000	-	0,998900	0,619300
C5-O	0,821300	2,335000	3,304000	0,514800	-	0,816700
C6-O	0,912200	0,601800	1,571000	2,248000	1,734000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela H28 - Resultados do teste de *Tukey* para E_L aos 28 dias para os concretos otimizados com aglomerantes quaternários

TESTE ESTATÍSTICO - 28 DIAS - CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTES QUATERNÁRIOS				
	C7-O	C8-O	C9-O	C10-O
C7-O	-	0,560700	0,870700	0,567300
C8-O	1,908000	-	0,229400	0,103600
C9-O	1,073000	2,980000	-	0,935800
C10-O	1,891000	3,798000	0,818000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela H29 - Resultados do teste de *Tukey* para E_L aos 91 dias para os concretos de referência com aglomerantes ternários

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS – CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTES TERNÁRIOS						
	C1-R	C2-R	C3-R	C4-R	C5-R	C6-R
C1-R	-	0,836600	0,157500	0,595100	0,655600	0,001301
C2-R	1,673000	-	0,022400	0,997100	0,144000	0,000226
C3-R	3,750000	5,424000	-	0,010520	0,861900	0,102400
C4-R	2,308000	0,634700	6,058000	-	0,069800	0,000122
C5-R	2,159000	3,832000	1,592000	4,467000	-	0,015600
C6-R	7,885000	9,559000	4,135000	10,190000	5,727000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H30 - Resultados do teste de *Tukey* para E_L aos 91 dias para os concretos de referência com aglomerantes quaternários

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS - CONCRETOS DE REFERÊNCIA COM AGLOMERANTES QUATERNÁRIOS				
	C7-R	C8-R	C9-R	C10-R
C7-R	-	0,968000	0,008708	0,067940
C8-R	0,634500	-	0,004960	0,036160
C9-R	6,356000	6,990000	-	0,475300
C10-R	4,221000	4,856000	2,134000	-

Fonte: Adaptado de Rossi [2023?]

Tabela H31 - Resultados do teste de *Tukey* para E_L aos 91 dias para os concretos otimizados com aglomerantes ternários

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS – CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTES TERNÁRIOS						
	C1-O	C2-O	C3-O	C4-O	C5-O	C6-O
C1-O	-	0,999900	0,500900	0,278100	0,221000	0,757800
C2-O	0,326700	-	0,632100	0,199200	0,156000	0,628700
C3-O	2,544000	2,217000	-	0,015190	0,011590	0,071850
C4-O	3,205000	3,532000	5,749000	-	1,000000	0,932600
C5-O	3,433000	3,760000	5,977000	0,227500	-	0,878300
C6-O	1,898000	2,225000	4,442000	1,307000	1,534000	-

Fonte: Autora (2022)

Tabela H32 - Resultados do teste de *Tukey* para E_L aos 91 dias para os concretos otimizados com aglomerantes quaternários

TESTE ESTATÍSTICO - 91 DIAS - CONCRETOS OTIMIZADOS COM AGLOMERANTES QUATERNÁRIOS				
	C7-O	C8-O	C9-O	C10-O
C7-O	-	0,511300	0,811900	0,608100
C8-O	2,037000	-	0,943000	0,997900
C9-O	1,254000	0,782600	-	0,980500
C10-O	1,787000	0,250000	0,532600	-

Fonte: Autora (2022)

A Tabela H33 apresenta os resultados do teste t de *Student* para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico longitudinal de cada traço de concreto nas idades de 7, 28 e 91 dias.

Tabela H33 - Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas no módulo de elasticidade dinâmico longitudinal dos concretos

TESTE ESTATÍSTICO – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO LONGITUDINAL								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
Concreto	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva	Concreto	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva	Concreto	P(T<=t) bi-caudal	Diferença expressiva
C1-R e C1-O	0,490391	Não	C1-R e C1-O	0,314360	Não	C1-R e C1-O	0,102985	Não
C2-R e C2-O	0,173343	Não	C2-R e C2-O	0,829454	Não	C2-R e C2-O	0,039010	Sim
C3-R e C3-O	0,000119	Sim	C3-R e C3-O	0,002112	Sim	C3-R e C3-O	0,011667	Sim
C4-R e C4-O	0,831787	Não	C4-R e C4-O	0,115037	Não	C4-R e C4-O	0,004801	Sim
C5-R e C5-O	0,199981	Não	C5-R e C5-O	0,090697	Não	C5-R e C5-O	0,044416	Sim
C6-R e C6-O	0,779392	Não	C6-R e C6-O	0,057146	Não	C6-R e C6-O	0,100779	Não
C7-R e C7-O	0,058185	Não	C7-R e C7-O	0,064686	Não	C7-R e C7-O	0,039936	Sim
C8-R e C8-O	0,191217	Não	C8-R e C8-O	0,408641	Não	C8-R e C8-O	0,354902	Não
C9-R e C9-O	0,230721	Não	C9-R e C9-O	0,283448	Não	C9-R e C9-O	0,754612	Não
C10-R e C10-O	0,506250	Não	C10-R e C10-O	0,003799	Sim	C10-R e C10-O	0,754974	Não

Fonte: Autora (2022)