UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO

JULIANA RIBEIRO

**Avaliação de empacotamento de agregados para dosagem
de concretos de baixo teor de CO₂**

São Carlos
2021

JULIANA RIBEIRO

**Avaliação de empacotamento de agregados para dosagem
de concretos de baixo teor de CO₂**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Área de Concentração: Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Luís Damineli

São Carlos
2021

AUTORIZO A REPRODUCAO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRONICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R484a Ribeiro, Juliana
 Avaliação de empacotamento de agregados para
dosagem de concretos de baixo teor de CO2 / Juliana
Ribeiro; orientador Bruno Luís Damineli. -- São
Carlos, 2021.
 182 p.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e
Tecnologia -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo,
Universidade de São Paulo, 2021.

 1. Empacotamento de partículas. 2. Métodos de
empacotamento. 3. Tecnologia em concreto. I.
Damineli, Bruno Luís , orient. II. Título.

Bibliotecária responsável pela estrutura de catalogação da publicação de acordo com a AACR2:
Brianda de Oliveira Ordonho Sígolo - CRB - 8/8229

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Juliana Ribeiro**

Título da dissertação: **“Avaliação de empacotamento de agregados para dosagem de concretos de baixo teor de CO₂”**

Data da defesa: **17/02/2021**

Orientador: Prof. Dr. Bruno Luis Damineli

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. Bruno Luis Damineli
(IAU/USP)

Não votante

Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos
(IAU/USP)

APROVADA

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Córdoba
(UFSCar)

APROVADA

Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira
(EESC/USP)

APROVADA

Coordenador e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: **Prof. Dr. Tomás Antonio Moreira.**

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo.

Ao Prof. Dr. Bruno Luís Damineli, pelos ensinamentos, paciência, sugestões e disponibilidade ao longo do desenvolvimento dessa dissertação.

Aos técnicos Paulo, Sérgio e Paulo pela disponibilidade na realização dos ensaios e pelos ensinamentos.

Às secretárias da Pós-Graduação, Mara, Flávia e Ana Paula, pela atenção, suporte e disponibilidade em ajudar.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Córdoba, Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira e Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos, pelas sugestões e considerações que contribuíram para o aperfeiçoamento da pesquisa.

Aos alunos de iniciação científica, Ana Victoria, Kamila, Pedro, Rafael e Ricardo pela contribuição na pesquisa.

Aos professores da Pós-Graduação e da Graduação do curso de Arquitetura e Urbanismo pelos ensinamentos. Em especial, agradeço a minha orientadora da iniciação científica e do projeto de extensão Prof.^a Dr.^a. Rosio Fernández Baca Salcedo e a minha orientadora do Trabalho Final de Graduação Prof.^a. Dr.^a. Norma Regina Truppel Constantino, por todos os ensinamentos e apoio.

Aos amigos e colegas do mestrado por compartilharem comigo essa etapa.

Aos meus pais, José Marcos e Lezira, por todo amor, dedicação, incentivo e apoio. Minhas inspirações e o meu orgulho.

À minha irmã, Jussara, por todo amor, incentivo e apoio. Meu orgulho, exemplo de determinação e coragem.

Aos meus sobrinhos Miguel e Mariana, por me fazerem sorrir todos os dias.

Ao meu cunhado Frederico, pelo incentivo e apoio.

Aos meus avós Santana, José Alfeu, Maria Augusta e Mario, por todo amor e ensinamentos. Meus exemplos de sabedoria e perseverança.

Aos meus familiares pela torcida e apoio.

Enfim, agradeço a todos que participaram desse processo.

“Recria tua vida, sempre, sempre.
Remove pedras e planta roseiras e faz doces. Recomeça.”

Cora Coralina

RESUMO

RIBEIRO, Juliana. Avaliação de empacotamento de agregados para dosagem de concretos de baixo teor de CO₂. 2021. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

A construção civil é um dos setores mais importantes para o desenvolvimento de um país, que gera muitos impactos ambientais ao longo de todos os processos que envolve. A demanda pela produção de concreto é crescente; por isso, devem ser tomadas medidas que contribuam para a diminuição dos impactos gerados, principalmente a redução da emissão de poluentes na atmosfera, especialmente o CO₂. Para que isso aconteça, uma das alternativas é o empacotamento de partículas, que consiste na redução dos vazios existentes entre os agregados, diminuindo a necessidade de pasta e consequentemente de cimento para a mesma fluidez e resistência à compressão. Dessa maneira, essa dissertação tem como objetivo analisar novos métodos de medição de empacotamento de agregados de forma a contribuir para a otimização do uso de cimento na elaboração de concretos. Inicialmente foi realizada a análise do índice de vazios de diferentes combinações de agregados através de cinco métodos de empacotamento: Lançamento sem vibração, Lançamento com vibração, Saco sem vibração, Saco com vibração e Vibração por partes. Por meio dos resultados obtidos foram realizados ensaios de abatimento de tronco de cone para obter o volume de pasta necessário para atingir o ponto de transição e o *slump* desejado para uma boa trabalhabilidade. Os resultados obtidos indicaram que os métodos com vibração são mais eficientes para determinar os vazios entre os agregados e, portanto, o empacotamento, pois a quantidade de pasta necessária para fazer o concreto fluir encontrada nos ensaios realizados se apresentou próxima ao índice de vazios determinado nos ensaios com vibração. Entre as nove composições granulométricas analisadas, a que obteve o menor índice de vazios foi a composição B5-B2-A4-A1 com um índice de 20,1% no método Saco com vibração na proporção 90-10. No ensaio de compressão, foi obtida a tensão de ruptura, permitindo a análise do consumo de cimento e da intensidade de ligantes. Na composição B6-B2-A5-A1 foi obtido o menor consumo de cimento, 293,7kg/m³, no Traço 08 - 80% Ag1 e 20% Ag2 e o menor índice de ligantes foi 6,55kg/m³.Mpa. Observou-se que traços com menor empacotamento foram menos eficientes do que os que alcançaram índices maiores de empacotamento. Conclui-se que há possibilidade de determinação do teor de vazios real de misturas de diferentes tipos, tamanhos e teores de agregados a partir de ensaios simples com utilização de vibração mecânica.

Palavras-chave: Empacotamento de partículas. Métodos de empacotamento. Tecnologia em concreto.

ABSTRACT

RIBEIRO, Juliana. Evaluation of packaging of aggregates for dosing concrete with low CO₂ content. 2021. Dissertation (Master in Architecture and Urbanism) - Institute of Architecture and Urbanism, University of São Paulo, São Carlos, 2021.

Civil construction is one of the most important sectors for a country's development, which generates many environmental impacts throughout all the processes it involves. The demand for concrete production is growing; therefore, measures must be taken that contribute to the reduction of the impacts generated, mainly the reduction of the emission of pollutants in the atmosphere, especially CO₂. For this to happen, one of the alternatives is the packaging of particles, which consists of reducing the voids existing between the aggregates, reducing the need for paste and consequently for cement for the same fluidity and resistance to compression. Thus, this dissertation aims to analyze new methods of measuring aggregate packaging in order to contribute to the optimization of the use of cement in the preparation of concretes. Initially, the void index analysis of different combinations of aggregates was carried out using five packaging methods: Launch without vibration, Launch with vibration, Bag without vibration, Bag with vibration and Vibration by parts. By means of the results obtained, cone trunk *slump* tests were performed to obtain the volume of paste necessary to reach the transition point and the desired *slump* for good workability. The results obtained indicated that the methods with vibration are more efficient to determine the voids between the aggregates and therefore the packing, because the amount of paste necessary to make the concrete flow found in the tests performed was close to the voids index determined in the tests with vibration. Among the nine granulometric compositions analyzed, the one that obtained the lowest void index was the composition B5-B2-A4-A1 with an index of 20.1% in the bag method with vibration in the proportion 90-10. In the compression test, the tensile strength was obtained, allowing the analysis of cement consumption and binder intensity. In the composition B6-B2-A5-A1 the lowest cement consumption was obtained, 293.7 kg / m³, in Trace 08 - 80% Ag1 and 20% Ag2 and the lowest binder index was 6.55 kg/m³.Mpa. It was observed that traits with less packaging were less efficient than those that achieved higher rates of packaging. We conclude that it is possible to determine the actual voids content of mixtures of different types, sizes and contents of aggregates from simple tests using mechanical vibration.

Keywords: Particle packaging. Packaging methods. Concrete technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Distribuição da demanda de energia por etapa do processo	28
Figura 2 - Produção de cimento por região	30
Figura 3 - Estimativas globais médias da composição do cimento	34
Figura 4 - Intensidade de ligantes (ILrc) versus resistência à compressão aos 28 dias. As linhas representam concretos com o mesmo teor total de ligantes, Kg. M-3	37
Figura 5 - Interação entre partículas: a) efeito de afastamento nos grãos de classe 2 provocado pela classe 3 de grãos; e b) efeito parede, em que grãos da classe 2 são influenciados pela proximidade com grãos de classe 1	40
Figura 6 – Efeito de cunha: a) O efeito de cunha quando as partículas grossas são dominantes; e	41
Figura 7 - Representação esquemática das formas de poros que podem ocorrer nas partículas:(a) partícula densa (isenta de poros); (b) partícula com poro interno fechado; (c) partícula com poros abertos	42
Figura 8 - Modelos esquemáticos que apresentam duas formas de empacotamento para uma mesma distribuição granulométrica: (a) camadas monodispersas; (b) empacotamento aleatório submetido a vibração. A faixa cinza em (b) representa a redução no espaço ocupado pelas partículas devido ao melhor empacotamento	43
Figura 9 - Modelos de elementos discretos que criam uma estrutura de partículas sem que as partículas se toquem (lado esquerdo (Zheng e Stroeven, 1999) ou uma estrutura estável de partículas (lado direito (Fu e Dekelbab, 2003)).....	48
Figura 10 - Agregados graúdos e miúdos.....	51
Figura 11 - Cilindro após o corte e nivelamento.....	56
Figura 12 - Método: 1º Lançamento sem vibração	59
Figura 13 - Método: 2º Lançamento com vibração	60
Figura 14 - Método: 3º Saco sem vibração	61
Figura 15 - Método: 4º Saco com vibração.....	62
Figura 16 - Método: 5º Vibração por partes.....	63
Figura 17 – Peneiramento	68
Figura 18 - Peneiras	68
Figura 19 - a) Brita B2 b) Composição granulométrica.....	69
Figura 20 - Granulometria das Britas.....	69
Figura 21 - a) Agregado miúdo compactado no molde; b) Cone após desmoldamento;	73
Figura 22 - a) Agregados antes da secagem superficial realizada com o pano b) Pesagem da massa em água	75
Figura 23 - Combinação B6-B5	76
Figura 24 - Composição dos agregados B6-B5.....	76
Figura 25 - Composição B6-B5-B4	77
Figura 26 - Composição B6-B5-B4	78
Figura 27 - Composição B6-B5-B4-B3	79
Figura 28 - Composição dos agregados B6-B5-B4-B3	80
Figura 29 - Composição B6-B5-B4-B3-B2	82
Figura 30 - Composição dos agregados B6-B5-B4-B3-B2.....	83
Figura 31 - Relação índice de vazios inicial (B6-B5) e final (B6-B5-B4-B3-B2)	85
Figura 32 - Composição B5-B3	87
Figura 33 - Composição dos agregados B5-B3.....	87
Figura 34 - Composição B5-B3-A6	88
Figura 35 - Composição dos agregados B5-B3-A6.....	89

Figura 36 - Composição B5-B3-A6-A3	90
Figura 37 - Composição dos agregados B5-B3-A6-A3	91
Figura 38 - Relação índice de vazios inicial (B5-B3) e final (B5-B3-A6-A3)	92
Figura 39 - Composição B5-B2	94
Figura 40 - Composição dos agregados B5-B2.....	94
Figura 41 - Composição B5-B2-A4	95
Figura 42 - Composição dos agregados B5-B2-A4.....	96
Figura 43 - Composição B5-B2-A4-A1	97
Figura 44 - Composição dos agregados B5-B2-A4-A1	98
Figura 45 - Relação índice de vazios inicial (B5-B2) e final (B5-B2-A4-A1)	99
Figura 46: Composição B6-B3.....	101
Figura 47 - Composição dos agregados B6-B3.....	101
Figura 48 - Composição B6-B3-A7	102
Figura 49 - Composição dos agregados B6-B3.....	103
Figura 50 - Composição B6-B3-A7-A1	104
Figura 51 - Composição dos agregados B6-B3-A7-A1	104
Figura 52 - Relação índice de vazios inicial (B6-B3) e final (B6-B3-A7-A1)	106
Figura 53 - Composição B6-B2	108
Figura 54 - Composição dos agregados B6-B2.....	108
Figura 55 - Composição B6-B2-A5	109
Figura 56 - Composição dos agregados B6-B2-A5.....	109
Figura 57 - Composição B6-B2-A5-A1	110
Figura 58 - Composição dos agregados B6-B2-A5-A1	110
Figura 59 - Relação índice de vazios inicial (B6-B2) e final (B6-B2-A5-A1)	112
Figura 60 - Composição B6-B4	114
Figura 61 - Composição dos agregados B6-B4.....	114
Figura 62 - Composição B6-B4-B2	115
Figura 63 - Composição dos agregados B6-B4-B2.....	115
Figura 64 - Composição B6-B4-B2-A6	116
Figura 65 - Composição dos agregados B6-B4-B2-A6.....	116
Figura 66 - Composição B6-B4-B2-A6-A3	117
Figura 67 - Composição dos agregados B6-B4-B2-A6-A3	118
Figura 68 - Composição B6-B4-B2-A6-A3-A1	118
Figura 69 - Gráfico da composição dos agregados B6- B4-B2-A6-A3-A1	119
Figura 70 - Relação índice de vazios inicial (B6-B4) e final (B6-B4-B2-A6-A3-A1)	120
Figura 71 - Composição B5-B3	122
Figura 72 - Gráfico da composição dos agregados B5-B3.....	122
Figura 73 - Composição B5-B3-A7	123
Figura 74 - Gráfico da composição dos agregados B5-B3-A7.....	123
Figura 75 - Composição B5-B3-A7-A5	124
Figura 76 - Gráfico da composição dos agregados B5-B3-A7-A5	124
Figura 77 - Composição B5-B3-A7-A5-A2.....	125
Figura 78 - Gráfico da composição dos agregados B5-B3-A7-A5-A2.....	125
Figura 79 - Relação índice de vazios inicial (B5-B3) e final (B5-B3-A7-A5-A2)	127
Figura 80 – Composição B5-B3.....	129
Figura 81 – Gráfico da composição dos agregados B5-B3	129
Figura 82 – Composição B5-B3-A7.....	130
Figura 83 – Gráfico da composição dos agregados B5-B3-A7.....	130

Figura 84 – Composição B6-B3-A7-A2	131
Figura 85 – Gráfico da composição dos agregados B5-B3-A7-A2.....	131
Figura 86 – Relação índice de vazios inicial (B5-B3) e final (B5-B3-A7-A2).....	132
Figura 87 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 01	137
Figura 88 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 02	140
Figura 89 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento - Traço 03	143
Figura 90 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento - Traço 04	146
Figura 91 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento - Traço 05	149
Figura 92 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 06	151
Figura 93 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 07	153
Figura 94 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 08	155
Figura 95 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 08-A	158
Figura 96 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 09	160
Figura 97 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 10	162
Figura 98 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 11	164
Figura 99 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 12	166
Figura 100 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 13	168
Figura 101 - a) Moldagem b) corpo de prova submersos em água c) corpo de prova retificado	169
Figura 102 – Ensaio de compressão	171
Figura 103 - a) Corpo de prova rompido b) Interior do corpo prova	171

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Equipamento para o ensaio dos métodos	55
Quadro 2 - Combinação de agregados em porcentagem	57
Quadro 3 – Quarteamento	58
Quadro 4 - Equipamentos para o ensaio de abatimento de tronco de cone	65
Quadro 6 - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro	70
Quadro 7 - Massa do cilindro completamente preenchido por agregados	75
Quadro 8 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados- B6-B5-B4	78
Quadro 9 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados- B6-B5-B4-B3	80
Quadro 10 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados- B6-B5-B4-B3-B2	82
Quadro 11 - Relação índice de vazios inicial (B6-B5) e final (B6-B5-B4-B3-B2)	86
Quadro 12 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados - B5-B3	87
Quadro 13 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados - B5-B3-A6	89
Quadro 14 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados- B5-B3-A6-A3	90
Quadro 15 - Relação índice de vazios inicial (B5-B3) e final (B5-B3-A6-A3)	93
Quadro 16 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados - B5-B2	94
Quadro 17 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados - B5-B2-A4	96
Quadro 18 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados - B5-B2-A4-A1	97
Quadro 19 - Relação índice de vazios inicial (B5-B2) e final (B5-B2-A4-A1)	100
Quadro 20 - Relação índice de vazios inicial (B6-B3) e final (B6-B3-A7-A1)	107
Quadro 21 - Comparação entre ensaios diferentes em um mesmo método, B6-B2-A5-A1	113
Quadro 22 - Relação índice de vazios inicial (B6-B4) e final (B6-B4-B2-A6-A3-A1)	121
Quadro 23 - Relação índice de vazios inicial (B5-B3) e final (B5-B3-A7-A5-A2)	128
Quadro 24 – Relação índice de vazios inicial (B5-B3) e final (B5-B3-A7-A2)	133
Quadro 25 - Abatimento – Traço 01	136
Quadro 26 - Abatimento – Traço 02	139
Quadro 27 - Abatimento – Traço 03	142
Quadro 28 - Abatimento – Traço 04	145
Quadro 29 - Abatimento – Traço 05	148
Quadro 30 - Abatimento – Traço 06	151
Quadro 31 - Abatimento – Traço 08	154
Quadro 32 - Abatimento – Traço 08-A	156
Quadro 33 - Abatimento – Traço 09	159
Quadro 34 - Abatimento – Traço 10	161
Quadro 35 - Abatimento – Traço 11	163
Quadro 36 - Abatimento – Traço 12	165
Quadro 37 - Abatimento – Traço 13	167
Quadro 38 - Ponto de transição e <i>slump</i> dos traços analisados.	168
Quadro 39 - Tensão de ruptura dos corpos de prova	170
Quadro 40 - Tensão de ruptura dos corpos de prova moldados	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção anual de cimento portland, segundo estados e regiões (em mil toneladas)	22
Tabela 2 - Principais compostos do cimento Portland	23
Tabela 3 - Certificação de projetos LEED	26
Tabela 4 - Consumo de cimento Portland no Brasil por Região	31
Tabela 5 - Consumo de Cimento no Brasil (10 ³ t)	32
Tabela 6 - Importação Brasileira 2016	33
Tabela 7 - Combinação de agregados	58
Tabela 8 – Traços realizados conforme a composição de agregados	64
Tabela 9 - Determinação do material fino que passa através da peneira 75mm, por lavagem	71
Tabela 10 - Massa específica do agregado seco	72
Tabela 11 - Massa específica do agregado saturado superfície seca	72
Tabela 12 - Massa específica	73
Tabela 13 - Massa específica do agregado seco	73
Tabela 14 - Massa específica do agregado na condição saturado superfície seco	74
Tabela 15 - Massa específica aparente	74
Tabela 16 - Adição dos agregados - Traço 01	134
Tabela 17 - Traço 01 - Adições e resultados	135
Tabela 18 - Adição dos agregados - Traço 02	138
Tabela 19 - Traço 02- Adições e resultados	138
Tabela 20 - Adição dos agregados - Traço 03	141
Tabela 21 - Traço 03 - Adições e resultados	141
Tabela 22 - Adição dos agregados - Traço 04	144
Tabela 23 - Traço 04 - Adições e resultados	144
Tabela 24 - Adição dos agregados - Traço 05	147
Tabela 25 - Traço 05 - Adições e resultados	147
Tabela 26 - Adição dos agregados - Traço 06	150
Tabela 27 - Traço 06 – Adições e resultados	150
Tabela 28 - Adição dos agregados - Traço 07	152
Tabela 29 - Traço 07 – Adições e resultados	152
Tabela 30 - Adição dos agregados - Traço 08	153
Tabela 31 - Traço 08 – Adições e resultados	154
Tabela 32 - Traço 08-A - Adições e resultados	155
Tabela 33 - Adição dos agregados - Traço 09	158
Tabela 34 - Traço 09 - Adições e resultados	159
Tabela 35 - Adição dos agregados - Traço 10	160
Tabela 36 - Traço 10 - Adições e resultados	161
Tabela 37 - Adição dos agregados - Traço 11	162
Tabela 38 - Traço 11 - Adições e resultados	163
Tabela 39 - Adição dos agregados - Traço 12	164
Tabela 40 - Traço 12 - Adições e resultados	165
Tabela 41 - Adição dos agregados - Traço 13	166

Tabela 42 - Traço 13 - Adições e resultados	167
Tabela 43 - Consumo de materiais dos concretos moldados referentes aos Traços 01, 02 e 03.	173
Tabela 44 - Proporções típicas para os materiais do concreto de diferentes resistências.....	173
Tabela 45 - Intensidade de ligantes	174
Tabela 46 - Consumo de cimento e Intensidade de ligantes.....	174

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	CONSTRUÇÃO CIVIL X IMPACTOS AMBIENTAIS	21
2.1	Construção civil.....	21
2.1.1	Concreto	21
2.1.2	Cimento.....	21
2.1.2.1	Fabricação do cimento	22
2.1.2.1.1	Extração do calcário e matéria-prima	23
2.1.2.1.2	Forno	24
2.1.2.1.3	Refrigeração / moagem	24
2.2	Impactos ambientais	25
2.2.1	Impactos ambientais em cada processo da utilização do cimento	27
2.2.1.1	Extração do calcário.....	27
2.2.1.2	Industrialização	28
2.2.1.3	Embalagem e transporte.....	29
2.2.1.4	Consumo	29
2.2.2	Consumo mundial e brasileiro de cimento.....	29
2.2.2.1	Consumo mundial de cimento	29
2.2.2.2	Consumo brasileiro de cimento	31
3	ESTRATÉGIAS PARA REDUZIR AS EMISSÕES DE CO2 DURANTE A PRODUÇÃO DO CIMENTO.....	34
3.1	Adições minerais para a substituição do clínquer	34
3.2	Sílica ativa (SA).....	34
3.3	Cinza volante (CV).....	35
3.4	Escória de alto forno (EAF)	35
3.5	Eficiência do uso do cimento	36
3.6	Intensidade de ligantes (ILRC).....	36
3.7	Intensidade de CO2 (ICRC).....	36
3.8	Avaliação dos indicadores ILRC E ICRC	37

4	EMPACOTAMENTO DE AGREGADOS.....	38
4.1	O que é empacotamento de agregados?	38
4.1.1	Fatores que influenciam o empacotamento de partículas	38
4.1.1.1	Distribuições granulométricas	38
4.1.1.2	Porosidade ou Índice de vazios	41
4.1.1.3	Morfologia das partículas	42
4.1.1.4	Técnica de compactação	43
4.1.1.5	Estado de dispersão das partículas	44
4.2	Análise de métodos de empacotamento.....	44
4.2.1	Modelos de empacotamento de partículas	44
4.2.1.1	Curvas de otimização em modelos de empacotamento de partículas	45
4.2.1.1.1	Modelo de Andreasen: abordagem contínua.....	46
4.2.1.1.2	Modelo de Alfred	46
4.2.1.2	Modelos de empacotamento de partículas	46
4.2.1.2.1	Modelo de Furnas: abordagem discreta	47
4.2.1.2.2	Modelos de elementos discretos	48
5	MATERIAIS E MÉTODOS	50
5.1	Materiais	50
5.1.1	Cimento.....	50
5.1.2	Britas	50
5.1.3	Areias	50
5.2	Caracterização.....	51
5.2.1	Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio - ABNT NBR 7809	51
5.2.2	Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem - NBR NM 46.....	51
5.2.3	Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente - ABNT NBR NM 52.....	52
5.2.4	Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água - ABNT NBR NM 53.....	53

5.3	Determinação do Índice de Vazios	54
5.3.1	Equipamentos.....	55
5.3.2	Procedimentos.....	55
5.3.3	Definição da amostra	56
5.3.4	Métodos.....	57
5.3.4.1	1º Lançamento sem vibração	59
5.3.4.2	2º Lançamento com vibração	59
5.3.4.3	3º Saco sem vibração	60
5.3.4.4	4º Saco com vibração	61
5.3.4.5	5º Vibração por partes.....	62
5.4	Ensaio de abatimento do tronco de cone.....	63
5.5	Resistência à compressão	66
5.5.1	Ensaio de resistência à compressão	67
6	RESULTADOS	68
6.1	Caracterização.....	68
6.1.1	Composição granulométrica	68
6.1.2	Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio - ABNT NBR7809: 2006	70
6.1.3	Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem – ABNT NBR NM 46: 2001	71
6.1.4	Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente – ABNT NBR NM 52: 2009	71
6.1.5	Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água - ABNT NBR NM 53: 2009.....	73
6.2	Determinação do Índice de Vazios	75
6.2.1	Composição B6-B5-B4-B3-B2	75
6.2.1.1	Índice de vazios B6-B5	76
6.2.1.2	Índice de vazios B6-B5-B4	77
6.2.1.3	Índice de vazios B6-B5-B4-B3	79

6.2.1.4	Índice de vazios B6-B5-B4-B3-B2	82
6.2.2	Composição B5-B3-A6-A3	86
6.2.2.1	Índice de vazios B5-B3	86
6.2.2.2	Índice de vazios B5-B3-A6.....	88
6.2.2.3	Índice de vazios B5-B3-A6-A3	90
6.2.3	Composição B5-B2-A4-A1	93
6.2.3.1	Índice de vazios B5-B2	93
6.2.3.2	Índice de vazios B5-B2-A4.....	95
6.2.3.3	Índice de vazios B5-B2-A4-A1	97
6.2.4	Composição B6-B3-A7-A1	101
6.2.4.1	Índice de vazios B6-B3	101
6.2.4.2	Índice de vazios B6-B3-A7.....	102
6.2.4.3	Índice de vazios B6-B3-A7-A1	104
6.2.5	Composição B6-B2-A5-A1	108
6.2.5.1	Índice de vazios B6-B2	108
6.2.5.2	Índice de vazios B6-B2-A5.....	109
6.2.5.3	Índice de vazios B6-B2-A5-A1	110
6.2.6	Composição B6-B4-B2-A6-A3-A1	113
6.2.6.1	Índice de vazios B6-B4	113
6.2.6.2	Índice de vazios B6-B4-B2	115
6.2.6.3	Índice de vazios B6-B4-B2-A6.....	116
6.2.6.4	Índice de vazios B6-B4-B2-A6-A3	117
6.2.6.5	Índice de vazios B6-B4-B2-A6-A3-A1	118
6.2.7	Composição B5-B3-A7-A5-A2	121
6.2.7.1	Índice de vazios B5-B3	121
6.2.7.2	Índice de vazios B5-B3-A7.....	123
6.2.7.3	Índice de vazios B5-B3-A7-A5	124
6.2.7.4	Índice de vazios B5-B3-A7-A5-A2	125
6.2.8	Composição B5-B3-A7-A2	128
6.2.8.1	Índice de vazios B5-B3	128
6.2.8.2	Índice de vazios B5-B3-A7.....	130
6.2.8.3	Índice de vazios B5-B3-A7-A2	131

6.3	Ensaio de abatimento.....	133
6.3.1	Composição B6-B5-B4-B3-B2	134
6.3.1.1	Traço 01 – 70% Ag1 e 30% Ag2	134
6.3.1.2	Traço 02 – 60% Ag1 e 40% Ag2	138
6.3.1.3	Traço 03 – 50% Ag1 e 50% Ag2	141
6.3.2	Composição B5-B3-A6-A3	144
6.3.2.1	Traço 04 – 80% Ag1 e 20% Ag2	144
6.3.2.2	Traço 05 – 90% Ag1 e 10% Ag2	147
6.3.3	Composição B6-B3-A7-A1	150
6.3.3.1	Traço 06 – 80% Ag1 e 20% Ag2	150
6.3.3.2	Traço 07 – 90% Ag1 e 10% Ag2	151
6.3.4	Composição B6-B2-A5-A1	153
6.3.4.1	Traço 08 – 80% Ag1 e 20% Ag2	153
6.3.4.2	Traço 08-A - 80% Ag1 e 20% Ag2	155
6.3.5	Composição B6-B2-A5.....	158
6.3.5.1	Traço 09 – 50% Ag1 e 50% Ag2	158
6.3.6	Composição B6-B4-B2-A6-A3-A1	160
6.3.6.1	Traço 10 – 90% Ag1 e 10% Ag2	160
6.3.7	Composição B6-B4-B2-A6-A3	162
6.3.7.1	Traço 11 – 90% Ag1 e 10% Ag2	162
6.3.8	Composição B6-B3-A7-A5-A2	164
6.3.8.1	Traço 12 – 80% Ag1 e 20% Ag2	164
6.3.9	Composição B6-B3-A7-A5	166
6.3.9.1	Traço 13 – 60% Ag1 e 40% Ag2	166
6.3.10	Análise dos traços	168
6.4	Resistência à compressão	169
6.5	Consumo de cimento.....	173
7	CONCLUSÃO	175
	REFERÊNCIAS	178

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores mais importantes da economia de um país. Por outro lado, provoca grandes prejuízos ambientais. Uma das principais causas é a liberação do dióxido de carbono durante a fabricação dos materiais. No caso dos componentes à base de cimento, isso ocorre principalmente na etapa de produção do clínquer, ou seja, na calcinação, cuja decomposição de CaCO_3 em CaO promove uma emissão maciça de CO_2 que corresponde a 60% da emissão total de um forno de cimento (NEVILLE, 1997).

Segundo dados do Technology Roadmap publicados em 2018 pela International Energy Agency (WBCSD/IEA, 2018), o setor de cimento é o segundo maior emissor industrial de CO_2 do mundo. Em 2018 foram liberadas 540 toneladas de CO_2 por tonelada de cimento (IEA, 2020). Além disso, a produção do cimento é responsável também pela liberação dos seguintes poluentes: monóxido de carbono, óxido de enxofre, óxido de nitrogênio e compostos de chumbo (ECYCLE).

Logo, é essencial buscar medidas que minimizem esses impactos, visto que o uso crescente do concreto interfere diretamente no aumento da produção do cimento. De acordo com o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) (2018), está previsto um crescimento da produção de cimento de 12 a 23% até 2050 e consequentemente um aumento global nas emissões diretas de carbono na atmosfera de 4% até 2050.

Uma alternativa para minimizar esses impactos é o aumento da eficiência do uso de ligantes no concreto. Estudos anteriores mostram que dentre os métodos utilizados para a redução da intensidade de ligantes e de gases poluentes, como o dióxido de carbono, a otimização do empacotamento dos agregados tem um papel importante (DAMINELI, 2013; DE LARRARD, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2008; OLIVEIRA et al, 2000). Métodos de empacotamento de agregados diminuem o índice de vazios entre os agregados, reduzindo o uso de pasta e consequentemente contribuindo para a diminuição da quantidade de cimento utilizada.

Como a proporção de água e cimento não sofrerá alteração, sendo mantida a mesma relação água/cimento (a/c), acredita-se ser possível obter o mesmo valor de resistência de um concreto feito sem a redução do uso de ligantes. Algo a ser considerado é que a resistência dos agregados que preencherão os vazios no lugar da pasta é maior que a resistência da combinação de água e cimento. Diante disso, o objetivo dessa dissertação é analisar comparativamente cinco novos métodos de medição do empacotamento de agregados, que são: Lançamento sem

vibração, Lançamento com vibração, Saco sem vibração, Saco com vibração e Vibração por partes, visando a diminuição do teor de pasta, sem prejudicar a trabalhabilidade do concreto e sem perda da sua resistência mecânica. Através da otimização de sistemas de empacotamento é possível produzir com a mesma quantidade de cimento utilizada atualmente, maiores quantidades de concreto.

A busca por novos métodos de medição do empacotamento é relevante, pois com esta estratégia, há a possibilidade de ganhos reais na redução do uso de pasta e consequentemente a diminuição dos impactos ambientais gerados.

A dissertação é composta por sete capítulos incluindo esta introdução. No capítulo 2, é apresentada a revisão de literatura sobre a construção civil e os impactos ambientais gerados por ela. No capítulo 3, é apresentada a análise sobre algumas estratégias para reduzir as emissões de CO₂ durante a produção do cimento. O capítulo 4 apresenta estudos sobre o empacotamento de agregados, em que consiste e alguns modelos existentes. O capítulo 5 aborda os materiais e métodos, ou seja, as etapas de desenvolvimento da pesquisa. O capítulo 6, dedica-se à apresentação dos resultados obtidos durante a realização dos ensaios. Por fim, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 CONSTRUÇÃO CIVIL X IMPACTOS AMBIENTAIS

2.1 Construção civil

A construção civil contribui para o desenvolvimento de um país, gerando empregos em todos os processos que a envolve. Por outro lado, a sua ocorrência provoca prejuízos ambientais. Sendo assim, é essencial buscar medidas que minimizem esses impactos.

A construção civil consiste na transformação do ambiente natural no ambiente construído (JOHN, 2000). Apesar de existir diferentes tipos de sistemas construtivos e a utilização de diferentes materiais, o uso do concreto ainda é predominante, sendo que o contínuo crescimento populacional contribui com o aumento do uso desse material, pois demanda mais infraestrutura e a realização de diferentes tipos de obras.

2.1.1 Concreto

Segundo o *World Business Council for Sustainable Development* – WBCSD (2015), o concreto é o material mais usado pelo homem no mundo, sendo que anualmente para cada pessoa existente são usadas quase três toneladas desse material. Em todo o mundo utiliza-se duas vezes mais concreto do que o total de todos os outros materiais de construção juntos, incluindo madeira, aço, plástico e alumínio. O concreto é usado para construir edificações, calçadas, sistemas de esgotos, estradas, pontes, túneis, barragens, entre outros.

Para a produção do concreto utilizam-se normalmente os agregados graúdo, miúdo e a pasta, que consiste no cimento mais água. Esta serve para unir os elementos e preencher os vazios existentes entre eles.

2.1.2 Cimento

O cimento é um pó fino com propriedades ligantes, que em contato com a água, a determinada proporção, forma uma pasta que ao endurecer se torna mais resistente. É formado pela combinação de minerais, a altas temperaturas, principalmente pela cal (CaO), sílica (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3). De acordo com Associação Mineira de Defesa do Ambiente - AMDA (2011), as variações de cimento são produzidas através da adição de outros produtos. Segundo Mehta e Monteiro (2008), o cimento anidro, ou seja, aquele que ainda não teve adição de água, é um pó cinza composto de partículas angulares com dimensões que variam normalmente de 1 a 50 μm . Por causa da sua resistência e durabilidade, o cimento é muito utilizado na construção civil para a produção do concreto, que é composto pela mistura de agregados, cimento e água, podendo conter aditivos.

Segundo a Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (2017), em 2016, a indústria brasileira de cimento operou com 23 grupos nacionais e estrangeiros, um a menos que em 2015, e 96 fábricas, sendo que no ano anterior eram 100 fábricas. O mercado de cimento no Brasil é regionalizado e distribuído por todo o território nacional, sendo que o transporte mais utilizado é o rodoviário, responsável por 94%, o ferroviário, 3%, e o hidroviário, 3%, este último utilizado geralmente na região Norte. Na Tabela 1 é possível visualizar os índices da produção de cimento por regiões do Brasil de 2010 a 2019. A região Sudeste se destaca como maior produtora do país.

Tabela 1 - Produção anual de cimento portland, segundo estados e regiões (em mil toneladas)

Região	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Norte	3.273	3.585	3.698	3.544	3.278	3.223	3.088	2.637	2.485	2.138
Nordeste	11.231	11.938	13.815	14.459	15.610	14.798	12.930	11.492	10.835	11.618
Centro-Oeste	6.370	7.082	7.635	8.263	8.649	7.605	5.787	5.777	6.037	6.200
Sudeste	29.741	32.324	33.596	33.477	34.402	31.097	27.044	25.384	25.429	27.580
Sul	8.502	9.164	10.065	10.418	10.564	9.766	9.311	8.714	8.816	9.075
Sub-total	59.117	64.093	68.809	70.161	72.503	66.489	58.160	54.004	53.602	56.611
Brasil										
Cimento	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Branco										
Total Brasil	59.117	64.093	68.809	70.161	72.503	66.489	58.160	54.004	53.602	56.611

Fonte: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2019), adaptado pela autora.

2.1.2.1 Fabricação do cimento

Segundo Neville (1997), os métodos de fabricação do cimento dependem tanto da dureza das matérias-primas como de seu teor de umidade, sendo que a mistura e a moagem das matérias-primas podem ser feitas tanto em condição úmida, denominada “por via úmida”, quanto seca, denominada “por via seca”. Atualmente, visando diminuir o gasto de energia para a queima, realiza-se o processo por via seca, sendo exceção apenas quando as matérias-primas utilizadas necessitam do outro processo.

Além dos processos principais, existem outros processos de produção de cimento. Entre eles está o que utiliza sulfato de cálcio no lugar do calcário. O sulfato de cálcio, a argila, o coque, a areia e o óxido de ferro são queimados em um forno rotatório, tendo como produtos finais o cimento Portland e o dióxido de enxofre, que é posteriormente transformado em ácido sulfúrico (NEVILLE, 1997).

O processo de fabricação do cimento é dividido nas seguintes etapas: extração do calcário e matéria-prima, forno e refrigeração/moagem.

2.1.2.1.1 Extração do calcário e matéria-prima

Inicialmente ocorre a mineração da rocha calcária, realizada em grandes lavras mecanizadas a céu aberto. Primeiro as rochas são desmontadas com explosivos, depois são transportadas, geralmente por caminhões, até a instalação de britagem onde as rochas são reduzidas a dimensões adequadas ao processamento industrial, em pedaços (AMDA, 2011).

No processo por via úmida, após a britagem o calcário é conduzido, juntamente com a argila dispersa em água, a um moinho de bolas, concluindo a fragmentação do calcário a uma finura de farinha. Forma-se uma pasta que é bombeada para tanques de armazenamento (NEVILLE, 1997).

No processo por via seca ou semiseca, as matérias-primas são britadas e levadas nas proporções corretas a um moinho, onde são secas e reduzidas à dimensão de um pó fino, denominado farinha crua. Este é bombeado para um silo de mistura, onde finaliza-se o ajuste da proporção dos materiais necessários à fabricação do cimento (NEVILLE, 1997).

Na sequência a mistura é peneirada e levada ao granulador, sendo adicionados cerca de 12% de água em relação à sua massa, resultando em péletes duros com diâmetro de aproximadamente 15 mm. Essa etapa é necessária porque, se a farinha fria for levada diretamente ao forno, impedirá o fluxo de ar e a troca de calor necessária às reações químicas para a formação do clínquer. Os péletes são aquecidos em uma grelha pré-aquecida pelos gases do forno e, em seguida, vão ao forno (NEVILLE, 1997).

De acordo com a Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (2017) para cada tonelada de cimento produzido é necessário 1,4 t de calcário, 100-300 kg de argila e 30-40 kg de gipsita. Nos últimos anos vem sendo utilizados escórias siderúrgicas de alto-forno, o chamado clínquer siderúrgico, e outros resíduos industriais.

Segundo Neville (1997), quatro compostos são normalmente considerados como os principais constituintes do cimento. Estes podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais compostos do cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Neville (1997).

2.1.2.1.2 Forno

Como citado anteriormente, existem dois tipos básicos de processos de produção de cimento e há também diferentes tipos de fornos. Dependendo do teor de água da matéria-prima, a produção de cimento é "úmida" ou "seca". No primeiro caso a quantidade de energia necessária é muito maior que a necessária no segundo.

No processo por via úmida, a mistura vai para um forno rotatório, que apresenta uma pequena inclinação horizontal, e gira lentamente em torno de seu eixo. O forno consiste em um grande cilindro de aço revestido com material refratário, com um diâmetro de até 8 m, chegando ao comprimento de 230 m. Pela extremidade superior ele recebe a pasta, enquanto na extremidade inferior recebe o carvão pulverizado que é insuflado com a temperatura chegando a 1.450 °C. O forno deve funcionar ininterruptamente, para garantir a uniformidade do clínquer (NEVILLE, 1997).

Inicialmente, evapora-se a água e o CO₂ é liberado, em seguida, com o material seco, ocorre uma série de reações químicas até que ocorra a fusão de 20% a 30% do material e as reações entre o calcário, a sílica e a alumina formam esferas de 3 a 25 mm de diâmetro, denominadas clínqueres. Estes seguem para resfriadores, que podem ser de vários tipos. Na decomposição de CaCO₃ em CaO, denominada calcinação, ocorre a liberação de CO₂, que corresponde a 60% da emissão total de um forno de cimento. O restante de CO₂ emitido é gerado pela queima do combustível (NEVILLE, 1997).

Segundo Neville (1997), no processo por via seca, as operações seguintes são as mesmas das do processo por via úmida, porém o forno é consideravelmente menor, pois o teor de umidade dos péletes fica em torno de 12% enquanto no processo por via úmida, esse teor é 40%. Outro fator que contribui para que o tamanho do forno seja menor é a utilização do pré-aquecedor, pois a farinha crua é aquecida até cerca de 800°C antes de ser levada ao forno. Como a produção do cimento pelo processo por via úmida tem um elevado consumo de energia, não são mais construídas fábricas com esse processo.

2.1.2.1.3 Refrigeração / moagem

Depois do forno, o clínquer é resfriado e moído com outros componentes minerais. Durante esse processo, a cal combina com os compostos da argila para formar os silicatos C₃S (Silicato tricálcico), C₂S (Silicato dicálcico) e os aluminatos de cálcio, C₃A (Aluminato tricálcico) e C₄AF (Ferro aluminato tetracálcico) que são os principais constituintes do cimento.

As respectivas quantidades desses elementos no cimento Portland comum variam entre 45 e 60%, 15 e 30%, 6 e 12% e 6 e 8%. Além disso, podem também ser utilizados alguns resíduos gerados em outras indústrias como a cinza volante e a escória, produzidas em outras indústrias (NEVILLE, 1997).

Dos moinhos, o cimento é transportado para os silos para embarque, ou seja, para a distribuição. A maior parte do cimento produzido é transportada a granel, sendo que uma pequena porcentagem será ensacada para clientes que precisam de pequenas quantidades (NEVILLE, 1997).

2.2 Impactos ambientais

Com o surgimento das indústrias, aumentaram os impactos ambientais. Segundo Bacellar (2014), com a Revolução Industrial começou o uso das máquinas a vapor e a carvão o que ocasionou um maior impacto ambiental. Buscavam o desenvolvimento sem se preocupar com os impactos no meio ambiente, sendo que só depois de algumas décadas é que ocorreu o aumento da preocupação ambiental e assim as indústrias, entre elas a da construção civil, que é uma das que mais polui o meio ambiente, começaram a realizar mudanças para se adaptar ao desenvolvimento sustentável.

De acordo com Montibeller (1993), esse processo pode ser denominado como um ecodesenvolvimento, pois desloca a lógica da produção para a ótica das necessidades fundamentais da maioria da população atual e busca garantir às gerações futuras as possibilidades de desenvolvimento.

Apesar da emissão de gases poluentes na atmosfera ser um dos impactantes ambientais mais difundidos devido ao aquecimento global, todas as etapas que envolvem a indústria desde a extração da matéria-prima até o descarte, ou seja, todo o ciclo de vida dos materiais empregados, também deve ser considerado.

Para Oliveira (2009), a produção do ambiente construído abrange também o setor da indústria de materiais e componentes e seus impactos. As fontes e a qualidade da matéria-prima, o consumo energético de sua manufatura, até questões relacionadas à obra em si passam a ser consideradas.

Observa-se que na construção civil o uso de sistemas construtivos tradicionais que utilizam o concreto ainda é predominante, por isso, além de buscar novos sistemas que minimizem esses impactos é necessário buscar melhorias nos processos dos sistemas já existentes para minimizar os impactos gerados por eles.

Conforme Bacellar (2014), ao longo dos anos foram desenvolvidas técnicas na construção civil, mais apropriadas e vantajosas, que tem como objetivo construções mais sustentáveis. Foram também criadas certificações para indicar a sustentabilidade nas construções. Entre elas estão: *Leadership in Energy and Environmental Design* - LEED, AQUA 26, Procel Edifica, Selo Casa Azul CAIXA, *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* - BREEAM 30, *Haute Qualité Environnementale* - HQE. De acordo com Matos (2014), o interesse do mercado brasileiro da construção civil por certificações ambientais tem crescido e, segundo o *Green Building Council Brasil*- GBC Brasil, em 2018 o Brasil manteve a posição de quarto lugar entre os países com o maior número de projetos certificados LEED, com mais de 530 projetos certificados LEED, totalizando mais de 16,74 milhões de metros quadrados certificados, ficando atrás da China, do Canadá e da Índia, como pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3 - Certificação de projetos LEED

Ranking	País/Região	Projetos certificados	Metros quadrados*
1	China	1,494	68.83
2	Canadá	3,254	46.81
3	Índia	899	24.81
4	Brasil	531	16.74
5	Coreia do Sul	143	12.15
6	Turquia	337	10.90
7	Alemanha	327	8.47
8	México	370	8.41
9	Taiwan	144	7.30
10	Espanha	299	5.81
**	Estados Unidos	33,632	441.60

*Milhões de metros quadrados no ano de 2018.

Fonte: *Green Building Council Brasil* (2018)

Além das certificações, há legislações aplicáveis à construção civil. De acordo com Caiado (2014), entre elas está a Norma Brasileira de Desempenho NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), que estabelece padrões de qualidade para as edificações residenciais, por meio de requisitos e critérios de desempenho que atendem às necessidades dos usuários quanto à segurança, à habilidade, à durabilidade e à manutenção das edificações.

Segundo Flores (2011), não existe material de construção totalmente sustentável, pois a sua sustentabilidade está diretamente relacionada à situação em que se insere, ou seja, função que deve cumprir, local que será aplicado, uso que será dado a esse material, modo de produção,

região do Brasil em que se localiza a obra, zona bioclimática, hábitos e costumes do usuário, etc.

Para Vosgueritchian (2006), os edifícios que utilizam o concreto na sua construção impactam o meio ambiente de diferentes formas, seja na extração de matéria-prima, na alteração das condições climáticas e na geração de resíduos. Além disso, é possível estender esses problemas a outros tipos de construções que utilizam esse material.

De acordo com Condeixa (2013), o cimento Portland tem como principais insumos a argila (ou xisto) e pedra calcária (CaCO_3) ou gesso, conchas ou outros carbonatos de cálcio, que são recursos não renováveis, e que produzem sérias agressões ao meio ambiente. Segundo o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável - CBCS (2009), a construção civil consome de 40 a 75% dos recursos naturais extraídos do planeta, desconsiderando água e energia, sendo que a produção de materiais de construção emite mais CO_2 e poeira que os limites tolerados.

Lotti (2015) diz que, para que os impactos ambientais gerados pelas construções sejam minimizados, é necessário que algumas atividades sofram alterações. É necessário que ao realizar um projeto estas mudanças sejam consideradas para que se alcance o resultado esperado.

Dessa maneira, observa-se a importância de pensar na forma de obtenção e utilização das matérias-primas. Esse é um dos objetivos do empacotamento dos agregados, pois, ao pensar no modo de utilização do material através da diminuição do índice de vazios entre agregados, permitirá reduzir o uso do cimento na produção do concreto, diminuindo assim o impacto que o uso desse material causa no meio ambiente em todos os seus processos.

2.2.1 Impactos ambientais em cada processo da utilização do cimento

Segundo a AMDA (2011), todo o ciclo de vida do cimento provoca impactos ambientais, podendo ser visualizados alguns deles nas seguintes etapas: extração do calcário, industrialização, embalagem e transporte, e consumo.

2.2.1.1 Extração do calcário

Provoca alteração do relevo, possíveis erosões, danos à flora, à fauna e aos recursos hídricos, gasto de combustíveis fósseis, produção de resíduos e emissão de gases causadores do Efeito Estufa (AMDA, 2011). Em relação às preocupações ambientais atuais referentes às emissões de gases, estão entre as principais: a poluição do ar, a destruição da camada de ozônio e o aquecimento global. Entre os gases que contribuem para a ocorrência do aquecimento global

estão o dióxido de carbono, o metano e o clorofluorcarbono, que causam o aumento da temperatura média da Terra (OLIVEIRA, 2009).

2.2.1.2 Industrialização

Nessa etapa ocorre o gasto de diversos recursos naturais e de uma enorme quantidade de energia elétrica, sendo que a fabricação de cimento é a 7ª atividade industrial no Brasil que mais consome energia, gerando efluentes líquidos e gasosos, resíduos sólidos, gastando combustíveis fósseis e gerando alta emissão de gases causadores do Efeito Estufa (AMDA, 2011). Os principais gases que contribuem para o aumento do efeito estufa são: dióxido de carbono - CO₂, metano - CH₄, óxido nitroso - N₂O, clorofluorcarbonetos - CFCs. (CETESB - PROCLIMA - Programa Estadual de Mudanças Climáticas do estado de São Paulo).

Segundo dados do *Technology Roadmap* publicados em 2018 pela *International Energy Agency* (WBCSD/IEA, 2018), o setor de cimento é o terceiro maior consumidor industrial de energia do mundo, responsável por 7% do uso de energia industrial, e o segundo emissor industrial de CO₂. Na Figura 1 observa-se um gráfico indicando a distribuição de demanda de energia elétrica e térmica em cada etapa dos processos de produção do cimento.

Figura 1- Distribuição da demanda de energia por etapa do processo

Fonte: *Technology Roadmap – Low-Carbon Transition in the Cement Industry* (2018), adaptado pela autora.

De acordo com o Sindicato Nacional Da Indústria Do Cimento (SNIC), para tentar amenizar essa situação, algumas fábricas de cimento estão cada vez mais utilizando energias renováveis. Isto ocorre através do coprocessamento de resíduos.

Segundo o Art. 2o CAPÍTULO 1 das Disposições Gerais da RESOLUÇÃO CONAMA nº 264, de 26 de agosto de 1999, o coprocessamento de resíduos deverá atender aos critérios técnicos fixados nessa Resolução e ser complementado sempre que necessário, pelos Órgãos Ambientais competentes, de modo a atender as peculiaridades regionais e locais.

Conforme o Art. 5o e o Art. 6o do CAPÍTULO 1 da Resolução, o modo como será feito o coprocessamento de resíduos em fornos de produção de clínquer, deverá garantir a

manutenção da qualidade ambiental, evitar danos e riscos à saúde e estar de acordo com os padrões de emissão fixados nesta Resolução e o produto final (cimento), não deverá conter substâncias ou elementos em quantidades que possam prejudicar a saúde humana e o meio ambiente.

Essa solução é reconhecida oficialmente, visto que os procedimentos do coprocessamento são regulamentados por normas estaduais e federais. Em 2015, foram coprocessados pela indústria do cimento nacional 1,07 milhão de toneladas de resíduos. Segundo um inventário de coprocessamento realizado em 2016 com os dados relativos a 2015, 67% do parque industrial brasileiro possui fornos rotativos licenciados para o coprocessamento de resíduos (ABCP, 2016).

Segundo a ABCP (2020), o coprocessamento além de dar uma destinação ambientalmente adequada a esses rejeitos, também reduz o uso de combustíveis tradicionais não-renováveis. Ao substituir combustíveis fósseis e matérias primas utilizadas na fabricação do cimento, promove a preservação das jazidas e reduz a emissão de CO₂.

2.2.1.3 Embalagem e transporte

Nessa etapa ocorre o gasto indireto, como fabricação de veículos, e direto de recursos naturais (queima de combustíveis fósseis - gasolina, óleo diesel, graxas), emissão de gases causadores de Efeito Estufa e geração de resíduos sólidos (AMDA, 2011).

2.2.1.4 Consumo

O consumo do cimento gera resíduos como as embalagens feitas de papel que são recicláveis e entulhos restantes de obras ou demolição que também podem ser reciclados (AMDA, 2011).

2.2.2 Consumo mundial e brasileiro de cimento

2.2.2.1 Consumo mundial de cimento

Segundo dados do *Technology Roadmap* publicados em abril de 2018 pela *International Energy Agency* (WBCSD/IEA, 2018), conforme a população mundial aumenta e mais pessoas se mudam para as cidades, a produção global de cimento deverá crescer de 12 a 23% até 2050, sendo que as emissões diretas de carbono da indústria de cimento deverão aumentar em 4% globalmente até 2050.

De acordo com um relatório da *International Energy Agency* (IEA) e *Cement Sustainability Initiative* (CSI), uma maneira de reduzir as emissões diretas de dióxido de carbono da indústria de cimento seria uma combinação de tecnologia e soluções políticas, o que resultaria em uma redução de 24% dos níveis atuais até 2050 (WBCSD, 2018).

Os principais métodos de mitigação de carbono disponíveis na fabricação de cimento são: melhorar a eficiência energética, utilizar combustíveis alternativos, reduzir o conteúdo de clínquer no cimento e implantar tecnologias emergentes e inovadoras, como captura de carbono e uso de materiais de ligação alternativos (WBCSD, 2018).

Além disso, considerar o ciclo de vida geral de cimento, concreto e o ambiente construído diminui as emissões, pois pode incluir a otimização do uso do concreto na construção, maximizando a vida útil dos edifícios e infraestruturas, incentivando a reutilização e a reciclagem, reduzindo o desperdício e beneficiando-se das propriedades do concreto para diminuir as necessidades de energia para aquecimento e resfriamento de edifícios (WBCSD, 2018).

De acordo com a *US Geological Survey/Mineral Commodity Summaries* – USGS (2018), em 2016, a produção mundial de cimento totalizou 4,2 bilhões de toneladas, sendo que no ranking mundial, o Brasil caiu da 6ª para a 9ª posição, com participação de 1,4%.

Na Figura 2 disponível na *Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry* (2018), há uma estimativa da produção do cimento por regiões desde 2014 a 2050.

Figura 2 - Produção de cimento por região

Fonte: *Technology Roadmap – Low-Carbon Transition in the Cement Industry* (2018), adaptado pela autora.

Segundo o SNIC, desde o início dos anos 2000, a indústria do cimento global apoia um dos maiores programas de sustentabilidade já realizados por um único setor industrial, conhecida como *Cement Sustainability Initiative* - CSI, desenvolvida por 23 das maiores empresas produtoras de cimento no mundo em prol da sustentabilidade, operando em mais de

100 países. Nesse programa foram criados indicadores globais durante 24 anos, de 1990 a 2014, com dados da América do Norte, Comunidade Dos Estados Independentes (CEI)¹, Oriente Médio, China e Japão e Coreia, Ásia e Oceania, América Central, Europa, África, Índia, Brasil e América do Sul. Entre os principais indicadores globais estão: Emissão Específica (Kg CO₂/t cimento), Consumo Térmico (MJ/t clínquer), Adições ao Cimento e Combustíveis Alternativos (%).

2.2.2.2 Consumo brasileiro de cimento

De acordo com a Associação dos Produtores de Cimento Portland, a queda da construção civil, em 2016, diminuiu o consumo da indústria do cimento, totalizando 65 milhões de toneladas (SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL, 2017). Na Tabela 4 observa-se o consumo de cimento Portland no Brasil por regiões.

Tabela 4 - Consumo de cimento Portland no Brasil por Região

Anos	Consumo aparente (10 ³ t)	Per capita (kg/hab)
Região Norte		
2012	5.014	311
2013	5.270	310
2014	5.227	213
2015	4.767	273
2016*	4.000	226
Região Nordeste		
2012	14.607	271
2013	15.351	275
2014	16.546	335
2015	15.411	272
2016*	13.400	235
Região Centro-Oeste		
2012	6.714	468
2013	6.982	466
2014	6.971	458
2015	6.174	400
2016*	5.100	326
Região Sudeste		
2012	31.438	385
2013	31.559	374
2014	31.213	367
2015	27.994	326
2016*	25.100	291

(Continua)

¹ Países que compõem a CEI: Armênia, Azerbaidjão, Belarus, Cazaquistão, Federação Russa, Geórgia, Moldávia, Quirquístão, Tadjiquistão, Turcomenistão, Ucrânia e Uzbequistão.

Anos	Consumo aparente ($10^3 t$)	Per capita (kg/hab)
Região Sul		
2012	11.551	413
2013	11.812	410
2014	11.745	405
2015	10.969	375
2016*	10.200	346

(Conclusão)

Fonte: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (2017).

Na Tabela 5 observa-se o consumo de cimento por toneladas no Brasil de 1950 a 2016. No início, em 1950 o consumo era mínimo 1790 $10^3 t$ e em 2014 chegou ao ápice com 71.700 $10^3 t$, seguido por reduções no consumo devido aos fatores citados acima.

Tabela 5 - Consumo de Cimento no Brasil ($10^3 t$)

Anos	Consumo Aparente	Per capita (kg/hab)
1950	1.790	34
1960	4.449	63
1970	9.328	100
1975	16.883	160
1980	26.911	227
1985	20.549	155
1990	25.980	177
1995	28.514	179
2000	39.710	232
2006	41.027	221
2007	45.062	240
2008	51.571	272
2009	51.892	271
2010	60.008	315
2011	64.972	338
2012	69.324	357
2013	70.967	353
2014	71.700	353
2015	65.315	320
2016	57.800	280

Fonte: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (2017).

Segundo o SNIC, quando as unidades locais não são capazes de atender rapidamente a demanda, as próprias fábricas de cimento realizam importações, principalmente de cimento Portland Comum e clínquer. Mais de 78% das importações brasileiras de cimento foram

provenientes da Espanha, Turquia e México. Na Tabela 6 observa-se os dados sobre as importações realizadas.

Tabela 6 - Importação Brasileira 2016

País	t	US\$
Espanha	273.400	13.328.372
Turquia	266.441	12.337.617
México	53.672	6.978.972
Venezuela	92.394	3.880.548
Dinamarca	29.700	2.704.798
França	1.907	1.306.475
Outros	10.307	1.147.324
Total	727.821	41.684.106

Fonte: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (2017).

Segundo a Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (2016), em 2015 o consumo de cimento per capita brasileiro foi de 321kg/hab. Sendo que a média mundial estimada foi de 561kg/hab. Já em 2016 houve uma queda, o consumo per capita brasileiro foi de 280kg/hab e a média mundial foi estimada em mais de 500kg/hab (ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO SETOR DE TRANSFORMAÇÃO DE NÃO METÁLICOS, 2017). Isso se deve a queda no setor da construção civil que o Brasil vem enfrentando.

Diante das informações citadas nesse capítulo, observa-se a importância de medidas que minimizem os impactos ambientais gerados. Entre elas estão, as estratégias para reduzir as emissões de CO₂ durante a produção do cimento, que serão apresentadas no próximo capítulo.

3 ESTRATÉGIAS PARA REDUZIR AS EMISSÕES DE CO₂ DURANTE A PRODUÇÃO DO CIMENTO

Como visto anteriormente, o uso crescente do concreto na construção civil aumenta o uso do cimento e consequentemente eleva os impactos gerados no meio ambiente. Uma das causas desse impacto é a liberação do dióxido de carbono que ocorre principalmente na etapa de produção do clínquer durante a fabricação do cimento. Segundo Damineli (2013), há três estratégias consolidadas para reduzir as emissões de CO₂ durante a produção do cimento, são elas: a utilização de combustíveis alternativos, como bio-combustíveis, a busca da eficiência energética no processo de produção, a partir dos fornos e dos processos de calcinação e a substituição do clínquer por adições minerais como sílica ativa, cinzas volantes e escória de alto forno.

O *World Business Council For Sustainable Development* - WBCSD (2018), disponibilizou estimativas médias globais da composição do cimento de 2014 a 2050, conforme Figura 3.

Figura 3 - Estimativas globais médias da composição do cimento

Fonte: *Technology Roadmap – Low-Carbon Transition in the Cement Industry* (2018), adaptado pela autora.

Observa-se que mesmo com as adições na produção do cimento a previsão de redução do clínquer é mínima, apenas 5%.

3.1 Adições minerais para a substituição do clínquer

Entre as estratégias atuais para reduzir a emissão de CO₂ durante a produção de cimento, serão abordadas as adições minerais.

3.2 Sílica ativa (SA)

A sílica ativa é uma pozolana, subproduto da produção de ligas de silício. Consiste em partículas de sílica amorfa esférica e finamente divididas com diâmetro médio de 0,1µm,

possuindo alta reatividade com os produtos de hidratação do cimento Portland, o que proporciona melhor empacotamento das partículas de cimento. Por possuir alta reatividade, induz um aumento nas resistências mecânicas iniciais e finais do concreto (BARATA, 1998).

Segundo Vagheti (1999), o custo unitário desse material é elevado, por ser um subproduto industrializado, por isso, a sílica torna-se relativamente cara quando utilizada em altos teores e combinada somente com o cimento Portland.

3.3 Cinza volante (CV)

A cinza volante é obtida pela queima do carvão mineral em usinas termoeletricas. Esse material contribui na trabalhabilidade e na velocidade de desenvolvimento da resistência do concreto endurecido quando possui finura adequada, pois apresenta uma boa reatividade, (VAGHETTI, 1999).

Segundo estimativas médias globais da composição do cimento disponibilizada pela WBCSD (2018), em 2050 o uso de cinzas volantes ao invés de aumentar reduzirá de 6% para 1% se comparado a 2014. Conforme Figura 3.

3.4 Escória de alto forno (EAF)

Segundo a ABNT NBR NM 16697, durante a produção do gusa, resultante do tratamento de minério de ferro em alto-forno, é obtida a escória granulada de alto-forno, um subproduto constituído principalmente por silicatos e alumino-silicatos de cálcio. Através do resfriamento brusco a escória é obtida sob forma granulada, na forma vítrea (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018).

De acordo com Damineli (2013), no mundo há locais que não possuem estes materiais em escala suficiente, e em outros, esses materiais estão disponíveis em quantidades suficientes ou excedentes. Logo, para que o mesmo nível de sustentabilidade seja atingido mundialmente, será necessário adotar novos materiais para a substituição de clínquer, pois a longo prazo a tendência é de diminuição da produção da escória de alto forno e cinza volante.

Esta estimativa também pode ser observada nos gráficos da Figura 3 disponibilizados pela WBCSD (2018) que prevê a redução de 13% para 7% do uso de escórias de alto forno.

Esse panorama justifica o aprofundamento do estudo e o uso de outras opções que substituam o clínquer e a necessidade de redução do uso total de ligantes.

3.5 Eficiência do uso do cimento

Devido ao consumo elevado de cimento no mundo e à previsão do aumento do seu uso ao longo dos anos, uma medida importante para a redução da emissão de dióxido de carbono, considerada uma nova estratégia, é o aumento da eficiência do uso de ligantes no concreto. Através da otimização de sistemas de empacotamento é possível produzir com a mesma quantidade de cimento utilizada atualmente maiores quantidades de concreto.

Damineli (2013) propõe dois indicadores que podem ser utilizados na análise do desempenho do concreto considerando a emissão de CO₂ ao longo dos processos que envolvem a sua produção. São eles: o indicador de Intensidade de Ligantes (IL_{rc}) e o indicador de Intensidade de CO₂ (IC_{rc}).

3.6 Intensidade de ligantes (ILRC)

Segundo Damineli (2013), a Intensidade de ligantes (IL_{rc}) é um indicador que analisa o comportamento da resistência mecânica do concreto, quando submetido à compressão uniaxial, em relação a quantidade total de aglomerantes utilizados para a sua produção [Kg/m³], como cinzas volantes, escória de alto forno, material pozzolânico ou clínquer.

O cálculo é realizado através da seguinte equação:

$$IL = \frac{l}{Rc}$$

Onde:

l: consumo total de ligantes [Kg/m³];

Rc: resistência à compressão uniaxial em certa idade [Mpa].

3.7 Intensidade de CO₂ (ICRC)

De acordo com Damineli (2013), a Intensidade de CO₂ (IC_{rc}) relaciona a quantidade de gás carbônico produzida pelo concreto à sua resistência à compressão uniaxial. Assim, é possível identificar os concretos com maior desempenho ambiental quando apuradas a proximidade ou equivalência de suas resistências, ou para o caso de quantidades similares de emissão de CO₂, aquelas que apresentam maior eficiência.

O cálculo é realizado pela seguinte equação:

$$IC = \frac{c}{Rc}$$

Onde:

c: emissão total de CO_2 [Kg/m^3] gerada pela produção e transporte de todos os materiais constituintes do concreto.

R_c : resistência à compressão uniaxial em certa idade [Mpa].

3.8 Avaliação dos indicadores ILRC E ICRC

O IL_{rc} e o IC_{rc} permitem uma rápida e objetiva comparação de diferentes misturas. Enquanto a Intensidade de ligantes (IL_{rc}) avalia a eficiência do uso dos ligantes, a Intensidade de CO_2 (IC_{rc}) permite a realização de uma estimativa do potencial de aquecimento global da mistura. Juntos, os indicadores possibilitam uma abordagem de fácil entendimento sobre a eficiência do uso do cimento e a avaliação da eficiência do processo como um todo (DAMINELI, 2013).

Na Figura 4 observa-se que conforme aumenta a resistência à compressão ocorre a diminuição do IL_{rc} (DAMINELI, 2013).

Figura 4 - Intensidade de ligantes (IL_{rc}) versus resistência à compressão aos 28 dias. As linhas representam concretos com o mesmo teor total de ligantes, Kg. M-3

Fonte: Daminieli (2013).

Damineli mostra que, para diminuir o IL, uma das principais estratégias é o aumento do empacotamento, pois este permite usar menos cimento mantendo a resistência, com aumento da eficiência através da diminuição do IL (vide fórmula). Portanto, esta dissertação tem papel importante no aumento da eficiência, já que estuda métodos de empacotamento.

Visto a importância da estratégia de empacotamento, no capítulo 4, serão apresentados estudos sobre o empacotamento de agregados, em que consiste e alguns modelos existentes.

4 EMPACOTAMENTO DE AGREGADOS

4.1 O que é empacotamento de agregados?

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o termo empacotamento pode ser representado quantitativamente pela densidade de empacotamento, definida como o volume de sólido em uma unidade de volume total.

A dosagem de um concreto deve buscar a otimização da distribuição das partículas que compõem o material, ou seja, obter uma mistura com o mínimo de vazios e com alta densidade (VANDERLEI, 2004). Através do controle da distribuição granulométrica é possível otimizar a densidade de empacotamento em sistemas compostos por partículas não esféricas (OLIVEIRA et al., 2000).

De acordo com Londero et al. (2017), o empacotamento de partículas em concretos e argamassas está adquirindo cada vez mais importância no âmbito técnico, devido ao fato de muitas das propriedades dos materiais compósitos serem influenciadas pelo índice de vazios e pela concentração de sólidos.

De Larrard (2011) diz que a densidade de empacotamento de uma mistura granular é definida como o volume sólido em um volume total unitário ou pelo índice de vazios. Segundo o autor, o tamanho dos grãos, a forma dos grãos e o método de processamento do empacotamento são três parâmetros principais que interferem na densidade de empacotamento de uma mistura de grãos polidispersos.

4.1.1 Fatores que influenciam o empacotamento de partículas

4.1.1.1 Distribuições granulométricas

A granulometria e o diâmetro dos agregados afetam tanto a quantidade de agregado a ser utilizada, como o consumo de cimento, de água, a trabalhabilidade, a bombeabilidade e a durabilidade do concreto. Em geral, para determinada resistência, se a relação água/cimento é adequada, uma maior variabilidade de distribuições granulométricas pode ser utilizada (RODOLPHO, 2007).

Porém, algo a se considerar é que durante o empacotamento a diferença do diâmetro dos grãos utilizados pode provocar o efeito de afastamento e o efeito parede (DE LARRARD, 2011; FENNIS, 2011; LONDERO et al., 2017).

O “efeito de afastamento” ocorre quando um grão de menor granulometria é inserido em um empacotamento de grãos maiores, provocando localmente um afastamento dos grãos.

Isso ocorre porque apesar da menor granulometria, o grão não é pequeno o suficiente para ocupar o espaço existente. Esse fenômeno é denominado efeito de afastamento do agregado menor sobre o maior (DE LARRARD, 2011; FENNIS, 2011; LONDERO et al., 2017).

Segundo De Larrard (2011), se um grão de menor granulometria é inserido na porosidade de grãos maiores, dominantes, porém não sendo capaz de caber em um vazio ocorre localmente uma diminuição do volume de grãos de maior granulometria, ocorrendo o efeito de afastamento. Sendo que se cada grão fino está suficientemente longe do próximo, este efeito pode ser considerado como uma função linear do volume de grãos de menor granulometria. De modo que:

$$\begin{aligned}\gamma &= \Phi_1 + \Phi_2 = \beta_1(1 - \lambda_{2 \rightarrow 1}\Phi_2) + \Phi_2 \\ &= \beta_1 + (\Phi_1 + \Phi_2)(1 - \beta_1\lambda_{2 \rightarrow 1})\gamma_2 \\ &= \beta_1 + \gamma(1 - \beta_1\lambda_{2 \rightarrow 1})\gamma_2\end{aligned}\tag{1}$$

Onde:

$\lambda_{2 \rightarrow 1}$ é uma constante que depende das características de ambos os grãos.

β_1 é a densidade de empacotamento.

γ_2 é a fração de volume mútuo.

Φ_1 e Φ_2 são os volumes parciais

γ é a densidade do empacotamento.

Então a densidade de empacotamento é:

$$\gamma = \gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - (1 - \beta_1\lambda_{2 \rightarrow 1})\gamma_2}\tag{2}$$

Segundo De Larrard, para adotar um modelo contínuo que cubra todos os casos, é preferível a seguinte fórmula:

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - (1 - \alpha_{12}\beta_1/\beta_2)\gamma_2}\tag{3}$$

Onde:

α_{12} é o coeficiente de efeito de afastamento. Quando $d_1 \geq d_2$ (sem interação), $\alpha_{12} = 0$, enquanto quando $d_1 = d_2$ (interação total), $\alpha_{12} = 1$.

d_1 e d_2 são o diâmetro dos agregados.

β_1 e β_2 são a densidade de empacotamento.

γ_2 é a fração de volume mútuo.

Já o “efeito de parede” ocorre quando um grão de maior granulometria é inserido em um empacotamento cujos grãos de menor granulometria são dominantes. O maior grão provoca um aumento de vazios ao redor da sua superfície, como se os grãos da classe menor conservassem sua compacidade própria em presença dos grãos da classe maior, mas dispusessem de um volume reduzido para serem empacotados (DE LARRARD, 2011; FENNIS, 2011; e LONDERO et al., 2017).

Na Figura 5 observa-se empacotamento contendo grãos com três granulometrias diferentes, indicando ao mesmo tempo o efeito de afastamento e o efeito parede, que são indicados por classes de granulometrias diferentes.

Figura 5 - Interação entre partículas: a) efeito de afastamento nos grãos de classe 2 provocado pela classe 3 de grãos; e b) efeito parede, em que grãos da classe 2 são influenciados pela proximidade com grãos de classe 1

Fonte: DE LARRARD (2011), adaptado pela autora.

Conforme De Larrard (2011), quando alguns grãos maiores são colocados em uma maior quantidade de grãos finos, dominantes, aumenta a quantidade de vazios no empacotamento de grãos de maior granulometria localizados ao redor da interface, provocando o chamado efeito parede. Se os grãos maiores estiverem suficientemente distantes uns dos outros, essa perda de volume sólido pode ser considerada proporcional para $\Phi_1/(1 - \Phi_1)$, podendo ser escrito como:

$$\begin{aligned}
 \gamma &= \Phi_1 + \Phi_2 \\
 &= \Phi_1 + \beta_2 \left(1 - \frac{\Phi_1}{1 - \Phi_1} \lambda_{1 \rightarrow 2} \right) (1 - \Phi_1) \\
 &= \beta_2 + \gamma [1 - \beta_2 (1 + \lambda_{1 \rightarrow 2})] \gamma_1
 \end{aligned} \tag{4}$$

Onde $\lambda_{2 \rightarrow 1}$ é outra constante, dependendo das características de ambos os grãos. Então a densidade de empacotamento é:

$$\gamma = \gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - [1 - \beta_2 (1 + \lambda_{1 \rightarrow 2})] \gamma_1} \quad (5)$$

Porém é preferível escrever da seguinte forma:

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - [1 - \beta_2 + b_{21} \beta_2 (1 - \frac{1}{\beta_1})] \gamma_1} \quad (6)$$

Onde:

b_{21} é o coeficiente de efeito de parede. Quando $d_1 \gg d_2$ (sem interação), $b_{21} = 0$, enquanto quando $d_1 = d_2$ (interação total), $b_{21} = 1$.

Existe também o efeito de cunha que pode ocorrer de duas formas; 1) quando as partículas grossas são dominantes e alguma partícula fina fica encaixada nos espaços entre as partículas grossas ao invés de preencher os vazios existentes; e 2) quando as partículas finas são dominantes e algumas partículas grossas que estão próximas entre si, impedem a formação de camadas de partículas finas entre elas, resultando na formação de vazios entre as partículas grossas (WONG; CHAN; KWAN, 2013). Essas duas situações de efeito de cunha podem ser observadas na Figura 6.

Figura 6 – Efeito de cunha: a) O efeito de cunha quando as partículas grossas são dominantes; e b) O efeito de cunha quando as partículas finas são dominantes

Fonte: Wong; Chan; Kwan (2013), adaptado pela autora.

4.1.1.2 Porosidade ou Índice de vazios

A porosidade interna das partículas é outro fator complicador na obtenção de empacotamentos de alta densidade relativa. Partículas com porosidade fechada, para efeitos de distribuição granulométrica, são similares às densas, mas, produzem uma mistura menos densa. A existência de porosidade aberta nas partículas provoca alteração no empacotamento das mesmas, uma vez que essas apresentam formato irregular. Além disso, partículas desse tipo possuem uma maior capacidade de absorção de fases líquidas através dos poros afetando as

condições de processamento, pois, em geral, precisam de um maior teor de líquido nas misturas. Além disso, por apresentarem porosidade, também resultam em misturas com menores densidades de empacotamento. As partículas podem ser totalmente densas, com porosidade interna fechada, ou com porosidade aberta, como pode ser visto na Figura 7 (OLIVEIRA et al., 2000).

Figura 7 - Representação esquemática das formas de poros que podem ocorrer nas partículas: (a) partícula densa (isenta de poros); (b) partícula com poro interno fechado; (c) partícula com poros abertos

Fonte: Oliveira et al (2000).

Para que haja um empacotamento de máxima densidade para uma determinada distribuição granulométrica, é necessário que sejam utilizadas partículas densas e com a menor porosidade possível, entretanto, essas partículas não são as mais usuais. Quando as partículas introduzidas são maiores que os vazios existentes, essas provocarão o surgimento de novos vazios pelo deslocamento das partículas maiores de suas posições originais, o que poderá levar a um aumento na porosidade e diminuição da eficiência do empacotamento. Logo, a distribuição granulométrica do sistema determina o aumento ou não da densidade de empacotamento da monodispersão (OLIVEIRA et al., 2000).

4.1.1.3 Morfologia das partículas

A morfologia, ou seja, a sua forma é um fator que pode alterar a condição de empacotamento das partículas. Quanto mais afastada do formato esférico for a partícula, menor é a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha. Isso ocorre devido ao contato das superfícies irregulares das mesmas gerando a fricção interparticular. Quanto menor o tamanho das partículas irregulares, maior esse efeito, em função da maior área superficial específica. Além disso, devido a considerações geométricas a forma das partículas pode gerar estruturas que não alcançarão um máximo empacotamento (OLIVEIRA et al., 2000).

Isso ocorre porque a forma dos grãos influencia na acomodação das partículas, uma em relação às outras. Quanto mais distante da forma esférica os grãos se apresentarem, maior será o espaço vazio entre as partículas, o que resulta na diminuição da densidade de empacotamento (LONDERO et al., 2017).

De acordo com Londero et al., (2017), os grãos podem apresentar forma bastante esférica, forma mais angulosa e, em alguns casos, grãos alongados. Devido a essas variedades, os grãos devem ser combinados de modo a ocupar o maior volume possível, visando reduzir o índice de vazios destes materiais o que favorece a resistência mecânica e durabilidade do material final.

A relação entre esses mecanismos, de forma simplificada, irá definir o consumo de pasta necessário para preencher os vazios dos grãos, minimizar o atrito entre as partículas e garantir a consistência e a capacidade do concreto se deformar plasticamente (RODOLPHO, 2007).

4.1.1.4 Técnica de compactação

Além dos fatores citados acima, para que o sistema consiga atingir seu máximo empacotamento é necessário considerar como as partículas são colocadas em suas devidas posições. Para compreender esse conceito, imagina-se um sistema de partículas densas e esféricas distribuídas segundo o modelo de Alfred, com coeficiente $q = 0,37$ (máximo empacotamento), no qual suas partículas sejam distribuídas em dois recipientes de maneiras distintas: no primeiro (a), as partículas são subdivididas em suas monodispersões e depositadas em um recipiente - começando pelas partículas de menor diâmetro - formando camadas sucessivas de partículas de um único diâmetro; no segundo (b), as partículas são depositadas aleatoriamente e o recipiente é submetido à vibração para que as partículas possam se movimentar umas em relação às outras, atingindo assim suas posições de equilíbrio no empacotamento. Fatores que podem ser observados na Figura 8 (OLIVEIRA et al., 2000).

Figura 8 - Modelos esquemáticos que apresentam duas formas de empacotamento para uma mesma distribuição granulométrica: (a) camadas monodispersas; (b) empacotamento aleatório submetido a vibração. A faixa cinza em (b) representa a redução no espaço ocupado pelas partículas devido ao melhor empacotamento

Fonte: Oliveira et al (2000).

Como observado na figura acima, dependendo da técnica de compactação empregada uma mesma distribuição pode gerar empacotamentos distintos. No caso do empacotamento em camadas sucessivas, cada camada monodispersa possui o mesmo fator de empacotamento, dessa forma, a utilização de diversos diâmetros não contribui para a ocupação dos espaços

vazios existentes entre as partículas, sendo o empacotamento global o mesmo da monodispersão. Já no segundo caso, quando as partículas menores ocupam os interstícios entre as maiores, ocorre a otimização do empacotamento diminuindo a porosidade do sistema (OLIVEIRA et al., 2000).

Ao realizar a vibração, tem-se como precauções que a mistura não seja vibrada por período, ou com frequência/amplitude inadequadas, pois poderia ocasionar desde baixas densidades de empacotamento devido à falta de energia de compactação, até segregações por excesso de energia empregada (OLIVEIRA et al., 2000).

4.1.1.5 Estado de dispersão das partículas

Partículas muito finas podem causar uma dificuldade adicional na obtenção de altas densidades de empacotamento por possuir uma maior tendência à aglomeração. Devido à tendência ao aumento das forças coesivas interparticulares, a sua maior relação entre a área superficial e o volume (massa). Esse efeito de aglomeração tende a inibir a coordenação espacial que leva as maiores densidades de empacotamento (OLIVEIRA et al., 2000).

Os aglomerados formados equivalem a partículas ocas, sendo talvez até mais prejudicial que a alteração do diâmetro mínimo de partícula, pois originam poros na microestrutura, prejudiciais à resistência mecânica dos produtos gerados. A porosidade interna dos aglomerados é evidenciada pela maior quantidade de água necessária para mistura dos concretos e/ou suspensões cujas partículas finas não foram adequadamente dispersas (OLIVEIRA et al., 2000).

4.2 Análise de métodos de empacotamento

Como citado no item anterior, há diversos estudos que mostram a importância do empacotamento de agregados. Há métodos teóricos que são realizados com o auxílio de fórmulas e experimentais realizados em laboratório.

4.2.1 Modelos de empacotamento de partículas

Segundo Oliveira et al., (2000), os estudos teóricos e experimentais de empacotamento de partículas geraram duas abordagens básicas: uma discreta, que considera as partículas individualmente, tendo Furnas como um dos expoentes; e outra proposta por Andreasen, que trata as partículas como distribuições contínuas. Um aprimoramento dos modelos citados anteriormente originou o modelo de Alfred, mostrando que os modelos de Furnas e Andreasen podem ser visualizados como duas formas distintas de se expressar a mesma coisa.

Na história do concreto, desde o século XIX houve o interesse no conceito de empacotamento de agregados, sendo que a maioria dos primeiros pesquisadores dessa área propuseram métodos para projetar uma curva ideal de distribuição de tamanho de agregados, como é o caso de Fuller e Thompson em 1907 e de Andreasen e Andersen em 1930 (FENNIS, 2011).

Segundo Furnas (1929, apud Fennis, 2011) os primeiros modelos de empacotamento analítico foram projetados com o objetivo de prever a taxa de vazios de uma mistura de dois grupos de partículas não sendo ainda considerada a interação entre elas. Nesse período, foram formulados modelos de dois componentes com interação, como é o caso do modelo de Ben Aïm e Le Goff (1967). Na sequência foram desenvolvidos modelos de empacotamento de múltiplos componentes com interação, como o modelo de De Larrard (1999). Desde o uso do computador, foram divulgados vários programas e modelos modificados que se baseiam nos modelos de empacotamento analítico, como: Europack (Idorn, 1995), RENÉ-LCPC (lcpc.fr) e 4C-Packing (dti.dk).

Em 1980, Funk e Dinger indicaram o tamanho mínimo de partícula no empacotamento. E nesse período vários pesquisadores propuseram diferentes valores para o expoente na equação, com o objetivo de ajustar a curva de concreto auto-adensável ou concreto de alto desempenho (FENNIS, 2011).

Segundo Fennis (2011), os métodos de otimização do tamanho das partículas podem ser divididos em três grupos. São eles: Curvas de otimização em modelos de empacotamento de partículas, Modelos de empacotamento de partículas e Modelos de elementos discretos.

4.2.1.1 Curvas de otimização em modelos de empacotamento de partículas

São modelos analíticos, em que é realizado o cálculo da densidade global de empacotamento de uma mistura baseada na geometria do conjunto de partículas. Nesse método os conjuntos de partículas são combinados de maneira que a distribuição do tamanho de partícula da mistura seja a mais próxima da curva ótima.

Segundo Fennis (2011), desde 1892, quando Feret propôs que a escolha dos agregados influencia a resistência do concreto, muitos pesquisadores tentaram encontrar a curva de graduação ideal. Entre eles está Fuller, cujos cálculos baseados em sua curva são ainda utilizados.

$$P(d) = \left(\frac{d}{d_{max}} \right)^q \quad (7)$$

$P(d)$ é a função de distribuição cumulativa de tamanho (-)

d é o diâmetro da partícula (m)

$d_{\max}$ é o diâmetro máximo de partícula em uma mistura (m)

q é o expoente

Alguns pesquisadores tentaram melhorar essa curva, como Andreasen e Andersen (1930), propondo o uso de um expoente q no intervalo de 0,33 a 0,50. Sendo um fator de ajuste determinado experimentalmente, que pode ser diferente dependendo das características das partículas FENNIS (2011).

4.2.1.1.1 Modelo de Andreasen: abordagem continua

Andreasen, mostrou que, em distribuições reais de partículas, todos os tamanhos podem estar presentes e por isso ao desenvolver uma teoria para o empacotamento de partículas as distribuições deveriam ser consideradas contínuas. (OLIVEIRA et al., 2000).

4.2.1.1.2 Modelo de Alfred

Segundo Oliveira et al (2000), Funk e Dinger realizaram uma extensa análise comparativa entre os modelos mais significativos de empacotamento de partículas, tanto discretos como contínuos, resultando nas seguintes considerações: 1- no modelo generalizado de Furnas, a quantidade de partículas finas de diâmetros distintos, adicionada para construir a distribuição, forma uma progressão geométrica. 2 - a distribuição de Andreasen gera uma linha reta, quando representada graficamente em uma escala log-log, indicando também uma progressão geométrica. A partir de tal análise provaram que os modelos de Furnas e Andreasen convergem matematicamente para uma única equação.

Comparando as densidades obtidas experimentalmente, observa-se que existem diferenças consideráveis entre os modelos citados. Em relação a eficiência de empacotamento resultante das diversas distribuições de máxima densidade, obtêm-se a seguinte sequência: Alfred > Andreasen > Furnas (OLIVEIRA et al., 2000).

4.2.1.2 Modelos de empacotamento de partículas

Esses modelos são baseados em equações matemáticas que mostram como partículas de tamanhos diferentes interagem geometricamente, porém não consideram a interação entre os grupos de partículas. Sendo realizado o cálculo da densidade de empacotamento teórico de

uma mistura, baseado na distribuição do tamanho de partícula e na densidade de empacotamento dos grupos de partículas. As equações foram introduzidas primeiramente por Furnas em 1929. Nesse modelo, são considerados dois grupos de partículas (FENNIS, 2011).

4.2.1.2.1 Modelo de Furnas: abordagem discreta

Furnas desenvolveu procedimentos para o cálculo do volume aparente de misturas binárias e de misturas multicomponentes. O tratamento dado às distribuições de partículas é típico de distribuições discretas e o empacotamento máximo ocorre quando as partículas finas preenchem completamente os vazios existentes entre as maiores (OLIVEIRA et al., 2000).

Além disso, mostrou que as proporções dos vários tamanhos de partículas presentes na elaboração de uma distribuição de máxima densidade de empacotamento formam uma progressão geométrica, generalizando sua teoria para qualquer mistura polimodal (infinitos diâmetros discretos), a qual, na realidade, corresponde a distribuições contínuas que satisfazem a seguinte equação: (OLIVEIRA et al., 2000).

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_p^{\log r} - D_s^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_s^{\log r}} \right) \quad (8)$$

Onde:

CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que D_p ,

D_p é o diâmetro da partícula,

D_s é o diâmetro da menor partícula,

D_L é o diâmetro da maior partícula

r é a razão entre o volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas.

$$CPFT(\%) = 100 \left[\frac{D^{\log r} - D_s^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_s^{\log r}} \right] \quad (9)$$

$$CPFT(\%) = 100 \left[\frac{D}{D_L} \right]^q \quad (10)$$

Dentre os modelos analíticos, o modelo de De Larrard denominado CPM, possibilita prever a densidade de empacotamento de conjuntos granulares polidispersos compostos por n classes de tamanhos de grãos (LONDERO et al, 2017).

4.2.1.2.2 Modelos de elementos discretos

Segundo FENNIS (2011), os modelos de elementos discretos são realizados no computador gerando uma estrutura virtual de partículas a partir de uma determinada distribuição de tamanho de partícula. Enquanto nos primeiros modelos, uma vez que colocada a partícula não mudaria mais sua posição, nas simulações estáticas, geralmente as partículas são colocadas aleatoriamente em um espaço definido, começando pelas partículas maiores resultando em um espaço tridimensional preenchido com partículas de tamanhos diferentes, que normalmente não têm contato entre si. Desse modo, o resultado não é oficialmente uma estrutura de empacotamento ou empacotamento. Como exemplos há o modelo de hystrotrac (citg.tudelft.nl) ou o modelo utilizado por Zheng e Stroeve (1999), que podem ser vistos na Figura 9.

Figura 9 - Modelos de elementos discretos que criam uma estrutura de partículas sem que as partículas se toquem (lado esquerdo (Zheng e Stroeve, 1999) ou uma estrutura estável de partículas (lado direito (Fu e Dekelbab, 2003))

Fonte: Fennis (2011).

Segundo De Larrard (2011), a densidade de empacotamento virtual do conjunto granular é definida como a densidade encontrada quando cada partícula do sistema é posicionada uma a uma e mantém sua forma original. Na prática a sua realização não é viável.

De acordo com Fennis (2011), com o avanço computacional, os modelos evoluíram para dinâmicos, pois as forças que atuam nas partículas permitem que todas consigam se mover, resultando em um empacotamento aleatório e solto sem a maior densidade de empacotamento possível. Há modelos que tentam resolver essa questão, como (Stroeve e Stroeve, 1999) e (Kolonko et al., 2008).

Como visto, existem diferentes métodos de empacotamento de agregados, porém a busca por métodos de fácil execução levou Damineli (2016) a propor cinco novos métodos que foram aplicados pela primeira vez por Massonetto (2017). São eles: Lançamento sem vibração - realizado conforme a NBR 45, Lançamento com vibração, Saco sem vibração, Saco com vibração e Vibração por partes.

No capítulo 5, serão apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa realizada a partir de um método experimental.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Como visto nos capítulos anteriores todos os processos que envolvem o cimento, ou seja, todo o seu ciclo de vida, geram impactos ambientais. Como este material está presente no concreto, é necessário realizar algumas medidas para minimizar esses impactos. Como alternativa há: 1) a possibilidade de usar adições minerais para a substituição do clínquer; e 2) a possibilidade de realizar o empacotamento de agregados.

Logo, o objetivo dessa dissertação foi realizar experimentalmente cinco métodos de empacotamento de agregados propostos por Damineli (2016) e analisar os resultados obtidos, verificando a sua eficácia. A seguir serão descritos os materiais utilizados e as etapas realizadas.

5.1 Materiais

Para a realização dos ensaios dos métodos foram utilizados apenas agregados naturais. Os ensaios podem ser realizados com agregados graúdos e/ou miúdos. Nessa dissertação a fase experimental e as análises foram realizadas com os dois tipos de agregados.

5.1.1 Cimento

Para o ensaio de abatimento e consequentemente para o ensaio de resistência à compressão foi utilizado um cimento CP-V do mercado brasileiro. A escolha desse cimento se deve a sua alta resistência inicial e ao fato de ser mais puro, podendo conter uma pequena adição de filler calcário.

5.1.2 Britas

Os ensaios dos métodos de empacotamento de agregados foram feitos com agregados graúdos, utilizando britas de basalto provenientes da Mineradora SAID, localizada em Ribeirão Preto – São Paulo. No laboratório as britas receberam as denominações B6, B5, B4, B3, B2 e B1.

5.1.3 Areias

Os ensaios dos métodos de empacotamento de agregados foram feitos com agregados miúdos, utilizando areias de quartzo nomeadas como A7, A6, A5, A4, A3, A2 e A1, provenientes da mineradora Jundu, localizada na cidade de Analândia, SP. Além dos agregados utilizados, na Figura 10 é possível observar os agregados existentes.

Figura 10 - Agregados graúdos e miúdos

Fonte: Autora.

5.2 Caracterização

Além dos ensaios dos Métodos de empacotamento, também foram realizados ensaios de caracterização nos agregados utilizados, seguindo as Normas da ABNT.

5.2.1 Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio - ABNT NBR 7809

A NBR7809 estabelece o método para determinação do índice de forma de agregados graúdos com dimensão máxima característica maior que 9,5 mm, através do método de paquímetro. O cálculo do índice de forma de cada uma das frações ensaiadas é realizado a partir das relações entre o comprimento e a espessura de todos os grãos medidos.

5.2.2 Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem - NBR NM 46

Conforme a Norma NBR NM 46, a amostra de agregado é lavada com água e depois passada por uma peneira de 75 mm. Ocorrerá uma perda em massa calculada em porcentagem da massa da amostra original e registrada como a porcentagem de material mais fino que a peneira de 75 mm.

Depois a amostra será seca à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ e colocada no recipiente, sendo adicionada água até cobri-la. Em seguida a mistura deverá ser agitada para que ocorra a separação completa de todas as partículas mais finas que 75 mm das maiores e para que o material fino fique em suspensão.

Logo após, a água da lavagem é despejada sobre as peneiras e adicionada mais água à amostra, sendo realizado o procedimento anterior até que a água no recipiente fique clara.

5.2.3 Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente - ABNT NBR NM 52

Para esse ensaio, inicialmente separa-se uma amostra do material conforme é determinado pela Norma NBR52. Essa amostra é colocada em um recipiente e coberta com água, ficando assim por 24 h. Na sequência ela é retirada da água e colocada sobre uma superfície plana, sendo submetida à ação de uma suave corrente de ar. A amostra deverá ser revolvida com frequência para que ocorra uma secagem uniforme, o procedimento deverá ser realizado até que os grãos de agregado miúdo não fiquem aderidos entre si.

Logo após, o agregado miúdo deverá ser colocado no molde sem ser comprimido e depois a sua superfície deverá ser compactada de forma suave com 25 golpes através da haste de socamento. Depois o molde deverá ser retirado e se ainda houver umidade superficial, o agregado conservará a forma do molde e o ensaio continuará em intervalos frequentes até que após a retirada do cone ocorra o desmoronamento do agregado. Nesse momento, ele terá atingido a condição de saturado superfície seca.

Após essa etapa deverá ser pesada cerca $(500,0 \pm 0,1)$ g de amostra (ms), colocada em um frasco e registrada a massa do conjunto (mL). O frasco deverá ser preenchido com água próximo a marca de 500 ml e na sequência o agregado miúdo deverá ser retirado do frasco e seco a (105 ± 5) °C até massa constante ($\pm 0,1$ g). Deverá esfriar em temperatura ambiente e pesada com precisão de 0,1 g (m). Sendo em seguida realizados os seguintes cálculos:

Massa específica do agregado seco

Calculada utilizando a fórmula seguinte:

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a}$$

Onde:

d_1 , é a massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

m, é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

V, é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;

V_a , é o volume de água adicionada ao frasco, de acordo com a seguinte fórmula, em centímetros cúbicos:

$$V_a = \frac{m_2 - m_3}{\rho_a}$$

onde:

m_1 , é a massa do conjunto (frasco + agregado), em gramas;

m_2 , é a massa total (frasco + agregado + água), em gramas;

ρ_a , é a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

Massa específica do agregado saturado superfície seca

Calculada utilizando a fórmula seguinte:

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a}$$

Onde:

d_2 , é a massa específica do agregado saturado superfície seca, em gramas por centímetro cúbico

m_s , é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, determinada em 7.1, em gramas.

V , é o volume do frasco, em centímetros cúbicos

V_a , é o volume de água adicionada ao frasco, determinado em centímetros cúbicos

Massa específica

Calculada segundo a fórmula:

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}}$$

Onde:

d_3 , é a massa específica do agregado, em gramas por centímetro cúbico;

m , é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

V , é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;

V_a , é o volume de água adicionado ao frasco, em centímetros cúbicos;

m_s , é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas.

ρ_a , é a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

5.2.4 Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água - ABNT NBR NM 53

Para esse ensaio, inicialmente, separa-se uma amostra do material conforme é determinado pela Norma NBR 53. A amostra é lavada para a retirada de impurezas ou qualquer outro material da superfície e na sequência pesada. O material é submergido em água à temperatura ambiente por um período de (24 ± 4) h, depois os agregados são retirados da água e envolvidos em um pano até que o excesso de água seja absorvido.

Para se obter a massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (m_s), a amostra deverá ser pesada. Em seguida, os agregados são colocados em um recipiente e submergido em água mantida a $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, sendo obtida a massa em água (m_a). Após essa etapa a amostra será seca na estufa com temperatura em torno de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$. Por fim, pesam-se os agregados sendo obtida a massa do agregado seco (m).

A massa específica é determinada pela fórmula abaixo:

$$d = \frac{m}{m_s - m_a}$$

Onde,

d: é massa específica do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

m: é a massa ao ar da amostra seca, em gramas;

m_s : massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

m_a : massa em água da amostra, em gramas.

5.3 Determinação do Índice de Vazios

Para a compreensão do funcionamento do processo de empacotamento, deve-se considerar que os agregados são materiais sólidos, rochosos e que possuem formatos diversos conforme o processo de britagem. Devido a essas características, quando os agregados são colocados próximos uns aos outros, formam-se espaços entre eles, ou seja, vazios, o que aumenta o volume ocupado por esse material em um determinado espaço.

Buscando diminuir os vazios existentes entre os agregados, pode ser realizada a combinação entre granulometrias diferentes, pois, conforme são utilizados agregados menores, estes vão preenchendo os espaços existentes entre os agregados maiores, até que seja obtida uma redução eficaz do índice de vazios. Dessa forma, a combinação escolhida influenciará no resultado obtido. Outra questão a ser observada é o modo como os agregados são utilizados, métodos com ou sem vibração influenciarão no resultado do índice de vazios obtidos.

Deve-se considerar que na produção do concreto, quando ocorre a diminuição de vazios entre agregados, há redução da quantidade de pasta necessária para preencher esses espaços e fluir essa mistura, porém, o aumento do uso de agregados não poderá prejudicar a trabalhabilidade do concreto. Considera-se também que a diminuição da pasta resulta em um menor uso de cimento, algo positivo para o meio ambiente. Dessa forma, devido aos fatores citados acima, busca-se uma combinação adequada entre os agregados.

5.3.1 Equipamentos

Os ensaios dos métodos de empacotamento de agregados foram realizados no Laboratório de Construção Civil - LCC da Universidade de São Paulo, em São Carlos, utilizando os equipamentos presentes no Quadro 1.

Quadro 1 - Equipamento para o ensaio dos métodos

a) Bandeja	b) Haste	c) Pá com fundo quadrado

d) Cilindro	e) Saco plástico	f) Balança

g) Mesa vibratória

Fonte: Autora.

5.3.2 Procedimentos

A análise da redução do índice de vazios é feita através da variação do volume dos agregados obtido pela pesagem de um cilindro, Figura 11. Antes de realizar o ensaio é necessário retirar a tara do cilindro, pois apenas o valor dos agregados será considerado na pesagem.

Figura 11 - Cilindro após o corte e nivelamento

Fonte: Autora.

5.3.3 Definição da amostra

Inicialmente foi definida a amostra a ser utilizada nos ensaios, o que pode ser observado na Tabela 9. Para que não haja a perda do material da amostra, o cilindro foi colocado em cima de uma bandeja e na sequência foram realizadas as seguintes etapas:

- 1 – Com o auxílio de uma pá, os agregados foram colocados no cilindro até preenchê-lo;
- 2 - Na sequência, foi realizado o corte e o nivelamento com a haste;
- 3 – Coloca-se o cilindro na mesa vibratória por cerca de 30 segundos, dessa forma ocorrerá o rearranjo dos agregados o que resultará na diminuição do volume ocupado por esse material, cabendo mais agregados no cilindro;
- 4 – Com o auxílio da pá foi acrescentado mais agregados no cilindro até preenchê-lo;
- 5 - Realizou-se o corte e o nivelamento com a haste;
- 6 – Foi colocado o cilindro na mesa vibratória por cerca de 30 segundos;
- 7 – Com o auxílio da pá acrescentou-se mais agregados até preencher o cilindro;
- 8 – Foi realizado o corte e o nivelamento com a haste;
- 9 - O cilindro foi pesado sendo obtido o valor da amostra.

5.3.4 Métodos

Para a realização dos métodos, considerou-se a utilização de um agregado 1 (Ag1) e de um agregado 2 (Ag2), sendo que nos ensaios realizados com mais de dois agregados o Ag1 será a combinação entre diferentes agregados e o Ag 2 o novo agregado inserido na composição.

Para a realização dos métodos são utilizadas variações de porcentagem entre os agregados (Ag1 e Ag2), que podem ser observados no Quadro 2, a seguir:

Quadro 2 - Combinação de agregados em porcentagem

Ag1	Ag2	
100%	0%	
90%	10%	
80%	20%	
70%	30%	IDA
60%	40%	
50%	50%	↓
40%	60%	↑
30%	70%	
20%	80%	VOLTA
10%	90%	
0%	100%	

Fonte: Autora.

O processo pode ser dividido em duas partes o de ida e o de volta. Na etapa de ida, foi utilizado um valor fixo de Ag1, sendo acrescentadas porcentagens diferentes de Ag2 a cada realização dos cinco métodos, ou seja, inicialmente foram realizados os cinco métodos apenas com um agregado, 100% Ag1 e 0% Ag2, na sequência acrescentou-se 10% de Ag2 ao Ag1 e sendo realizados novamente os cinco métodos, depois acrescentou-se 20% de Ag2 e assim sucessivamente até atingir a porcentagem de 50% Ag1 e 50% Ag2.

Na etapa de volta o procedimento é o mesmo, porém, utilizou-se um valor fixo de Ag2 sendo acrescentadas porcentagens diferentes de Ag1 até chegar na porcentagem de 40% Ag1 e 60% Ag2. Como na ida foram realizados os métodos com a porcentagem 50% Ag1 50% Ag2, não é necessário realizá-los novamente.

Como citado anteriormente, ao realizar os ensaios são definidas combinações de agregados de forma experimental, ou seja, não há uma regra na escolha dos agregados utilizados, são testes para descobrir qual gerará melhores resultados. Os métodos foram feitos com as seguintes combinações de britas e areias, Tabela 7.

Tabela 7 - Combinação de agregados

Composição	Ensaio	Ag1	Ag2
1	1º Ensaio	B6+B5	B4
	2º Ensaio	B6+B5+B4	B3
	3º Ensaio	B6+B5+B4+B3	B2
2	1º Ensaio	B5	B3
	2º Ensaio	B5+B3	A6
	3º Ensaio	B5+B3+A6	A3
3	1º Ensaio	B5	B2
	2º Ensaio	B5+B2	A4
	3º Ensaio	B5+B2+A4	A1

Fonte: Autora.

Nos ensaios que utilizam dois ou mais agregados no Ag1, foi feito o quarteamento para a obtenção de uma mistura mais homogênea. Essa etapa consistiu em colocar os agregados em um saco plástico, movimentá-lo para que os agregados fossem misturados e na sequência, com um movimento de vai e vem, distribuídos o material sobre a bandeja. Depois com o auxílio da pá de fundo quadrado, o material foi retirado da bandeja de forma alternada e lançado no cilindro. Essas etapas foram realizadas nos métodos de lançamento, já nos ensaios realizados com o saco o material não passou pelo quarteamento foi apenas misturado antes da realização dos métodos. Ver Quadro 3.

Quadro 3 – Quarteamento

a) Materiais para a realização do quarteamento	b) Agregados misturados no saco.

c) Pilha para a realização do quarteamento.	d) Material sendo colocado no cilindro através do quarteamento.

Fonte: Autora.

Os cinco métodos para a obtenção do índice de vazios são: Lançamento sem vibração, Lançamento com vibração, Saco sem vibração, Saco com vibração e Vibração por partes.

5.3.4.1 1º Lançamento sem vibração

Esse método foi realizado da seguinte maneira:

- 1 - Colocou-se o cilindro sobre a bandeja para evitar a perda de agregados, o que interferiria no total da amostra, na sequência os agregados foram distribuídos sobre a bandeja;
- 2 - Com a pá de fundo retangular, os agregados foram lançados a uma altura máxima de 50 mm do topo do cilindro, conforme rege a NBR NM 45. Realizou-se essa etapa até o preenchimento do cilindro;
- 3 - Realizou-se o corte e o nivelamento com a haste para a retirada do excesso do material;
- 4 – Pesou-se o cilindro;
- 5 - O resultado foi registrado em uma tabela no Excel, gerando um gráfico mostrando o índice de vazios.

Essas etapas podem ser observadas na Figura 12 a seguir:

Figura 12 - Método: 1º Lançamento sem vibração

Fonte: Autora.

5.3.4.2 2º Lançamento com vibração

O segundo método foi realizado da seguinte maneira:

- 1 – O cilindro com o material pesado no método anterior foi colocado na mesa vibratória por cerca de 30 segundos. Essa ação promoveu o rearranjo dos agregados, diminuindo o volume ocupado por eles, o que possibilitou o acréscimo de mais material;
- 2 – Acrescentou-se mais agregados ao recipiente, realizou-se o corte e o nivelamento com a haste;
- 3- Realizou-se a vibração por cerca de 30 segundos na mesa vibratória;
- 4 - Preencheu-se o cilindro, realizando o corte e o nivelamento;

5 – Pesou-se o cilindro e;

6 – Lançou-se o resultado na tabela.

Essas etapas podem ser observadas na Figura 13 a seguir:

Figura 13 - Método: 2º Lançamento com vibração

Fonte: Autora.

5.3.4.3 3º Saco sem vibração

O terceiro método, denominado Saco sem vibração foi realizado da seguinte maneira:

1 – Depositou-se em um saco plástico todo o material utilizado no método anterior e realizou-se a mistura;

2 – Colocou-se a abertura do saco no interior do cilindro acomodando-o e em seguida o saco foi puxado devagar para cima, reduzindo assim, a vibração nos agregados ao serem depositados no cilindro;

3 – Realizou-se o corte e o nivelamento com a haste;

4 – Pesou-se o cilindro;

5 – Registrou-se o resultado na tabela.

Essas etapas podem ser observadas na Figura 14 a seguir:

Figura 14 - Método: 3º Saco sem vibração

Fonte: Autora.

5.3.4.4 4º Saco com vibração

Esse método foi realizado a partir do método anterior da seguinte maneira:

- 1 – O cilindro com o material pesado no método anterior foi colocado na mesa vibratória por cerca de 30 segundos;
- 2 – Acrescentou-se com o auxílio do saco, mais agregados ao recipiente, realizou-se o corte e o nivelamento com a haste;
- 3 – Colocou-se o cilindro na mesa vibratória e realizou-se a vibração por cerca de 30 segundos;
- 4 - Acrescentou-se com o auxílio do saco mais agregados ao recipiente, realizou-se o corte e o nivelamento com a haste metálica;
- 5 - Realizou-se a pesagem;
- 6 – Lançou-se o resultado na tabela.

Essas etapas podem ser observadas na Figura 15 a seguir:

Figura 15 - Método: 4º Saco com vibração

Fonte: Autora.

5.3.4.5 5º Vibração por partes

O quinto método foi realizado da seguinte maneira:

- 1 - Colocou-se o cilindro sobre a bandeja para que não ocorresse a perda dos agregados;
- 2 - O material utilizado no método anterior foi colocado no saco, os agregados foram misturados e realizou-se o quarteamento sobre a bandeja. Com a pá de fundo retangular, o material foi lançado a cerca de 50 mm de distância da abertura do cilindro, até preenchê-lo em 1/3;
- 3- Colocou-se o cilindro na mesa vibratória e realizou-se a vibração por cerca de 30 segundos.
- 4 – O cilindro foi colocado sobre a bandeja e, com a pá de fundo retangular, preencheu-se 2/3;
- 5 – Colocou-se o cilindro sobre a mesa vibratória e realizou-se a vibração por cerca de 30 segundos;
- 6 – O cilindro foi colocado na bandeja e, com a pá de fundo retangular, preencheu-se 3/3;
- 7 – Com a haste realizou-se o corte e o nivelamento;
- 8 - Colocou-se o cilindro na mesa vibratória e realizou-se a vibração por cerca de 30 segundos;
- 9 – O cilindro foi colocado na bandeja e preenchido com agregado;
- 10 – Realizou-se o corte e o nivelamento com a haste;
- 11 - Colocou-se o cilindro na mesa vibratória e realizou-se a vibração por cerca de 30 segundos;
- 12 – O cilindro foi colocado na bandeja e preenchido com agregado;
- 13 – Realizou-se o corte e o nivelamento com a haste;

14 – Pesou-se o cilindro;

15 – Registrou-se o resultado na tabela.

Essas etapas podem ser observadas na Figura 16 a seguir:

Figura 16 - Método: 5º Vibração por partes

Fonte: Autora.

5.4 Ensaio de abatimento do tronco de cone

Após a realização dos ensaios, os resultados obtidos nos gráficos foram analisados, sendo determinado o ponto de melhor empacotamento, ou seja, em qual combinação de britas e em qual porcentagem de agregados foi obtido o menor índice de vazios. A partir disso, foram escolhidos os traços a serem utilizados no ensaio de abatimento do tronco de cone ou *slump*. Estes podem ser vistos na Tabela 8 a seguir:

Tabela 8 – Traços realizados conforme a composição de agregados

Composição	Ensaio	Traço
B6-B5-B4-B3-B2	B6-B5-B4-B3-B2	Traço 1 – 70% Ag1 e 30% Ag2 Traço 2 – 60% Ag1 e 40% Ag2 Traço 3 – 50% Ag1 e 50% Ag2
B5-B3-A6-A3	B5-B3-A6-A3	Traço 4 - 80% Ag1 e 20% Ag2 Traço 5 - 90% Ag1 e 10% Ag2
B6-B3-A7-A1	B6-B3-A7-A1	Traço 6 – 80% Ag1 e 20% Ag2 Traço 7 – 90% Ag1 e 10% Ag2
B6-B2-A5-A1	B6-B2-A5-A1 B6-B2-A5	Traço 8 – 80% Ag1 e 20% Ag2 Traço 9 – 50% Ag1 e 50% Ag2
B6-B4-B2-A6-A3-A1	B6-B4-B2-A6-A3-A1 B6-B4-B2-A6-A3	Traço 10 – 90% Ag1 e 10% Ag2 Traço 11 – 90% Ag1 e 10% Ag2
B6-B3-A7-A5-A2	B6-B3-A7-A5-A2 B6-B3-A7-A5	Traço 12– 80% Ag1 e 20% Ag2 Traço 13 – 60% Ag1 e 40% Ag

Para a realização do ensaio foi elaborada uma planilha contendo a quantidade de água e cimento que seriam adicionados no concreto ao longo do ensaio de abatimento. Foi definido que o ensaio iniciaria com 4% a menos do que a porcentagem do índice de vazios escolhido, para que fosse obtido o resultado real do índice de vazios da combinação. Caso o ponto de transição fosse exatamente na porcentagem do empacotamento escolhido, se não tivesse essa margem, não seria possível saber ao certo quando saiu do zero, ou seja, qual foi o ponto de transição.

O ponto de transição, que se dá quando o sistema é preenchido e começa a fluir é a informação mais importante do ensaio. Para encontrá-lo são feitas adições de cimento e água, medindo-se o abatimento do tronco de cone a cada adição, o último abatimento com o resultado igual a zero é o ponto de transição. Definiu-se também que as adições seriam realizadas até que fosse obtido um *slump* próximo a 120 mm, considerada como uma medida adequada para a trabalhabilidade do concreto na construção civil. Para esse ensaio, foi necessário a presença de duas pessoas para a realização das seguintes etapas:

- 1º - Molhou-se a betoneira, para que ela não absorvesse a água utilizada no experimento;
- 2º - Posicionou-se o molde tronco-cônico sobre a base metálica;
- 3º - Essa etapa dividiu-se em duas partes. Primeiro misturou-se na betoneira o cimento, a água e os agregados de maior granulometria, em seguida acrescentou-se os agregados de menor granulometria;

4º - Com a concha, o concreto foi colocado no molde tronco-cônico preenchendo 1/3 do molde e formando a primeira camada. Nessa etapa, uma pessoa ficou posicionada com os pés nas alças laterais do molde;

5º - Realizou-se a compactação do concreto com a haste, através de 25 golpes em movimentos circulares no entorno das laterais do recipiente;

6º - Com a concha colocou-se no tronco de cone o concreto preenchendo 2/3 do molde e formando a segunda camada. Essa etapa foi realizada como citada anteriormente;

7º - Realizou-se a compactação do concreto com a haste como citado acima;

8º - Com a concha, colocou-se no molde tronco-cônico o concreto preenchendo 3/3 do molde e formando a última camada;

9º - Realizou-se a compactação do concreto com a haste;

10º - Com a colher, o excesso de concreto foi retirado e a superfície nivelada;

11º - O molde foi retirado cuidadosamente.

12º - Com o auxílio da trena foi medido o abatimento do concreto, ou seja, à medida que ele desceu comparado a sua altura inicial, que é a mesma altura do molde tronco-cônico.

Na sequência esse material foi colocado na betoneira e feito uma nova adição de água e cimento conforme consta na planilha. As etapas citadas acima foram repetidas até atingir um valor próximo a 120 mm. Obtendo esse resultado, o concreto que está na betoneira e o que foi utilizado na moldagem do tronco de cone foram utilizados na moldagem dos corpos de prova para a realização do ensaio de compressão. Os resultados obtidos foram colocados em um gráfico, indicando o ponto de transição, o *slump* desejado e a quantidade de adições necessárias. Para a realização desse ensaio foram utilizados os equipamentos presentes no Quadro 4.

Quadro 4 - Equipamentos para o ensaio de abatimento de tronco de cone

a) Concha	b) Gola	c) Base metálica	d) Colher

e) Trena	f) Molde tronco-cônico	g) Haste metálica	h) Betoneira

Fonte: Autora.

5.5 Resistência à compressão

Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizados a concha, a colher e a gola mostrados no Quadro 4 e os equipamentos presentes no Quadro 5 que são: o molde do corpo de prova 10X20, a mesa vibratória, a retífica e a prensa para ensaio de compressão

Quadro 5 - Equipamentos para o ensaio de compressão

a) Molde do corpo de prova 10X20	b) Mesa vibratória

c) Retífica	d) Prensa para ensaio de compressão

Fonte: Autora.

As etapas que foram realizadas estão descritas a seguir.

Moldagem dos corpos de prova:

- 1º - Uma camada de óleo foi passada em toda a superfície interna do molde para facilitar na desmoldagem;
- 2º – Com o auxílio de uma concha, colocou-se o concreto no interior do molde e em seguida realizou-se a vibração na mesa vibratória;
- 3º – Como diminuiu o volume após a vibração, acrescentou-se mais concreto até o preenchimento do molde. Para a realização desse processo foram necessárias duas pessoas, pois enquanto uma segurou o molde sobre a mesa vibratória, a outra acrescentou mais concreto.
- 4º – O molde foi retirado da mesa vibratória e mantido em temperatura ambiente até o dia seguinte.

Foram moldados no total, seis corpos de prova por traço. No dia seguinte, os corpos de prova foram retirados dos moldes e colocados na câmara úmida. Antes do ensaio de compressão

as superfícies planas dos corpos de prova foram retificadas. Os ensaios de compressão para a determinação da carga de ruptura dos corpos de prova foram realizados no sétimo e no vigésimo oitavo dia após a moldagem, sendo obtida a resistência característica do concreto moldado.

5.5.1 Ensaio de resistência à compressão

Ao atingir a idade de ensaio, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e secos. Na sequência, foi realizada a medição de três posições do diâmetro sendo encontrada a média e medida a altura do corpo de prova com um paquímetro. Em seguida o corpo de prova foi colocado na prensa Amsler e submetido a um carregamento contínuo com velocidade de carregamento constante de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s conforme a NBR 5739:2018, até que o ponteiro indicador da máquina desacelerasse e parasse, o que indica que o corpo de prova rompeu, ou seja, atingiu a sua resistência máxima. Depois do ensaio, com o resultado da força de ruptura, foi calculado o f_{ck} em MPa/s.

A partir da realização dos ensaios indicados nesse capítulo, foram obtidos os resultados presentes no capítulo 6 a seguir.

6 RESULTADOS

6.1 Caracterização

Além dos ensaios dos métodos de empacotamento, foram realizados ensaios de caracterização nos agregados utilizados, seguindo as Normas da ABNT.

6.1.1 Composição granulométrica

Para a obtenção das curvas granulométricas dos agregados, foram considerados os dados obtidos em experimentos realizados no laboratório de construção civil, com quatro amostras de 500 gramas das britas B6, B5, B4, B3, B2 e B1.

As amostras são peneiradas, por cerca de 15 minutos, em um conjunto de sete peneiras, Figura 17.

Figura 17 – Peneiramento

Fonte: Autora.

No total são utilizadas trinta e três peneiras com malhas diferentes, ver Figura 18. O material retido em cada peneira é pesado sendo obtida a composição de cada agregado.

Figura 18 - Peneiras

Fonte: Autora.

Os agregados são classificados de acordo com a sua composição granulométrica, ou seja, quando citamos, por exemplo, a Brita B2, não significa que todas as suas partículas possuem uma única dimensão e sim que ela engloba uma faixa granulométrica. Através do ensaio de granulometria é possível verificar e visualizar a composição de cada tipo de brita. A Brita B2, por exemplo, é composta por vinte e quatro granulometrias diferentes como pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 - a) Brita B2 b) Composição granulométrica

Fonte: Autora.

Entender essa questão contribui na análise dos resultados dos ensaios dos métodos, pois é possível observar a quantidade de finos existentes, o que influenciará na quantidade de água utilizada no ensaio de abatimento de tronco de cone e consequentemente quando será obtido o ponto de transição.

Na Figura 20 a seguir constam os resultados dos ensaios realizados com as seis britas.

Figura 20 - Granulometria das Britas

6.1.2 Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio - ABNT NBR7809: 2006

O ensaio foi realizado conforme a Norma com as britas B6 e B5, sendo os resultados obtidos presentes no Quadro 6.

Quadro 5 - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro

B6	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Comprimento/Espessura c/e	B5	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Comprimento/Espessura c/e
1	26,97	6,15	4,39	1	16,64	6,69	2,49
2	22,99	5,89	3,90	2	17,56	6,57	2,67
3	25,30	8,47	2,99	3	19,46	2,86	6,80
4	29,70	10,93	2,71	4	20,34	4,57	4,45
5	27,65	9,02	3,07	5	22,47	7,63	2,94
6	26,75	10,67	2,51	6	17,53	8,54	2,05
7	25,79	10,35	2,49	7	16,53	6,48	2,55
8	26,45	11,9	2,22	8	18,34	10,93	1,68
9	25,02	10,38	2,41	9	18,13	6,15	2,95
10	27,23	6,88	3,96	10	22,44	5,87	3,82
11	25,15	12,62	1,99	11	20,75	4,08	5,09
12	22,03	10,39	2,12	12	20,73	5,04	4,11
13	23,34	10,6	2,20	13	18,08	5,02	3,60
14	23,8	5,16	4,61	14	23,10	7,68	3,00
15	26,84	6,98	3,85	15	17,65	9,27	1,90
16	24,08	7,71	3,12	16	19,58	4,87	4,02
17	26,86	11,8	2,28	17	23,86	8,52	2,80
18	27,90	7,4	3,77	18	22,32	6,14	3,64
19	21,90	9,04	2,42	19	18,32	8,07	2,27
20	25,59	8,11	3,16	20	16,85	8,44	2,00
21	29,45	10,81	2,72	21	17,84	7,3	2,44
22	26,49	7,97	3,32	22	19,98	7,13	2,80
23	25,63	5,35	4,79	23	20,85	6,26	3,33
24	16,26	9,73	1,67	24	16,89	11,44	1,48
25	29,57	9,02	3,28	25	16,55	5,70	2,90
26	25,31	11,00	2,30	26	17,83	7,69	2,32
27	24,44	8,15	3,00	27	16,53	7,78	2,12
28	24,05	6,48	3,71	28	17,17	7,54	2,28
29	23,26	8,52	2,73	29	20,09	6,61	3,04
30	28,80	8,52	3,38	30	18,11	5,03	3,60
31	25,06	8,94	2,80	31	16,77	6,54	2,56
32	25,61	6,41	4,00	32	17,53	5,33	3,29
33	23,66	7,39	3,20	33	18,39	5,6	3,28
34	26,24	9,22	2,85	34	16,5	4,89	3,37
35	24,37	11,12	2,19	35	17,51	5,82	3,01
36	22,92	12,77	1,79	36	15,66	7,99	1,96
37	29,26	11,33	2,58	37	16,14	6,83	2,36
38	24,17	6,17	3,92	38	17,15	12,47	1,38
39	23,28	11,37	2,05	39	15,06	8,03	1,88
40	26,77	9,50	2,82	40	20,68	5,10	4,05
41	23,16	10,49	2,20	41	16,94	6,38	2,66
42	20,62	12,55	1,64	42	17,89	7,46	2,40
43	23,68	7,33	3,23	43	17,76	8,41	2,11
44	19,54	9,19	2,13	44	19,6	9,46	2,07
45	23,22	7,35	3,16	45	16,95	5,76	2,94
46	24,95	10,55	2,36	46	13,36	8,83	1,51
47	23,79	11,16	2,13	47	18,04	4,44	4,06
48	20,25	9,30	2,18	48	20,45	6,07	3,37
49	17,81	9,58	1,86	49	19,82	7,33	2,70
50	24,17	8,83	2,74	50	17,72	4,73	3,75
MÉDIA			2,86	MÉDIA			2,92

Fonte: Autora.

6.1.3 Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem – ABNT NBR NM 46: 2001

De acordo com os procedimentos definidos na Norma e citados na metodologia, foram realizados ensaios com os agregados B6, B5, B4 e B3.

Fórmula:
$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

Onde:

m é a porcentagem de material mais fino que a peneira de 75 mm por lavagem;

m_i é a massa original da amostra seca; em gramas;

m_f é a massa da amostra seca após a lavagem em gramas.

Através da média de duas determinações foram obtidos os resultados presentes na Tabela 9.

Tabela 9 - Determinação do material fino que passa através da peneira 75mm, por lavagem

Agregados	Ensaio	m _i (g)	m _f (g)	M (g)	Média
B6	1	1000g	999,7	0,03	0,02
	2	1000g	999,9	0,01	
B5	1	1000g	997,6	0,24	0,35
	2	1000g	995,5	0,45	
B4	1	1000g	995,7	0,43	0,23
	2	1000g	999,7	0,03	
B3	1	1000g	995,6	0,44	2,39
	2	1000g	956,7	4,33	

Fonte: Autora.

6.1.4 Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente – ABNT NBR NM 52: 2009

Para a realização desse ensaio conforme citado na metodologia foram utilizados os agregados B3 e B2.

Massa específica do agregado seco

Fórmula:
$$d_1 = \frac{m}{V - V_a}$$

Onde:

d₁, é a massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

m, é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

V, é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;

V_a, é o volume de água adicionada ao frasco, de acordo com a seguinte fórmula, em centímetros cúbicos:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a}$$

m_1 , é a massa do conjunto (frasco + agregado), em gramas;

m_2 , é a massa total (frasco + agregado + água), em gramas;

ρ_a , é a massa específica da água em gramas por centímetro cúbico.

Os resultados podem ser vistos na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10 - Massa específica do agregado seco

Brita – B3		Brita – B2	
d1	2,73g/cm ³	d1	2,72g/cm ³
m	486,2g	m	479,2g
V	450,00cm ³	V	450,00cm ³
V _a	271,7	V _a	274,1cm ³
m ₁	741,0g	m ₁	741,0g
m ₂	1012,7	m ₂	1015,1g
ρ_a	450,00cm ³	ρ_a	1g/cm ³

Fonte: Autora.

Massa específica do agregado saturado superfície seca

Fórmula:
$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a}$$

Onde:

d_2 é a massa específica do agregado saturado superfície seca em gramas por centímetro cúbico

m_s é a massa da amostra na condição saturada superfície seca em gramas.

V é o volume do frasco em centímetros cúbicos.

V_a é o volume de água adicionada ao frasco em centímetros cúbicos.

Os resultados podem ser vistos na tabela a seguir:

Tabela 11 - Massa específica do agregado saturado superfície seca

Brita – B3		Brita – B2	
d ₂	2,19g/cm ³	d ₁	2,21g/cm ³
m _s	500g	m _s	500g
V	450,00cm ³	V	450,00cm ³
V _a	221,7cm ³	V _a	224,1cm ³

Fonte: Autora.

Massa específica

Fórmula:
$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}}$$

Onde:

d_3 , é a massa específica do agregado em gramas por centímetro cúbico;

m, é a massa da amostra seca em estufa em gramas;

V, é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;

V_a, é o volume de água adicionado ao frasco em centímetros cúbicos;

m_s é a massa da amostra na condição saturada superfície seca em gramas.

ρ_a é a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

Os resultados obtidos foram:

Tabela 12 - Massa específica

Brita – B3		Brita – B2	
d ₃	2,96g/cm ³	d ₃	3,09g/cm ³
m	486,2g	m	479,2g
V	450,00cm ³	V	450,00cm ³
V _a	271,7	V _a	274,1cm ³
m _s	500,0g	m _s	500,0g
ρ _a	1g/cm ³	ρ _a	1g/cm ³

Fonte: Autora.

Na Figura 21, podem ser observadas imagens do experimento:

Figura 21 - a) Agregado miúdo compactado no molde; b) Cone após desmoronamento; c) Frasco com a água e o agregado

Fonte: Autora.

6.1.5 Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água - ABNT NBR NM 53: 2009

Esse ensaio realizado conforme citado na metodologia, foi realizado com os agregados B6, B5 e B4.

Massa específica do agregado seco

Fórmula:
$$d_2 = \frac{m}{m - m_a}$$

d₂ é a massa específica do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

m é a massa ao ar da amostra seca em gramas;

m_a é a massa em água da amostra em gramas.

Sendo obtido os seguintes resultados:

Tabela 13 - Massa específica do agregado seco

Brita – B6		Brita – B5		Brita – B4	
d ₂	2,88	d ₂	2,88	d ₂	2,86
m	3000,0	m	3000,0	m	3000,0
m _a	1960,0	m _a	1958,4	m _a	1952,5

Fonte: Autora.

Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca

Fórmula:
$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a}$$

Onde:

d_s é a massa específica do agregado na condição saturado superfície seca, em gramas por centímetro cúbico;

m_s é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca em gramas;

m_a é a massa em água da amostra em gramas.

Foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 14 - Massa específica do agregado na condição saturado superfície seco

Brita – B6		Brita – B5		Brita – B4	
d_s	2,91	d_s	2,90	d_s	2,87
m_s	2984,4	m_s	2989,8	m_s	2998,9
m_a	1960,0	m_a	1958,4	m_a	1952,5

Fonte: Autora.

Massa específica aparente

Fórmula:
$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a}$$

Onde:

d_a é a massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

m é a massa ao ar da amostra seca em gramas;

m_s é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca em gramas;

m_a é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca em gramas.

Foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 15 - Massa específica aparente

Brita – B6		Brita – B5		Brita – B4	
d_a	2,93	d_a	2,91	d_a	2,87
m	3000,0	m	3000,0	m	3000,0
m_s	2984,4	m_s	2989,8	m_s	2998,9
m_a	1960,0	m_a	1958,4	m_a	1952,5

Fonte: Autora.

Segue imagens das amostras durante o ensaio, Figura 22.

Figura 22 - a) Agregados antes da secagem superficial realizada com o pano b) Pesagem da massa em água c) Pesagem da massa ao ar na condição saturada superfície seca

Fonte: Autora.

A densidade dos agregados graúdos considerada foi de $2,92 \text{ g/cm}^3$, informação necessária para a obtenção do resultado do índice de vazios. Inicialmente foi calculado o volume do recipiente utilizado nos ensaios, na sequência, através desse valor e da massa específica obtida na caracterização, foi possível calcular a máxima massa de agregados que ocuparia o recipiente, caso não houvesse nenhum vazio. Os resultados obtidos podem ser vistos a seguir:

Quadro 6 - Massa do cilindro completamente preenchido por agregados

Densidade obtida (g/cm^3)	2,92
Volume do cilindro (cm^3)	3000
Massa sem vazios (g)	8760

Fonte: Autora.

6.2 Determinação do Índice de Vazios

Para a análise dos métodos propostos, citados na metodologia, foram realizados nove ensaios utilizando a combinação de britas e areias de diferentes granulometrias. Para a realização dos métodos, considerou-se a utilização de um agregado 1 (Ag1) e de um agregado 2 (Ag2), sendo que nos ensaios realizados com mais de dois agregados o Ag1 será a combinação entre diferentes agregados e o Ag2 o novo agregado inserido na composição.

6.2.1 Composição B6-B5-B4-B3-B2

A primeira composição analisada foi B6-B5-B4-B3-B2. Como citado anteriormente os métodos são realizados inicialmente com duas britas diferentes Ag1 e Ag2. Logo, nessa composição, os ensaios iniciam-se com as britas B6 e B5. Visto que Massoneto (2017) realizou o ensaio B6-B5, não houve a necessidade de realizar um novo ensaio com essas britas. Por isso, os dados obtidos por ele apenas nesse ensaio, serviram de base para a realização do ensaio seguinte, composto pela britas B6, B5 e B4. Os dados obtidos por Massoneto (2017) foram analisados, como pode ser observado a seguir.

6.2.1.1 Índice de vazios B6-B5

O primeiro ensaio composto por B6-B5 possui britas de granulometrias próximas. Os resultados obtidos podem ser vistos a seguir.

Na Figura 23 observa-se os agregados utilizados.

Figura 23 - Combinação B6-B5

Fonte: Autora.

Durante a realização dos ensaios obtêm-se um gráfico com os resultados dos cinco métodos. Este pode ser visto na Figura 24 a seguir:

Figura 24 - Composição dos agregados B6-B5

Ao analisar o gráfico, observa-se inicialmente que ocorreu um aumento no índice de vazios, quando foi acrescentado o agregado 2 ao agregado 1, porém, conforme a diferença de porcentagem entre os agregados diminuiu, ocorreu uma redução no índice. Observa-se que o modo como os agregados se comportam, considerando cada porcentagem nos cinco métodos, é semelhante, devido ao desenho das curvas. São exceções a este comportamento a porcentagem 80-20 do método Vibração por partes, a porcentagem 20-80 no método Saco sem vibração e a porcentagem 0-100 no método Lançamento com vibração, onde ocorreu uma alteração em relação à sequência dos demais agregados.

Entre os métodos sem vibração, o Lançamento sem vibração obteve um resultado melhor do que o do Saco sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtidos foi 43,7% na proporção 70-30.

O menor índice de vazios obtido através dos métodos com vibração foi o de Vibração por partes com 40,2% na proporção 100-0, sendo que em alguns métodos o acréscimo do agregado 2 acabou aumentando o índice de vazios ao invés de contribuir com a sua redução. Isso ocorre devido à proximidade granulométrica, pois, ao invés de preencher o volume dos vazios ocorreu o afastamento entre os agregados.

De forma geral, observa-se que os métodos que utilizam a vibração em seu processo obtiveram melhores resultados de empacotamento de agregados, sendo valores próximos. Percebe-se também, que conforme a porcentagem entre o agregado 1 e o agregado 2 vai se equiparando, os índices de vazios vão diminuindo, devido ao rearranjo entre esses materiais. Por serem agregados com granulometrias próximas, observa-se que a redução do índice de vazios não foi expressiva e que a diferença entre proporções não ocasionou grandes diferenças nos resultados, que se mantiveram praticamente uniforme, principalmente na curva inversa. Dessa maneira, viu-se a necessidade de acrescentar a essa composição um agregado de menor granulometria visando uma melhora nos resultados de índice de vazios. O agregado escolhido foi a brita B4.

6.2.1.2 Índice de vazios B6-B5-B4

Através dos resultados obtidos no ensaio com a B6-B5, foi inserida na composição a brita B4 e realizados novos ensaios. Na Figura 25 podem ser vistos os agregados utilizados:

Figura 25 - Composição B6-B5-B4

Fonte: Autora.

Cada método é realizado com as combinações de proporções variáveis entre os agregados, fator que pode ser observado no Quadro 8.

Quadro 7 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados- B6-B5-B4

Proporção Ag1-Ag2	Ag1		Ag2
	B6 - 50%	B5 - 50%	B4
100 - 0	3222,5 + 3222,5 = 6445,0		0
90 - 10			716,1
80 - 20			895,1
70 - 30			1150,9
60 - 40			1534,5
50 - 50			2148,3
40 - 60	767,25	767,25	6445,0
30 - 70	575,45	575,45	
20 - 80	447,55	447,55	
10 - 90	358,05	358,05	
0 - 100	0	0	

Fonte: Autora.

Inicialmente, foram utilizadas como Ag1, 3222,5g de B6 e 3222,5g de B5 totalizando 6445,0g de agregados. A adição do Ag-1 ocorre apenas na proporção 100-0, sendo fixa até atingir a proporção 50-50. A partir da porcentagem 90-10 acrescenta-se o Ag2-B4, em diferentes proporções, até a porcentagem de 50-50. Na sequência realiza-se o inverso, são utilizados 6445,0g de B4-Ag2, na proporção 0-100 que se mantém constante, sendo acrescentado o Ag1(B6+B5) em diferentes proporções até atingir a porcentagem 40-60. Na Figura 26 é possível observar os resultados obtidos.

Figura 26 - Composição B6-B5-B4

Ao analisar o gráfico, observa-se através das curvas que o modo como os agregados se comportam, considerando cada porcentagem nos cinco métodos, é semelhante. Sendo exceções, a porcentagem 60-40 do método Saco com vibração e a porcentagem 40-60 método Lançamento sem vibração, onde ocorreu uma alteração em relação à sequência dos demais agregados.

Percebe-se, que quando comparado à proporção 100-0 e a 0-100 entre os agregados Ag1 e Ag2, a diferença obtida nos resultados de índice de vazios é pequena. Observa-se, que conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag1 na proporção 100-0, de modo geral, obteve menores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração, o de Lançamento sem vibração obteve um resultado melhor do que o do método do Saco sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtidos foi 41% no método de Lançamento sem vibração na proporção 50-50. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Vibração por partes com 36,7% na proporção 60-40. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração, obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados, sendo valores próximos e que em alguns casos que se sobrepõem.

De forma geral, observa-se que conforme a porcentagem entre o Ag1 e o Ag2 vai se equiparando, ou seja, que a quantidade total de Ag1 se aproxima da quantidade total de Ag2, os índices de vazios vão diminuindo, devido à inserção de um material de menor granulometria e o rearranjo entre esses materiais, ou seja, a brita de tamanho menor consegue preencher vazios existentes. Por serem agregados com dimensões próximas, nota-se, que a redução do índice de vazios não foi expressiva.

6.2.1.3 Índice de vazios B6-B5-B4-B3

O segundo ensaio, consistiu em acrescentar aos agregados utilizados no primeiro ensaio um novo agregado de menor granulometria, sendo o escolhido a brita B3. Na Figura 27, pode ser observada a combinação dos agregados nesse segundo ensaio.

Fonte: Autora.

Cada método é realizado com as combinações de proporções variáveis entre os agregados que pode ser observado no quadro a seguir:

Quadro 8 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados- B6-B5-B4-B3

Proporção Ag1-Ag2	Ag1			Ag2
	B6 – 25%	B5 – 25%	B4 – 50%	B3
100 - 0	1611,25+1611,25+3222,5= 6445,0			0
90 - 10				716,1
80 - 20				895,1
70 - 30				1150,9
60 - 40				1534,5
50 - 50				2148,3
40 - 60	383,625	383,625	767,25	6445,0
30 - 70	287,725	287,725	575,45	
20 - 80	223,775	223,775	447,55	
10 - 90	179,025	179,025	358,05	
0 - 100	0	0	0	

Fonte: Autora.

Inicialmente foram utilizadas como Ag1, 1611,25g de B6, 1611,25g de B5 e 3222,5g de B4, totalizando 6445,0g de agregados. A adição do Ag-1 ocorre apenas na proporção 100-0, sendo fixa até atingir a proporção 50-50. Em seguida, acrescenta-se o Ag2-B3 em diferentes proporções até a combinação atingir também a porcentagem de 50-50. Na sequência, realiza-se o inverso, são utilizados 6445,0g de B3-Ag2 na proporção 0-100 que se mantém fixa, sendo acrescentado a ela o Ag1 em diferentes proporções até atingir a porcentagem 40-60. Na Figura 28 podem ser observados os resultados obtidos:

Figura 28 - Composição dos agregados B6-B5-B4-B3

Ao analisar o gráfico, observa-se inicialmente que ocorreu a redução do índice de vazios, porém, mesmo acrescentando um agregado de menor granulometria, B3, o menor índice de vazios foi 36,1% obtido nos métodos Saco com vibração na proporção 80-20 e Vibração por partes na proporção 60-40. Ao acrescentar B3, observa-se que o menor índice de vazios obtido,

36,1%, está próximo do resultado do ensaio 1, porém, ao analisar as curvas, percebe-se que de modo geral, ocorreu uma redução do índice de vazios nos métodos.

O comportamento dos agregados a cada porcentagem nos cinco métodos é semelhante, sendo exceções a porcentagem 60-40 e 20-80 entre os métodos Lançamento sem vibração e Saco sem vibração e na porcentagem 90-10 e 50-50 entre os métodos Vibração por partes e Lançamento com vibração, onde ocorreu uma alteração em relação à sequência dos demais agregados.

Percebe-se que quando comparada a proporção 100-0 e 0-100 entre Ag1 e Ag2, o Ag1 possui o menor índice de vazios, o que indica que apesar do Ag2 possuir uma menor granulometria, a combinação entre as britas do agregado 1 obteve um melhor empacotamento, gerando um menor índice de vazios. Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, porém, de forma inversa, observa-se que os métodos que começam com o agregado 1 na proporção 100-0 sendo acrescentado aos poucos o agregado 2, foram obtidos menores índices de vazios se comparado a situação contrária. Quando o ensaio começa com agregados maiores e depois são acrescentados o de menor granulometria, estes se acomodam melhor nos vazios existentes, preenchendo-os.

Observa-se que entre os métodos sem vibração o de Lançamento sem vibração obteve um resultado melhor do que o do Saco sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 41,5% no método de Lançamento sem vibração na proporção 70-30.

É possível visualizar que nessa combinação há uma diferença maior no modo como os agregados se comportam nos dois lados da curva. Quando é acrescentado primeiro o Ag2 ocorre uma variação maior no índice de vazios se comparado ao inverso. Através do gráfico da Figura 28, observa-se que os métodos que utilizam a vibração em seu processo tiveram melhores resultados de empacotamento de agregados e que os resultados obtidos utilizando inicialmente o Ag2 foram próximos, ocorrendo em alguns casos, a sobreposição.

Nesse ensaio os menores índices de vazios obtidos nos métodos com vibração foram através do método Saco com vibração 36,1% na proporção 80-20 e no método Vibração por partes 36,1% na proporção 60-40.

De modo geral, observa-se que conforme a porcentagem entre o Ag1 e o Ag2 vão se equiparando os índices de vazios vão diminuindo devido ao aumento da quantidade de material de menor granulometria e pelo rearranjo entre esses materiais, permitindo que as britas menores ocupem vazios existentes. Por serem agregados com dimensões próximas, observa-se que a redução do índice de vazios não foi expressiva.

6.2.1.4 Índice de vazios B6-B5-B4-B3-B2

O terceiro ensaio consistiu em acrescentar aos agregados utilizados no segundo ensaio um novo agregado com uma granulometria menor, o escolhido foi o agregado B2. Na Figura 29, podem ser observados os agregados utilizados.

Fonte: Autora.

No Quadro 10 estão as combinações utilizadas.

Quadro 9 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados- B6-B5-B4-B3-B2

Proporção Ag1-Ag2	Ag1				Ag2
	B6 – 24%	B5 – 24%	B4 – 32%	B3 – 20%	B2
100 - 0	1440 + 1440 + 1920 + 1200 = 6000				0
90 - 10					666,7
80 - 20					833,3
70 - 30					1071,4
60 - 40					1428,6
50 - 50					2000,0
40 - 60	348,6	348,6	464,8	290,5	6100
30 - 70	261,4	261,4	348,6	217,9	
20 - 80	203,3	203,3	271,1	169,4	
10 - 90	162,7	162,7	216,9	135,6	
0 - 100	0	0	0	0	

Fonte: Autora.

Inicialmente foram utilizadas como Ag1, 1440,0g de B6, 1440,0g de B5, 1920,0g de B4 e 1200,0g de B3, totalizando 6000,0g de agregados na proporção 100-0 e em seguida, acrescenta-se o Ag2-B2 em diferentes proporções até a combinação atingir a porcentagem de 50-50. No ensaio inverso, foram utilizados 6100,0g de B2-Ag2 na proporção 0-100 e depois acrescentado o Ag1 em diferentes proporções até atingir a porcentagem 40-60.

Na Figura 30, podem ser observados os resultados obtidos:

Figura 30 - Composição dos agregados B6-B5-B4-B3-B2

Ao analisar o gráfico, observa-se inicialmente que ocorreu uma melhora na redução do índice de vazios ao acrescentar um agregado com menor granulometria, o B2, ocorrendo uma redução considerável no índice de vazios se comparado aos ensaios anteriores. Quando é utilizado um agregado que se assemelha mais a granulometria da areia, ocorre uma maior redução no índice de vazios.

Percebe-se, que o modo como os agregados se comportam, considerando cada porcentagem nos cinco métodos, é semelhante devido ao desenho das curvas. Sendo exceções a porcentagem 60-40 Lançamento com vibração e 50-50 no método Vibração por partes e nas porcentagens 30-70 nos métodos Saco sem vibração e Vibração por partes, onde ocorreu uma alteração em relação à sequência dos demais agregados.

Quando comparado a proporção 100-0 e a 0-100 entre Ag1 e Ag2, o segundo possui menor índice de vazios, pois, apesar de ser um único agregado, possui uma granulometria menor, tendo menos vazios entre os grãos. Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, porém, de formas inversas, observa-se que o método que começa com o agregado 2 na proporção 0-100 e vai acrescentando aos poucos o Ag1, mantém os menores índices de vazios se comparado a situação contrária.

É possível visualizar que nessa combinação há uma diferença maior no modo como os agregados se comportam nos dois lados da curva. Quando é acrescentado primeiro o Ag1 ocorre uma variação maior no índice de vazios se comparado ao outro lado, situação oposta à obtida no ensaio anterior.

Observa-se que entre os métodos sem vibração o do Saco sem vibração obteve um resultado melhor do que o do Lançamento sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtidos foi 35,6% na proporção 40-60. Percebe-se também, que ao realizar o ensaio a partir do Ag1 o índice de vazios é superior àquele que iniciou com o Ag2. Desde o primeiro método o índice de vazios é menor na curva inversa.

Os métodos que utilizam em seu processo a vibração obtiveram melhores resultados de empacotamento de agregados. O menor índice de vazios obtido foi através do método Saco com vibração com o índice de vazios de 27,9% na proporção 50-50.

De modo geral, verificou-se que conforme a porcentagem entre o agregado 1 e o agregado 2 vão se equiparando, os índices de vazios vão diminuindo devido ao aumento na quantidade de material de menor granulometria e ao rearranjo entre esses materiais, permitindo que as britas de menor granulometria ocupem os vazios existentes.

Para conferir se o acréscimo de um agregado de menor granulometria teve uma redução significativa no índice de vazios, foram realizados gráficos comparando os métodos em cada ensaio. Estes podem ser vistos na Figura 31.

Figura 31 - Relação índice de vazios inicial (B6-B5) e final (B6-B5-B4-B3-B2)

Fonte: Autora.

Ao comparar o primeiro e o último ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

Quadro 10 - Relação índice de vazios inicial (B6-B5) e final (B6-B5-B4-B3-B2)

Lançamento sem vibração	Índice de vazios										
B6-B5	44,0	46,1	44,5	43,7	43,9	44,2	44,0	45,2	46,1	45,8	46,2
B6-B5-B4-B3-B2	42,8	41,4	39,5	37,7	37,1	36,4	36,4	36,4	37,7	38,6	38,6
Redução dos vazios (%)	2,7%	10,2%	11,2%	13,7%	15,5%	17,6%	17,3%	19,5%	19,1%	15,7%	16,5%
Lançamento com vibração	Índice de vazios										
B6-B5	40,6	43,3	41,9	41,2	41,4	40,6	40,7	41,0	41,4	41,6	40,9
B6-B5-B4-B3-B2	37,1	34,2	32,2	30,3	30,4	29,2	28,8	29,1	30,0	30,4	31,9
Redução dos vazios (%)	8,6%	21%	23,2%	26%	26,6%	28,1%	29,2%	29%	27,5%	26,9%	22%
Saco sem vibração	Índice de vazios										
B6-B5	47,9	50,4	48,7	48,6	48,3	47,4	47,3	47,4	46,6	47,1	47,6
B6-B5-B4-B3-B2	45,0	42,3	39,9	38,6	37,1	35,8	35,6	37,2	37,3	38,7	40,6
Redução dos vazios (%)	6,1%	16,1%	18,1%	20,6%	23,2%	24,5%	24,7%	21,5%	20,0%	17,8%	14,7%
Saco com vibração	Índice de vazios										
B6-B5	40,5	43,4	42,5	41,9	41,0	40,6	40,9	41,2	41,0	40,7	41,1
B6-B5-B4-B3-B2	36,9	35,5	33,0	31,1	29,4	27,9	28,6	29,3	29,4	30,3	31,3
Redução dos vazios (%)	8,9%	18,2%	21,6%	25,8%	28,3%	31,3%	30,1%	28,9%	28,3%	25,6%	23,8%
Vibração por partes	Índice de vazios										
B6-B5	40,2	42,3	42,6	41,9	40,6	40,7	40,9	41,2	40,9	41,0	41,4
B6-B5-B4-B3-B2	36,5	34,6	32,6	31,0	29,1	29,6	29,3	30,4	30,0	30,2	31,7
Redução dos vazios (%)	9,2%	18,2%	23,5%	26%	28,3%	27,3%	28,4%	26,2%	26,7%	26,4%	23,4%

Fonte: Autora.

Ao analisar a porcentagem de índice de vazios, observa-se que entre os métodos o menor resultado obtido foi no Lançamento sem vibração 2,7% e que a maior redução ocorreu no método Saco com vibração 31,3%.

6.2.2 Composição B5-B3-A6-A3

6.2.2.1 Índice de vazios B5-B3

A segunda composição a ser analisada foi B5-B3-A6-A3. O primeiro ensaio realizado consistiu na combinação dos agregados, B5 e B3, que podem ser observados na Figura 32.

Figura 32 - Composição B5-B3

Fonte: Autora.

No Quadro 12 estão as combinações utilizadas.

Quadro 11 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados - B5-B3

Proporção Ag1-Ag2	Ag1 B5	Ag2 B3
100 - 0	5500,0	0
90 - 10		611,1
80 - 20		763,9
70 - 30		982,1
60 - 40		1309,5
50 - 50		1833,3
40 - 60	1309,5	5500,0
30 - 70	982,1	
20 - 80	763,9	
10 - 90	611,1	
0 - 100	0	

Fonte: Autora.

Foram utilizadas como Ag1, 5500,0g de B5 na proporção 100-0 e em seguida, acrescenta-se o Ag2-B3 em diferentes proporções até a combinação atingir a porcentagem de 50-50. Na sequência inversa, são utilizados 5500,0g de B3-Ag2 na proporção 0-100 e depois acrescentado o Ag1 em diferentes proporções até atingir a porcentagem 40-60. Na Figura 33 é possível observar os resultados obtidos.

Figura 33 - Composição dos agregados B5-B3

Observa-se através das curvas, que o modo como os agregados se comportam considerando cada porcentagem nos cinco métodos é semelhante. Sendo exceção, a porcentagem 50-50 dos métodos Lançamento sem vibração, Lançamento com vibração, Saco

com vibração e Vibração por partes, onde ocorreu uma alteração em relação à sequência dos demais agregados.

Percebe-se, que quando comparado à proporção 100-0 e a 0-100 entre os agregados Ag1 e Ag2, a diferença obtida nos resultados de índice de vazios é pequena. Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas inversamente, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100, de modo geral, obteve menores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o de Lançamento sem vibração obteve um resultado melhor do que o do método do Saco sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtidos foi 41,9% no método de Lançamento sem vibração na proporção 40-60. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Vibração por partes com 35,9% na proporção 40-60. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração, obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados, sendo valores próximos e que em alguns casos se sobrepõem.

De forma geral, observa-se que conforme a porcentagem entre o Ag1 e o Ag2 vão se equiparando, os índices de vazios vão diminuindo, devido à inserção de um material de menor granulometria e o rearranjo entre esses materiais, ou seja, a brita de tamanho menor consegue preencher vazios existentes. Por serem agregados com dimensões próximas, observa-se que a redução do índice de vazios não foi expressiva.

6.2.2.2 Índice de vazios B5-B3-A6

O segundo ensaio consistiu em acrescentar aos agregados utilizados no primeiro ensaio um novo agregado de menor granulometria, sendo o escolhido a areia A6. Na Figura 34, pode ser observada a combinação dos agregados.

Figura 34 - Composição B5-B3-A6

Fonte: Autora.

As proporções utilizadas podem ser observadas no Quadro 13 a seguir:

Quadro 12 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados - B5-B3-A6

Proporção Ag1-Ag2	Ag1		Ag2
	B5 - 60%	B3 - 40%	A6
100 - 0	3600 + 2400 = 6000,0		0
90 - 10			605,0
80 - 20			756,3
70 - 30			972,4
60 - 40			1296,5
50 - 50			1815,1
40 - 60	843,3	556,2	5300,0
30 - 70	625,7	417,1	
20 - 80	486,7	324,4	
10 - 90	389,3	259,6	
0 - 100	0	0	

Fonte: Autora.

Inicialmente, foram utilizadas como Ag1, 3600,0g de B5 e 2400,0g de B3, totalizando 6000,0g de agregados na proporção 100-0 e na curva inversa, foram utilizados 5300,0g de A6 - Ag2 na proporção 0-100. Na Figura 35 é possível observar os resultados obtidos.

Figura 35 - Composição dos agregados B5-B3-A6

Fonte: Autora.

Observa-se a semelhança no comportamento dos cinco métodos.

Quando comparado à proporção 100-0 e a 0-100 entre os agregados Ag1 e Ag2, a diferença obtida nos resultados de índice de vazios é pequena. Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100, de modo geral, obteve menores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o de Lançamento sem vibração obteve resultados melhores do que o do método do Saco sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 31,2% no método de Lançamento sem vibração na proporção 50-50 e no método

Saco sem vibração na proporção 60-40. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Saco com vibração com 26,3% na proporção 60-40. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração, obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

De forma geral, conforme a porcentagem entre o Ag1 e o Ag2 vai se equiparando, os índices de vazios vão diminuindo, devido à inserção de um material de menor granulometria e o rearranjo entre esses materiais. Verifica-se, que a presença da areia ao conjunto contribuiu para a redução do índice de vazios.

6.2.2.3 Índice de vazios B5-B3-A6-A3

No terceiro ensaio, foi acrescentado aos agregados utilizados no segundo ensaio, a areia A3. Na Figura 36, podem ser observados os agregados utilizados.

Fonte: Autora.

No quadro a seguir estão as proporções variáveis entre os agregados, utilizadas no ensaio:

Quadro 13 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados- B5-B3-A6-A3

Proporção Ag1-Ag2	Ag1			Ag2
	B5-36%	B3-24%	A6-40%	A3
100 - 0	2467,3+1644,8+2487,9= 6600,0			0
90 - 10				691,1
80 - 20				863,9
70 - 30				1110,7
60 - 40				1480,9
50 - 50				2073,3
40 - 60	519,5	346,3	523,8	5500,0
30 - 70	389,6	259,7	392,9	
20 - 80	303,0	202,0	305,6	
10 - 90	242,4	161,6	244,4	
0 - 100	0	0	0	

Fonte: Autora.

Inicialmente foram utilizadas como Ag1, 2467,3g de B5, 1644,8g de B3, 2487,9g de A6, totalizando 6600,0g de agregados na proporção 100-0 e na sequência acrescentado o Ag2-A3 até atingir a proporção 50-50. Depois é realizado o inverso, sendo utilizados 5500,0g de A3-Ag2 na proporção 0-100 que se mantém constante, sendo acrescentado a ela o Ag1 em

diferentes proporções até atingir a porcentagem 40-60. Na Figura 37, podem ser observados os resultados obtidos:

Figura 37 - Composição dos agregados B5-B3-A6-A3

Através do gráfico, observa-se que quando começa com Ag1 sendo acrescentado o Ag2, da proporção 100-0 a 70-30 este preenche os vazios, reduzindo os valores obtidos. A partir de 60-40 começa a aumentar o índice de vazios, isso provavelmente ocorre, porque a quantidade de agregados de menor granulometria utilizada foi superior a necessária, provocando o afastamento dos agregados. Ao realizar o inverso, ou seja, começar com Ag2 e acrescentar Ag1, a redução do índice de vazios foi constante, porém menor que o da outra curva.

Quando inicia com Ag1 100-0 o índice de vazios é menor do que o obtido quando inicia com o Ag2 0-100. Os menores índices de vazio obtidos foram 23% no método Lançamento sem vibração na proporção 80-20 e 26,7% no método Saco sem vibração na proporção 70-30.

Nos gráficos a seguir há a comparação do resultado dos métodos nos três ensaios. Os métodos podem ser visualizados individualmente na Figura 38.

Figura 38 - Relação índice de vazios inicial (B5-B3) e final (B5-B3-A6-A3)

Fonte: Autora.

Ao comparar o primeiro e o último ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

Quadro 14 - Relação índice de vazios inicial (B5-B3) e final (B5-B3-A6-A3)

Lançamento sem vibração	Índice de vazios										
B5-B3	45,0	44,7	43,2	43,3	42,9	43,2	41,9	43,0	43,7	45,4	46,8
B5-B3-A6-A3	31,2	29,6	26,8	26,9	28,1	29,9	31,4	33,7	35,9	38,7	40,7
Redução dos vazios (%)	30,6%	33,8%	37,7%	37,9%	34,5%	30,8%	25,1%	21,6%	17,8%	14,8%	13%
Lançamento com vibração	Índice de vazios										
B5-B3	41,4	38,9	37,5	36,9	37,0	36,6	36,3	37,1	37,9	39,0	40,1
B5-B3-A6-A3	27,2	24,8	23,0	23,1	24,7	26,6	28,1	29,9	32,4	33,3	35,6
Redução dos vazios (%)	34,3%	36,3%	38,7%	37,4%	33,2%	27,3%	22,5%	19,4%	14,5%	14,6%	11,2%
Saco sem vibração	Índice de vazios										
B5-B3	48,7	47,8	45,2	44,6	44,1	44,0	42,8	43,5	43,7	45,5	47,0
B5-B3-A6-A3	31,7	28,8	27,5	26,7	29,2	29,7	32,3	34,2	36,2	38,8	40,9
Redução dos vazios (%)	34,9%	39,7%	39,2%	40,1%	33,8%	32,5%	24,5%	21,4%	17,2%	14,7%	13%
Saco com vibração	Índice de vazios										
B5-B3	40,9	39,6	38,0	36,8	37,0	37,2	36,4	37,0	38,2	39,0	40,3
B5-B3-A6-A3	27,3	23,8	23,3	23,3	25,3	25,6	28,0	30,1	32,2	33,5	35,3
Redução dos vazios (%)	33,3%	39,9%	38,7%	36,7%	31,6%	31,2%	23,1%	17,8%	15,7%	14,1%	12,4%
Vibração por partes	Índice de vazios										
B5-B3	41,5	39,5	38,0	36,5	36,1	36,8	35,9	37,0	37,8	38,8	40,6
B5-B3-A6-A3	27,9	25,4	23,8	23,2	25,1	26,4	27,8	29,7	32,4	33,6	35,5
Redução dos vazios (%)	32,8%	35,7%	37,4%	36,4%	30,5%	28,3%	22,6%	19,7%	14,3%	13,4%	12,6%

Fonte: Autora.

Observa-se que o maior índice de vazios obtido foi no método Saco sem vibração, 28,3%, e que o menor ocorreu no método Vibração por partes, 25,8%.

6.2.3 Composição B5-B2-A4-A1

6.2.3.1 Índice de vazios B5-B2

A terceira composição a ser analisada foi B5-B2-A4-A1. O primeiro ensaio realizado consistiu na combinação dos agregados, B5 e B2, que podem ser observados na Figura 39 a seguir:

Figura 39 - Composição B5-B2

Fonte: Autora.

No Quadro a seguir observa-se a combinação utilizada.

Quadro 15 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados - B5-B2

	Ag1	Ag2
Proporção Ag1-Ag2	B5	B2
100 - 0	5500,0	0
90 - 10		611,1
80 - 20		763,9
70 - 30		982,1
60 - 40		1309,5
50 - 50		1833,3
40 - 60	1500,0	6300,0
30 - 70	1125,0	
20 - 80	875,0	
10 - 90	700,0	
0 - 100	0	

Fonte: Autora.

Inicialmente foi utilizado como Ag1, 5500,0g de B5 na proporção 100-0 e em seguida, acrescentado o Ag2-B2 em diferentes proporções até a combinação atingir a porcentagem de 50-50. Na sequência, realiza-se o inverso, são utilizados 6300,0g de B2-Ag2 na proporção 0-100, sendo acrescentado a ela o Ag1 em diferentes proporções até atingir a porcentagem 40-60. Na Figura 40 é possível observar os resultados obtidos.

Figura 40 - Composição dos agregados B5-B2

Observa-se através das curvas que o modo como os agregados se comportam considerando cada porcentagem nos cinco métodos é semelhante. Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100, de modo geral, obteve menores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o Saco sem vibração obteve um resultado melhor do que o do método do Lançamento sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtidos foi 34,2% no método Saco sem vibração na proporção 50-50. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Saco com vibração com 27,4% na proporção 50-50. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados, sendo valores próximos e que em alguns casos se sobrepõem.

De forma geral, nota-se que conforme a porcentagem entre o Ag1 e o Ag2 vai se equiparando, os índices de vazios vão diminuindo, devido à inserção de um material de menor granulometria e o rearranjo entre esses materiais, ou seja, a brita de tamanho menor consegue preencher vazios existentes.

6.2.3.2 Índice de vazios B5-B2-A4

O segundo ensaio consistiu em acrescentar a areia A4 aos agregados utilizados no primeiro ensaio. Na Figura 41, pode ser observada a combinação dos agregados.

Fonte: Autora.

Cada método é realizado com as combinações de proporções variáveis entre os agregados, fator que pode ser observado no Quadro 17 a seguir.

Quadro 16 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados - B5-B2-A4

Proporção Ag1-Ag2	Ag1		Ag2
	B5 - 60%	B2 - 40%	A4
100 - 0	3900 + 2600 = 6500,0		0
90 - 10			655,4
80 - 20			819,3
70 - 30			1053,4
60 - 40			1404,5
50 - 50			1966,3
40 - 60	865,7	577,2	5500,0
30 - 70	649,3	432,9	
20 - 80	505,0	336,7	
10 - 90	404,0	269,4	
0 - 100	0	0	

Fonte: Autora.

Inicialmente, foram utilizadas como Ag1, 3900,0g de B5 e 2600,0g de B2 totalizando 6500,0g de agregados na proporção 100-0. A partir da porcentagem 90-10 acrescenta-se o Ag2-A4, em diferentes proporções, até a combinação atingir a porcentagem de 50-50. Na sequência realiza-se o inverso, são utilizados 5500,0g de A4-Ag2, na proporção 0-100 e depois acrescenta-se o Ag1 em diferentes proporções até atingir a porcentagem 40-60. Na Figura 42 é possível observar os resultados obtidos.

Figura 42 - Composição dos agregados B5-B2-A4

Observa-se a semelhança no comportamento dos cinco métodos.

Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100, de modo geral, obteve menores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o de Lançamento sem vibração obteve resultados melhores do que o do método do Saco sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 26,8% na proporção 70-30. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Lançamento com vibração com 22,2% na proporção 70-30. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

De forma geral, conforme a porcentagem entre o Ag1 e o Ag2 vai se equiparando, os índices de vazios vão diminuindo, devido à inserção de um material de menor granulometria e o rearranjo entre esses materiais. Verifica-se, que a presença da areia ao conjunto contribuiu para a redução do índice de vazios.

6.2.3.3 Índice de vazios B5-B2-A4-A1

O terceiro ensaio consistiu em acrescentar a areia A1 aos agregados utilizados no segundo ensaio. Na Figura 43, podem ser observados os agregados utilizados.

Fonte: Autora.

Na tabela a seguir observa-se a composição utilizada.

Quadro 17 - Combinação de proporções variáveis entre os agregados - B5-B2-A4-A1

Proporção Ag1-Ag2	Ag1			Ag2
	B5-36%	B2-24%	A4-40%	A1
100 - 0	3227,7 + 2151,8 + 1220,5 = 6600			0
90 - 10				678,1
80 - 20				847,6
70 - 30				1089,7
60 - 40				1453,0
50 - 50				2034,2
40 - 60	692,6	461,7	261,9	5500
30 - 70	519,5	346,3	196,4	
20 - 80	404,0	269,4	152,8	
10 - 90	323,2	215,5	122,2	
0 - 100	0	0	0	

Fonte: Autora.

Inicialmente foram utilizadas como Ag1, 3227,7g de B5, 2151,8g de B2, 1220,5g de A6, totalizando 6600,0g de agregados na proporção 100-0 e na sequência acrescentado o Ag2-A1 até atingir a proporção 50-50. Depois é realizado o inverso, sendo utilizados 5500,0g de A1-Ag2 na proporção 0-100 que se mantém constante, sendo acrescentado a ela o Ag1 em

diferentes proporções até atingir a porcentagem 40-60. Na Figura 44, podem ser observados os resultados obtidos:

Figura 44 - Composição dos agregados B5-B2-A4-A1

Através do gráfico, observa-se que quando começa com Ag1 sendo acrescentado o Ag2, da proporção 100-0 a 80-20, com exceção do método Saco com vibração, este preenche os vazios, reduzindo os valores obtidos. A partir de 70-30 ocorre o aumento do índice de vazios, provavelmente devido ao fato da quantidade de agregados de menor granulometria utilizada ser superior a necessária, provocando o afastamento dos agregados. Os ensaios realizados com a curva inversa, ou seja, a partir de Ag2, teve uma redução do índice de vazios constante, porém os índices obtidos foram maiores.

Os menores índices de vazio obtidos foram 20,1% no método Saco com vibração na proporção 90-10 e 24,7% no método Saco sem vibração na proporção 80-20.

Nos gráficos a seguir há a comparação dos resultados obtidos nos quatro ensaios. Os métodos podem ser visualizados individualmente na Figura 45.

Figura 45 - Relação índice de vazios inicial (B5-B2) e final (B5-B2-A4-A1)

Fonte: Autora.

Ao comparar o primeiro e o último ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

Quadro 18 - Relação índice de vazios inicial (B5-B2) e final (B5-B2-A4-A1)

Lançamento sem vibração	Índice de vazios										
B5-B2	47,3	43,9	40,6	37,4	36,1	35,3	35,8	35,9	37,4	39,1	40,6
B5-B2-A4-A1	29,4	26,6	24,9	26,2	28,2	31,1	33,5	36,3	38,3	41,3	44,0
Redução dos vazios (%)	37,8%	39,4%	38,7%	29,9%	21,9%	11,9%	6,4%	-	-	-	-
Aumento dos vazios (%)	-	-	-	-	-	-	-	1,1%	2,4%	5,6%	8,4%
Lançamento com vibração	Índice de vazios										
B5-B2	41,9	38,9	34,2	30,4	29,1	27,6	28,8	29,6	30,8	32,3	33,8
B5-B2-A4-A1	25,5	21,6	20,4	23,1	25,4	28,2	30,1	32,6	34,6	37,1	38,2
Redução dos vazios (%)	39,1%	44,5%	40,4%	24,1%	12,7%	-	-	-	-	-	-
Aumento dos vazios (%)	-	-	-	-	-	2,2%	4,5%	10,1%	12,3%	14,9%	13%
Saco sem vibração	Índice de vazios										
B5-B2	47,9	45,0	41,4	36,9	34,9	34,2	34,7	36,4	37,2	38,6	41,1
B5-B2-A4-A1	29,0	26,7	24,7	26,3	29,3	31,2	34,3	36,6	39,5	41,4	43,9
Redução dos vazios (%)	39,5%	40,7%	40,3%	28,7%	16,1%	8,8%	1,2%	-	-	-	-
Aumento dos vazios (%)	-	-	-	-	-	-	-	0,5%	6,2%	7,3%	6,8%
Saco com vibração	Índice de vazios										
B5-B2	41,8	39,1	34,5	30,9	27,9	27,4	29,1	30,2	30,9	32,3	33,6
B5-B2-A4-A1	24,4	20,1	20,6	23,5	25,5	27,9	30,7	32,7	35,2	37,6	38,9
Redução dos vazios (%)	41,6%	48,6%	40,3%	23,9%	8,6%	-	-	-	-	-	-
Aumento dos vazios (%)	-	--	-	-	-	1,8%	5,5%	8,3%	13, 9%	16,4%	15,8%
Vibração por partes	Índice de vazios										
B5-B2	42,3	38,9	35,0	30,3	29,2	28,5	29,1	29,0	30,5	32,0	34,0
B5-B2-A4-A1	25,3	21,5	21,1	22,8	25,4	27,6	30,1	32,5	34,7	37,1	38,6
Redução dos vazios (%)	40,2%	44,7%	39,7%	24,8%	13,1%	3,2%	-	-	-	-	-
Aumento dos vazios (%)	-	-	-	-	-	-	3,4%	12,1%	13,8%	15,9%	13,5%

Fonte: Autora.

Observa-se que ao comparar o primeiro e o último ensaio a partir de determinada porcentagem o índice de vazios em B5-B2-A4-A1 foi superior ao do ensaio inicial B5-B2, ou seja, o acréscimo da areia A1 não contribuiu para o preenchimento de todos os vazios promovendo um aumento desses. O maior índice de vazios obtido foi no método Saco com vibração, 48,6%, e que o menor ocorreu no método Saco sem vibração 1,2%.

Para uma análise mais ampla dos cinco métodos propostos, foram analisados também os resultados obtidos em ensaios realizados por quatro alunos de iniciação científica no Laboratório de Construção Civil da USP, São Carlos, sob a orientação do prof. Dr. Bruno Luís Damineli. Assim, foi possível observar se a realização dos métodos por pessoas diferentes e com diferentes combinações de agregado interfere nos resultados obtidos.

6.2.4 Composição B6-B3-A7-A1

6.2.4.1 Índice de vazios B6-B3

Na composição B6-B3-A7-A1 o primeiro ensaio realizado consistiu na combinação dos agregados, B6 e B3, que podem ser observados na Figura 46.

Figura 46: Composição B6-B3

Fonte: Autora.

Na Figura 47 é possível observar os resultados obtidos.

Figura 47 - Composição dos agregados B6-B3

Observa-se através das curvas, que o modo como os agregados se comportam considerando cada porcentagem nos cinco métodos é semelhante. Sendo exceção, o método Lançamento sem vibração cujo aumento do índice de vazios inicia-se na porcentagem 70-30 e se mantém até a porcentagem 50-50.

Percebe-se que, quando comparado à proporção 100-0 e a 0-100 entre os agregados Ag1 e Ag2, a diferença obtida nos resultados de índice de vazios é pequena. Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas inversamente, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100, de modo geral, obteve menores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o Saco sem vibração obteve um resultado melhor do que o do método do Lançamento sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 42,1% no método de Saco sem vibração na proporção 60-40. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Saco com vibração com 34,6% na proporção 60-40. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração, obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

6.2.4.2 Índice de vazios B6-B3-A7

O segundo ensaio consistiu em acrescentar aos agregados utilizados no primeiro ensaio um novo agregado de menor granulometria, sendo o escolhido a areia A7. Na Figura 48, pode ser observada a combinação dos agregados.

Fonte: Autora.

Na Figura 49 é possível observar os resultados obtidos.

Figura 49 - Composição dos agregados B6-B3

Observa-se através das curvas, que o modo como os agregados se comportam considerando cada porcentagem nos cinco métodos é semelhante. Apesar do gráfico ser visualmente diferente nas porcentagens 70-30 nos métodos Saco sem vibração e Vibração por partes, manteve-se nesses casos a diminuição do índice de vazios, porém no caso do método Saco sem vibração o índice de vazios foi inferior ao obtido na proporção 60-40. Percebe-se também que no método Saco sem vibração ocorreu oscilações entre aumento e diminuição do índice de vazios ao longo do gráfico como pode ser observado nas porcentagens 60-40 onde ocorreu o aumento do índice de vazios e na porcentagem 20-80 cujo índice de vazios obtido foi inferior ao da porcentagem 30-70.

Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100, de modo geral, obteve menores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o Saco sem vibração obteve resultados melhores do que o do método de Lançamento sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 33% no método Saco sem vibração na proporção 50-50. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Vibração por partes 27,6% na proporção 60-40. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

De forma geral, conforme a porcentagem entre o Ag1 e o Ag2 vai se equiparando, os índices de vazios vão diminuindo, provavelmente devido a um maior equilíbrio entre a

proporção dos agregados de menor e de maior granulometria na composição. Verifica-se que a presença da areia ao conjunto contribuiu para a redução do índice de vazios.

6.2.4.3 Índice de vazios B6-B3-A7-A1

O terceiro ensaio consistiu em acrescentar aos agregados utilizados no segundo ensaio um novo agregado de menor granulometria, sendo o escolhido a areia A1. Na Figura 50, pode ser observada a combinação dos agregados nesse ensaio.

Figura 50 - Composição B6-B3-A7-A1

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos podem ser vistos no gráfico da Figura 51.

Figura 51 - Composição dos agregados B6-B3-A7-A1

Através desse gráfico, observa-se que quando começa com Ag1 sendo acrescentado o Ag2, este preenche os vazios, reduzindo os valores obtidos. Isso ocorre de 100-0 a 70-30. A partir de 60-40 a 50-50 começa a aumentar o índice de vazios, isso provavelmente ocorre porque foi utilizado mais agregado de menor granulometria do que o necessário, provocando o afastamento dos agregados, aumentando assim, o índice de vazios.

Ao realizar o inverso, ou seja, começar com Ag2 e acrescentar Ag1 observa-se que de modo geral ocorreu a redução do índice de vazios de 0-100 a 40-60, porém, nos métodos

Lançamento com vibração, Saco sem vibração e Saco com vibração na porcentagem 10-90 ocorreu um aumento de vazios.

Observando a curva, percebe-se que quando começa com Ag1 100-0 o índice de vazios é menor do que o obtido quando inicia com o Ag2 0-100. Os menores índices de vazio obtidos foram 25,5% no método Saco sem vibração na proporção 70-30 e 22,7% no método Vibração por partes na proporção 70-30.

Nos gráficos a seguir há a comparação dos resultados obtidos nos quatro ensaios. Os métodos podem ser visualizados individualmente na Figura 52.

Figura 52 - Relação índice de vazios inicial (B6-B3) e final (B6-B3-A7-A1)

Ao comparar o primeiro e o último ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

Quadro 19 - Relação índice de vazios inicial (B6-B3) e final (B6-B3-A7-A1)

Lançamento sem vibração	Índice de vazios										
B6-B3	46,0	44,0	42,7	42,9	43,3	43,5	43,1	43,7	44,0	45,6	46,3
B6-B3-A7-A1	33,3	30,5	28,8	26,8	31,0	33,4	29,9	35,2	42,9	44,4	45,4
Redução dos vazios (%)	27,7%	30,6%	32,6%	37,5%	28,3%	23,3%	30,7%	19,6%	2,7%	2,7%	1,9%
Lançamento com vibração	Índice de vazios										
B6-B3	42,4	40,7	40,1	39,1	37,8	37,3	36,4	38,0	38,5	40,0	40,6
B6-B3-A7-A1	28,4	25,7	24,1	23,4	27,3	30,2	29,7	34,0	41,3	42,5	40,1
Redução dos vazios (%)	33,0%	36,9%	39,7%	40%	27,6%	19%	18,3%	11,4%	-	-	1,1%
Aumento dos vazios (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	7,1%	6,2%	-
Saco sem vibração	Índice de vazios										
B5-B3	48,2	47,1	44,1	43,1	42,1	42,1	42,3	42,9	43,2	44,3	45,4
B6-B3-A7-A1	33,0	28,6	26,6	25,5	29,7	30,6	29,7	34,0	41,3	42,5	40,1
Redução dos vazios (%)	31,6%	39,2%	39,7%	40,8%	29,4%	27,4%	29,8%	20,6%	4,4%	95,8%	11,5%
Saco com vibração	Índice de vazios										
B6-B3	42,0	40,6	37,3	36,6	34,6	35,3	36,3	36,9	38,9	39,2	39,9
B6-B3-A7-A1	28,5	24,3	22,7	22,8	26,0	30,1	29,5	29,7	35,0	41,2	38,1
Redução dos vazios (%)	32,1%	40,2%	39%	37,5%	25%	14,8%	18,9%	19,5%	10%	-	4,6%
Aumento dos vazios (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,3%	-
Vibração por partes	Índice de vazios										
B6-B3	41,5	40,7	38,6	37,1	36,3	36,6	36,6	37,4	38,3	39,4	40,0
B6-B3-A7-A1	27,8	25,7	23,6	22,7	25,9	29,4	29,1	29,7	34,0	37,2	38,0
Redução dos vazios (%)	32,5%	36,8%	38,9%	38,8%	28,5%	19,8%	20,4%	20,8%	11,2%	5,7%	5%

Fonte: Autora.

Nota-se que ao comparar o primeiro e o último ensaio, em algumas porcentagens o índice de vazios em B6-B3-A7-A1 foi superior ao do ensaio inicial B6-B3, ou seja, o acréscimo da areia A1 não contribuiu para o preenchimento de todos os vazios promovendo um aumento desses.

Observa-se que o maior índice de vazios obtido foi no método Saco sem vibração, 40,8%, e que o menor ocorreu no método Lançamento sem vibração 1,1%.

6.2.5 Composição B6-B2-A5-A1

6.2.5.1 Índice de vazios B6-B2

Na composição B6-B2-A5-A1 o primeiro ensaio realizado consistiu na combinação dos agregados, B6 e B2, que podem ser observados na Figura 53.

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 54.

Figura 54 - Composição dos agregados B6-B2

Observa-se a semelhança no comportamento dos cinco métodos. Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100, obteve maiores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o de Lançamento sem vibração obteve resultados melhores do que o do método do Saco sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 35,2% na proporção 60-40. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Vibração por partes com 28,3% na proporção 60-40. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

6.2.5.2 Índice de vazios B6-B2-A5

Ao primeiro ensaio realizado com as britas B6 e B2, acrescentou-se a areia A5. Na Figura 55, observam-se os agregados utilizados.

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 56.

Figura 56 - Composição dos agregados B6-B2-A5

Observa-se a semelhança no comportamento dos cinco métodos. Começando com Ag1 ocorre a redução do índice de vazios até atingir a proporção 80-20, a partir da proporção 70-30 ocorre o aumento do índice de vazios até atingir a proporção 50-50. Como exceção temos a proporção 60-40 no método Saco com vibração cujo índice de vazios aumentou. Começando com Ag2 a diminuição do índice de vazios é constante até atingir a proporção 50-50.

Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100, obteve maiores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o de Lançamento sem vibração obteve resultados melhores do que o do método do Saco sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 31% na proporção 70-30. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de

vazios obtido foi através do método Vibração por partes com 24% na proporção 80-20. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração, obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

6.2.5.3 Índice de vazios B6-B2-A5-A1

No terceiro ensaio, foi acrescentado aos agregados utilizados no segundo ensaio, a areia A1. Na Figura 57, podem ser observados os agregados utilizados.

Figura 57 - Composição B6-B2-A5-A1

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 58.

Figura 58 - Composição dos agregados B6-B2-A5-A1

Observa-se a semelhança no comportamento dos cinco métodos.

Através do gráfico, observa-se que quando começa com Ag1 sendo acrescentado o Ag2, da proporção 100-0 a 80-20 este preenche os vazios, reduzindo os valores obtidos. A partir de 70-30 a 50-50 começa a aumentar o índice de vazios, isso provavelmente ocorre porque foram utilizados mais agregados de menor granulometria do que o necessário, provocando o afastamento dos agregados. Ao realizar o inverso, ou seja, começar com Ag2 e acrescentar Ag1 observa-se que ocorre a redução do índice de vazios no intervalo de 0-100 a 50-50.

Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100, obteve maiores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o de Lançamento sem vibração obteve resultados melhores do que o do método do Saco sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 28,3% na proporção 80-20. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Vibração por partes com 21,8% na proporção 80-20.

Como visto anteriormente os métodos que utilizam em seu processo a vibração obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

Na Figura 59 há a comparação dos resultados obtidos nos quatro ensaios, sendo que os métodos podem ser visualizados individualmente.

Figura 59 - Relação índice de vazios inicial (B6-B2) e final (B6-B2-A5-A1)

Ao comparar o primeiro e o último ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

Quadro 20 - Comparação entre ensaios diferentes em um mesmo método, B6-B2-A5-A1

Lançamento sem vibração	Índice de vazios										
B6-B	41,2	38,9	36,7	36,2	35,2	37	36,8	38,5	40,7	45,0	47,8
B6-B2-A5-A1	31,1	28,8	28,3	29,8	30,5	33,2	34,0	37,8	40,9	42,8	45,3
Redução dos vazios	24,5%	26%	22,9%	17,8%	13,4%	10,2%	7,5%	1,8%	-	4,8%	5,3%
Aumento dos vazios	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4%	-	-
Lançamento com vibração	Índice de vazios										
B6-B2	35,2	32,6	31,6	29,8	28,4	29,9	29,8	32,0	35,3	40,1	44,5
B6-B2-A5-A1	24	21,9	22,00	23,5	25,5	28,2	29,2	32,9	35,0	36,6	39,0
Redução dos vazios	31,9%	32,8%	30,3%	21,1%	10,3%	5,7%	1,91%	-	0,8%	8,6%	12,3%
Aumento dos vazios	-	-	-	-	-	-	-	2,9%	-	-	-
Saco sem vibração	Índice de vazios										
B6-B2	40,1	39,2	37,2	36,3	35,5	37,3	36,4	38,7	42,4	46,5	49,5
B6-B2-A5-A1	31,4	29	29,1	29,3	31,3	33,3	35,6	38,1	40,8	42,1	45,4
Redução dos vazios	21,7%	25,9%	21,8%	19,4%	11,8%	10,8%	2,3%	1,6%	3,8%	9,4%	8,3%
Saco com vibração	Índice de vazios										
B6-B2	33,7	32,5	31,2	30,3	28,9	30,6	30,2	33,5	37,5	41,5	44,6
B6-B2-A5-A1	25,5	22,0	22,1	23,5	25,6	27,6	29,4	32,3	35	37,2	38,9
Redução dos vazios (%)	24,4%	32,2%	29,2%	22,5%	11,3%	9,7%	2,7%	3,6%	6,7%	10,4%	12,7%
Vibração por partes	Índice de vazios										
B6-B2	34,2	31,9	30,9	29,4	28,3	30,0	30,2	32,8	35,5	39,9	43,4
B6-B2-A5-A1	23,9	22,2	21,8	23,2	24,7	26,8	28,7	31,8	33,8	36,6	38,3
Redução dos vazios (%)	30%	30,5%	29,5%	21%	12,7%	10,8%	4,8%	3,2%	4,7%	8,2%	11,8%

Fonte: Autora.

Observa-se que o maior índice de vazios obtido foi no método Saco com vibração, 32,2%, e que o menor ocorreu no método Saco sem vibração 1,6%.

6.2.6 Composição B6-B4-B2-A6-A3-A1

6.2.6.1 Índice de vazios B6-B4

Na composição B6-B4-B2-A6-A3-A1 o primeiro ensaio realizado consistiu na combinação dos agregados, B6 e B4, que podem ser observados na Figura 60.

Figura 60 - Composição B6-B4

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 61.

Figura 61 - Composição dos agregados B6-B4

Observa-se através das curvas, que o modo como os agregados se comportam nos métodos com vibração são semelhantes, assim como nos métodos sem vibração. Neste último a exceção ocorre no método Saco sem vibração na porcentagem 10-90 e na porcentagem 70-30 nos métodos Lançamento sem vibração e Saco sem vibração com o aumento do índice de vazios.

Percebe-se que, quando comparado à proporção 100-0 e a 0-100 entre os agregados Ag1 e Ag2, a diferença obtida nos resultados de índice de vazios é pequena. Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas inversamente, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100, de modo geral, obteve menores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o Lançamento sem vibração obteve um resultado melhor do que o do método do Saco sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtidos foi 42,6% no método Lançamento sem vibração na proporção 30-70. Nos métodos que utilizam a

vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Vibração por partes com 39,4% na proporção 50-50. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

6.2.6.2 Índice de vazios B6-B4-B2

O segundo ensaio consistiu em acrescentar aos agregados utilizados no primeiro um novo agregado de menor granulometria, sendo o escolhido a brita B2. Na Figura 62, pode ser observada a combinação dos agregados.

Fonte: Autora.

Na Figura 63 é possível observar os resultados obtidos.

Figura 63 - Composição dos agregados B6-B4-B2

Observa-se através das curvas que o modo como os agregados se comportam considerando cada porcentagem nos cinco métodos é semelhante. A exceção ocorre no método Vibração por partes na porcentagem 10-90 com o aumento do índice de vazios.

Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100, de modo geral, obteve menores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o Saco sem vibração obteve resultados melhores do que o do método de Lançamento sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 37% no método Saco sem vibração na proporção 60-40. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Saco com vibração com 31,4% na proporção 60-40. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

6.2.6.3 Índice de vazios B6-B4-B2-A6

O terceiro ensaio consistiu em acrescentar aos agregados utilizados no segundo ensaio um novo agregado de menor granulometria, sendo o escolhido a areia A6. Na Figura 64, pode ser observada a combinação dos agregados.

Fonte: Autora.

Na Figura 65 é possível observar os resultados obtidos.

Figura 65 - Composição dos agregados B6-B4-B2-A6

Observa-se através das curvas que o modo como os agregados se comportam, considerando cada porcentagem nos cinco métodos, é semelhante. Percebe-se que, quando o método inicia-se com o Ag1, o índice de vazios diminui até a porcentagem 70-30 e depois

aumenta até alcançar a porcentagem 50-50. Ao iniciar com Ag2 o índice de vazios diminui até chegar à proporção 50-50.

Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag1 na proporção 0-100, de modo geral, obteve menores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o Saco sem vibração obteve resultados melhores do que o do método de Lançamento sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 32,8% no método Saco sem vibração na proporção 70-30. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Vibração por partes com 27,9% na proporção 70-30. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

6.2.6.4 Índice de vazios B6-B4-B2-A6-A3

No quarto ensaio, foi acrescentado na combinação B6-B4-B2-A6, a areia A3. Na Figura 66, podem ser observados os agregados utilizados.

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 67.

Figura 67 - Composição dos agregados B6-B4-B2-A6-A3

Observa-se que ao iniciar com o Ag1 sendo acrescentado o Ag2, na proporção 100-0 a 80-20, o agregado 2 preenche os vazios, reduzindo-os. A partir da proporção 70-30 a 50-50, ocorreu o aumento do índice de vazios, isso provavelmente aconteceu porque foram utilizados mais agregados de menor granulometria, provocando o afastamento entre os agregados. A exceção ocorre no método Lançamento sem vibração com a redução do índice de vazios na proporção 50-50.

Ao começar com Ag2 e acrescentar Ag1 percebe-se que ocorre a redução do índice de vazios de 0-100 a 50-50. Quando começa com Ag1 100-0 o índice de vazios é menor do que o obtido quando inicia com o Ag2 0-100. Os menores índices de vazio obtidos foram 29,6% no método Saco sem vibração na proporção 80-20 e 24,9% no método Vibração por partes na proporção 80-20.

6.2.6.5 Índice de vazios B6-B4-B2-A6-A3-A1

No último ensaio foi acrescentado aos agregados B6-B4-B2-A6-A3 a areia A1. Na Figura 68 podem ser observados os agregados utilizados.

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 69.

Figura 69 - Gráfico da composição dos agregados B6- B4-B2-A6-A3-A1

Observa-se que ao iniciar com Ag1 sendo acrescentado o Ag2 ocorre uma oscilação nos índices de vazios obtidos. Nos ensaios de Lançamento sem vibração, Lançamento com vibração e Saco com vibração na porcentagem 90-10 ocorreu o aumento do índice de vazios, já na porcentagem 80-20 ocorreu o aumento do índice de vazios nos métodos Saco com vibração e Vibração por partes. A partir da proporção 70-30 ocorre o aumento do índice de vazios até atingir a proporção 50-50. Na curva contrária, começando com Ag2, a diminuição do índice de vazios foi constante até atingir a proporção 50-50.

Os menores índices de vazio obtidos foram 29,3% no método Saco sem vibração na proporção 80-20 e 24,3% no método Vibração por partes na proporção 90-10.

Nos gráficos a seguir há a comparação dos resultados obtidos nos quatro ensaios. Os métodos podem ser visualizados individualmente na Figura 70.

Figura 70 - Relação índice de vazios inicial (B6-B4) e final (B6-B4-B2-A6-A3-A1)

Método 1 **Método 2** **Método 3** **Método 4** **Método 5**

Ao comparar o primeiro e o último ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

Quadro 21 - Relação índice de vazios inicial (B6-B4) e final (B6-B4-B2-A6-A3-A1)

Lançamento sem vibração	Índice de vazios										
B6-B4	47,8	45,7	45,0	45,1	43,5	43,3	43,1	42,6	45,7	46,8	48,3
B6-B4-B2-A6-A3-A1	30,5	30,8	30,7	30,7	32,8	34,9	36,0	38,1	41,1	43,4	45,4
Redução dos vazios (%)	36,2%	32,7%	31,8%	31,9%	24,8%	19,4%	16,4%	10,5%	10%	7,2%	6%
Lançamento com vibração	Índice de vazios										
B6-B4	46,2	43,2	41,7	40,9	40,4	39,5	40,0	40,6	41,6	44,2	43,9
B6-B4-B2-A6-A3-A1	25,0	26,2	26,1	27,3	29,4	31,4	32,4	34,3	36,8	38,6	41,2
Redução dos vazios (%)	45,8%	39,4%	37,4%	33,3%	27,1%	20,5%	18,9%	15,4%	11,4%	12,6%	6%
Saco sem vibração	Índice de vazios										
B6-B4	51,4	47,7	46,5	46,8	45,7	46,0	46,0	46,0	45,5	49,8	49,2
B6-B4-B2-A6-A3-A1	29,6	29,4	29,3	31,1	33,0	34,8	36,1	38,5	40,8	43,1	45,3
Redução dos vazios (%)	42,4%	38,4%	37,1%	33,6%	27,7%	24,5%	21,6%	16,3%	10,3%	13,5%	8%
Saco com vibração	Índice de vazios										
B6-B4	45,8	43,2	42,5	41,8	41,0	40,4	40,2	40,6	42,9	44,2	43,7
B6-B4-B2-A6-A3-A1	25,4	25,6	25,7	27,8	29,3	30,8	32,2	34,1	37,2	39,3	41,7
Redução dos vazios (%)	44,6%	40,8%	39,5%	33,4%	28,5%	23,8%	19,9%	15,9%	13,2%	11,2%	4,6%
Vibração por partes	Índice de vazios										
B6-B4	45,2	42,5	41,6	40,8	40,3	39,4	39,9	40,1	41,8	43,5	44,8
B6-B4-B2-A6-A3-A1	24,9	24,3	24,7	26,3	28,7	30,4	31,3	33,9	37,4	38,7	40,0
Redução dos vazios (%)	44,9%	42,9%	40,6%	35,4%	28,8%	22,7%	21,4%	15,5%	10,5%	11,2%	10,7%

Fonte: Autora.

Observa-se que o maior índice de vazios obtido foi no método Lançamento sem vibração, 45,8%, e que o menor ocorreu no método Saco com vibração 4,6%.

6.2.7 Composição B5-B3-A7-A5-A2

6.2.7.1 Índice de vazios B5-B3

Na composição B5-B3-A7-A5-A2 o primeiro ensaio realizado consistiu na combinação dos agregados, B5 e B3, que podem ser observados na Figura 71.

Figura 71 - Composição B5-B3
B5 B3

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 72.

Figura 72 - Gráfico da composição dos agregados B5-B3

Observa-se a semelhança no comportamento dos cinco métodos com exceção da porcentagem 20-80 no método Saco sem vibração onde ocorreu um aumento do índice de vazios. Percebe-se também que os índices de vazios obtidos foram próximos.

Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100, obteve maiores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o Saco sem vibração obteve resultados melhores do que o do método Lançamento sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 45% na proporção 60-40. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Saco com vibração com 39,9% na proporção 50-50. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

6.2.7.2 Índice de vazios B5-B3-A7

O segundo ensaio consistiu em acrescentar aos agregados utilizados no primeiro ensaio um novo agregado de menor granulometria, sendo o escolhido a areia A7. Na Figura 73, podem ser observados os agregados utilizados.

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 74.

Figura 74 - Gráfico da composição dos agregados B5-B3-A7

Observa-se a semelhança no comportamento dos cinco métodos com exceção da porcentagem 20-80 no método Vibração por partes onde ocorreu um aumento do índice de vazios.

Apesar da proximidade entre os resultados obtidos de índices de vazios, observa-se que conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100 obteve menores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o Saco sem vibração obteve resultados melhores do que o do método Lançamento sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 40,1% na proporção 50-50. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi

através do método Lançamento com vibração com 34,8% na proporção 60-40. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração, obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

6.2.7.3 Índice de vazios B5-B3-A7-A5

Na sequência B5-B3-A7 foi acrescentada a areia A5. Na Figura 75, podem ser observados os agregados utilizados.

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 76.

Figura 76 - Gráfico da composição dos agregados B5-B3-A7-A5

Observa-se a semelhança no comportamento dos cinco métodos.

Apesar da proximidade entre os resultados obtidos de índices de vazios, observa-se que conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag1 na proporção 0-100 obteve menores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o Saco sem vibração obteve resultados melhores do que o do método Lançamento sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 31,1%

na proporção 60-40. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Vibração por partes com 26,6% na proporção 60-40. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração, obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

6.2.7.4 Índice de vazios B5-B3-A7-A5-A2

O último ensaio, consistiu em acrescentar aos agregados utilizados no terceiro ensaio um novo agregado de menor granulometria, sendo o escolhido a areia A2. Na Figura 77, podem ser observados os agregados utilizados.

Fonte: Autora.

Na Figura 78 podem ser vistos os resultados obtidos.

Figura 78 - Gráfico da composição dos agregados B5-B3-A7-A5-A2.

Através do gráfico, observa-se que ao iniciar com o Ag1 sendo acrescentado o Ag2, na proporção 100-0 a 80-20, este preenche os vazios, reduzindo-os. A partir da proporção 70-30 a 50-50 ocorre o aumento do índice de vazios, isso provavelmente acontece porque foram utilizados mais agregados de menor granulometria do que o necessário, o que provocou o

afastamento entre os agregados. A exceção é o método Lançamento sem vibração na proporção 60-40.

Ao começar com Ag2 e acrescentar Ag1 percebe-se que ocorreu a redução do índice de vazios de 0-100 a 50-50. Quando começa com Ag1 100-0 o índice de vazios é menor do que o obtido quando inicia com o Ag2 0-100. Os menores índices de vazio obtidos foram 29,6% no método Lançamento sem vibração na proporção 80-20 e 25,6% no método Vibração por partes na proporção 80-20. Na Figura 79 há a comparação dos resultados obtidos nos quatro ensaios.

Figura 79 - Relação índice de vazios inicial (B5-B3) e final (B5-B3-A7-A5-A2)

Fonte: Autora.

Ao comparar o primeiro e o último ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

Quadro 22 - Relação índice de vazios inicial (B5-B3) e final (B5-B3-A7-A5-A2)

Lançamento sem vibração	Índice de vazios										
B5-B3	47,4	46,6	46,0	45,9	45,6	45,2	45,2	45,7	46,2	47,5	47,9
B5-B3-A7-A5-A2	31,5	30,8	29,6	31,1	31,1	32,8	34,7	36,4	37,2	40,3	42,4
Redução dos vazios	33,6%	33,8%	35,6%	32,3%	31,8%	27,4%	23,1%	20,4%	19,5%	15,2%	11,4%
Lançamento com vibração	Índice de vazios										
B5-B3	42,37	41,8	41,2	40,6	40,7	40,5	40,2	40,9	42,0	42,6	44,5
B5-B3-A7-A5-A2	26,83	26,5	26,1	26,9	27,3	28,6	29,0	32,3	32,8	35,6	38,0
Redução dos vazios (%)	36,6%	36,5%	36,7%	33,8%	33,1%	29,3%	27,9%	21,1%	21,9 %	16,4%	14,8%
Saco sem vibração	Índice de vazios										
B5-B3	47,7	47,2	46,6	45,7	45,0	45,2	45,6	47,0	47,9	48,4	49,3
B5-B3-A7-A5-A2	31,1	30,6	30,2	30,7	31,9	33,0	35,0	37,3	38,6	40,2	41,9
Redução dos vazios (%)	34,9%	35,3%	35,2%	32,7%	29,1%	26,9%	23,2%	20,7%	27,8%	16,8%	15%
Saco com vibração	Índice de vazios										
B5-B3	41,9	41,9	41,4	40,6	40,1	39,9	40,6	41,0	41,7	43,1	44,0
B5-B3-A7-A5-A2	27,7	26,3	25,7	26,2	27,7	28,0	29,8	31,7	33,5	35,3	36,6
Redução dos vazios (%)	34%	37,4%	37,9%	35,6%	31%	29,9%	26,6%	22,6%	19,6%	18,2%	16,9%
Vibração por partes	Índice de vazios										
B5-B3	41,8	41,4	41,2	40,3	40,1	40,1	40,8	40,8	42,3	43,1	44,1
B5-B3-A7-A5-A2	26,6	26,2	25,6	25,8	26,9	28,6	29,6	32,3	33,3	35,0	36,2
Redução dos vazios	36,4%	36,6%	37,7%	36%	33,1%	28,7%	27,4%	20,8%	21,4%	18,7%	17%

Fonte: Autora.

Observa-se que o maior índice de vazios obtido foi no método Saco com vibração, 37,9%, e que o menor ocorreu no Lançamento com vibração 11,4%.

6.2.8 Composição B5-B3-A7-A2

6.2.8.1 Índice de vazios B5-B3

Na composição B5-B3-A7-A2 o primeiro ensaio realizado consistiu na combinação dos agregados, B5 e B3, que podem ser observados na Figura 80.

Figura 80 – Composição B5-B3

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 81.

Figura 81 – Gráfico da composição dos agregados B5-B3

Observa-se a semelhança no comportamento dos cinco métodos com exceção da porcentagem 20-80 no método Saco sem vibração onde ocorreu um aumento do índice de vazios. Percebe-se também que os índices de vazios obtidos foram próximos.

Conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100, obteve maiores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o Saco sem vibração obteve resultados melhores do que o do método Lançamento sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 45% na proporção 60-40. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Saco com vibração com 39,9% na proporção 50-50. Observa-se que os métodos que utilizam em seu processo a vibração obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

6.2.8.2 Índice de vazios B5-B3-A7

Ao primeiro ensaio foi acrescentada a areia A7. Na Figura 82, podem ser observados os agregados utilizados.

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 83.

Figura 83 – Gráfico da composição dos agregados B5-B3-A7

Observa-se a semelhança no comportamento dos cinco métodos com exceção da porcentagem 20-80 no método Vibração por partes onde ocorreu um aumento do índice de vazios. Apesar da proximidade entre os resultados obtidos de índices de vazios, observa-se que conforme são realizadas as combinações entre os dois agregados em uma mesma proporção, mas de formas inversas, o método que começa com o Ag2 na proporção 0-100, obteve menores índices de vazios se comparado à situação contrária.

Entre os métodos sem vibração o Saco sem vibração obteve resultados melhores do que o do método Lançamento sem vibração. Nesse caso, o menor índice de vazios obtido foi 40,1% na proporção 50-50. Nos métodos que utilizam a vibração, o menor índice de vazios obtido foi através do método Lançamento com vibração com 34,8% na proporção 60-40. Observa-se que

os métodos que utilizam em seu processo a vibração obtiveram resultados melhores de empacotamento de agregados.

6.2.8.3 Índice de vazios B5-B3-A7-A2

Na sequência B5-B3-A7 foi acrescentada a areia A2. Na Figura 84, podem ser observados os agregados utilizados.

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 85.

Figura 85 – Gráfico da composição dos agregados B5-B3-A7-A2

Observa-se que iniciando com o Ag1 e acrescentando o Ag2, na proporção 100-0 a 60-40 o agregado 2 preenche os vazios, reduzindo-os. Já da proporção 60-40 a 50-50 ocorreu um aumento no índice de vazios, isso provavelmente acontece porque a quantidade de agregado miúdo utilizado foi superior a quantidade de vazios, provocando o afastamento dos agregados.

Ao começar com o Ag2 e acrescentar o Ag1 percebe-se que ocorreu a redução do índice de vazios de 0-100 a 50-50. Nesse ensaio o índice de vazios inicial é muito próximo entre Ag1 100-0 e Ag2 0-100. Os menores índices de vazio obtidos foram 27,3% no método Lançamento sem vibração na proporção 60-40 e 22,9% no método Saco com vibração na proporção 60-40.

Na Figura 86 há a comparação dos resultados obtidos nos quatro ensaios.

Figura 86 – Relação índice de vazios inicial (B5-B3) e final (B5-B3-A7-A2)

Ao comparar o primeiro e o último ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

Quadro 23 – Relação índice de vazios inicial (B5-B3) e final (B5-B3-A7-A2)

Lançamento sem vibração	Índice de vazios										
B5-B3	47,4	46,6	46,0	46,0	45,6	45,2	45,2	45,7	46,2	47,5	47,9
B5-B3-A7-A2	40,2	37,1	32,8	29,4	27,3	29,1	30,9	34,5	37,1	40,7	42,4
Redução dos vazios	15,3%	20,2%	28,6%	36,1%	40,2%	35,5%	31,6%	24,6%	19,7%	14,3%	11,4%
Lançamento com vibração	Índice de vazios										
B5-B3	42,4	41,8	41,2	40,6	40,7	40,5	40,2	40,9	42,0	42,6	44,5
B5-B3-A7-A2	34,8	33,0	30,4	25,3	23,8	25,9	27,9	30,9	33,3	36,5	38,0
Redução dos vazios	17,8%	21,2%	26,2%	37,6%	41,6%	36%	30,5%	24,5%	20,8%	14,2%	14,8%
Saco sem vibração	Índice de vazios										
B5-B3	47,7	47,2	46,6	45,7	45,0	45,2	45,6	47,0	47,9	48,4	49,3
B5-B3-A7-A2	40,7	38,0	34,0	30,2	28,1	29,2	30,5	33,9	36,7	39,7	41,9
Redução dos vazios	14,8%	19,5%	27%	33,9%	37,6%	35,4%	33,1	27,9%	23,4%	17,9%	15%
Saco com vibração	Índice de vazios										
B5-B3	41,9	41,9	41,4	40,6	40,1	39,9	40,6	41,0	41,7	43,1	44,0
B5-B3-A7-A2	35,0	33,6	29,2	25,5	22,9	24,3	27,5	30,3	33,3	36,0	36,6
Redução dos vazios	16,5%	19,9%	29,4%	37,3%	42,8%	39,1%	32,2%	26,1%	20,2%	16,6%	16,9%
Vibração por partes	Índice de vazios										
B5-B3	41,8	41,4	41,2	40,3	40,1	40,1	40,8	40,8	42,3	43,1	44,12
B5-B3-A7-A2	35,2	32,5	29,3	25,0	23,6	23,9	26,4	30,3	32,8	35,2	36,2
Redução dos vazios	15,8%	21,4%	28,8%	38,1%	41,3%	40,3%	35,1%	25,7%	22,5%	18,3%	17,9%

Fonte: Autora.

Observa-se que o maior índice de vazios obtido foi no método Saco com vibração, 42,8%, e que o menor ocorreu no método Lançamento sem vibração 11,4%.

6.3 Ensaio de abatimento

Esse ensaio consiste em obter o volume de pasta necessário para atingir o ponto de transição e fazer o sistema fluir, atingindo o *slump* desejado. Para obter o ponto de transição do traço, ou seja, quando os vazios existentes entre os agregados são preenchidos, dado essencial para a pesquisa, a água e o cimento foram acrescidos gradativamente, para ser obtido a porcentagem de pasta necessária e quantas adições foram realizadas. Os resultados obtidos nos ensaios de abatimento serão comparados aos resultados obtidos nos ensaios dos métodos, para

verificar se a quantidade de vazios encontrados nos métodos corresponde à quantidade de pasta que foi necessária para preencher os vazios e fazer a mistura fluir.

Além do ponto de transição, outro importante dado obtido no ensaio é o momento que o *slump* atinge aproximadamente 120 mm, que corresponde a um concreto com uma boa trabalhabilidade. Para a obtenção desses dados, definiu-se a realização de 12 adições de água e cimento, porém, a quantidade total de adições realizadas foi menor que a prevista, pois o *slump* desejado foi obtido antes de serem feitas todas as adições.

Na composição B6-B5-B4-B3-B2 por exemplo, foram colocados na betoneira os agregados maiores, B6, B5 e B4 junto com a água e o cimento da primeira adição. A mistura dos elementos foi realizada na betoneira por cerca de dois minutos e depois acrescentados os agregados B3 e B2 misturados por cerca de três minutos. Dessa forma, a incorporação dos elementos ocorre durante cinco minutos e depois é realizado o ensaio de abatimento. Após cada ensaio é realizada uma nova adição que é incorporada a mistura durante dois minutos.

O uso da betoneira possibilita que a superfície de todos os agregados seja revestida com pasta de cimento e também que todos os ingredientes do concreto se juntem em uma massa uniforme (NEVILLE, 1982).

Para a realização do ensaio de abatimento utilizou-se diferentes combinações de agregados, como pode ser visto a seguir.

6.3.1 Composição B6-B5-B4-B3-B2

6.3.1.1 Traço 01 – 70% Ag1 e 30% Ag2

Para esse traço a combinação escolhida foi de 70% Ag1, composto pelos agregados B6, B5, B4 e B3 e 30% Ag2 composto pelo agregado B2. As quantidades utilizadas estão presentes na Tabela 16.

Tabela 16 - Adição dos agregados - Traço 01

Material	Volume (%)
B6	16,8
B5	16,8
B4	22,4
B3	14
B2	30

Fonte: Autora.

Em relação aos demais componentes do concreto, a pesagem inicial foi calculada com 27% de pasta em volume, visto que no ensaio dos métodos o ponto registrado com o menor índice de vazios foi de 31%. A porcentagem definida é menor que a obtida no ensaio dos métodos, pois, dessa maneira, seria possível encontrar a quantidade de pasta necessária para o

preenchimento dos vazios. A realização das adições considerou o teor de vazios e a proporção de 0,5 de água/cimento.

A cada adição foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone e, na sequência, o concreto utilizado foi colocado na betoneira e realizada uma adição. A quantidade de cada adição e os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 17 abaixo:

Tabela 17 - Traço 01 - Adições e resultados

Adições	Vp(%)	Slump
1	27	0
2	29	0
3	31	0
4	33	15
5	35	45
6	37	80
7	39	110
8	41	-
9	43	-
10	45	-
11	47	-
12	49	-

Fonte: Autora.

A quantidade de adições necessárias para atingir o *slump* nesse traço, foram sete. No Quadro 25, pode ser observado o comportamento do concreto em cada adição, após a realização dos ensaios de abatimento do tronco de cone.

Quadro 24 - Abatimento – Traço 01

1ª Adição	2ª Adição	3ª Adição

<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 0</i>
4ª Adição	5ª Adição	6ª Adição

<i>Slump: 15mm</i>	<i>Slump: 45mm</i>	<i>Slump: 80mm</i>
7ª Adição

<i>Slump: 110mm</i>		

Fonte: Autora.

Adições:

1ª Adição: Observa-se que a quantidade de água e de cimento utilizadas não é suficiente para estruturar a mistura, sendo assim, ao retirar o tronco de cone acontece o desmoronamento do material.

2ª Adição: Nessa adição apesar de ocorrer um aumento na quantidade de água e cimento, ainda não é suficiente para unir os elementos, estruturando-os. Dessa forma, ocorre o desmoronamento novamente.

3ª Adição: A partir dessa adição aumenta a interação entre os constituintes do concreto, sendo suficiente para estruturá-lo, porém, não sendo capaz de fazê-lo fluir. Ainda há vazios e a porcentagem de pasta não é suficiente.

4ª Adição: Observa-se um aumento na quantidade de pasta, a mistura está mais úmida o que contribui para a interação entre os constituintes do concreto, sendo suficiente para estruturá-lo e fazê-lo fluir. O *slump* inicial é de 15mm com 33% de pasta.

5ª Adição: Observa-se o aumento do volume de pasta e o concreto atinge o *slump* de 45mm.

6ª Adição: O aumento no volume de pasta ocasiona um *slump* de 80mm.

7ª Adição: Nessa adição, o volume de pasta de 39% fez com que o concreto fluísse atingindo o *slump* desejado de 110mm.

Na Figura 87, observa-se que o volume de pasta obtido no ensaio de abatimento está de acordo com o índice de vazios obtidos no ensaio dos métodos. O volume de pasta necessário para preencher os vazios e fazer o concreto fluir está próximo dos índices de vazios encontrados nos métodos com vibração, se distanciando dos ensaios sem vibração, pois esses necessitam de um volume de pasta maior para preencher os vazios.

Figura 87 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 01

6.3.1.2 Traço 02 – 60% Ag1 e 40% Ag2

Para o traço 02 a combinação escolhida foi de 60% Ag1, composto pelos agregados graúdos B6, B5, B4 e B3 e 40% Ag2 composto pelo agregado B2. As quantidades utilizadas estão presentes na tabela a seguir:

Tabela 18 - Adição dos agregados - Traço 02

Material	Volume (%)
B6	14,4
B5	14,4
B4	19,2
B3	12
B2	40

Fonte: Autora.

Em relação aos demais componentes do concreto, a pesagem inicial foi calculada com 26% de pasta em volume, visto que no ensaio dos métodos o ponto registrado com o menor índice de vazios foi de 30%. Como citado no traço 01, a realização das adições considerou o teor de vazios e a proporção de 0,5 de água/cimento. A cada adição foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, em seguida o concreto utilizado foi colocado novamente na betoneira e realizado uma adição, na sequência são repetidos os demais procedimentos. A quantidade de cada adição e os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 19 abaixo:

Tabela 19 - Traço 02- Adições e resultados

Adições	Vp(%)	Slump
1	26	0
2	28	0
3	30	0
4	32	0
5	34	20
6	36	65
7	38	110
8	40	-
9	42	-
10	44	-
11	46	-
12	48	-

Fonte: Autora.

Apesar de definida doze adições, a quantidade necessária para atingir o *slump* nesse traço, foram sete. No Quadro 26 pode ser observado o comportamento do concreto em cada adição, após a realização dos ensaios de abatimento do tronco de cone:

Quadro 25 - Abatimento – Traço 02

1ª Adição	2ª Adição	3ª Adição

Slump: 0	Slump: 0	Slump: 0
4ª Adição	5ª Adição	6ª Adição

Slump: 0	Slump: 20mm	Slump: 65mm
7ª Adição

Slump: 110mm		

Fonte: Autora.

Adições:

1ª, 2ª e 3ª Adição: A conexão entre os constituintes do concreto é suficiente para estruturá-lo, porém, não sendo capaz de fazê-lo fluir. Ainda há vazios e a porcentagem de pasta não é suficiente. O aspecto do concreto na primeira e na segunda adição é semelhante.

4ª Adição: A partir dessa adição observa-se um aumento na quantidade de pasta, porém ainda não é suficiente para fazê-lo fluir.

5ª Adição: Observa-se um aumento na quantidade de pasta, a mistura está mais úmida o que contribui para a união entre os constituintes do concreto, sendo suficiente para estruturá-lo e fazê-lo fluir. O *slump* inicial é de 20mm com 34% de pasta.

6ª Adição: Nessa adição, observa-se o aumento do volume de pasta e o concreto atinge o *slump* de 65mm.

7ª Adição: O volume de pasta de 38% fez com que o concreto fluísse atingindo o *slump* de 110mm.

Na Figura 88, observa-se que o volume de pasta obtido no ensaio de abatimento, está de acordo com o índice de vazios obtidos no ensaio dos métodos. O volume de pasta necessário para preencher os vazios e fazer o concreto fluir está próximo dos índices de vazios encontrados nos métodos com vibração, se distanciando dos ensaios sem vibração, pois esses necessitam de um volume de pasta maior para preencher os vazios.

Figura 88 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 02

6.3.1.3 Traço 03 – 50% Ag1 e 50% Ag2

Para o traço 03 a combinação escolhida foi de 50% Ag1, composto pelos agregados graúdos B6, B5, B4 e B3 e 50% Ag2 composto pelo agregado B2. As quantidades utilizadas estão presentes na tabela a seguir:

Tabela 20 - Adição dos agregados - Traço 03

Material	Volume (%)
B6	12
B5	12
B4	16
B3	10
B2	50

Fonte: Autora.

Em relação aos demais componentes do concreto, a pesagem inicial foi calculada com 26% de pasta em volume, visto que no ensaio dos métodos o ponto registrado com o menor índice de vazios foi de 30%. Assim como nos outros traços, a realização das adições considerou o teor de vazios e a proporção de 0,5 de água/cimento.

A cada adição foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, em seguida o concreto utilizado foi colocado novamente na betoneira e realizado a adição, na sequência são repetidos os demais procedimentos. A quantidade de cada adição e os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 21.

Tabela 21 - Traço 03 - Adições e resultados

Adições	Vp(%)	Slump
1	26	0
2	28	0
3	30	0
4	32	15
5	34	35
6	36	65
7	38	115
8	40	-
9	42	-
10	44	-
11	46	-
12	48	-

Fonte: Autora.

A quantidade de adições necessárias para atingir o *slump* nesse traço foram sete. No Quadro 27, pode ser observado o comportamento do concreto em cada adição após a realização dos ensaios de abatimento do tronco de cone:

Quadro 26 - Abatimento – Traço 03

1ª Adição	2ª Adição	3ª Adição

<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 0</i>
4ª Adição	5ª Adição	6ª Adição

<i>Slump: 15mm</i>	<i>Slump: 35mm</i>	<i>Slump: 65mm</i>
7ª Adição

<i>Slump: 115mm</i>		

Fonte: Autora.

Adições:

1ª e 2ª adição: A interação entre os constituintes do concreto é suficiente para estruturá-lo, porém, a quantidade de pasta não é suficiente para fazê-lo fluir.

3ª adição: Apesar de visualmente ainda ser semelhante às adições anteriores, observa-se que ocorreu um aumento do volume de pasta na mistura, porém, não o suficiente para fazê-lo fluir.

4ª adição: Na quarta adição, observa-se um aumento na quantidade de pasta, a mistura está mais úmida entre os constituintes do concreto, sendo suficiente para fazê-lo fluir. O *slump* inicial é de 15 mm com 32% de pasta.

5ª adição: Observa-se o aumento do volume de pasta e o concreto atinge o *slump* de 35mm.

6ª adição: Com o aumento do volume de pasta nessa adição, o concreto atinge o *slump* de 65mm.

7ª adição: O volume de pasta de 38% fez com que o concreto fluísse atingindo o *slump* desejado de 115mm.

Através da Figura 89, observa-se que o volume de pasta obtido no ensaio de abatimento está de acordo com o índice de vazios obtidos no ensaio dos métodos. O volume de pasta necessário para preencher os vazios e fazer o concreto fluir está próximo dos índices de vazios encontrados nos métodos com vibração, se distanciando dos ensaios sem vibração, pois esses necessitam de um volume de pasta maior para preencher os vazios.

Figura 89 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento - Traço 03

6.3.2 Composição B5-B3-A6-A3

6.3.2.1 Traço 04 – 80% Ag1 e 20% Ag2

Para o traço 04 a combinação escolhida foi de 80% Ag1, composto pelos agregados graúdos B5, B3 e A6 e 20% Ag2 composto pelo agregado A3. As quantidades utilizadas estão presentes na tabela a seguir:

Tabela 22 - Adição dos agregados - Traço 04

Material	Volume (%)
B5	7704.0
B3	5136.0
A6	7768.4
A3	4855.3

Fonte: Autora.

Em relação aos demais componentes do concreto, a pesagem inicial foi calculada com 19% de pasta em volume, visto que no ensaio dos métodos o ponto registrado com o menor índice de vazios foi de 23%. Assim como nos outros traços, a realização das adições considerou o teor de vazios e a proporção de 0,5 de água/cimento.

A cada adição foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, em seguida o concreto utilizado foi colocado novamente na betoneira e realizado a adição, na sequência são repetidos os demais procedimentos. A quantidade de cada adição e os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 23.

Tabela 23 - Traço 04 - Adições e resultados

Adições	Vp(%)	Slump
1	19	0
2	21	0
3	23	0
4	25	0
5	27	0
6	29	15
7	31	40
8	33	80
9	35	130
10	37	-
11	39	-
12	41	-

Fonte: Autora.

A quantidade de adições necessárias para atingir o *slump* nesse traço foram nove. No Quadro 28, pode ser observado o comportamento do concreto em cada adição após a realização dos ensaios de abatimento do tronco de cone:

Quadro 27 - Abatimento – Traço 04

1ª Adição	2ª Adição	3ª Adição

<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 0</i>
4ª Adição	5ª Adição	6ª Adição

<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 15mm</i>
7ª Adição	8ª Adição	9ª Adição

<i>Slump: 40mm</i>	<i>Slump: 80mm</i>	<i>Slump: 130mm</i>

Fonte: Autora.

Adições:

1ª, 2ª e 3ª adição: A interação entre os constituintes do concreto é suficiente para estruturá-lo, porém, a quantidade de pasta não é suficiente para preencher os vazios.

4ª adição: Apesar de visualmente ainda ser semelhante às adições anteriores, observa-se que ocorreu um aumento do volume de pasta na mistura, porém, não o suficiente para fazê-lo fluir.

5ª adição: Na quinta adição, observa-se um aumento na quantidade de pasta, a mistura está mais úmida entre os constituintes do concreto, porém a quantidade de pasta não foi suficiente para fazê-lo fluir.

6ª adição: Na sexta adição a quantidade de pasta foi suficiente para o concreto fluir. O *slump* inicial é de 15 mm com 29% de pasta.

7ª adição: Observa-se o aumento do volume de pasta e o concreto atinge o *slump* de 40mm.

8ª adição: O aumento no volume de pasta ocasiona um *slump* de 80mm.

9ª adição: O volume de pasta de 35% fez com que o concreto fluísse atingindo o *slump* desejado de 130mm.

Na Figura 90, observa-se que o volume de pasta necessário no ensaio de abatimento, está de acordo com o índice de vazios obtidos no ensaio dos métodos. Nesse traço o volume de pasta necessário para preencher os vazios e fazer o concreto fluir está próximo dos índices de vazios encontrados nos métodos sem vibração, se distanciando dos métodos com vibração. Isso ocorreu provavelmente devido a quantidade elevada de finos na mistura, necessitando de mais cimento e água, o que indica um volume maior de pasta, sendo que o sistema fluiu na sexta adição, enquanto nos outros traços nessa adição foi obtido o *slump* desejado.

Figura 90 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento - Traço 04

6.3.2.2 Traço 05 – 90% Ag1 e 10% Ag2

Para o traço 05 a combinação escolhida foi de 90% Ag1, composto pelos agregados graúdos B5, B3 e A6 e 10% Ag2 composto pelo agregado A3. As quantidades utilizadas estão presentes na tabela a seguir:

Tabela 24 - Adição dos agregados - Traço 05

Material	Volume (%)
B5	8666.9
B3	5778.0
A6	8739.5
A3	2427.6

Fonte: Autora.

Em relação aos demais componentes do concreto, a pesagem inicial foi calculada com 19% de pasta em volume, visto que no ensaio dos métodos o ponto registrado com o menor índice de vazios foi de 23%. Assim como nos outros traços, a realização das adições considerou o teor de vazios e a proporção de 0,5 de água/cimento.

A cada adição foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, em seguida o concreto utilizado foi colocado novamente na betoneira e realizado a adição, na sequência são repetidos os demais procedimentos. A quantidade de cada adição e os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 25.

Tabela 25 - Traço 05 - Adições e resultados

Adições	Vp(%)	Slump
1	19	0
2	21	0
3	23	0
4	25	0
5	27	0
6	29	15
7	31	40
8	33	75
9	35	125
10	37	-
11	39	-
12	41	-

Fonte: Autora.

Nesse traço foram necessárias nove adições para atingir o *slump*. No Quadro 29, pode ser observado o comportamento do concreto em cada adição após a realização dos ensaios de abatimento do tronco de cone:

Quadro 28 - Abatimento – Traço 05

1ª Adição	2ª Adição	3ª Adição

<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 0</i>
4ª Adição	5ª Adição	6ª Adição

<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 15mm</i>
7ª Adição	8ª Adição	9ª Adição

<i>Slump: 40mm</i>	<i>Slump: 75mm</i>	<i>Slump: 125mm</i>

Fonte: Autora.

Adições:

1ª adição: Observa-se que a quantidade de água e de cimento utilizadas não é suficiente para estruturar a mistura, sendo assim, ao retirar o tronco de cone acontece o desmoronamento do material.

2ª, 3ª e 4ª adição: A interação entre os constituintes do concreto é suficiente para estruturá-lo, porém, a quantidade de pasta não é suficiente para preencher os vazios.

5ª adição: Observa-se que ocorreu um aumento do volume de pasta na mistura, porém, não o suficiente para fazê-lo fluir.

6ª adição: Na sexta adição, observa-se um aumento na quantidade de pasta, a mistura está mais úmida entre os constituintes do concreto, sendo suficiente para fazê-lo fluir. O *slump* inicial é de 15 mm com 29% de pasta.

7ª adição: Observa-se o aumento do volume de pasta e o concreto atinge o *slump* de 40mm.

8ª adição: O aumento no volume de pasta ocasiona um *slump* de 75mm.

9ª adição: O volume de pasta de 35% fez com que o concreto fluísse atingindo o *slump* desejado de 125mm.

Através da Figura 91, observa-se que o volume de pasta obtido no ensaio de abatimento, está de acordo com o índice de vazios obtidos no ensaio dos métodos. O volume de pasta necessário para preencher os vazios e fazer o concreto fluir está mais próximo dos índices de vazios encontrados nos métodos com vibração. A partir dos resultados obtidos é possível observar a influência que o excesso de finos possui na obtenção do *slump* desejado, visto que tendo a mesma composição granulométrica do traço 04 o traço 05 se aproximou mais dos métodos com vibração por ter a proporção 90-10 enquanto o traço 04 na proporção 80-20 os resultados se aproximaram mais dos métodos sem vibração.

Figura 91 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento - Traço 05

Para uma análise mais ampla dos cinco métodos propostos, foram considerados também os resultados obtidos nos ensaios de abatimento de tronco de cone realizados pelos alunos citados no ensaio do índice de vazios.

6.3.3 Composição B6-B3-A7-A1

6.3.3.1 Traço 06 – 80% Ag1 e 20% Ag2

Para o Traço 06 a combinação escolhida foi de 80% Ag1, composto pelos agregados graúdos B6, B3 e A7 e 20% Ag2 composto pelo agregado A1. As quantidades utilizadas estão presentes na Tabela 26 a seguir:

Tabela 26 - Adição dos agregados - Traço 06

Material	Volume (%)
B6	20
B3	20
A7	40
A1	20

Fonte: Autora.

Em relação aos demais componentes do concreto, a pesagem inicial foi calculada com 18% de pasta em volume, visto que no ensaio dos métodos o ponto registrado com o menor índice de vazios foi de 22%. Após as adições foram realizados o ensaio de abatimento do tronco de cone. As quantidades das adições utilizadas e os resultados obtidos no ensaio de abatimento podem ser observados na tabela abaixo.

Tabela 27 - Traço 06 – Adições e resultados

Adições	Vp(%)	Slump
1	18	0
2	20	0
3	22	0
4	24	0
5	26	0
6	28	20
7	30	60
8	32	95
9	34	120
10	36	-
11	38	-
12	40	-

Fonte: Autora.

Para esse traço a quantidade de adições necessárias para atingir o *slump*, foram nove. No Quadro 30, pode ser observado o comportamento do concreto na 6ª adição quando o sistema começou a fluir.

Quadro 29 - Abatimento – Traço 06

Fonte: Gonçalves (2018).

Na Figura 92, observa-se que o volume de pasta obtido no ensaio de abatimento, está de acordo com o índice de vazios obtidos no ensaio dos métodos. Sendo que o volume de pasta necessário para preencher os vazios e fazer o concreto fluir está próximo dos índices de vazios encontrados nos métodos com vibração, se distanciando dos ensaios sem vibração, pois esses necessitam de um volume de pasta maior para preencher os vazios.

Figura 92 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 06

6.3.3.2 Traço 07 – 90% Ag1 e 10% Ag2

Para o Traço 07 a combinação escolhida foi de 90% Ag1, composto pelos agregados graúdos B6, B3 e A7 e 10% Ag2 composto pelo agregado A1. As quantidades utilizadas estão presentes na Tabela a 28.

Tabela 28 - Adição dos agregados - Traço 07

Material	Volume (%)
B6	22,5
B3	22,5
A7	45
A1	10

Fonte: Autora.

Em relação aos demais componentes do concreto, a pesagem inicial foi calculada com 20% de pasta em volume, visto que no ensaio dos métodos o ponto registrado com o menor índice de vazios foi de 24%.

Após as adições, foram realizados os ensaios de abatimento do tronco de cone. As quantidades das adições utilizadas e os resultados obtidos no ensaio de abatimento podem ser observados na tabela abaixo:

Tabela 29 - Traço 07 – Adições e resultados

Adições	Vp(%)	Slump
1	20	0
2	22	0
3	24	0
4	26	0
5	28	0
6	30	10
7	32	75
8	34	105
9	36	135
10	38	-
11	40	-
12	42	-

Fonte: Autora.

A quantidade de adições necessárias para atingir o *slump* nesse traço, foram nove. Na Figura 93, observa-se que o volume de pasta obtido no ensaio de abatimento, está de acordo com o índice de vazios obtidos no ensaio dos métodos. O volume de pasta necessário para preencher os vazios e fazer o concreto fluir está próximo dos índices de vazios encontrados nos métodos com vibração, se distanciando dos ensaios sem vibração, pois, esses necessitam de um volume de pasta maior para preencher os vazios. No caso deste ensaio, houve um erro de 2% entre o teor de vazios e o teor de pasta necessário. Porém, este erro pode ser considerado pequeno em uma metodologia de ensaio que inclui tantas variáveis que influenciam o empacotamento, como a forma e densidade dos agregados (e ainda agregados de diferentes mineralogias). Comparando com os resultados anteriores, demonstra-se um nível muito satisfatório de controle do teor de vazios.

Figura 93 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 07

6.3.4 Composição B6-B2-A5-A1

6.3.4.1 Traço 08 – 80% Ag1 e 20% Ag2

Para o Traço 08 a combinação escolhida foi de 80% Ag1, composto pelos agregados graúdos B6, B2 e A5 e 20% Ag2 composto pelo agregado A1. As quantidades utilizadas estão presentes na tabela a seguir:

Tabela 30 - Adição dos agregados - Traço 08

Material	Volume (%)
B6	38,4
B2	25,6
A5	16
A1	20

Fonte: Autora.

Em relação aos demais componentes do concreto, a pesagem inicial foi calculada com 18% de pasta em volume, visto que no ensaio dos métodos o ponto registrado com o menor índice de vazios foi de 22%.

Após as adições foram realizados o ensaio de abatimento do tronco de cone. As quantidades das adições utilizadas e os resultados obtidos no ensaio de abatimento podem ser observados na Tabela 31.

Tabela 31 - Traço 08 – Adições e resultados

Adições	Vp(%)	Slump
1	18	0
2	20	0
3	22	0
4	24	0
5	26	0
6	28	0
7	30	0
8	32	10
9	34	130
10	36	-
11	38	-
12	40	-

Fonte: Autora.

Nesse traço foram necessárias nove adições para atingir o *slump* desejado. No Quadro 31, pode ser observado o comportamento do concreto na 1ª adição, na 8ª adição quando o sistema começou a fluir e na 9ª adição quando atingiu o *slump*.

Quadro 30 - Abatimento – Traço 08

1ª Adição	8ª Adição	9ª Adição

Slump: 0	Slump: 10mm	Slump: 130mm

Fonte: Kerckhoff (2018).

Na Figura 94, observa-se que o volume de pasta necessário no ensaio de abatimento, está de acordo com o índice de vazios obtidos no ensaio dos métodos. Nesse caso o volume de pasta necessário para preencher os vazios e fazer o concreto fluir está próximo dos índices de vazios encontrados nos métodos sem vibração, se distanciando dos métodos com vibração. Isso ocorreu provavelmente devido a quantidade elevada de finos na mistura, como citado no traço 04, necessitando de mais materiais e mais água, o que indica um volume maior de pasta, sendo que o sistema fluiu na sétima adição, enquanto nos outros traços nessa adição foi obtido o *slump* desejado.

É um resultado que necessita de mais aprofundamento e ensaios, pois apesar da quantidade de pasta para atingir o ponto de transição ser maior, não é apenas os vazios que interferiram no resultado e sim a elevada quantidade de agregados miúdos na mistura. Agregados de granulometrias menores absorvem uma quantidade maior de água, como pode ser observado nas imagens da tabela do traço 08. Logo, é necessária mais água para umidificar

os agregados, o cimento, tendo mais conexão entre os elementos e preenchendo os vazios existentes para o concreto fluir.

Figura 94 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 08

Para confirmar os resultados obtidos, visto que o concreto demorou mais para fluir assim como nos traços 04 e 05, foi realizado outro ensaio de abatimento, Traço 08-A, com o mesmo traço.

6.3.4.2 Traço 08-A - 80% Ag1 e 20% Ag2

Após a realização das etapas citadas nos traços anteriores, as quantidades das adições utilizadas e os resultados obtidos nesse ensaio de abatimento podem ser observados na tabela a seguir:

Tabela 32 - Traço 08-A - Adições e resultados

Adições	Vp(%)	Slump
1	18	0
2	20	0
3	22	0
4	24	0
5	26	0
6	28	0
7	30	20
8	32	55
9	34	110
10	36	-
11	38	-
12	40	-

Fonte: Autora.

Nesse traço, foram necessárias nove adições para atingir o *slump* desejado e o ponto de transição foi obtido na 6ª adição. No Quadro 32, observa-se o comportamento do concreto conforme as adições, após a realização dos ensaios de abatimento do tronco de cone.

Quadro 31 - Abatimento – Traço 08-A.

1ª Adição	2ª Adição	3ª Adição

<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 0</i>
4ª Adição	5ª Adição	6ª Adição

<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 0</i>
7ª Adição	8ª Adição	9ª Adição

<i>Slump: 20mm</i>	<i>Slump: 55mm</i>	<i>Slump: 110mm</i>

Fonte: Autora.

Adições:

1ª adição: Nessa adição não foi realizado o ensaio de abatimento, pois, percebe-se que a mistura está seca, não ocorrendo à interligação entre os componentes.

2ª e 3ª adição: Além de visualmente parecidas estas duas adições se comportam de formas semelhantes, sendo possível realizar o ensaio de abatimento em ambas. A quantidade de água acrescentada contribuiu para umedecer a mistura, estruturando-a, porém, não sendo suficiente para fazê-la fluir.

4ª e 5ª adição: Essas adições são visualmente semelhantes e se comportam de maneiras parecidas, os agregados maiores estão mais aparentes e há coesão entre os constituintes. Observa-se que o conjunto está mais úmido, porém a quantidade de material utilizado não foi suficiente para preencher os vazios e fazê-lo fluir.

6ª adição: Observa-se o aumento na quantidade de água na mistura, o que contribui para a união dos elementos, porém, percebe-se a existência dos vazios, sendo que o sistema não fluiu.

7ª adição: Percebe-se a mudança do aspecto do cone e a quantidade de pasta foi suficiente para começar a fazer o sistema fluir. O concreto atingiu o *slump* de 20mm.

8ª adição: Ocorreu o aumento do volume de pasta, que é suficiente para cobrir os agregados e fazer com que o sistema flua mais. Com o aumento do volume de pasta nessa adição, o concreto atinge o *slump* de 55mm.

9ª adição: O volume de pasta de 34% fez com que o concreto fluísse, atingindo o *slump* desejado de 110mm.

Observa-se na Figura 95 que o volume de pasta obtido no ensaio de abatimento, está próximo ao índice de vazios previsto nos métodos sem vibração, se distanciando dos métodos com vibração, o que confirma os resultados obtidos anteriormente no traço 08. Isso provavelmente aconteceu devido a maior quantidade de finos na composição, o que eleva a necessidade de água e cimento para a formação da pasta, visto que agregados miúdos absorvem mais água. Nesse ensaio o ponto de transição foi atingido na sexta adição.

Comparando ao ensaio realizado anteriormente com o mesmo traço, observa-se que ocorreu uma variação nos resultados obtidos. O primeiro atingiu o ponto de transição na sétima adição e o segundo ensaio na sexta adição, mas ambos atingiram o *slump* desejado na nona adição. Os métodos sem vibração continuam mais próximos do ponto de transição, porém o índice de vazios é superior ao previsto para a quantidade de volume de pasta obtido no ensaio de abatimento.

Figura 95 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 08-A

6.3.5 Composição B6-B2-A5

6.3.5.1 Traço 09 – 50% Ag1 e 50% Ag2

Para o Traço 09 a combinação escolhida foi de 50% Ag1, composto pelos agregados B6 e B2 e 50% Ag2 composto pelo agregado A5. As quantidades utilizadas estão presentes na Tabela 33:

Tabela 33 - Adição dos agregados - Traço 09

Material	Volume (%)
B6	30
B2	20
A5	50

Fonte: Autora.

Em relação aos demais componentes do concreto, a pesagem inicial foi calculada com 20% de pasta em volume, visto que no ensaio dos métodos o ponto registrado com o menor índice de vazios foi de 24%.

Após as adições foram realizados o ensaio de abatimento do tronco de cone. As quantidades das adições utilizadas e os resultados obtidos no ensaio de abatimento podem ser observados na Tabela 34.

Tabela 34 - Traço 09 - Adições e resultados

Adições	Vp(%)	Slump
1	20	0
2	22	0
3	24	0
4	26	0
5	28	0
6	30	10
7	32	20
8	34	60
9	36	120
10	38	-
11	40	-
12	42	-

Fonte: Autora.

Na nona adição atingiu-se o *slump* desejado. No Quadro 33, pode ser observado o comportamento do concreto na 1ª e na 6ª adição quando começou a fluir e na 9ª adição quando foi obtido o *slump* de 120mm.

Quadro 32 - Abatimento – Traço 09

1ª Adição	6ª Adição	9ª Adição

Slump: 0	Slump: 10mm	Slump: 120mm

Fonte: Kerckhoff (2018).

Observa-se na Figura 96 que o volume de pasta obtido no ensaio de abatimento, está de acordo com o índice de vazios obtidos no ensaio dos métodos. O volume de pasta necessário para preencher os vazios e fazer o concreto fluir está próximo dos índices de vazios encontrados nos métodos com vibração, se distanciando dos ensaios sem vibração, pois, esses necessitam de um volume de pasta maior para preencher os vazios.

Figura 96 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 09

6.3.6 Composição B6-B4-B2-A6-A3-A1

6.3.6.1 Traço 10 – 90% Ag1 e 10% Ag2

Para o traço 10 a combinação escolhida foi de 90% Ag1, composto pelos agregados B6, B4, B2, A6 e A3 e 10% Ag2 composto pelo agregado A1. As quantidades utilizadas estão presentes na tabela a seguir:

Tabela 35 - Adição dos agregados - Traço 10

Material	Volume (%)
B6	15,9
B4	15,9
B2	21,0
A6	20,6
A3	17,1
A1	9,5

Fonte: Autora.

Em relação aos demais componentes do concreto, a pesagem inicial foi calculada com 20% de pasta em volume, visto que no ensaio dos métodos o ponto registrado com o menor índice de vazios foi de 24%. Após as adições foram realizados o ensaio de abatimento do tronco de cone. As quantidades das adições utilizadas e os resultados obtidos no ensaio de abatimento podem ser observados na Tabela 36.

Tabela 36 - Traço 10 - Adições e resultados

Adições	Vp(%)	Slump
1	20	0
2	22	0
3	24	0
4	26	0
5	28	5
6	30	20
7	32	55
8	34	135
9	36	-
10	38	-
11	40	-
12	42	-

Fonte: Autora.

A quantidade de adições necessárias para atingir o *slump* nesse traço, foram oito. No Quadro 34, pode ser observado o comportamento do concreto, na 5ª adição quando começou a fluir e na 8ª adição ao atingir o *slump* desejado.

Quadro 33 - Abatimento – Traço 10

5ª Adição	8ª Adição
A photograph showing a concrete slump test. A metal cone is being lifted from a pile of concrete. The concrete has a very low slump, appearing as a dense, conical pile.	A photograph showing a concrete slump test. A metal cone is being lifted from a pile of concrete. The concrete has a high slump, appearing as a tall, conical pile that has spread significantly.
Slump: 5mm	Slump: 135mm

Fonte: Andrade (2018).

Observa-se na Figura 97 que o volume de pasta obtido no ensaio de abatimento, está de acordo com o índice de vazios obtidos no ensaio dos métodos. A quantidade de pasta necessária para preencher os vazios e fazer o concreto fluir está próxima dos índices de vazios encontrados nos métodos com vibração, se distanciando dos ensaios sem vibração, pois, esses necessitam de um volume de pasta maior para preencher os vazios.

Figura 97 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 10

6.3.7 Composição B6-B4-B2-A6-A3

6.3.7.1 Traço 11 – 90% Ag1 e 10% Ag2

Para o Traço 37 a combinação escolhida foi de 90% Ag1, composto pelos agregados B6, B4, B2, A6 e 10% Ag2 composto pelo agregado A3. As quantidades utilizadas estão presentes na tabela a seguir:

Tabela 37 - Adição dos agregados - Traço 11

Material	Volume (%)
B6	19,6
B4	19,6
B2	26,0
A6	25,4
A3	9,4

Fonte: Autora.

Em relação aos demais componentes do concreto, a pesagem inicial foi calculada com 20% de pasta em volume, visto que no ensaio dos métodos o ponto registrado com o menor índice de vazios foi de 24%. Após as adições foram realizados o ensaio de abatimento do tronco de cone. As quantidades das adições utilizadas e os resultados obtidos no ensaio de abatimento podem ser observados na Tabela 38.

Tabela 38 - Traço 11 - Adições e resultados

Adições	Vp(%)	Slump
1	20	0
2	22	0
3	24	0
4	26	5
5	28	30
6	30	100
7	32	-
8	34	-
9	36	-
10	38	-
11	40	-
12	42	-

Fonte: Autora.

Para esse traço foram necessárias seis adições para atingir o *slump* desejado. No Quadro 35, pode ser observado o comportamento do concreto na 4ª adição quando o sistema começou a fluir e na 6ª adição quando atingiu o *slump*.

Quadro 34 - Abatimento – Traço 11

4ª Adição	6ª Adição
A photograph showing a concrete slump test. A metal cone is being lifted from a pile of concrete. The concrete has a very low slump, appearing as a dense, conical pile.	A photograph showing a concrete slump test. A metal cone is being lifted from a pile of concrete. The concrete has a high slump, appearing as a tall, conical pile.
Slump: 5mm	Slump: 100mm

Fonte: Andrade (2018).

Na Figura 98 percebe-se que o volume de pasta obtido no ensaio de abatimento, é inferior aos índices de vazios obtidos no ensaio dos métodos. O volume de pasta necessário para preencher os vazios e fazer o concreto fluir está próximo dos índices de vazios encontrados nos métodos com vibração.

Figura 98 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 11

6.3.8 Composição B6-B3-A7-A5-A2

6.3.8.1 Traço 12 – 80% Ag1 e 20% Ag2

Para o Traço 12 a combinação escolhida foi de 80% Ag1, composto pelos agregados B6, B3, A7, A5 e 20% Ag2 composto pelo agregado A2. As quantidades utilizadas estão presentes na tabela a seguir:

Tabela 39 - Adição dos agregados - Traço 12

Material	Volume (%)
B6	14,4
B3	14,4
A7	19,2
A5	32
A2	20

Fonte: Autora.

Em relação aos demais componentes do concreto, a pesagem inicial foi calculada com 21% de pasta em volume, visto que no ensaio dos métodos o ponto registrado com o menor índice de vazios foi de 25%.

Após as adições foram realizados o ensaio de abatimento do tronco de cone. As quantidades das adições utilizadas e os resultados obtidos no ensaio de abatimento podem ser observados na Tabela 40.

Tabela 40 - Traço 12 - Adições e resultados

Adições	Vp(%)	Slump
1	21	0
2	23	0
3	25	0
4	27	0
5	29	70
6	31	130
7	33	-
8	35	-
9	37	-
10	39	-
11	41	-
12	43	-

Para esse traço foram necessárias seis adições para atingir o ponto de transição. No Quadro 36, pode ser observado o comportamento do concreto na 1ª adição quando desmoronou, na 5ª adição quando o sistema começou a fluir e na 6ª adição quando atingiu o *slump* desejado.

Quadro 35 - Abatimento – Traço 12

1ª Adição	5ª Adição	6ª Adição

Slump: 0	Slump: 70mm	Slump: 130mm

Fonte: Pinto (2018).

Através da Figura 99, observa-se que o volume de pasta obtido no ensaio de abatimento, está de acordo com o índice de vazios obtidos no ensaio dos métodos. O volume de pasta necessário para preencher os vazios e fazer o concreto fluir está próximo dos índices de vazios encontrados nos métodos com vibração, se distanciando dos ensaios sem vibração, pois esses necessitam de um volume de pasta maior para preencher os vazios

Figura 99 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 12

6.3.9 Composição B6-B3-A7-A5

6.3.9.1 Traço 13 – 60% Ag1 e 40% Ag2

Para o traço 13 a combinação escolhida foi de 60% Ag1, composto pelos agregados B6, B3 e A7 e 40% Ag2 composto pelo agregado A5. As quantidades utilizadas estão presentes na tabela a seguir:

Tabela 41 - Adição dos agregados - Traço 13

Material	Volume (%)
B6	18
B3	18
A7	24
A5	40

Fonte: Autora.

Em relação aos demais componentes do concreto, a pesagem inicial foi calculada com 21% de pasta em volume, visto que no ensaio dos métodos o ponto registrado com o menor índice de vazios foi de 25%.

Após as adições foram realizados o ensaio de abatimento do tronco de cone. As quantidades das adições utilizadas e os resultados obtidos no ensaio de abatimento podem ser observados na Tabela 42.

Tabela 42 - Traço 13 - Adições e resultados

Adições	H2O	Slump
1	1443,7	0
2	178,6	0
3	188,1	0
4	198,4	0
5	209,6	35
6	221,7	135
7	235,0	-
8	249,4	-
9	265,2	-
10	282,6	-
11	301,8	-
12	323,0	-

Fonte: Autora.

Para atingir o *slump* desejado, foram necessárias seis adições. No Quadro 37, observa-se o comportamento do concreto. Em uma das adições ocorreu o desmoronamento do tronco de cone e na 6ª adição atingiu o *slump* desejado.

Quadro 36 - Abatimento – Traço 13

- Adição	6ª Adição

<i>Slump: 0</i>	<i>Slump: 135mm</i>

Fonte: Pinto (2018).

Na Figura 100, observa-se que o volume de pasta obtido no ensaio de abatimento, está de acordo com o índice de vazios obtidos no ensaio dos métodos, estando os resultados muito próximos. O volume de pasta necessário para preencher os vazios e fazer o concreto fluir está próximo dos índices de vazios encontrados nos métodos com vibração, já os métodos sem vibração distanciam do ponto de transição, necessitando de mais pasta do que o volume obtido no ensaio de abatimento.

Figura 100 - Relação entre os métodos e o volume de pasta obtido no abatimento – Traço 13

6.3.10 Análise dos traços

No Quadro 38 há os resultados obtidos nos traços. O menor volume de pasta necessário para atingir o ponto de transição foi 26% e o maior 32%, já para o *slump* o menor volume foi 31% e o maior 39%.

Quadro 37 - Ponto de transição e *slump* dos traços analisados.

Vp (%)	Traço								Vp (%)	Traço				
	02	03	06	07	08	09	10	11		01	04	05	12	13
16	-	-	-	-	-	-	-	-	17	-	-	-	-	-
18	-	-	0	-	0	-	-	-	19	-	0	0	-	-
20	-	-	0	0	0	0	0	0	21	-	0	0	0	0
22	-	-	0	0	0	0	0	0	23	-	0	0	0	0
24	-	-	0	0	0	0	0	0	25	-	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0
28	0	0	20	0	0	0	0	5	29	0	15	15	70	35
30	0	0	60	10	0	10	10	20	31	0	40	40	130	135
32	0	15	95	75	10	20	20	55	33	15	80	75	-	-
34	20	35	120	105	130	60	60	100	35	45	130	125	-	-
36	65	65	-	135	-	120	135	-	37	80	-	-	-	-
38	110	115	-	-	-	-	-	-	39	110	-	-	-	-
Legenda:									Ponto de transição					
									Slump					

Fonte: Autora.

6.4 Resistência à compressão

Após a realização do ensaio de abatimento do tronco de cone e a obtenção do *slump* desejado, foram moldados seis corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão, sendo a metade rompidos em 07 dias e o restante aos 28 dias após a concretagem. No ensaio de compressão é obtido o carregamento necessário para romper os corpos de prova, ou seja, a sua tensão de ruptura.

Depois da moldagem, os corpos de prova ficam em temperatura ambiente por um dia e em seguida são desenformados e colocados submersos em água na câmara úmida. Antes do ensaio de compressão é necessário retificar as superfícies planas dos corpos de prova, para que a força seja distribuída de forma uniforme. Na Figura 101 podem ser vistas imagens de algumas etapas:

Figura 101 - a) Moldagem b) corpo de prova submersos em água c) corpo de prova retificado

Fonte: Autora.

Segundo Neville (1982), mesmo antes que qualquer carregamento seja aplicado, já existem muitas microfissuras na região entre a matriz pasta de cimento e o agregado graúdo, ou seja, na zona de transição na interface.

Para o ensaio de compressão os corpos de prova foram submetidos a uma força até a sua ruptura, indicando a sua resistência limite. No Quadro 39 há as informações obtidas nos ensaios dos corpos de prova dos traços 01, 02 e 03.

Quadro 38 - Tensão de ruptura dos corpos de prova

Traço 01								
Idade	Corpos de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D média (mm)	Altura (mm)	Força (kgf)	fck MPa
07 Dias	Cp1	101,41	101,22	101,46	101,36	195,98	25020	31,9
	Cp2	101,09	99,60	100,84	100,51	197,16	27120	34,5
	Cp3	99,71	101,15	99,12	99,99	195,64	22520	28,7
28 Dias	Cp4	100,94	99,44	101,27	100,55	196,73	29760	37,9
	Cp5	99,68	100,98	99,04	99,90	197,26	30980	39,4
	Cp6	100,84	99,79	99,06	197,27	30,56	30560	38,9
Traço 02								
Idade	Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D média (mm)	Altura (mm)	Força (kgf)	fck MPa
07 Dias	Cp1	100,18	100,89	101,25	100,77	196	30480	38,8
	Cp2	99,42	99,67	100,48	99,86	196,58	28860	36,7
	Cp3	100,81	101,14	100,05	100,66	196,27	27140	34,6
28 Dias	Cp4	100,83	99,90	101,25	100,66	196,82	31460	40,1
	Cp5	100,86	101,01	100,96	100,94	195,98	35120	44,7
	Cp6	99,40	100,26	99,35	99,67	197,04	35760	45,5
Traço 03								
Idade	Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D média (mm)	Altura (mm)	Força (kgf)	fck MPa
07 Dias	Cp1	101,10	99,82	101,12	100,68	196,42	27160	34,6
	Cp2	100,07	99,84	99,46	99,79	198,71	28540	36,3
	Cp3	100,54	101,27	100,09	100,63	197,42	27380	34,9
28 Dias	Cp4	99,80	101,19	100,25	100,41	197,04	39740	50,6
	Cp5	99,77	100,11	100,74	100,21	196,23	30120	38,4
	Cp6	101,17	101,00	101,06	101,08	195,86	32960	42,0

Fonte: Autora.

Na Figura 102 observa-se a realização do ensaio de compressão.

Figura 102 – Ensaio de compressão

Fonte: Autora.

Na Figura 103 é possível visualizar um corpo de prova após o rompimento e o interior do corpo de prova após ser rompido.

Figura 103 - a) Corpo de prova rompido b) Interior do corpo prova

Fonte: Autora.

Segundo Mehta & Monteiro (2008) o concreto pode ser dividido em três categorias gerais, baseadas na resistência à compressão aos 28 dias, sendo:

Concreto de baixa resistência: menor que 20MPa.

Concreto de resistência moderada: de 20 a 40Mpa.

Concreto de alta resistência: superior a 40MPa.

Logo, nos ensaios realizados, os concretos se enquadram como sendo de resistência moderada, traço 01 com 38,7Mpa e alta resistência no traço 02 com 43,4Mpa e no traço 03 com 43,7 Mpa.

Além dos ensaios realizados, também serão apresentados os resultados obtidos nos demais traços² citados ao longo do trabalho. As informações podem ser vistas no Quadro 40:

Quadro 39 - Tensão de ruptura dos corpos de prova moldados

Traço	Corpos de Prova	7 dias		28 dias		Resistência Moderada	Alta resistência
		Força (kgf)	Fck MPa	Força (kgf)	Fck MPa	De 20 a 40Mpa	Superior a 40Mpa
06	CP 1	33540	42,7	38700	49,3	-	48,4
	CP 2	31360	39,9	36140	46,0		
	CP 3	34160	43,5	39270	50,0		
07	CP 1	21120	26,9	27020	34,4	35,2	-
	CP 2	21240	27,0	30060	38,3		
	CP 3	22440	28,6	25880	33,0		
08	CP 1	28820	36,7	36900	47,0	-	46,0
	CP 2	27800	35,4	35040	44,6		
	CP 3	25940	33,0	36500	46,5		
09	CP 1	20060	25,5	31480	40,1	-	42,4
	CP 2	21000	26,7	33860	43,1		
	CP 3	21420	27,3	34600	44,1		
10	CP 1	28300	36,0	36020	45,9	-	45,7
	CP 2	30060	38,3	35540	45,3		
	CP 3	28440	36,2	36080	45,9		
11	CP 1	28920	36,8	34840	44,4	-	45,7
	CP 2	28014	35,8	37700	48,00		
	CP 3	28680	36,5	35120	44,7		
12	CP 1	33458	42,6	42804	54,5	-	52,5
	CP 2	33536	42,7	42018	53,5		
	CP 3	33850	43,1	38877	49,5		
13	CP 1	26860	34,2	31966	40,7	-	41,0
	CP 2	26703	34,0	31730	40,4		
	CP 3	26153	33,3	32829	41,8		

Fonte: Autora.

² Não foi possível realizar os ensaios de compressão dos corpos de prova dos traços 04 e 05 devido as mudanças ocasionadas pela pandemia da COVID-19.

O ensaio da resistência à compressão para o concreto aos 28 dias é aceito universalmente como um índice geral da resistência do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Os dados obtidos pelo ensaio de compressão contribuem para a obtenção do índice de ligantes IL_{RC} que é um indicador que analisa o comportamento da resistência mecânica do concreto, quando submetido à compressão uniaxial, em relação à quantidade total de aglomerantes utilizados para a sua produção $[Kg/m^3]$.

6.5 Consumo de cimento

A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar se ocorreu ou não a redução do consumo de cimento. Ver Tabela 43.

Tabela 43 - Consumo de materiais dos concretos moldados referentes aos Traços 01, 02 e 03.

MATERIAIS	TRAÇO 01		TRAÇO 02		TRAÇO 03	
	Massa (g)	Volume (ml)	Massa (g)	Volume (ml)	Massa (g)	Volume (ml)
Brita	24107,9	8256,1	24438,2	8369,25	24438,2	8369,25
Cimento	6417,0	2070,0	6235,8	2011,55	6235,8	2011,55
Água	3208,5	3208,5	3118,0	3118,0	3118,0	3118,0
TOTAL	33733,4	13534,6	33792,0	13498,8	33792,0	13498,8

Fonte: Autora.

Através dos consumos em massa e em volume dos materiais utilizados foi possível calcular o consumo de cimento a partir da divisão entre a massa do cimento e o volume total de concreto. No traço 01 o consumo de cimento foi de 474,12 Kg/m^3 e nos traços 02 e 03 o consumo foi de 461,95 Kg/m^3 . Na Tabela 44, observa-se o consumo de cimento previsto conforme o tipo de resistência.

Tabela 44 - Proporções típicas para os materiais do concreto de diferentes resistências

	Baixa Resistência	Resistência Moderada	Alta Resistência
	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3
Cimento	255	356	510
Água	178	178	178
Agregado miúdo	801	848	890
Agregado graúdo	1169	1032	872
Proporção de pasta			
porcentagem em massa	26	29,3	34,3
Porcentagem em volume			
Fator água/cimento			
em massa	0,70	0,50	0,35
Resistência			
em MPa	18	30	60

Fonte: Mehta & Monteiro (2008).

No traço 01 a quantidade de cimento utilizada foi 474,1Kg/m³, superior a definida para concretos de resistência moderada que é de 356kg/m³. Já nos traços 02 e 03 considerados de alta resistência o valor obtido foi 462,0 Kg/m³, sendo inferior a quantidade de cimento prevista, que é de 510Kg/m³.

A partir do consumo de cimento e da resistência dos concretos obtidas aos 28 dias, foi possível obter a intensidade de ligantes através da equação a seguir:

$$IL = \frac{I}{R_c}$$

Onde 'I' é o consumo total de ligantes [Kg/m³]

'R_c' é a resistência à compressão uniaxial em certa idade [Mpa].

Sendo obtidos os seguintes resultados:

Tabela 45 - Intensidade de ligantes

Traço	"I"- consumo total de ligantes	"R _c " - Resistência à compressão uniaxial em certa idade	"IL"- Intensidade de ligantes
Traço 01	474,1	38,7	12,3
Traço 02	462,0	43,4	10,7
Traço 03	462,0	43,7	10,6

Fonte: Autora.

Considerando que concretos produzidos sem a elaboração de um projeto de empacotamento possuem valores de IL_{rc} acima 10-11 kg.m⁻³.MPa⁻¹ para as matérias-primas utilizadas nesse trabalho. observa-se que nas dosagens definidas para esses ensaios de empacotamento, não foram obtidos resultados eficientes deste indicador, assim como no traço 07. Porém, nos traços 06, 08, 09, 10, 11, 12 e 13 os resultados obtidos foram satisfatórios.

Na Tabela 46 observa-se o consumo do cimento e a Intensidade de ligantes obtidas em todos os traços.

Tabela 46 - Consumo de cimento e Intensidade de ligantes

Traço	Consumo de cimento (kg/m ³)	Intensidade de ligantes (kg/m ³ .MPa)
01	474,12	12,24
02	461,95	10,64
03	461,95	10,58
06	413,3	8,5
07	437,7	12,42
08	293,74	6,55
09	305,6	7,30
10	413,33	8,99
11	364,70	7,89
12	401,99	7,66
13	377,58	9,22

Fonte: Autora.

7 CONCLUSÃO

A principal proposta deste trabalho foi avaliar, entre cinco métodos de adensamento de agregados, quais obteriam uma medida mais precisa do teor de vazios entre os agregados, já que a redução no índice de vazios pode contribuir para a diminuição do teor de pasta no concreto e consequentemente a redução do consumo de cimento, diminuindo os impactos ambientais gerados. Através da análise da resistência mecânica dos concretos obtidos e da sua trabalhabilidade, foi possível verificar se o concreto produzido apresenta maior ou menor impacto ambiental.

Na análise do índice de vazios observou-se que a combinação de agregados com granulometrias próximas, ou seja, contínuas, apresentaram pouco potencial de empacotamento, com baixa diminuição dos índices de vazios mesmo em diferentes proporções. Isto ocorre devido ao fato de agregados com granulometrias semelhantes acabarem interferindo no espaçamento uns dos outros, pois, apesar do agregado ter um tamanho menor ele não é suficiente para preencher os vazios entre os agregados maiores, provocando o afastamento entre eles, o que ocasiona um aumento no teor de vazios. Assim, sistemas descontínuos apresentam melhores combinações para o empacotamento. Logo, o empacotamento dos agregados é mais efetivo quando há uma maior variação da distribuição granulométrica.

Com relação aos cinco métodos de adensamento dos agregados, observa-se que aqueles que incluíram a vibração, apresentaram uma medida menor do teor de vazios, visto que esse método promove o rearranjo dos agregados diminuindo os vazios existentes.

Na composição B6-B5-B4-B3-B2 o método com o menor índice de vazios foi o método Saco com vibração com um índice de 27,9% na proporção 50-50. Já ao analisar os resultados obtidos entre a combinação inicial de agregados B6 e B5 e a combinação final, com os agregados B6, B5, B4, B3 e B2, observa-se a proximidade dos resultados, conforme o método foi realizado, com ou sem vibração. É perceptível que a combinação entre agregados de granulometrias diferentes, contribui efetivamente para a redução do índice de vazios.

Na composição B5-B3-A6-A3 o método com o menor índice de vazios foi o método Lançamento com vibração com um índice de 23% na proporção 80-20. Já ao analisar os resultados obtidos entre a combinação inicial de agregados B5 e B3 e a combinação final, com os agregados B5, B3, A6 e A3, observa-se a proximidade dos resultados, conforme o método foi realizado, com ou sem vibração.

Na composição B5-B2-A4-A1 o método com o menor índice de vazios foi o método Saco com vibração com um índice de 20,1% na proporção 90-10. Já ao analisar os resultados

obtidos entre a combinação inicial de agregados B5 e B2 e a combinação final, com os agregados B5, B2, A4 e A1, observa-se a proximidade dos resultados, conforme o método foi realizado, com ou sem vibração e que em todos os métodos em determinada proporção ocorreu o aumento no índice de vazios ao invés da diminuição.

Entre as nove composições granulométricas analisadas, a que obteve o menor índice de vazios foi a composição B5-B2-A4-A1 com um índice de 20,1% no método Saco com vibração na proporção 90-10.

Outro fator a ser observado é que os menores índices de vazios foram obtidos na etapa de ida, ou seja, quando os agregados de maior granulometria são inseridos primeiro no ensaio dos métodos. Isto demonstra que, em geral, para bons empacotamentos, a estratégia de adicionar agregados finos para preencher vazios entre os grossos é mais efetiva do que adicionar grossos sobre os finos.

No ensaio de abatimento de tronco de cone, observa-se, de modo geral, que o volume de pasta obtido no ponto de transição, está de acordo com o índice de vazios obtidos no ensaio dos métodos com vibração. O volume de pasta necessário para preencher os vazios coincide com os índices de vazios encontrados nos métodos com vibração ou estão próximos a ele, distanciando-se dos ensaios sem vibração, pois esses necessitam de um volume de pasta maior para preencher os vazios. Assim, a conclusão mais importante do presente trabalho é a de que, com o uso de métodos de vibração, é possível determinar, com precisão aceitável para uso prático, o teor de vazios entre os agregados.

Para atingir o ponto de transição foi necessário no mínimo a realização de três adições, sendo o menor volume de pasta necessário, 26%. O maior ponto de transição ocorreu na sétima adição no traço 08, que necessitou de mais adições devido à quantidade de finos na composição. Já o *slump* desejado, foi obtido a partir da sexta adição sendo predominante a sua obtenção na nona adição. A variação no *slump* obtido foi de 110mm a 135mm.

Em relação à resistência à compressão obteve-se como menor valor 35,2 Mpa no traço 07 e a maior resistência 52,5 Mpa no traço 12. Já no uso de cimento, o menor consumo foi 293,7 kg/m³, traço 08 e o maior 474,1kg/m³, traço 01, sendo respectivamente a menor e a maior intensidade de ligantes obtida. Percebe-se que nos traços 01, 02 e 03 cujas combinações não utilizaram agregado miúdo, foram obtidos os maiores consumos de cimento, obtendo também as maiores intensidades de ligantes. Porém, o maior resultado de IL_{tc} foi obtido no traço 07. Assim, verifica-se que a redução do IL, que deriva do aumento do empacotamento por este

permitir a diminuição do teor de cimento, é mensurável pelos métodos de medição do empacotamento por vibração apresentados no presente trabalho.

De modo geral, entre os 11 traços analisados, no ensaio de compressão, aos 28 dias, dois traços obtiveram resistência moderada e os demais obtiveram alta resistência, resultado importante, pois, mesmo reduzindo o consumo de cimento, o MPa obtido nesses traços, foi elevado, ocorrendo uma redução na intensidade de ligantes com um aumento na resistência. Dado importante, pois, está de acordo com o objetivo da pesquisa, que é diminuir o índice de vazios e consequentemente a quantidade de cimento, sem prejudicar a trabalhabilidade e a resistência, diminuindo o índice de ligantes.

Em relação à análise dos cinco métodos propostos, percebe-se que, mesmo sendo realizados com combinações diferentes de agregados, os resultados obtidos de índices de vazios nos métodos com vibração correspondem ao volume de pasta necessário para atingir o ponto de transição, obtido no ensaio de abatimento. Apesar da necessidade de outros testes com combinações e porcentagens diferentes, percebe-se o potencial na utilização desses métodos e a sua eficácia.

REFERÊNCIAS³

ANDRADE, P. M. P. **Estudos de empacotamento de agregados para concretos de baixo teor de CO₂**. 49 f. Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo/USP, São Carlos, 2018.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. **Coprocessoamento**. (2016). Disponível em: <https://www.abcp.org.br/>. Acesso em: 20 de nov. 2018

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. Coprocessamento - Panorama do Coprocessamento 2020 - Ano base 2019. Uma tecnologia sustentável.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 18p.

_____. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2001. 13p.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 14p.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 18p.

_____. **NBR NM 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006. 9p

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

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

Associação Mineira de Defesa do Ambiente - AMDA. **Ciclo de Vida do Cimento**. 2011. Disponível em: <http://www.amda.org.br/?string=interna-projetos&cod=28>. Acesso em: 24 ago. 2018.

BACELLAR, M. do R. **Levantamento de práticas adotadas no processo construtivo para a otimização da sustentabilidade em obras de edificações**. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará**: estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

CAIADO, A. R. **Contribuição ao estudo da rotulagem ambiental dos materiais de construção civil**. 2014. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

³ De acordo com Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023).

CBCS. **Materiais, Componentes, e a Construção Sustentável**. Agosto 2009. Disponível em: http://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/posicionamentos/CBCS_CT Materiais_Posicionamento_Materiais%20componentes.pdf. Acesso em: 09 de set. 2016.

CONDEIXA, K. M. **Comparação entre materiais da construção civil através da avaliação do ciclo de vida: sistema drywall e alvenaria de vedação**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

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

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. Modern Concrete Technology Series, vol. 9. London: E&FN SPON, 1999. 421 p.

Ecycle. **Como ocorre o processo de produção do cimento e quais são seus impactos ambientais?** Equipe eCycle. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/component/content/article/35/1569-processo-de-producao-do-cimento-gera-emissoes-e-pode-diminuir-biodiversidade.html>. Acesso em 13 de març. 2021.

FENNIS, S. A. A. M. **Design of ecological concrete by particle packing optimization**. 276 f. Tese Dr., TU Delft, Amersfoort, Holanda (2011).

FLORES, C. Z. **Procedimento para especificação e compra de materiais da construção civil de menor impacto ambiental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

GBC Brasil. Green Building Council Brasil. **Brasil mantém a 4ª posição no ranking de países com maior número de projetos LEED**. Publicada em: 06/02/2018 Disponível em: <http://www.gbcbrasil.org.br/detalhe-noticia.php?cod=287>. Acessado em: 20 de nov. 2018.

GONÇALVES, A. V. S. **Estudos de empacotamento de agregados para concretos de baixo teor de CO₂**. 50 f. Pesquisa Universidade de São Paulo/USP, São Carlos, 2018.

Iea. **Cement**. More efforts needed. Tracking report. June 2020. Authors and contributors. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/cement>. Acesso em: 21 de mar 2021.

JOHN, V. M.. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KERCKHOFF, K. S. **Estudos de empacotamento de agregados para concretos de baixo teor de CO₂**. 48 f. Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo/USP, São Carlos, 2018.

LONDERO, C.; LENZ L. A.; DOS 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* [online]. 2017, vol.63, n.365, pp.22-33. ISSN 1678-4553. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633652018>. Acesso: 07 ago. 2018

LOTTI, M. G. **Processo de desenvolvimento e implantação de sistemas, medidas e práticas sustentáveis com vista a certificação ambiental de empreendimentos imobiliários – estudo de caso:** empreendimento bairro Ilha Pura – Vila dos Atletas 2016. 2015. Monografia (Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MASSONETTO, R.H.C.. **Otimização do empacotamento dos agregados graúdos na elaboração de concretos com menor consumo de cimento.** 51 f. Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo/USP, São Carlos, 2016/2017.

MATOS, B. F. **Construção sustentável:** panorama nacional da certificação ambiental. 2014. Dissertação (Mestrado em Ambiente construído) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3ª ed. São Paulo, IBRACON, 2008.

MONTIBELLER, G. **Ecodesenvolvimento e desenvolvimento sustentável; conceitos e princípios.** v. 4, n. 1, jan. 1993. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/economia/article/view/6645>. Acesso em: 10 set. 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 1. ed., São Paulo: Pini, 1982.

_____. **Propriedades do concreto.** 2. ed., São Paulo: Pini, 1997, 828p.

OLIVEIRA, C. N. **O paradigma da sustentabilidade na seleção de materiais e componentes para edificações.** 2009. Dissertação (Mestrado em Arquitetura), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

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

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. 224p.

PINTO, R. S. C. **Estudos de empacotamento de agregados para concretos de baixo teor de CO₂.** 47 f. Pesquisa - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

PROCLIMA – Programa Estadual de Mudanças Climáticas do Estado de São Paulo. **Gases do Efeito estufa.** Gases do Efeito Estufa e Fontes de Emissão. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/#:~:text=CO2%20%E2%80%93%20Respons%C3%A1vel%20por%20cerca%20de,e%20sumidouros%2C%20que%20tem%20a>. Acesso em 06 de març. 2021.

ROADMAP DE TECNOLOGIA - Transição de baixo carbono na indústria de cimento. 6 de abril de 2018. p.66. Disponível em: <https://webstore.iea.org/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry> Acesso em: 17 jan. 2019.

RODOLPHO, P. M. **Estudo do comportamento do concreto no estado fresco contendo areia britada**. 2007. Dissertação (Mestrado em Estrutura e Construção civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2007.

Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos**. Brasília: SGM, 2016. 98p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/ANU%C3%81RIO+N%C3%83O-METALICOS+2017+27.03.2018.pdf/d20dce50-bfe8-4718-8924-129038887835>. Acesso em: 20 de ago. 2018.

Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos**. Brasília: SGM, 2017. 89p. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/ANU%C3%81RIO+N%C3%83O-METALICOS+2017_27.07.2017.pdf/8a777f0f-3f3c-4f03-85de-8fa783f2813c. Acesso em: 20 de ago. 2018.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>. Acesso em: 20 de nov. 2018.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual**. 2019.

SOUSA, J.G. **Contribuição ao estudo das propriedades das argamassas de revestimento no estado fresco**. 2005. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2005.

US.GEOLOGICAL SURVEY/MINERAL COMMODITY SUMMARIES – USGS. **Mineral Commodity Summaries 2018**. Disponível em: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2018/mcs2018.pdf>. Acesso em: ago. 2018.

VAGHETTI, M. A. O. **Efeitos da cinza volante de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento portland**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

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

VOSGUERITCHIAN, A. B. **A abordagem dos sistemas de avaliação de sustentabilidade da arquitetura nos quesitos ambientais de energia, materiais e água, e suas associações às inovações tecnológicas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

WONG,V; CHAN K. W., KWAN , A. K. H. • Applying theories of particle packing and rheology to concrete for Sustainable Development. p 844 -851. Organization, technology and management in construction, an international journal • 5(2)2013

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **Low Carbon Technology Partnerships initiative**. 29 Nov 2015. Disponível em:

<https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Low-Carbon-Technology-Partnership-initiative-LCTPi-Cement-full-report>. Acesso em: 23 de jan 2020.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. 6 Abr 2018. Disponível em: <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050>. Acesso em: 23 de jan 2020.