

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NICOLLE TALYTA ARRIAGADA SOTO

TWO STAGE CONCRETE: CONCRETO ECOEFICIENTE COM AGREGADOS PRÉ-COLOCADOS E OTIMIZADO POR EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

CURITIBA

2023

NICOLLE TALYTA ARRIAGADA SOTO

TWO STAGE CONCRETE: CONCRETO ECOEFICIENTE COM AGREGADOS PRÉ-COLOCADOS E OTIMIZADO POR EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. PhD. Nayara Soares Klein

Coorientador: Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho

CURITIBA

2023

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

Soto, Nicolle Talyta Arriagada

Two stage concrete: concreto ecoeficiente com agregados précolocados e otimizado por empacotamento de partículas / Nicolle Talyta Arriagada Soto. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

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

Orientador: Nayara Soares Klein

Coorientador: Juarez Hoppe Filho

1. Concreto. 2. Agregados (Materiais de construção). 3. Empacotamento de partículas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Klein, Nayara Soares. IV. Hoppe Filho, Juarez. V. Título.

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **NICOLLE TALYTA ARRIAGADA SOTO** intitulada: **TWO STAGE CONCRETE: CONCRETO ECOEFICIENTE COM AGREGADOS PRÉ-COLOCADOS E OTIMIZADO POR EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS**, sob orientação da Profa. Dra. NAYARA SOARES KLEIN, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

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

CURITIBA, 18 de Agosto de 2023.

Assinatura Eletrônica
22/08/2023 10:48:27.0
NAYARA SOARES KLEIN
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
15/09/2023 15:23:10.0
BERENICE MARTINS TORALLES
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA)

Assinatura Eletrônica
22/08/2023 10:10:21.0
EDNA POSSAN
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO
LATINO AMERICANA)

Assinatura Eletrônica
22/08/2023 10:41:37.0
JOSÉ MARQUES FILHO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

A todas que me trouxeram até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Prof^a. Phd Nayara Soares Klein, pelos ensinamentos, apoio e orientações que tanto contribuíram no desenvolvimento desta tese.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho, pelo compartilhamento de tanto conhecimento e por toda ajuda e contribuição ao longo desses anos.

Aos avaliadores da banca, cujas contribuições foram fundamentais para este trabalho: Profa. Dra. Edna Possan, Prof. Dr. Renan Picolo Salvador, Prof. Dr. José Marques Filho, Prof. Dr. Ricardo Pieralisi, Profa. Dr. Berenice Martins Toralles.

Às empresas Itambé, McBauchemie, Pozofly e Metacaulim do Brasil, que gentilmente forneceram os materiais necessários para a campanha experimental deste estudo.

Ao Centro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC) da UFPR, ao Laboratório Multiusuário de Fotônica (FOTON) e ao Laboratório de Pesquisa de Aplicação de Nanopartículas (FotoNanoBio) da UTFPR, e pela infraestrutura disponibilizada.

Agradeço à Universidade Federal do Paraná pela valiosa oportunidade de fazer parte de um Programa de Pós-Graduação de tamanha qualidade. Agradeço também à Universidade Tecnológica Federal do Paraná - instituição onde cursei o ensino médio, graduação, mestrado e onde atuo como servidora há mais de dez anos – por toda formação e oportunidades que me proporcionou.

E, com isso, concluo que, apesar do meu enorme esforço, o sucesso desta tese não é mérito unicamente meu. Agradeço a todos os meus camaradas, companheiros e amigos. Em especial, agradeço ao Thyago e à Luísa, pela vida de carnavais; ao Emanuel, pela amizade desde o primeiro dia; e ao Italo, por me guiar nos caminhos de mim mesma.

Agradeço aos meus amigos amados Maria Lígia, Rafael e à minha amada afilhada Ceci. Que alegria poder seguir a caminhada ao lado de vocês, sigamos sempre juntos! Obrigada por tudo.

Com o maior amor agradeço à minha mãe, meu pai e irmã, por sempre me amarem, me incentivarem, acreditarem em mim e entenderem minha ausência nesses anos. Obrigada!

Ao meu marido Gustavo, que torna o cotidiano delicioso. Agradeço o amor e companheirismo, toda ajuda nos ensaios e nas revisões do trabalho. Sem você, certamente não teria chegado até aqui. Obrigada por tudo, sempre.

Muito obrigada a todos os servidores públicos das instituições de ensino, que trabalham diariamente por uma educação pública, gratuita e de qualidade.

RESUMO

O *two stage concrete* (TSC) é um concreto produzido e lançado em duas etapas. Primeiramente os agregados graúdos são colocados nas formas e, em seguida, os vazios internos deixados por eles são preenchidos com graute. O TSC não requer vibração ou compactação para seu adensamento, pois a consistência fluida do graute permite sua aplicação por injeção ou gravidade. Devido à alta proporção de agregados graúdos em sua composição (da ordem de 60%), o TSC pode ser considerado um concreto ecoeficiente, devido ao baixo consumo de cimento que pode ser associado ao uso de adições minerais inertes (fíler) e ativas (materiais cimentícios suplementares), com consequente baixa emissão de CO₂. Contudo, ainda não há consenso sobre o método de dosagem apropriado para sua produção, como incorporar adições minerais na mistura e qual é a relação entre a dimensão dos agregados graúdos utilizados e a capacidade de penetração do graute no esqueleto granular. Assim, o objetivo deste estudo foi desenvolver e avaliar as propriedades de TSC produzido com graute otimizado por modelos de empacotamento de partículas, assim como estudar a interação deste graute com o esqueleto granular, também otimizado por técnicas de empacotamento. O planejamento experimental foi dividido em três etapas: (i) desenvolvimento do graute com base no modelo CPM (do inglês, *Compressible Packing Model*), (ii) desenvolvimento do esqueleto granular, ajuste da quantidade de água dos grautes por meio da avaliação da sua fluidez e penetração dos grautes nos esqueletos granulares, (iii) avaliação das propriedades dos TSC produzidos. A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que o modelo de empacotamento associado à avaliação da reatividade química dos componentes permite produzir concretos ecoeficientes, promovendo o uso racional de adições minerais ativas e do cimento Portland. Além disso, foi possível compreender o comportamento de penetração do graute em esqueletos granulares com diâmetros de agregados inferiores à 19mm. Por fim, comprovou-se a eficiência mecânica e ambiental deste tipo de concreto que apresentou 7,31 kg de cimento/m³.MPa e 6,46 CO_{2e}/m³.MPa; valores respectivamente 39% e 29% inferiores à média encontrada para concretos brasileiros na faixa de 40 MPa.

Palavras-chave: Concreto em duas etapas. Agregado pré-colocado. Graute. Sustentabilidade. Empacotamento de partículas. CPM.

ABSTRACT

Two stage concrete (TSC) is a concrete produced and cast in two stages. First, the coarse aggregates are placed in the molds and then the internal voids left by them are filled with grout. TSC does not require vibration or compaction for densification, as the fluid consistency of the grout allows it to be applied by injection or gravity. Due to the high proportion of coarse aggregates in its composition (around 60%), TSC can be considered an eco-efficient concrete, due to the low cement consumption that can be associated with the use of inert (filler) and active mineral additions (supplementary cementitious materials), with consequent low CO₂ emissions. However, there is still no consensus on the appropriate dosing method for its production, how to incorporate mineral additions into the mix and what the relationship is between the size of the coarse aggregates used and the penetration capacity of the grout in the granular skeleton. Therefore, the aim of this study was to develop and evaluate the properties of TSC produced with grout optimized by particle packing models, as well as to study the interaction of this grout with the granular skeleton, also optimized by packing techniques. The experimental design was divided into three stages: (i) development of the grout based on the CPM model (Compressible Packing Model), (ii) development of the granular skeleton, adjustment of the amount of water in the grouts by evaluating their fluidity and penetration of the grouts into the granular skeletons, (iii) evaluation of the properties of the TSC produced. From the results, it was possible to conclude that the packing model associated with the evaluation of the chemical reactivity of the components makes it possible to produce eco-efficient concretes, promoting the rational use of active mineral admixtures and Portland cement. In addition, it was possible to understand the penetration behavior of grout in granular skeletons with aggregate diameters lower than 19 mm. Finally, the mechanical and environmental efficiency of this type of concrete was proven, with 7.31 kg of cement/m³.MPa and 6.46 CO_{2e}/m³.MPa, respectively 39% and 29% lower than the average found for Brazilian concretes in the 40 MPa range.

Keywords: Sustainability. Grout. Compressible packing model. Pre-placed aggregate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Duas etapas do TSC: (a) colocação dos agregados graúdos na forma, e preenchimento dos vazios com graute por (b) injeção e (c) gravidade.....	22
Figura 1.2 - Estratégias para reduzir as emissões de CO ₂ pela indústria do cimento.....	25
Figura 1.3 – Projeção da produção de cimento no Brasil.	29
Figura 1.4 – Uso e estimativa de disponibilidade de adições minerais, em milhões de toneladas por ano.	31
Figura 1.5 – Publicações sobre TSC.....	34
Figura 1.6 – Estrutura da tese.....	36
Figura 2.1 – Diferentes formas de preenchimento dos vazios entre os agregados graúdos com graute.	40
Figura 2.2 – Formas utilizadas de preenchimento dos vazios no TSC (90 trabalhos considerados na análise).	41
Figura 2.3 – Mecanismo de transmissão de tensões no TSC.	43
Figura 2.4 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos para TSC segundo ACI 304 para (a) diâmetro mínimo do agregado de 12.5mm, (b) diâmetro mínimo de 19mm e (c) diâmetro mínimo de 38mm, comparados com as curvas da NBR 7211 (ABNT, 2009a).	45
Figura 2.5 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos para TSC segundo Neville e Brooks para (a) diâmetro mínimo do agregado de 19mm e máximo de 125mm, (b) diâmetro mínimo de 25mm máximo de 75mm e (c) diâmetro mínimo de 19mm e máximo de 37.5mm, comparados com as curvas da NBR 7211 (ABNT, 2009a).	46
Figura 2.6 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos para TSC segundo ASTM C637-20 para (a) diâmetro mínimo do agregado de 12.5mm e máximo de 37.5mm (b) diâmetro mínimo de 12.5mm máximo de 25mm, comparados com as curvas da NBR 7211 (ABNT, 2009a).	47
Figura 2.7 – Diâmetros de agregados graúdos utilizados para produção de TSC (78 trabalhos considerados na análise).....	49
Figura 2.8 – Histograma dos agregados graúdos utilizados para produção de TSC (78 trabalhos considerados na análise).....	50
Figura 2.9 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos para TSC (a) ACI 304.1 (b) Neville e Brooks (2010) e (c) ASTM C637-20, comparados com as curvas da NBR 7211 (ABNT, 2009a).	53
Figura 2.10 – Histograma do módulo de finura utilizado por diversos autores para produção de graute para TSC (49 trabalhos considerados na análise).....	56
Figura 2.11 – Adições utilizadas para produção de grautes para TSC (27 trabalhos considerados na análise).	57
Figura 2.12 – Aditivos químicos utilizados para produção de grautes para TSC dentre os estudos lidos na revisão sistemática (86 trabalhos considerados na análise).	59
Figura 2.13 – Relações (a)Agregado miúdo/aglomerante e (b)Água/aglomerante utilizadas por diversos autores.	61
Figura 2.14 – Histograma das relações agregado miúdo/aglomerante e água/aglomerante utilizadas por diversos autores.	62
Figura 2.15 – Relação entre <i>IC</i> e resistência à compressão dos traços de TSC analisados na revisão sistemática.	64
Figura 2.16 – Aglomeração de partículas finas.....	69
Figura 2.17 - Continuidade sólida do corpo granular.	73
Figura 2.18 – Efeito (a) afastamento e (b) parede.	73
Figura 2.19 – Condições de dispersão de partículas em água.....	77

Figura 3.1 – Representação do resultado do ensaio <i>mixing energy</i> , com aumento do consumo de energia em função da adição de água ao longo do tempo.....	83
Figura 3.2 –Ensaio <i>mixing energy</i> : (a) sensor de corrente e (b) gotejador de água.....	85
Figura 3.3 – Modelos de planejamento experimentais: (a) planejamento fatorial 3 ² ; (b) Planejamento composto de face centrada e; (c) Planejamento Simplex.	90
Figura 3.4 – Processo de análise do planejamento experimental.	92
Figura 3.5 – Planejamento Simplex – (a) combinações nos vértices e centrais e (b) matriz de planejamento para a composição CP.....	92
Figura 3.6 – Planejamento Simplex – (a) combinações nos vértices e centrais e (b) matriz de planejamento para as composições CV, MK e SA (cimento + adição mineral ativa).	93
Figura 3.7 – Configuração do ensaio de permeabilidade pelo método de carga variável, adaptado para agregados graúdos.	97
Figura 3.8 – Configuração do ensaio de fluidez do graute.	98
Figura 3.9 – Processo de moldagem dos corpos de prova de TSC: (a) agregados pré colocados; (b) início do grauteamento e; (c) esqueleto granular preenchido por graute.	100
Figura 4.1 – Termogravimetria do cimento CP V – ARI anidro.....	104
Figura 4.2 – Distribuição granulométrica do cimento e adições minerais.....	107
Figura 4.3 – Difratomia de raios X da (a) cinza volante, (b) metacaulim, (c) sílica ativa e (d) filer calcário....	108
Figura 4.4 – Correlações entre Chapelle modificado e teor de material amorfo das adições minerais.	110
Figura 4.5 – Distribuição granulométrica dos agregados (a) miúdo e (b) graúdos.....	111
Figura 4.6 – Ponto de saturação do aditivo superplastificante.	113
Figura 4.7 – Resultado dos ensaios <i>mixing energy</i> para (a)cimento CPV-ARI, (b) cinza volante, (c)filer calcário, (d)metacaulim e (e)sílica ativa.....	114
Figura 4.8 – Termogravimetria da pasta de cimento CP V – ARI, aos 91 dias.	116
Figura 4.9 – Modelo da hidratação do cimento Portland com adição de SiO ₂ ,assumindo a reação completa do cimento Portland e SiO ₂	121
Figura 4.10 – Superfície de resposta e ajuste do modelo para a composição CP.	123
Figura 4.11 – Valores preditos e desejabilidade de densidade de empacotamento da superfície de resposta do graute CP.....	124
Figura 4.12 – Superfície de resposta e ajuste do modelo para a composição CV.	125
Figura 4.13 – Superfície de resposta e ajuste do modelo para a composição MK.....	126
Figura 4.14 – Superfície de resposta e ajuste do modelo para a composição SA.	126
Figura 4.15 – Resultado dos ensaios <i>mixing energy</i> para as composições (a) CP, (b) CV, (c) MK e (d) SA.	128
Figura 4.16 – Calorimetria semi-adiabática das composições CP, CV, MK e SA.	130
Figura 4.17 – (a) Resistência à compressão e (b) resistência à compressão relativa (CP = 100%) para as composições CP, CV, MK e SA, aos 28 e 91 dias.	131
Figura 4.18 – Correlação entre resistência à compressão e tração para as composições CP, CV, MK e AS, aos 28 e 91 dias.....	132
Figura 4.19 – Correlação entre resistência à compressão e relação a/c, para as composições CP, CV, MK e SA aos 28 e 91 dias.....	132
Figura 4.20 – Resultados de termogravimetria (TG) para as composições CP, CV, MK e SA.	133
Figura 4.21 – (a) Composição química (base de não voláteis) e (b) consumo de portlandita para as composições CP, CV, MK e SA, aos 90 dias.	135

Figura 4.22 – Reatividade efetiva das composições CP, CV, MK e SA.	136
Figura 4.23 – Correlação entre reatividade efetiva e teor de portlandita	137
Figura 4.24 – (a) Consumo de cimento para se obter 1MPa de resistência à compressão (<i>IC</i>) e (b) emissões de CO ₂ e/m ³ .MPa (<i>IC02</i>) para as composições CP, CV, MK e SA, aos 28 e 90 dias.	138
Figura 4.25 – Densidade de empacotamentos das misturas entre agregados graúdos.	139
Figura 4.26 – Distribuição granulométrica (a) discreta e (b) acumulada dos esqueletos granulares e do modelo Funk e Dinger (q=0,37).	140
Figura 4.27 – Permeabilidade à água dos esqueletos granulares.	141
Figura 4.28 – Ensaio de fluidez para ajuste da composição CV.	142
Figura 4.29 – (a) Resistência à compressão para os grautes GR18, GR21 e GR35, aos 28 e 91 dias, e (b) ajuste com a Lei de Abrams.	144
Figura 4.30 – (a) Consumo de cimento para se obter 1MPa de resistência à compressão (<i>IC</i>) e (b) emissões de CO ₂ e/m ³ .MPa (<i>IC02</i>) dos grautes GR18, GR21 e GR35, aos 28 e 90 dias.	144
Figura 4.31 – (a) Resistividade elétrica superficial aos 7, 14, 21 e 28 e (b) correlação entre a RES e a resistência à compressão dos grautes GR18, GR21 e GR35, aos 28 dias.	145
Figura 4.32 – Superfície externa dos corpos de prova das 9 composições de TSC estudadas.	148
Figura 4.33 – Corte transversal dos corpos de prova das 9 composições de TSC estudadas.	149
Figura 4.34 – Fotografias do corte longitudinal dos corpos de prova das 9 composições de TSC estudadas. ...	150
Figura 4.35 – Tortuosidade dos esqueletos granulares.	152
Figura 4.36 – (a) Resistência à compressão para os TSC aos 28 dias e (b) correlação entre a resistência à compressão dos grautes (GR18, GR21 e GR35) e do TSC.	153
Figura 4.37 – Consumo de cimento para se obter 1MPa de resistência à compressão (<i>IC</i>) das 9 composições de TSC estudadas, aos 28 dias.	153
Figura 4.38 – Resistividade elétrica superficial das 9 composições de TSC estudadas, aos 7, 14, 21 e 28 dias.	154
Figura 4.39 – Massa específica das 9 composições de TSC estudadas, aos 28 dias.	156
Figura 4.40 – (a) Absorção por imersão e índice de vazios e (b) sua correlação, para as 9 composições de TSC estudadas, aos 28 dias.	156
Figura 4.41 – Correlação entre RES e (a) absorção por imersão e (b) índice de vazios, das 9 composições de TSC estudadas, aos 28 dias.	157
Figura 4.42 – Relação entre o índice <i>IC</i> e resistência à compressão dos traços de TSC analisados na revisão sistemática e do TSC de maior ecoeficiência produzido no presente trabalho.	158
Figura 4.43 – Relação entre <i>IC</i> e resistência à compressão dos traços de TSC analisados na revisão sistemática produzidos pelo método da gravidade e sem fibras, e do TSC de maior ecoeficiência produzido no presente trabalho.	159
Figura 4.44 – Emissões de CO ₂ e/m ³ .MPa (<i>IC02</i>) das 9 composições de TSC estudadas, aos 28 dias.	160
Figura 4.45 – Aspecto e acabamento dos traços testados para o CC2, em função do teor de graute (argamassa úmida).	163
Figura 4.46 – <i>Slump test</i> dos traços testados para o CC2, em função do teor de graute (argamassa úmida). ...	164
Figura 4.47 – Superfície externa dos corpos de prova do B1GR21, CC1 e CC2.	165
Figura 4.48 – Corte transversal dos corpos de prova do B1GR21, CC1 e CC2.	166
Figura 4.49 – Resistência à compressão dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.	167
Figura 4.50 – Resistividade elétrica superficial dos concretos CC2 e B1GR21, aos 7, 14, 21 e 28 dias.	168

Figura 4.51 –(a) Massa específica e (b) absorção por imersão e índice de vazios dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias..... 169

Figura C.1 – Arduino electronic setup with SCT013 sensor.209

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Exemplos de obras que utilizaram o <i>two-stage concrete</i>	23
Tabela 1.2 – Emissão de CO ₂ para os principais materiais constituintes do concreto.	31
Tabela 2.1 – Aplicações sugeridas para o <i>two-stage concrete</i>	39
Tabela 2.2 – Módulo de finura dos agregados miúdos utilizados por diversos autores para produção de graute para TSC (49 trabalhos considerados na análise).	55
Tabela 2.3 – Requisitos do aditivo fluidificador de graute, segundo requisitos da norma ASTM C937-16 (ASTM, 2016a).	58
Tabela 2.4 - Valores para o índice de compactação K.	75
Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados para cada material na realização do ensaio <i>mixing energy</i>	84
Tabela 3.2 – Materiais presentes em cada composição estudada para graute.	89
Tabela 3.3 – Tabela resumo dos ensaios da Etapa I.	95
Tabela 3.4 – Tabela resumo dos ensaios da Etapa II.	100
Tabela 3.5 – Tabela resumo dos ensaios da Etapa II.	103
Tabela 4.1 – Composição química e características físicas do cimento.	104
Tabela 4.2 – Composição química e características físicas das adições minerais.	105
Tabela 4.3 – Dimensões médias do cimento e adições minerais.	107
Tabela 4.4 – Quantificação de fases minerais das adições minerais por Rietveld.	110
Tabela 4.5 – Caracterização dos agregados miúdos e graúdos.	111
Tabela 4.6 – Dimensão mínima dos agregados graúdos utilizados.	112
Tabela 4.7 – Densidade de empacotamento e demanda de água das adições minerais.	114
Tabela 4.8 – Composição química do cimento utilizado (FRX e TG).	118
Tabela 4.9 – Composição teórica potencial do cimento anidro.	118
Tabela 4.10 – Teores de adição e substituição máximos das adições minerais ativas, baseadas nos resultados do Chapelle.	118
Tabela 4.11 – Teores de adição e substituição ponderados das adições minerais ativas, baseadas nos resultados do Chapelle.	119
Tabela 4.12 – Densidade de empacotamento e diâmetro médio das classes.	122
Tabela 4.13 – Relação percentual em massa das composições CP, CV, MK e SA.	127
Tabela 4.14 – Consumo de materiais (kg/m ³) das composições CP, CV, MK e SA.	127
Tabela 4.15 – Densidade de empacotamento e demanda de água das composições avaliadas.	129
Tabela 4.16 – Composição dos esqueletos granulares.	140
Tabela 4.17 – Relação percentual em massa dos grautes GR18, GR21 e GR35, tempos de escoamento e relação a/agl.	143
Tabela 4.18 – Consumo de materiais (kg/m ³) dos grautes GR18, GR21 e GR35.	143
Tabela 4.19 – Consumo de materiais (kg/m ³) das 9 composições de TSC estudadas.	147
Tabela 4.20 – Consumo de materiais (kg/m ³) do traço CC1, CC2 e B1GR21.	165
Tabela A.1 – Outros nomes utilizados para o <i>two stage concrete</i>	196
Tabela A.2 – Resultado da busca nas bases de dados.	198

Tabela B.1 – Resultado da busca nas bases de dados.....	200
Tabela E.1 – Outros nomes utilizados para o <i>two stage concrete</i>	213
Tabela E.2 – Composição teórica potencial do cimento anidro.....	215
Tabela F.1 – Dados do ensaio de permeabilidade dos esqueletos granulares à água.....	217
Tabela G.1 – ANOVA – Resistência à compressão das composições CP, CV, MK e AS, aos 28 e 91 dias.....	218
Tabela G.2 – TUKEY – Resistência à compressão das composições CP, CV, MK e AS, aos 28 e 91 dias.	219
Tabela G.3 – ANOVA – Resistência à compressão dos grautes GR18, GR21 e GR35, aos 28 e 91 dias.....	219
Tabela G.4 – TUKEY – Resistência à compressão dos grautes GR18, GR21 e GR35, aos 28 e 91 dias.	220
Tabela G.5 – ANOVA – Resistividade elétrica superficial dos grautes GR18, GR21 e GR35, aos 7, 14, 21 e 28 dias.....	220
Tabela G.6 – TUKEY – Resistividade elétrica superficial dos grautes GR18, GR21 e GR35, aos 7, 14, 21 e 28 dias.....	221
Tabela G.7 – ANOVA – Resistência à compressão dos TSC, aos 28 dias.....	221
Tabela G.8 – TUKEY – Efeito do esqueleto na resistência à compressão dos TSC, aos 28 dias.....	222
Tabela G.9 – TUKEY – Efeito do graute na resistência à compressão dos TSC, aos 28 dias.....	222
Tabela G.10 – TUKEY – Resistência à compressão dos TSC, aos 28 dias.....	222
Tabela G.11 – ANOVA – Resistividade elétrica superficial dos TSC, aos 7, 14, 21 e 28 dias.....	223
Tabela G.12 – TUKEY – Resistividade elétrica superficial dos TSC, aos 7, 14, 21 e 28 dias.....	224
Tabela G.13 – ANOVA – Absorção por imersão dos TSC, aos 28 dias.....	225
Tabela G.14 – TUKEY – Efeito do esqueleto na absorção dos TSC, aos 28 dias.....	225
Tabela G.15 – TUKEY – Efeito do graute na absorção dos TSC, aos 28 dias.....	225
Tabela G.16 – TUKEY – Absorção dos TSC, aos 28 dias.....	226
Tabela G.17 – ANOVA – Índice de vazios dos TSC, aos 28 dias.....	226
Tabela G.18 – TUKEY – Efeito do esqueleto no índice de vazios dos TSC, aos 28 dias.....	226
Tabela G.19 – TUKEY – Efeito do graute no índice de vazios dos TSC, aos 28 dias.....	227
Tabela G.20 – TUKEY – Índice de vazios dos TSC, aos 28 dias.....	227
Tabela G.21 – ANOVA – Massa específica dos TSC, aos 28 dias.....	227
Tabela G.22 – TUKEY – Massa específica dos TSC, aos 28 dias.....	228
Tabela G.23 – ANOVA – Resistência à compressão dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.....	228
Tabela G.24 – TUKEY – Resistência à compressão dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.....	228
Tabela G.25 – ANOVA – Resistividade elétrica superficial dos concretos CC2 e B1GR21, aos 7, 14, 21 e 28 dias.....	229
Tabela G.26 – TUKEY – Resistividade elétrica superficial dos concretos CC2 e B1GR21, aos 7, 14, 21 e 28 dias.....	229
Tabela G.27 – ANOVA – Massa específica dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.....	230
Tabela G.28 – TUKEY – Massa específica dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.....	230
Tabela G.29 – ANOVA – Absorção dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.....	230
Tabela G.30 – TUKEY – Absorção dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.....	230
Tabela G.31 – ANOVA – Índice de vazios dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.....	231
Tabela G.32 – TUKEY – Índice de vazios dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.....	231

Tabela H.1 – Composição química das composições CP, CV, MK e SA.	232
Tabela H.2 – Composição química das composições CP, CV, MK e SA, na base de não voláteis.....	232
Tabela H.3 – Portlandita consumida estimada para as composições CP, CV, MK e SA.	233
Tabela H.4 – Resultados normalizados de Portlandita consumida estimada para as composições CP, CV, MK e SA.	233
Tabela H.5 – Reatividade efetiva das composições CV, MK e SA.	234

LISTA DE SIGLAS

ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AATG	Análise termogravimétrica
BET	Área específica (Brunauer, Emmett e Teller)
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPV-ARI	Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial
CPM	<i>Compressive packing model</i> (modelo de empacotamento compressível)
CC	Concreto convencional
DRX	Difração de raios X
DMC	Dimensão máxima característica
FRX	Fluorescência de raios X
GoF	<i>Goodness of Fit</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LPM	<i>Linear packing model</i>
MF	Módulo de finura
NBR	Norma Brasileira
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PA	Pureza analítica
TSC	<i>Two-stage concrete</i>
UFPR	Universidade Federal do Paraná
CP	Composição contendo cimento Portland
CV	Composição contendo cinza volante
MK	Composição contendo metacaulim
SA	Composição contendo sílica ativa

LISTA DE SIMBOLOS

H_2O	Água
agl	Aglomerante
h_2	Altura final da lâmina d'água
h_1	Altura inicial da lâmina d'água
A_1	Área da seção transversal da amostra
A_2	Área da seção transversal do tubo
A	Área projetada de cada grão
q	Coefficiente de distribuição
$c_{fração}$	Coefficiente de forma da fração
$c_{agregado}$	Coefficiente de forma do agregado
k	Coefficiente de permeabilidade
L	Comprimento da amostra
Φ	Concentração de sólidos
β	Densidade de empacotamento
γ_i	Densidade de empacotamento virtual
D	Diâmetro da partícula
D10	Diâmetro pelo qual passam 10% das partículas
D50	Diâmetro pelo qual passam 50% das partículas
D90	Diâmetro pelo qual passam 90% das partículas
D_{max}	Diâmetro da maior partícula
$D_{médio}$	Diâmetro médio das partículas
d_j	Dimensão seguinte de d_i
K	Índice de compactação
IC	Índice de eficiência do cimento
ICO_2	Índice de emissão de CO_2
λ	Índice de lamelaridade
IV	Índice de vazios do agregado
$m_{fração}$	Massa dos grãos contidos na imagem
m_e	Massa específica
$d_{fração}$	Massa específica da fração
ρ	Massa específica do agregado analisado

MM_{H_2O}	Massa molecular da água
$MM_{Ca(OH)_2}$	Massa molecular de hidróxido de cálcio
MM_{CO_2}	Massa molecular do anidrido carbônico
MM_{CaCO_3}	Massa molecular do carbonato de cálcio
m	Massa total da amostra de agregados
m_u	Massa unitária
ρ_i	Massa unitária de cada classe
d_i	Menor dimensão
$CPFT$	Porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D
pH	Potencial Hidrogeniônico
a/s	Relação água sólidos
a/agl	Relação água/aglomerantes
u_w	Relação água/materiais finos
a/m	Relação água/materiais secos
a_m/agl	Relação agregado miúdo/aglomerantes
f_c	Resistência à compressão
t	Tempo decorrido de escoamento
a_{ij}	Valor do efeito afastamento
b_{ij}	Valor do efeito parede
V_a	Volume de aditivo
γ_j	Volume de material de cada classe
v_p	Volume do material fino
V_s	Volume dos materiais sólidos
v_l	Volume total de líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	22
1.2	PROBLEMA DA PESQUISA.....	26
1.3	OBJETIVO DA PESQUISA.....	28
1.3.1	Objetivo geral.....	28
1.3.2	Objetivos específicos	28
1.4	JUSTIFICATIVA.....	28
1.4.1	Justificativa socioambiental	28
1.4.2	Justificativa econômica	32
1.4.3	Justificativa técnica	32
1.5	ESTRUTURA DA TESE.....	35
2	REVISÃO DA LITERATURA	38
2.1	CONCRETO EM DUAS ETAPAS – <i>TWO STAGE CONCRETE (TSC)</i>	38
2.1.1	CARACTERÍSTICAS DO TSC.....	38
2.1.2	ESPECIFICAÇÕES DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO TSC	42
2.1.3	PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS DO GRAUTE.....	60
2.1.4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO GRAUTE.....	65
2.1.5	PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO DO TSC.....	65
2.1.6	DURABILIDADE DO TSC.....	66
2.2	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	68
2.2.1	MODELOS DE OTIMIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	70
2.2.2	MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO	75
3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	79
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	79
3.1.1	Cimento Portland e adições minerais	79
3.1.2	Agregados	85
3.1.3	Aditivo	88
3.2	ETAPA I - DESENVOLVIMENTO DO GRAUTE	88

3.2.1	Planejamento experimental dos grautes	88
3.2.2	Caracterização dos grautes	93
3.3	ETAPA II – ESQUELETO GRANULAR E AJUSTE DE FLUIDEZ DO GRAUTE	95
3.3.1	Definição e caracterização do esqueleto granular	95
3.3.2	Ajuste da fluidez dos grautes	98
3.3.3	Penetração dos grautes no esqueleto granular e moldagem das amostras	99
3.4	ETAPA III – PROPRIEDADES DO TSC	100
3.4.1	Caracterização dos grautes e TSCs	101
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	104
4.1	CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DOS MATERIAIS UTILIZADOS	104
4.1.1	Cimento Portland	104
4.1.2	Adições minerais.....	105
4.1.3	Agregados	111
4.1.4	Aditivo	112
4.1.5	Densidade de empacotamento dos finos.....	113
4.2	ETAPA I - DESENVOLVIMENTO DO GRAUTE	116
4.2.1	Definição dos teores de substituição do cimento por adições minerais ativas.....	116
4.2.2	Definição das proporções entre os materiais do graute.....	122
4.2.3	Caracterização do graute.....	129
4.3	ETAPA II - ESQUELETO GRANULAR E AJUSTE DE FLUIDEZ DO GRAUTE	139
4.3.1	Definição e caracterização do esqueleto granular	139
4.3.2	Ajuste da fluidez dos grautes	142
4.4	ETAPA III - PROPRIEDADES DO TSC	143
4.4.1	Caracterização dos grautes	143
4.4.2	Penetração dos grautes no esqueleto granular e moldagem das amostras	146
4.4.3	Caracterização dos TSCs	152
4.4.4	Influência do método de mistura	161
5	CONCLUSÕES DA TESE	171
	REFERÊNCIAS	174
	APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	196

APÊNDICE B - PERIÓDICOS UTILIZADOS NA REVISÃO SISTEMÁTICA	200
APÊNDICE C – CONFIGURAÇÃO ARDUINO PARA ENSAIO <i>MIXING ENERGY</i>.....	209
APÊNDICE D – DEDUÇÃO DO CÁLCULO DO LIMITE DE POZOLANA.....	211
APÊNDICE E – CÁLCULOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO PORTLAND... 	213
APÊNDICE F – DADOS DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE À ÁGUA.....	217
APÊNDICE G – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS EXPERIMENTAIS	218
APÊNDICE H – CÁLCULO DO CONSUMO DE PORTLANDITA NOS GRAUTES	232

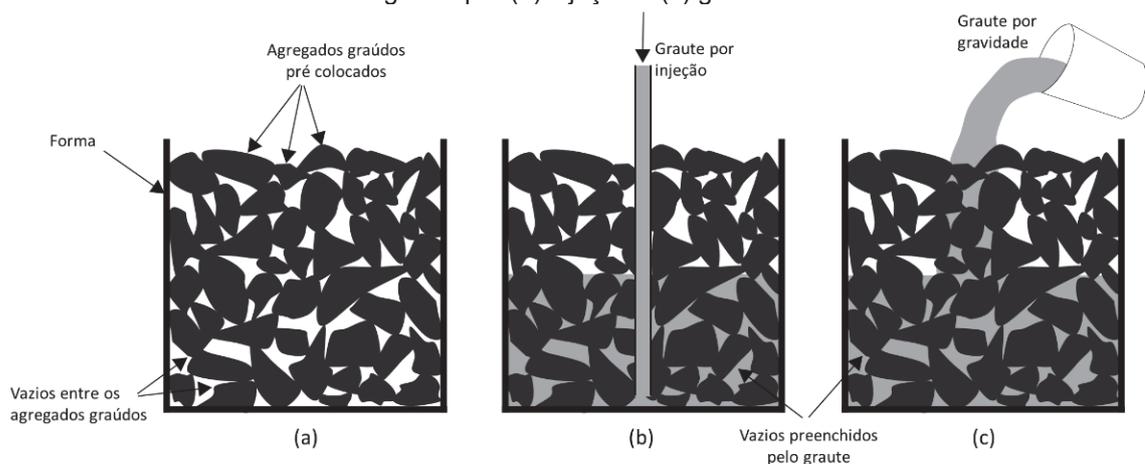
1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Na produção de concretos convencionais, a mistura dos materiais constituintes é feita previamente às ações de moldagem. Já o *two-stage concrete* (TSC), ou concreto em duas etapas, apresenta um método de fabricação singular, no qual, primeiramente, os agregados graúdos são colocados nas formas e, posteriormente, os vazios internos deixados por eles serão preenchidos com graute: um compósito a base de cimento Portland de consistência fluída, podendo conter adições, agregado miúdo e aditivos (ACI, 1997; ALFAYEZ; ALI; NEHDI, 2019; ALFAYEZ; OMAR; NEHDI, 2019; DAS; LAM, 2019; DAS; LAM; TANG, 2020; LI et al., 2019; LV et al., 2020, 2023; LV; ZHOU; LI, 2020a, 2020b; NAJJAR et al., 2017; NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2014; NEHDI et al., 2017b; RAMKUMAR et al., 2019).

O TSC não necessita de vibração ou compactação para seu adensamento, uma vez que a consistência fluída do graute permite que este, seja por injeção ou gravidade, preencha os vazios entre os agregados graúdos (ALFAYEZ, 2018; ALFAYEZ; OMAR; NEHDI, 2019; GANAW, 2012; NAJJAR, 2016; NAJJAR; ABDELGADER, 2009; NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2014; NEHDI et al., 2017b; O'MALLEY; ABDELGADER, 2010). Na Figura 1.1 são exemplificadas as duas etapas de colocação do concreto.

Figura 1.1 – Duas etapas do TSC: (a) colocação dos agregados graúdos na forma, e preenchimento dos vazios com graute por (b) injeção e (c) gravidade.



FONTE: A autora (2023).

O desenvolvimento do TSC teve início na década de 30, com o advento de equipamentos que permitiram a produção de grautes bastante trabalháveis e estáveis (NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2014). Inicialmente, este tipo de concreto foi concebido visando reparos em estruturas existentes, com sua primeira aplicação em 1939, para a reabilitação do túnel da Ferrovia Santa Fé, na Califórnia (ACI, 1997). O TSC já foi utilizado com sucesso também em construções submersas, como concreto massa, concreto com agregados pesados, entre outros (ACI, 1997; ALFAYEZ; OMAR; NEHDI, 2019; LI et al., 2019; LV; ZHOU; LI, 2020a; MOHAMMADHOSSEINI et al., 2020a; NAJJAR et al., 2017). Na Tabela 1.1 encontram-se exemplos de projetos em que o TSC foi o principal componente estrutural.

Tabela 1.1 – Exemplos de obras que utilizaram o *two-stage concrete*.

Projeto	Ano	Referência
Face jusante da barragem Barker em Nederland, Colorado (USA)	1946	Davis, Jansen e Neelands (1948)
Paredes da turbina da hidrelétrica Bull	1951	ACI (1997)
Reforço de pilares e vigas de ponte na Pensilvânia (USA)	1952	King e Wilson (1988)
Pilar submerso da ponte Mackinac	1954-1955	Davis e Haltenhoff (1956)
Base de reator nuclear na Estação Geradora de Fort Saint Vrain, Colorado (USA)	1969-1970	Habush e Walker (1974)
Recuperação da estrutura do Farol Brandywine Shoal, Delaware (USA)	1985-1987	Paul (1987)
Recuperação de pilares submersos da plataforma petrolífera em Los Angeles (USA)	1990	Sgouros, Webster e Hennegan (1996)
Vedação de túneis em mina de ouro na África do sul	2001-2006	Littlejohn e Swart (2006)
Barragem auxiliar na China	2006	Huang et al.(2008)
Reforço de cais petrolífero em Qingdao (China)	2012	Li et al. (2012)

FONTE: A autora (2023).

Observa-se na Tabela 1.1 que o TSC já teve aplicações em grandes projetos de engenharia. Isso se deve a certas características deste concreto que são benéficas para essas construções: baixo calor de hidratação, baixa retração por secagem, não ocorrência de segregação ao se utilizar agregados pesados devido à forma de produção deste concreto. Porém estudos e aplicações em projetos de menor escala, em pequenas obras, ainda são limitados (DAS; LAM, 2019; LV; ZHOU; LI, 2020b). Apesar de tratar-se de uma técnica relativamente antiga, a necessidade do uso de misturadores de alta velocidade para a

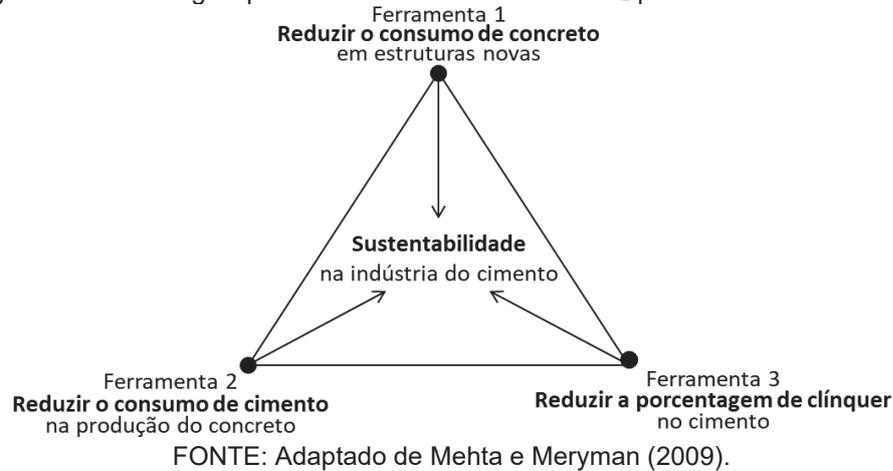
produção de grautes de qualidade acarretaram a subutilização do TSC, especialmente nos primeiros anos após seu desenvolvimento, ficando seu uso mais restrito a grandes projetos.

O avanço da tecnologia dos aditivos superplastificantes permitiu a produção de grautes para TSC em misturadores convencionais. A produção de grautes autoadensáveis também possibilitou que o TSC fosse aplicado por gravidade, dispensando o uso de bombas e diminuindo a necessidade de mão de obra especializada (BAYER; TURANLI; MEHTA, 2019). Com isso, a aplicação do TSC em projetos menores torna-se mais viável, podendo ser adequado o uso de TSC em pisos industriais, por exemplo. De acordo com Alfayez, Ali e Nehdi (2019) e Nehdi et al. (2017a) o uso do TSC oferece vantagens em relação a redução de custos e tempo de execução na construção de pavimentos. A popularização do uso de estruturas de concreto pré-moldadas, em substituição à concretagem *in loco*, também apresenta uma oportunidade de uso do TSC. O processo de colocação de agregados na forma e posterior grauteamento pode ser feito em fábrica, conferindo a esses elementos as vantagens econômicas e ambientais próprias deste material (LV; ZHOU; LI, 2020b).

As vantagens ambientais do TSC têm sido destacadas apenas recentemente (ALFAYEZ; ALI; NEHDI, 2019) e é devido a elas que este concreto vem ganhando espaço no mercado (NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2014). Em especial devido à maior proporção de agregados graúdos em sua composição em comparação a concretos convencionais, o que acarreta uma menor utilização de cimento na composição do TSC e consequente redução da emissão de CO₂ associada ao concreto (ALFAYEZ, 2018; ALFAYEZ; OMAR; NEHDI, 2019; LI et al., 2019; LV; ZHOU; LI, 2020a, 2020b; NAJJAR; ABDELGADER, 2009). Segundo Lv, Zhou e Li (2020b), a ampliação do uso do TSC seria uma maneira eficaz de diminuir o consumo de cimento na construção de estruturas.

As alternativas para redução de CO₂ pela indústria do cimento vêm sendo estudadas e desenvolvidas em diferentes frentes, algumas delas resumidas na Figura 1.2.

Figura 1.2 - Estratégias para reduzir as emissões de CO₂ pela indústria do cimento.



Como ilustrado na Figura 1.2, a ferramenta 1 baseia-se em reduzir o consumo de concreto para novas estruturas. Isto porque, utilizando concretos de alta resistência para construção de novas estruturas, é possível atingir o desempenho mecânico esperado com menores volumes de material (DAMINELI et al., 2010; DE MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO, 2019). Além disso, quanto maior a resistência à compressão do concreto, menor é a razão entre o consumo de cimento (kg/m^3) e a resistência à compressão (MPa) (CAMPOS et al., 2020; DAMINELI et al., 2010; DE MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO, 2019; GARTNER; HIRAO, 2015; YOUSUF; SANCHEZ; SHAMMEH, 2019). Ou seja, enquanto o consumo de cimento para concretos convencionais está na faixa de 9 a 17 kg/m^3 .MPa (GRAZIA et al., 2019), os concretos de alta resistência podem apresentar consumos de até 5 kg/m^3 .MPa (DAMINELI et al., 2010).

Já nas ferramentas 2 e 3 fica evidente a importância do uso de adições minerais quando o objetivo é produzir concretos mais sustentáveis, seja com a produção de cimentos compostos com alto teor de fíler e materiais cimentícios suplementares (reduzindo, assim, a porcentagem de clínquer no cimento) ou com a substituição de parte do cimento por adições minerais no processo de dosagem e produção do concreto (HOPPE FILHO et al., 2017; MEDEIROS; RAISDORFER; HOPPE FILHO, 2017). Isso porque os materiais cimentícios suplementares são subprodutos de outras cadeias produtivas, e chegam ao concreto com impacto ambiental e contribuição de CO₂ inferior ao cimento (DE MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO, 2019; GARTNER; HIRAO, 2015; HIGUCHI et al., 2014; MEHDIPOUR; KHAYAT, 2018; ROBATI; MCCARTHY; KOKOGIANNAKIS, 2016; YOUSUF; SANCHEZ; SHAMMEH, 2019; YU; SPIESZ; BROUWERS, 2015). Desta forma, a utilização de adições minerais na

composição do graute para a produção do TSC pode aumentar ainda mais o caráter ecoeficiente deste tipo de concreto (NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2014).

1.2 PROBLEMA DA PESQUISA

A instrução normativa relativa ao TSC, elaborada pelo *American Concrete Institute*, teve sua última revisão em 1997 (ACI, 1997). Nos mais de 25 anos decorridos após essa publicação, diversos avanços ocorreram na indústria do concreto. Contudo, autores ainda utilizam o documento como referência para a dosagem e controle tecnológico do material, sem considerar as novas tecnologias e técnicas disponíveis no mercado. Isto posto, ainda existem diversas lacunas no entendimento do TSC.

O principal componente deste concreto é o agregado graúdo, e a indicação normativa é de uso de agregados com um diâmetro mínimo de 12,5 mm (ACI, 1997). Essa limitação estaria atrelada à problemas no processo produtivo devido ao uso de agregados de diâmetros menores, por impedirem o correto fluxo do graute. Porém, o uso de agregados de diâmetros menores, associado ao uso de aditivos de terceira geração e ao controle de características reológicas do graute poderia reduzir o consumo de cimento devido ao menor volume de graute necessário. Ressalta-se, no entanto, que não há registros de estudos voltados à caracterização da fluidez do graute atrelada à utilização de agregados de menor diâmetro.

Tem-se como desafio para as próximas décadas o desenvolvimento e produção de concretos mais sustentáveis, que tenham um menor impacto na liberação de CO₂, porém com a mesma durabilidade e confiabilidade dos já existentes (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a). Nesse contexto o TSC assume relevância por utilizar uma maior fração de agregados graúdos em relação ao concreto convencional (CC) – cerca de 60% do volume total do concreto, frente aos cerca de 45% do CC, o que reduz o consumo de cimento em sua produção.

A densidade de empacotamento dos agregados graúdos, que exerce influência direta no consumo de cimento, ainda não foi explorada nesse tipo de concreto. No processo de fabricação de concretos por técnicas de empacotamento é comum a busca pelo menor volume de vazios. Porém, para o TSC, essa busca deve considerar a necessidade de o graute fluir entre os agregados. Adicionalmente, os estudos realizados não consideram a densidade de empacotamento dos agregados graúdos como parâmetro de dosagem.

As novas gerações de aditivos superplastificantes permitem a produção de grautes estáveis e trabalháveis o suficiente para serem empregados na produção de TSC. O aditivo fluidificador de graute indicado na instrução normativa, que consiste na combinação de redutor de água e agente expansivo, não vem sendo usado nas pesquisas recentes. Desta forma infere-se que as propriedades reológicas do graute que levaram ao estabelecimento do diâmetro mínimo dos agregados graúdos podem não ser mais válidas, e novas relações entre características do graute e da fase graúda (densidade de empacotamento e diâmetro mínimo) devem ser estudadas.

O uso de adições minerais na fabricação de grautes para TSC visa melhorar as características mecânicas e diminuir o consumo de cimento. Apesar do apelo ambiental em se utilizar altos volumes de adições minerais ativas (materiais cimentícios suplementares), as reações pozolânicas dependem da disponibilidade do hidróxido de cálcio, que é um produto da reação de hidratação das fases silicato do cimento Portland. O uso de adições minerais pozolânicas em quantidades que requeiram mais portlandita do que as disponibilizadas pelo cimento fazem com que parte das adições não reajam, impedindo a formação de fases hidratadas que melhoram as características mecânicas do concreto (PACEWSKA; WILIŃSKA, 2020; SCRIVENER et al., 2015). A presença de materiais cimentícios suplementares não reagidos pode ainda se tornar origem de reações deletérias no futuro devido à sua fração vítrea não reagida ou à liberação de álcalis na solução de poros (TAPAS, 2020).

Grande parte da produção atual de adições minerais já é empregada pela indústria do cimento (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). A previsão é que a produção dessas adições nos próximos anos não atenda totalmente à demanda, principalmente devido à tendência de descarbonização da matriz energética das indústrias que tem as adições minerais ativas como subprodutos (SNIC, 2019). A incorporação de adições minerais sem ou com baixa reatividade, como o fíler calcário, torna-se uma das alternativas mais promissoras na mitigação das emissões de CO₂ pela indústria do concreto. Isso porque seu uso não exige alto investimento: não há necessidade de calcinação, e a disponibilidade de reservas de calcário é bastante ampla (SNIC, 2019).

Ao se utilizar adições minerais em substituição ao cimento, o grau de reatividade de cada adição adicionada e seu impacto na reserva alcalina do concreto devem ser avaliados, visando a utilização racional do potencial reativo destas adições. Esses aspectos, porém, não são considerados nos estudos acerca do TSC. A substituição do cimento por adições minerais pode ainda diminuir a demanda de água e o calor de hidratação, porém o impacto do uso

destas adições na fluidez do graute ainda precisa ser mais bem estudado para garantir a trabalhabilidade necessária ao método (NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2017).

1.3 OBJETIVO DA PESQUISA

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo é desenvolver e avaliar as propriedades do TSC, com o desenvolvimento de graute otimizado por modelos de empacotamento de partículas, assim como estudar a interação deste graute com o esqueleto granular, também otimizado por técnicas de empacotamento.

1.3.2 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos também são foco deste trabalho:

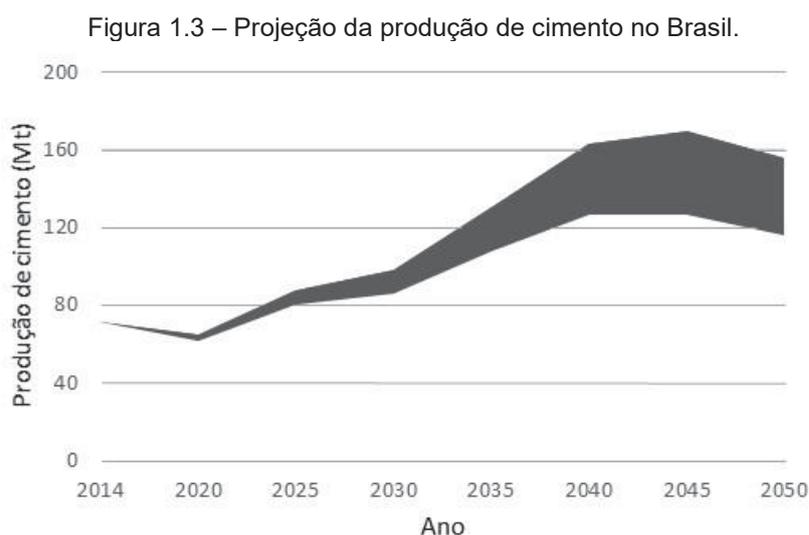
- Comparar adaptações nos métodos de ensaio de densidade de empacotamento de materiais finos na presença de água proposto por Wong e Kwan (2008) e o método de energia da mistura proposto por Marquardt (2001).
- Estabelecer critérios para determinar o teor de substituição do cimento Portland por adições minerais em pastas considerando aspectos químicos de reatividade das adições e reserva alcalina do cimento.
- Analisar o desempenho mecânico e ambiental de TSC dosados por técnicas de empacotamento de partículas, correlacionando a fluidez do graute com a capacidade de penetração no esqueleto granular.

1.4 JUSTIFICATIVA

1.4.1 Justificativa socioambiental

O cimento permanece sendo o material de construção mais consumido no mundo (CARVALHO et al., 2019; FENNIS; WALRAVEN, 2012; GARTNER; HIRAO, 2015; GRAZIA et al., 2019; HIGUCHI et al., 2014; MEHTA, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2008; MILLER et al., 2016; ROBATI; MCCARTHY; KOKOGIANNAKIS, 2016): em 2019 foram produzidas 4,08 bilhões de toneladas (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2020). Com isso, estima-se que, para cada pessoa, aproximadamente 535 kg de cimento são consumidos anualmente. A indústria do cimento é a terceira com maior consumo de energia e responde por 7% do total mundial de emissão de CO₂ (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018), ficando atrás apenas das indústrias de petróleo, carvão e gás natural (NAZARI; SANJAYAN, 2016).

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) estimou que, para limitar o aumento da temperatura global em até 1,5°C, as emissões de CO₂ até 2030 devem ser reduzidas em 45% em relação às emissões de 2010, devendo ser praticamente zeradas até 2050 (MASSON-DELMOTTE et al., 2019). Todavia, não há tendência de diminuição da fabricação de cimento (DAMINELI et al., 2010; MEHTA, 2010; ROBATI; MCCARTHY; KOKOGIANNAKIS, 2016; U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2020): em 2019 foram produzidas no mundo 50 mil toneladas a mais de cimento, em comparação com 2018 (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2020). Há perspectivas de aumento da produção de cimento mundial de 12 a 23% até 2050 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018). Para o Brasil a projeção da produção de cimento é apresentada na Figura 1.3, com base nos dados do Roadmap tecnológico do cimento (SNIC, 2019).



FONTE: Adaptado de SNIC (2019).

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2019) a produção de cimento no Brasil aumentou em 273% no período de 1990 a 2014. A Figura 1.3 mostra a projeção de produção de cimento em dois cenários, de alta e baixa demanda. Espera-se que, no período compreendido entre 2014 e 2050 a produção aumente em até 120% considerando um cenário de alta demanda. Mesmo em um cenário mais conservador, que considera uma baixa demanda de cimento, a projeção é que o aumento da produção nacional seja de 60%. Além disso, considera-se que ainda não exista substituto para o concreto em grandes obras (LIFSET; ECKELMAN, 2013).

Algumas medidas para diminuição da emissão de gases do efeito estufa vem sendo tomadas nas fábricas de cimento, como a utilização de fornos mais eficientes e combustíveis alternativos, redução da proporção de clínquer no cimento e recaptura da energia térmica excedente (DAMINELI et al., 2010; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018; MEHTA, 2010; ROBATI; MCCARTHY; KOKOGIANNAKIS, 2016; U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2011). Porém, considera-se pouco provável que as melhorias no processo de fabricação ocorram na rapidez e intensidade necessárias para atingir às metas de redução de emissões (DAMINELI, 2013; DAMINELI et al., 2010; MILLER et al., 2016). Isto porque apenas um terço das emissões relacionadas ao cimento estão atreladas à queima de combustíveis, sendo os outros dois terços decorrentes da descarbonatação do calcário (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018; MEHTA, 2010). A meta é a diminuição global da porcentagem de clínquer no cimento de 65% (2014) para 60% até 2050 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018). No Brasil a meta é ainda mais ambiciosa: redução do fator clínquer dos atuais 67% para 52% em 2050 (SNIC, 2019).

Desta forma, urge a necessidade de produção de concretos com uma menor utilização de cimento. Este objetivo pode ser alcançado pela combinação da utilização de adições minerais ativas ou inertes, aditivos químicos e técnicas de empacotamento de partículas. É largamente aceito que a otimização do empacotamento do esqueleto granular do concreto pode levar a uma redução do teor de cimento em concretos (YOUSUF; SANCHEZ; SHAMMEH, 2019; YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a, 2014b), e seu uso combinado com aditivos superplastificantes reduz a quantidade de água na mistura, garantindo um melhor preenchimento de vazios e densificando a matriz do compósito cimentício (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Certas adições minerais são subprodutos de outras cadeias produtivas. A cinza volante é resultante da queima de carvão, e a escória granulada de alto forno vem da indústria

metalúrgica, por exemplo. A emissão de CO₂ nessas indústrias ocorre independentemente da destinação das adições e, por esse motivo, essas emissões não são incluídas no cálculo das emissões de CO₂ relacionadas a esses materiais. Porém, podem ser contabilizadas as emissões referentes ao seu manuseio, moagem e transporte (NAZARI; SANJAYAN, 2016). Ou seja, apesar das baixas emissões de CO₂ associadas às adições minerais em comparação ao cimento, estas adições não chegam ao concreto com impacto ambiental nulo, como pode ser visto na Tabela 1.2. Outro fator a ser considerado é a disponibilidade destas adições (Figura 1.4), com destaque para a alta disponibilidade de fíler e baixa disponibilidade de sílica ativa.

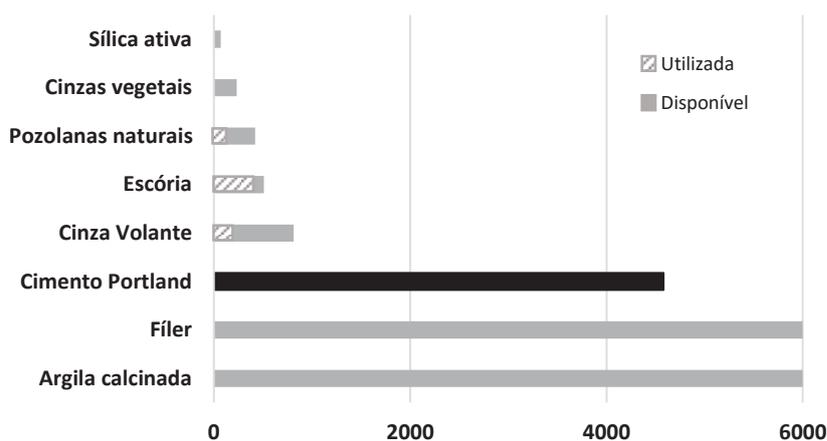
Tabela 1.2 – Emissão de CO₂ para os principais materiais constituintes do concreto.

Material	Emissão de CO ₂ (kg CO ₂ /kg material) *
Processamento do clínquer	0,830
Cimento Portland (clínquer + gesso)	0,860
Fíler calcário	0,008
Argila calcinada / metacaulim	0,350
Cinza volante	0,029
Escória granulada de alto forno	0,085
Sílica ativa	0,014
Agregado miúdo	0,002
Agregado graúdo	0,003
Superplastificante	0,767

*Sem considerar emissões de transporte

FONTE: Adaptado de Miller (2018); Scrivener, John e Gartner (2018); Shoubi, Barough e Amirsoleimani (2013).

Figura 1.4 – Uso e estimativa de disponibilidade de adições minerais, em milhões de toneladas por ano.



FONTE: Traduzido de Scrivener, John e Gartner (2018).

Portanto, é essencial que o potencial pozolânico destas adições minerais reativas seja explorado, levando em consideração sua composição química e características físicas, além

do meio em que ocorrem. Por esse motivo é importante que, ao determinar as porcentagens de substituição do cimento por adições pozolânicas, o grau de reatividade destas e a disponibilidade de hidróxido de cálcio sejam avaliados, de forma a evitar a presença de adições minerais ativas que não irão reagir adequadamente.

1.4.2 Justificativa econômica

No TSC, apenas 30 a 40% do volume total de materiais necessitam passar pelo processo de mistura – uma vez que aproximadamente 60% de seu volume é composto por agregados graúdos pré-colocados, o que resulta em menor emprego de equipamentos e mão de obra para sua produção (NOWEK et al., 2007). Desta forma, os custos para fabricação deste concreto podem ser menores para aplicações em baixas alturas como pavimentos e fundações, pois há menos energia envolvida. Além disso, após a colocação do graute nas formas, não há necessidade de adensamento ou compactação deste concreto, o que também contribui para diminuição dos seus custos de produção.

O grande volume de agregados graúdos também é responsável por um menor custo deste concreto por metro cúbico, uma vez que os aglomerantes, insumos que mais impactam no preço do concreto, são utilizados em menores porcentagens (NOWEK et al., 2007).

A otimização da curva granulométrica da fase graúda em escala industrial na usina de britagem, através do emprego de técnicas de empacotamento, poderia aumentar ainda mais a porcentagem destes agregados no TSC. Com isto o consumo de graute diminuiria, tornando esse concreto ainda mais vantajoso economicamente.

1.4.3 Justificativa técnica

Do ponto de vista técnico, uma das principais características do TSC é a baixa retração por secagem. Como esse fenômeno de variação volumétrica ocorre na pasta, pode-se inferir que, quanto maior a proporção de agregados no concreto, menor será a sua retração.

Aïtcin (2000) e Powers (1961) *apud* Mehta e Monteiro (2008) expõem que um aumento na fração de agregados diminui a retração no concreto. Porém destaca-se o fato de que poderá haver maior microfissuração na pasta, pois a retração ocorrerá nesta parcela do concreto, cujos movimentos estarão mais restritos devido ao maior volume de agregado.

O grande volume de agregados graúdos presentes no TSC faz com que esse concreto apresente valores de retração 50% menores que os encontrados em concretos convencionais. Esse é um dos motivos que fazem do TSC uma solução interessante para reparos estruturais: a baixa retração por secagem apresentada por esse concreto faz com que haja menos stress nas interfaces do reparo (ACI, 1997).

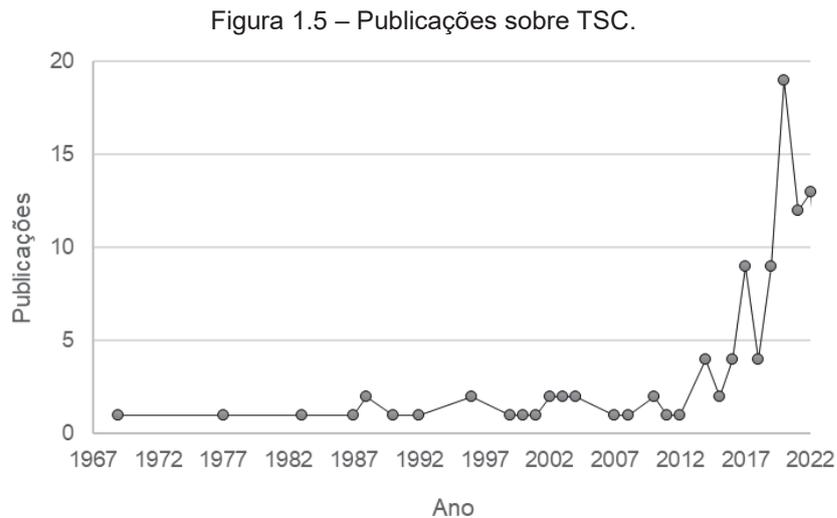
Outra característica importante do TSC é a menor liberação de calor de hidratação. Assim como no concreto convencional, o calor de hidratação do TSC está relacionado ao tipo e quantidade de aglomerantes na mistura. Devido à alta proporção de agregados graúdos no TSC o calor de hidratação deste tipo de concreto tende a ser menor e, por esse motivo, seu uso é recomendado para concreto massa (DAS; LAM; TANG, 2020; NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2014). Isso porque, em estruturas massivas, com emprego de grandes volumes de concreto, o aumento da temperatura devido às reações de hidratação e subsequente resfriamento à temperatura ambiente pode causar fissuração (BAYER; TURANLI; MEHTA, 2019).

Além do calor liberado pelas reações de hidratação, o pico de temperatura atingido durante a pega do cimento depende da temperatura inicial dos componentes do concreto. Nesse ponto o TSC também apresenta vantagens, pois os agregados graúdos não são misturados com os outros materiais, evitando que sua temperatura aumente devido à fricção dos componentes (BAYER; TURANLI; MEHTA, 2019). Além disso, há a possibilidade de pré-resfriar os agregados antes do grauteamento, com uso de água gelada, gelo ou nitrogênio líquido (ACI, 1997).

Outra forma de controlar o aumento da temperatura é diminuir a proporção de cimento na mistura, substituindo-o por aglomerantes com menor calor de hidratação. O emprego de volumes altos de pozolanas é uma forma efetiva de prevenir fissuras de origem térmica (BAYER; TURANLI; MEHTA, 2019). Assim, o emprego de adições minerais ativas, além de contribuir para o caráter ecoeficiente do concreto, como previamente mencionado, também tem como objetivo reforçar o desempenho técnico deste material.

Finalmente, o uso de técnicas de empacotamento de partículas tanto para a produção do graute quanto para a definição do esqueleto granular podem colaborar para melhorar os aspectos técnicos, econômicos e socioambientais advindos da redução do consumo de cimento nas misturas. Ressalta-se que foi realizada uma revisão sistemática da literatura, com foco no TSC, cujo detalhamento é apresentado nos Apêndices A e B. Com a aplicação do método de revisão sistemática, pode-se comprovar a lacuna de conhecimento envolvendo o

TSC e as teorias de empacotamento de partículas, uma vez que não foi possível localizar, em nenhuma das bases pesquisadas, artigos que tratem concomitantemente sobre os dois temas. Na Figura 1.5 é apresentado o número de publicações no tema de estudo ao longo dos anos, que totaliza 104 publicações entre 1967 e fevereiro de 2023, com destaque para 76% dos estudos publicados nos últimos 10 anos.



FONTE: A autora (2023).

É possível observar a atualidade e relevância do tema, uma vez que as publicações vêm aumentando nos últimos 5 anos. Vale destacar, contudo, que o aumento das publicações acadêmicas é uma tendência em diferentes áreas e pode ser atribuído a vários fatores interligados (BORNMANN; HAUNSCHILD; MUTZ, 2021; BORNMANN; MUTZ, 2015; LARSEN; VON INS, 2010). Primeiramente, a crescente globalização e acesso à internet têm facilitado a disseminação do conhecimento, incentivando pesquisadores a compartilhar suas descobertas de forma mais ampla. Além disso, a pressão por produtividade acadêmica e a competição por financiamento de pesquisa têm levado os pesquisadores a publicarem mais para garantir visibilidade e reconhecimento em suas áreas. As políticas de avaliação de instituições de ensino e agências de financiamento, que valorizam a quantidade de publicações, também desempenham um papel importante nesse aumento.

Pretende-se, portanto, colaborar com o desenvolvimento do conhecimento acerca do TSC, destacando seu potencial ecológico. O presente estudo inicia uma nova linha de pesquisa em TSC no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, porém destaca-se que a aplicação de técnicas empacotamento de partículas voltadas ao desenvolvimento de

concretos ecoeficientes já foi tema de trabalhos desenvolvidos e publicados no PPGEC. Dentre as publicações mais recentes e relevantes, destaca-se as realizadas por Campos et al. (2019), Campos, Klein e Marques Filho (2020a), Campos, Klein e Marques Filho (2020b), Campos et al. (2020), Klein, Lenz; Mazer (2020), Londero, Klein e Mazer (2021) e Campos et al. (2022).

1.5 ESTRUTURA DA TESE

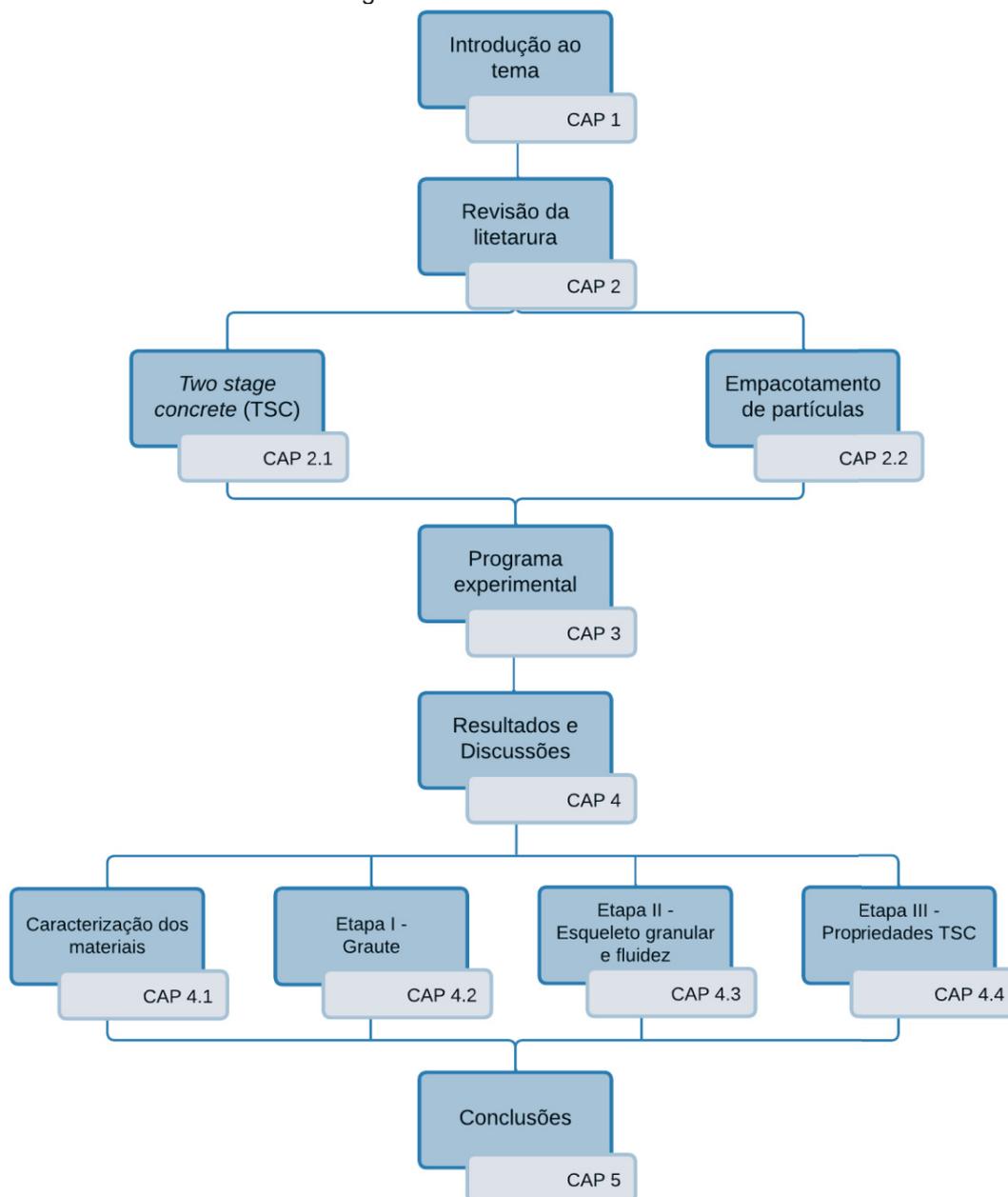
A tese foi estruturada em cinco capítulos de forma a apresentar, inicialmente, a introdução, revisão da literatura e programa experimental, seguido pela apresentação de três capítulos experimentais e um capítulo de conclusão (Figura 1.6).

No Capítulo 1 é feita a contextualização do tema, e são apresentados os problemas da pesquisa, os objetivos do trabalho, as justificativas e a estrutura da tese.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura. Primeiramente, no Capítulo 2.1, é apresentada a revisão bibliográfica acerca do TSC. Neste capítulo são tratados aspectos históricos, especificação dos materiais, métodos de proporcionamento e procedimentos de execução, assim como avaliação e caracterização do concreto. Para redação deste capítulo, e a fim de verificar as publicações acerca do TSC, foi realizada uma revisão sistemática da literatura com a aplicação do *Methodi Ordinatio*. Este método, por meio da equação *InOrdinatio*, seleciona e classifica os trabalhos de acordo com sua relevância científica. Para isso, considera-se os três parâmetros de maior importância para as publicações: fator de impacto da revista, número de citações e ano de publicação (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2018). O *Methodi Ordinatio* diferencia-se dos demais métodos de revisão sistemática pois classifica os artigos de acordo com sua relevância, sem a necessidade de leitura integral prévia dos mesmos (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015, 2018). O método é composto por 9 etapas, que vão do estabelecimento da intenção da pesquisa à análise dos artigos selecionados. A descrição de cada uma das etapas aplicadas pode ser consultada no Apêndice A, e a lista dos periódicos utilizados pode ser encontrada no Apêndice B.

No Capítulo 2.2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre os modelos de empacotamento de partículas e métodos experimentais para a determinação da densidade de empacotamento, necessários porque consistem em uma etapa importante do proporcionamento tanto do graute quanto do esqueleto granular para os TSCs estudados.

Figura 1.6 – Estrutura da tese.



FONTE: A autora (2023).

O programa experimental da tese é detalhado no Capítulo 3, no qual são descritos os métodos de caracterização dos materiais utilizados, bem como as metodologias para o planejamento, produção e avaliação das propriedades dos grautes, dos esqueletos granulares e concretos produzidos ao longo da tese.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados discussões do trabalho. No item 4.1 serão apresentados os resultados referentes à caracterização do cimento, adições minerais e

agregados, bem como da determinação da densidade de empacotamento experimental dos materiais finos.

No item 4.2 são apresentados os resultados da Etapa I do trabalho, sendo apresentados os resultados da definição dos teores de substituição do cimento pelas adições minerais ativas, seguido da elaboração de misturas para grautes baseados em modelos de empacotamento de partículas e na reatividade química das adições minerais. Nesse tópico são apresentados também os resultados da caracterização dos grautes produzidos nesta etapa, e seleção do graute de melhor desempenho mecânico e em termos de ecoeficiência, que será utilizado para a produção dos TSCs da próxima etapa.

A definição dos esqueletos granulares é tratada no item 4.3 (Etapa II), onde também são discutidos resultados do ajuste da fluidez do graute e da penetração do graute no esqueleto granular, considerando a influência do diâmetro e do índice de vazios dos agregados graúdos na capacidade de penetração do graute nos interstícios do esqueleto granular.

No item 4.4 – Etapa III - é realizada a análise das propriedades dos TSCs produzidos em termos de propriedades mecânicas e de ecoeficiência. Serão discutidas ainda as vantagens e desvantagens do uso desta tecnologia de produção e lançamento.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CONCRETO EM DUAS ETAPAS – *TWO STAGE CONCRETE (TSC)*

2.1.1 CARACTERÍSTICAS DO TSC

As ações de concretagem são consideradas etapas críticas na construção civil, devido ao seu impacto na qualidade do concreto (NEVILLE, 1995). A complexidade da concretagem varia de acordo com o formato e posicionamento das formas durante a construção (ALFAYEZ, 2018). Nesse contexto o concreto em duas etapas, TSC (do inglês *two stage concrete*) foi desenvolvido nos EUA, no ano de 1937, por Lee Turzillo e Louis S. Werts. Durante a reabilitação do túnel da Ferrovia Santa Fé, na Califórnia, a equipe utilizou agregados graúdos para preencher espaços que normalmente seriam preenchidos apenas por graute, diminuindo assim seu consumo. Os resultados foram promissores e estudos foram conduzidos para explorar a técnica (ACI, 1997).

O TSC é um concreto produzido com os mesmos materiais que um concreto convencional, porém em um processo que contempla duas etapas: primeiramente os agregados graúdos lavados são colocados na forma, com posterior preenchimento dos vazios deixados por estes com graute (ACI, 2000). Neste processo, o ar presente entre os agregados graúdos é expulso, resultando em um material que atinge altas densidades sem necessidade de compactação (O'MALLEY; ABDELGADER, 2010).

As características de produção do TSC permitem seu uso em aplicações desafiadoras para o concreto convencional: no caso de concretos com agregados pesados ou leves a pré-colocação dos agregados graúdos elimina os problemas de segregação e bombeamento, útil também nas construções submersas; no concreto massa a alta porcentagem de agregados graúdos resulta em maior estabilidade volumétrica e menores calor de hidratação e retração por secagem. Essa menor retração também é benéfica na execução de reparos estruturais, minimizando a tensão na interface dos materiais (ACI, 1997; NAJJAR et al., 2017; NEVILLE; BROOKS, 2010; NOWEK et al., 2007).

O TSC também se apresenta como alternativa promissora para o uso de agregados graúdos reciclados, uma vez que se elimina a perda de trabalhabilidade devido à alta absorção da água de amassamento pelos agregados durante o processo de mistura do concreto (ALFAYEZ; ALI; NEHDI, 2019; MOROHASHI; MEYER; ABDELGADER, 2013), podendo-se

realizar a umidificação prévia destes agregados antes do seu lançamento nas formas. Também é uma alternativa promissora para concretos reforçados com fibras, uma vez que a pré-colocação das fibras na forma juntamente com o agregado graúdo permite tanto a construção de *layers* com diferentes porcentagens de fibras, quanto uso de maior quantidade de fibras, normalmente limitada de 1,5 à 2,0% em volume, devido principalmente a dificuldades no bombeamento e trabalhabilidade do concreto (NEHDI et al., 2017b). Na Tabela 2.1 pode-se observar diversas aplicações sugeridas por autores para o TSC.

Tabela 2.1 – Aplicações sugeridas para o *two-stage concrete*.

Tipo de obra	Aplicação	Referências
Pavimentação	Pavimentos	Nehdi et al. (2017b); Alfayez, Omar e Nehdi (2019); Nehdi et al. (2017a); Murali et al. (2019b); Alfayez, Ali e Nehdi (2019).
	Calçadas	Nehdi et al. (2017b); Alfayez, Omar e Nehdi (2019); Nehdi et al. (2017a).
	Placas pré-moldadas	Murali et al. (2019b); Nehdi et al. (2017b).
	Muretas (<i>Guardrail</i>)	Alfayez, Omar e Nehdi (2019); Murali et al. (2019b).
Pontes e estruturas marítimas	Lajes	Nehdi et al. (2017b).
	Blocos de coroamento	Manohar et al. (2020).
	Reabilitação e reforço	Murali et al. (2019b); Li et al. (2011); Li et al. (2012), Sgouros, Webster; Hennegan (1996); Paul (1987).
Edifícios	Lajes entre apartamentos	Lee et al. (2018a)
	Paredes internas e externas	Alfayez, Omar e Nehdi (2019).
	Elementos pré-moldados	Nehdi et al. (2017b); Coe e Pheeraphan (2016); Lv, Zhou e Li (2020b).
	Elementos pré-tensionados	Coe e Pheeraphan (2016).
Edifícios e Estruturas militares	Plataforma de lançamento	Murali et al. (2019b).
	Absorção de impactos	Murali et al. (2019b).
	Estruturas de proteção	Murali et al. (2019b).
Outras obras especiais	Tubos metálicos preenchidos com concreto	Lv et al. (2020); Lv, Zhou e Li (2020b).
	Fundações de equipamentos	Murali et al. (2019b).
	Barreiras acústicas	Murali et al. (2019b).
	Absorção de sismos	Murali et al. (2019b).
	Depósitos nucleares	Wakeley e Roy (1983).

FONTE: A autora (2023).

Segundo Ichino, Beppu e Williamson (2020), o TSC também apresenta vantagens em construções com funções militares e de proteção, por exemplo. Isso se deve ao fato de essas construções muitas vezes ocorrerem em locais isolados. Com o uso do TSC não há necessidade de transporte de grandes volumes de concreto, e há possibilidade de usar agregados graúdos encontrados no próprio local. O'Malley e Abdelgader (2010) e Wakeley e

Roy (1983) publicaram estudos em que avaliam a possibilidade de agregados graúdos locais para produção de TSC.

O processo de preenchimento dos vazios com graute pode ser feito tanto por gravidade quanto por injeção. No método por gravidade, também conhecido como método de penetração, o graute é despejado e penetra entre os agregados sob ação de seu próprio peso. Já no método por injeção, o graute é bombeado através de tubos até o fundo da forma (ABIRAMI et al., 2020). O tamanho dos agregados graúdos e a dimensão da peça a ser concretada tem grande influência na escolha do método de grauteamento (NAJJAR, 2016). Uma ilustração com diferentes configurações dos métodos de preenchimento de vazios pode ser vista na Figura 2.1.

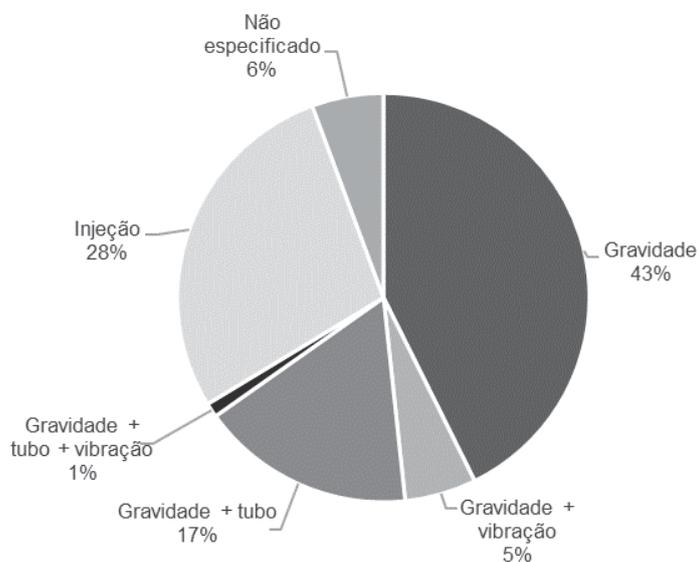
Figura 2.1 – Diferentes formas de preenchimento dos vazios entre os agregados graúdos com graute.



FONTE: A autora (2023).

O método de preenchimento com graute por gravidade é utilizado na maior parte dos estudos analisados na revisão sistemática (Apêndice B), correspondendo a 43% do total de trabalhos experimentais. Esse fato pode estar atrelado à maior simplicidade de execução do TSC pelo método da gravidade, tanto *in loco* quando no laboratório, uma vez que o método por injeção necessita de equipamentos e mão de obra especializada. Os métodos utilizados pelos autores analisados podem ser observados na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Formas utilizadas de preenchimento dos vazios no TSC (90 trabalhos considerados na análise).



FONTE: A autora (2023).

Como pode ser observado na Figura 2.2, dentre todos os trabalhos que descreveram o método de preenchimento de vazios utilizado, 43% utilizaram o método mais simples, da gravidade, onde se despeja o graute por cima dos agregados sem nenhuma outra ação, e 5% trabalhos utilizaram o método da gravidade em conjunto com vibração, moldando os corpos de prova em cima de uma mesa vibratória; Para evitar que o ar fique preso entre os agregados, e para evitar que sujidades sejam carregadas para o fundo das formas, uma adaptação do método por gravidade com inserção de tubos de grauteamento é utilizada por 18% dos autores. Nesse método, tubos são inseridos entre os agregados graúdos até o fundo da forma. O graute é despejado pelo tubo com auxílio de um funil e flui sob seu próprio peso. Desta forma o preenchimento dos vazios se dá do fundo para o topo da forma, similarmente ao que ocorre no método por injeção. Em 1% dos trabalhos essa adaptação foi utilizada em conjunto com vibração. O método por injeção, onde o graute é injetado sob pressão com auxílio de bombas, foi utilizado em 28% dos trabalhos, e em 6% dos estudos analisados os autores não especificam qual o método utilizado para produção do TSC.

Artigos que comparam os resultados de ensaios realizados em TSC produzidos por diferentes formas de preenchimento de vazios correspondem a 9% do total de estudos analisados (90 trabalhos). A comparação mais usual nesses estudos é realizada entre o método por injeção com uma das variações apresentadas do método por gravidade.

Em comparação ao concreto convencional, o TSC diferencia-se ao utilizar uma maior proporção de agregados graúdos em sua composição. O volume desse agregado pode chegar

a 60% do volume total do TSC, enquanto em concretos convencionais este valor é da ordem de 40%. Esta diferença representa uma vantagem ambiental e economia ao material: apenas 40% do volume referente ao graute necessita das ações de mistura e lançamento, e a menor porcentagem de graute no concreto impacta, de forma geral, em menor consumo de aglomerantes (ALFAYEZ; OMAR; NEHDI, 2019; DAS; LAM, 2019; DAS; LAM; TANG, 2020; LI et al., 2019, 2020; LV et al., 2020; LV; ZHOU; LI, 2020a, 2020b; NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2014; RAMKUMAR et al., 2019). Em estudo conduzido por Abdelgader (1996), 61% do volume do TSC era constituído por agregados graúdos; Coe e Pheeraphan (2015) utilizaram 65% de agregados graúdos na composição do TSC e, mais recentemente, Li et al. (2020) produziram TSC que contava com até 82% de seu volume constituído por agregados graúdos.

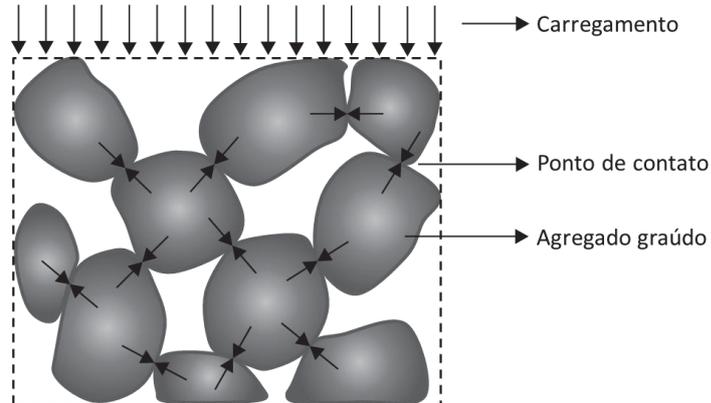
2.1.2 ESPECIFICAÇÕES DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO TSC

2.1.2.1 Agregado graúdo

As propriedades do TSC estão intimamente ligadas às propriedades dos agregados graúdos. O mecanismo de distribuição de tensões no TSC dá-se primeiramente no esqueleto granular para depois ser absorvido pela matriz cimentícia (NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2014; O'MALLEY; ABDELGADER, 2010), diferentemente do que ocorre no CC.

No CC, os agregados graúdos encontram-se dispersos na matriz e é ela que absorve, distribui e resiste às tensões de carregamento. Já no TSC, como os agregados são colocados previamente nas formas, eles formam um esqueleto de grãos que repousam uns sobre os outros, deixando apenas os vazios que serão preenchidos por graute, como pode ser visto na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Mecanismo de transmissão de tensões no TSC.



FONTE: Traduzido de O'malley e Abdelgader (2010).

Desta forma, como pode ser visto na Figura 2.3, no TSC o mecanismo de distribuição de tensão se dá no contato entre os agregados e no esqueleto formado por eles e somente após a sua deformação, as forças são transmitidas para o graute endurecido (ABDELGADER, 1996, 1999; MOHAMMADHOSSEINI et al., 2020a; O'MALLEY; ABDELGADER, 2010).

Os agregados graúdos para produção do TSC devem ser lavados, livres de partículas finas ou sujidades em sua superfície e quimicamente estável, de forma a garantir sua boa aderência com o graute (ABDUL AWAL, 1984; ACI, 1997; O'MALLEY; ABDELGADER, 2010).

Além dessas características, a forma, textura e características mineralógicas dos agregados também influenciam na aderência dos agregados graúdos com o graute. No tocante à forma, são preferíveis agregados arredondados ou angulares àqueles achatados e alongados, uma vez que estas últimas formas podem formar canais estreitos que impedem a passagem adequada do graute, levando a formação de defeitos de concretagem. Quanto à textura, os agregados mais rugosos promovem maior aderência entre eles e o graute, levando a resistências maiores do que as alcançadas com agregados de superfície lisa. Apesar da melhor aderência promovida pelos agregados mais rugosos, essa característica tende a diminuir a massa unitária do material, levando à um maior consumo de graute e, conseqüentemente, de cimento (ACI, 1997; NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2014; O'MALLEY; ABDELGADER, 2010). Ainda que o índice de forma não seja uma variável dos modelos de empacotamento de partículas, a densidade de empacotamento de cada classe é avaliada experimentalmente para que os efeitos de sua morfologia e dimensões sejam considerados.

Já a resistência mecânica dos agregados graúdos não aparenta ter relação direta com a resistência do TSC em si, porém há ainda poucos estudos sobre TSC de alta resistência e, com o avanço do conhecimento acerca desse material, novas relações podem ser descobertas

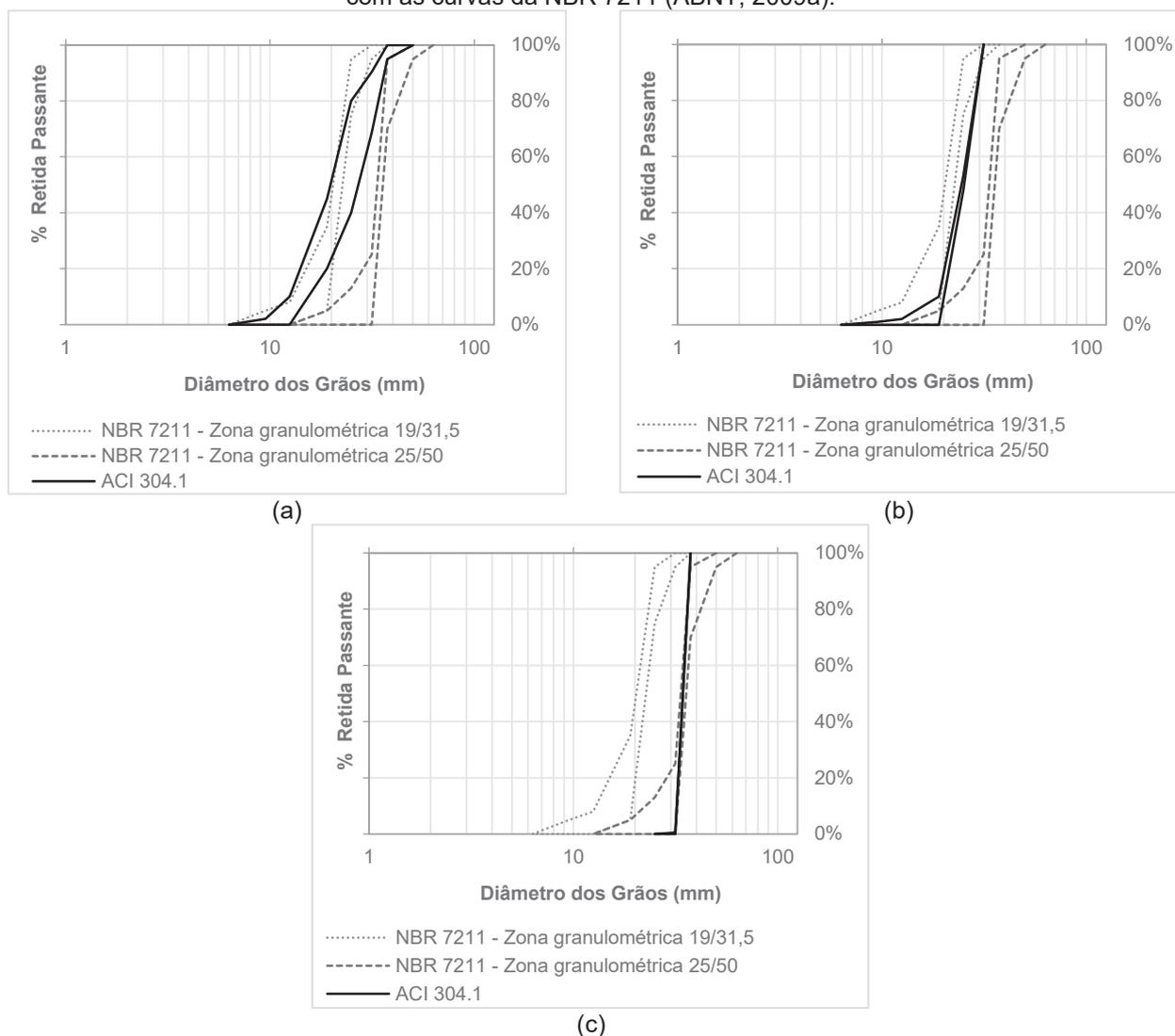
(NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2014). Acredita-se, porém, que agregados mais resistentes, que suportem as tensões transmitidas nos pontos de contato sem sofrerem fraturas, produzirão concretos com maiores resistências (O'MALLEY; ABDELGADER, 2010).

Não há limitação de ordem prática para o tamanho máximo do agregado graúdo – esse limite será definido por requisitos de projeto, como distanciamento entre as barras e dimensões das formas, de forma similar ao que ocorre no concreto convencional. Já o tamanho mínimo destes agregados é limitado de forma a garantir o fluxo de graute pelo esqueleto granular (ABDELGADER, 1999; ABDUL AWAL, 1984; NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2014).

O diâmetro mínimo do agregado graúdo relaciona-se com o diâmetro máximo do agregado miúdo, porém não há consenso sobre qual seria o menor diâmetro possível do agregado graúdo. Autores já propuseram que o diâmetro mínimo deveria ser ao menos 4 vezes maior que o diâmetro máximo do agregado miúdo, limitado a 10 mm (ORCHARD (1979) *apud* NAJJAR (2016)), ou maior que 20 mm (NAJJAR; ABDELGADER, 2009), ou ainda maior que 38 mm (CHAMPION; DAVIS, 1958).

Em relação à distribuição granulométrica, o agregado graúdo para TSC deve apresentar preferivelmente curva descontínua (ABDUL AWAL, 1984; LV; ZHOU; LI, 2020b; NEVILLE; BROOKS, 2010). Agregados graúdos com distribuição granulométrica contínua podem apresentar volume muito pequeno de vazios que dificultem o processo de grauteamento do TSC (ACI, 1997; NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2014; O'MALLEY; ABDELGADER, 2010). Algumas publicações sugerem distribuições granulométricas específicas para os agregados graúdos. Por este motivo se faz necessário um estudo que possibilite a aplicação de técnicas de empacotamento e que verifique o efeito das descontinuidades das distribuições granulométricas dos agregados graúdos na capacidade de penetração do graute e propriedades dos concretos produzidos. A ACI 304 (ACI, 1997) propõe três zonas granulométricas, considerando três diferentes diâmetros mínimos de agregado graúdo, conforme apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos para TSC segundo ACI 304 para (a) diâmetro mínimo do agregado de 12.5mm, (b) diâmetro mínimo de 19mm e (c) diâmetro mínimo de 38mm, comparados com as curvas da NBR 7211 (ABNT, 2009a).

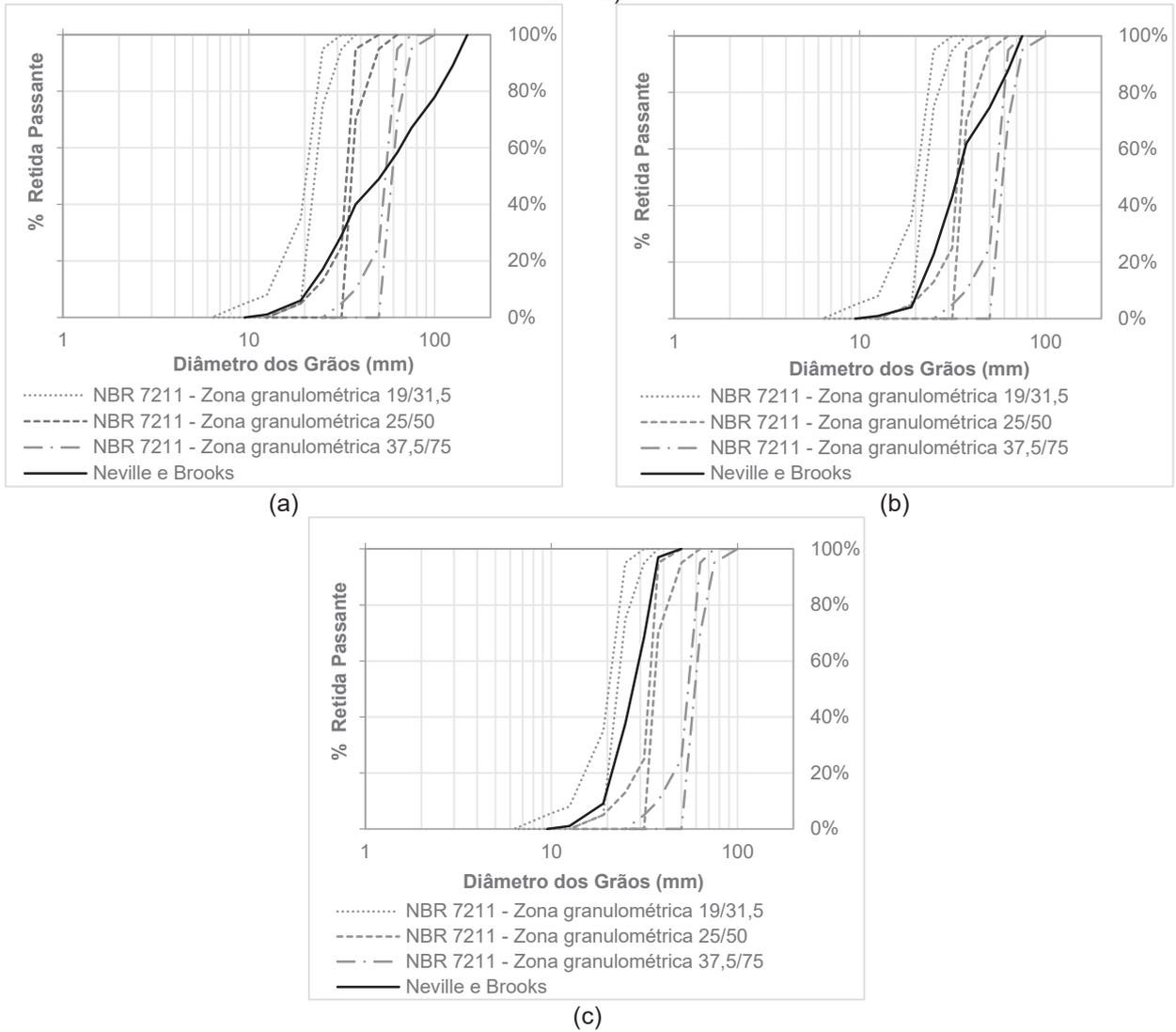


FONTE: A autora (2023).

Da análise dos gráficos da Figura 2.4, pode-se perceber que as curvas propostas pela ACI 304 (ACI, 1997) aproximam-se mais das curvas referentes às zonas granulométricas 19/31,5 e 25/50, não sendo apresentadas curvas com graduações menores de grãos. Isto se deve à preocupação do correto fluxo do graute e preenchimento dos vazios e, segundo a norma, diâmetros menores que 12.5 mm não seriam adequados à produção do TSC. Há ainda recomendação nesta mesma norma que, acima dos diâmetros especificados, deve-se buscar a distribuição com menor volume de vazios que costuma ser obtida com uma distribuição granulométrica contínua. Assim, apesar da recomendação de curva descontínua, as distribuições propostas na norma em questão apresentam curvas contínuas ou uniformes.

Neville e Brooks (2010) também apresentam distribuições típicas para a produção do TSC, apresentadas no Figura 2.5.

Figura 2.5 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos para TSC segundo Neville e Brooks para (a) diâmetro mínimo do agregado de 19mm e máximo de 125mm, (b) diâmetro mínimo de 25mm máximo de 75mm e (c) diâmetro mínimo de 19mm e máximo de 37.5mm, comparados com as curvas da NBR 7211 (ABNT, 2009a).



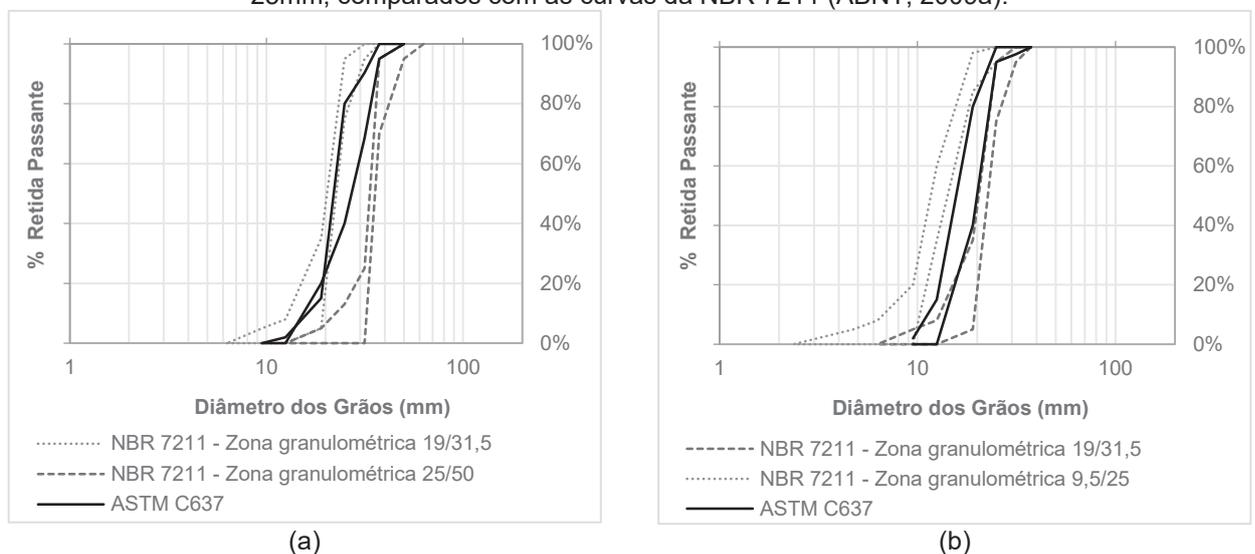
FONTE: A autora (2023).

Os autores apresentam curvas para 2 diâmetros mínimos de agregado, de 19 e 25 mm – não há recomendações para diâmetros menores. Novamente, apesar de os autores indicarem uma distribuição descontínua para o agregado graúdo, as curvas propostas aproximam-se mais de distribuições contínuas e uniformes. É possível notar também, da análise dos gráficos, que nenhuma das distribuições propostas se enquadra no recomendado

pelas normas brasileiras, estendendo-se entre as curvas de britas das zonas granulométricas 19/31,5, 25/50 e 37,5/75. Por este motivo, no Brasil, isso implica na necessidade de mistura de agregados, antes do lançamento nas fôrmas. Contudo, este estudo irá verificar a possibilidade de uso de faixas granulométricas de agregados previstas pelas normativas brasileiras de forma a viabilizar a execução do TSC com agregados nacionais.

Uma terceira recomendação de zonas granulométricas para produção de TSC é dada pela ASTM C637-20 (ASTM, 2020), que trata sobre agregados para serem utilizados em concretos para proteção radiológica. A presença do TSC nesta norma se dá pelo fato de este material, conforme exposto anteriormente, ser adequado e recomendado para construção de barreiras radiológicas devido ao fato de não apresentar segregação de agregados pesados, que podem ser recomendados para esse uso. A norma apresenta zonas granulométricas para agregados de diâmetro mínimo de 12.5 mm, podendo atingir no máximo 25 ou 37.5 mm, conforme apresentado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos para TSC segundo ASTM C637-20 para (a) diâmetro mínimo do agregado de 12.5mm e máximo de 37.5mm (b) diâmetro mínimo de 12.5mm máximo de 25mm, comparados com as curvas da NBR 7211 (ABNT, 2009a).

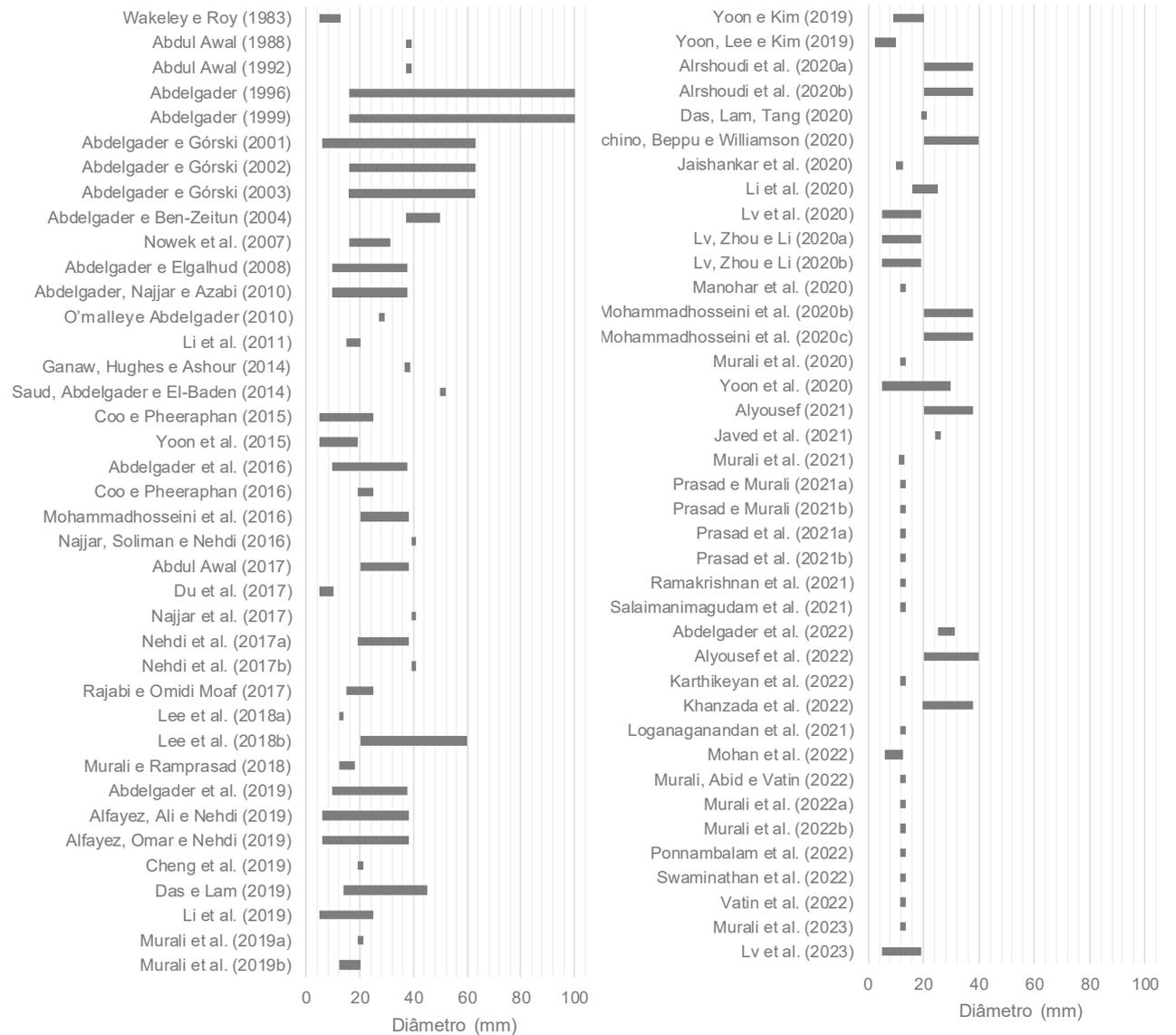


Mais uma vez, pode-se observar que as curvas propostas não se adequam aos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009a), tampouco apresentam distribuição descontínua, como o recomendado para a produção deste concreto. Não há proposição de distribuições para diâmetros menores de agregado graúdo.

Apesar de haver variação nas recomendações apresentadas por diversos autores e normas, o consenso é de que o tamanho mínimo do agregado vai depender das características do graute e da forma de lançamento (por gravidade ou injeção) (ABDUL AWAL, 1984; DAS; LAM, 2019; MOHAMMADHOSSEINI et al., 2020a; NAJJAR; ABDELGADER, 2009). De maneira geral, o método por gravidade é mais adequado à tamanhos maiores de agregados graúdos, enquanto o método de injeção é mais eficaz para aqueles concretos com agregados de tamanhos menores (ABIRAMI et al., 2020).

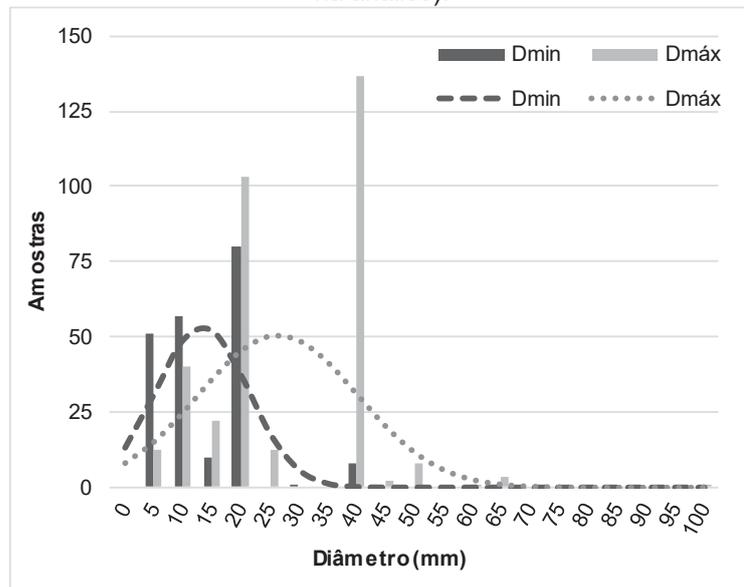
Pesquisas mais recentes envolvendo este concreto já vêm abordando o uso de agregados graúdos de diâmetros menores do que os estabelecidos por norma. A Figura 2.7 e Figura 2.8 apresentam a faixa e histograma dos diâmetros de agregado graúdo utilizados para produção de TSC em diversos estudos.

Figura 2.7 – Diâmetros de agregados graúdos utilizados para produção de TSC (78 trabalhos considerados na análise).



FONTE: A autora (2023).

Figura 2.8 – Histograma dos agregados graúdos utilizados para produção de TSC (78 trabalhos considerados na análise).



FONTE: A autora (2023).

Da análise da Figura 2.7 pode-se inferir que os estudos mais antigos utilizavam diâmetros de agregado graúdo maiores. Uma possível explicação para esse fato é o desenvolvimento da tecnologia dos aditivos. Antes das novas gerações de aditivos superplastificantes, era difícil produzir grautes estáveis o suficiente para produzir TSC. No entanto, o avanço da tecnologia permitiu a produção de grautes mais fluidos e sem segregação, permitindo que o diâmetro mínimo dos agregados graúdos fosse reduzido e, mesmo assim, o graute será capaz de preencher os vazios da estrutura granular. Estudos recentes, como o de Li et al. (2019) utilizam agregados graúdos com diâmetros a partir de 5mm, atingindo resistência de aproximadamente 140 MPa aos 28 dias, sem apresentar defeitos de concretagem.

Em seu estudo Das e Lam (2019) produziram TSC variando o diâmetro do agregado graúdo (14, 20, 37 e 45 mm), e procederam a concretagem dos corpos de prova pelos processos de gravidade e injeção. Os valores de resistência à compressão aumentaram com a diminuição da dimensão dos agregados, atingindo valor máximo de resistência com o diâmetro de 20mm, sem diferença significativa entre os processos de grauteamento. Ao reduzir o diâmetro para 14mm a resistência à compressão teve valores menores, e os autores atribuem esse fato a dificuldade de fluxo do graute imposta pelo menor diâmetro.

Foi possível observar também que o TSC produzido através de injeção apresentou volume de vazios de concretagem levemente menor (0,5%) que o encontrado para o processo

por gravidade, de 1,5%, para os três maiores diâmetros. Isso se deve ao fato de as bolsas de ar presas entre os agregados graúdos serem mais facilmente expelidas sob a pressão do processo de injeção. Já para os concretos produzidos com o agregado de 14 mm, o volume de vazios encontrado foi de 3,0%, o que corrobora a hipótese de dificuldade do fluxo durante o grauteamento.

Abdelgader (1999) investigou a influência do uso de diferentes tipos de agregados para produção de TSC: arredondados, britados e uma combinação igualitária dos dois. Em seu estudo o autor concluiu que os agregados arredondados apresentaram a menor resistência à compressão, seguido dos britados e, por fim, da combinação, que apresentou a maior resistência dentre as três variações. Esses resultados se devem à maior aderência promovida pelos agregados britados, e uma diminuição dos vazios pela combinação entre eles. O'Malley e Abdelgader (2010) chegaram à conclusão similar em seu estudo, onde o TSC produzido com agregados britados apresentou maior resistência à compressão do que aqueles produzidos com agregados arredondados. Os autores destacam ainda um maior consumo de graute nos concretos produzidos com agregados britados, o que também destaca seu maior volume de vazios.

Estudos como os citados acima, que variam o diâmetro ou características do agregado graúdo ainda são escassos, mesmo com os resultados apontando a influência que essas características têm no comportamento mecânico final do concreto.

Já em relação ao estudo de empacotamento dos agregados graúdos, não foi possível encontrar na literatura trabalhos que abordem o tema. Esse estudo é fundamental quando levada em consideração a ecoeficiência do uso do cimento, uma vez que um melhor empacotamento dos agregados graúdos diminui o consumo de graute e, conseqüentemente, de cimento.

2.1.2.2 Graute

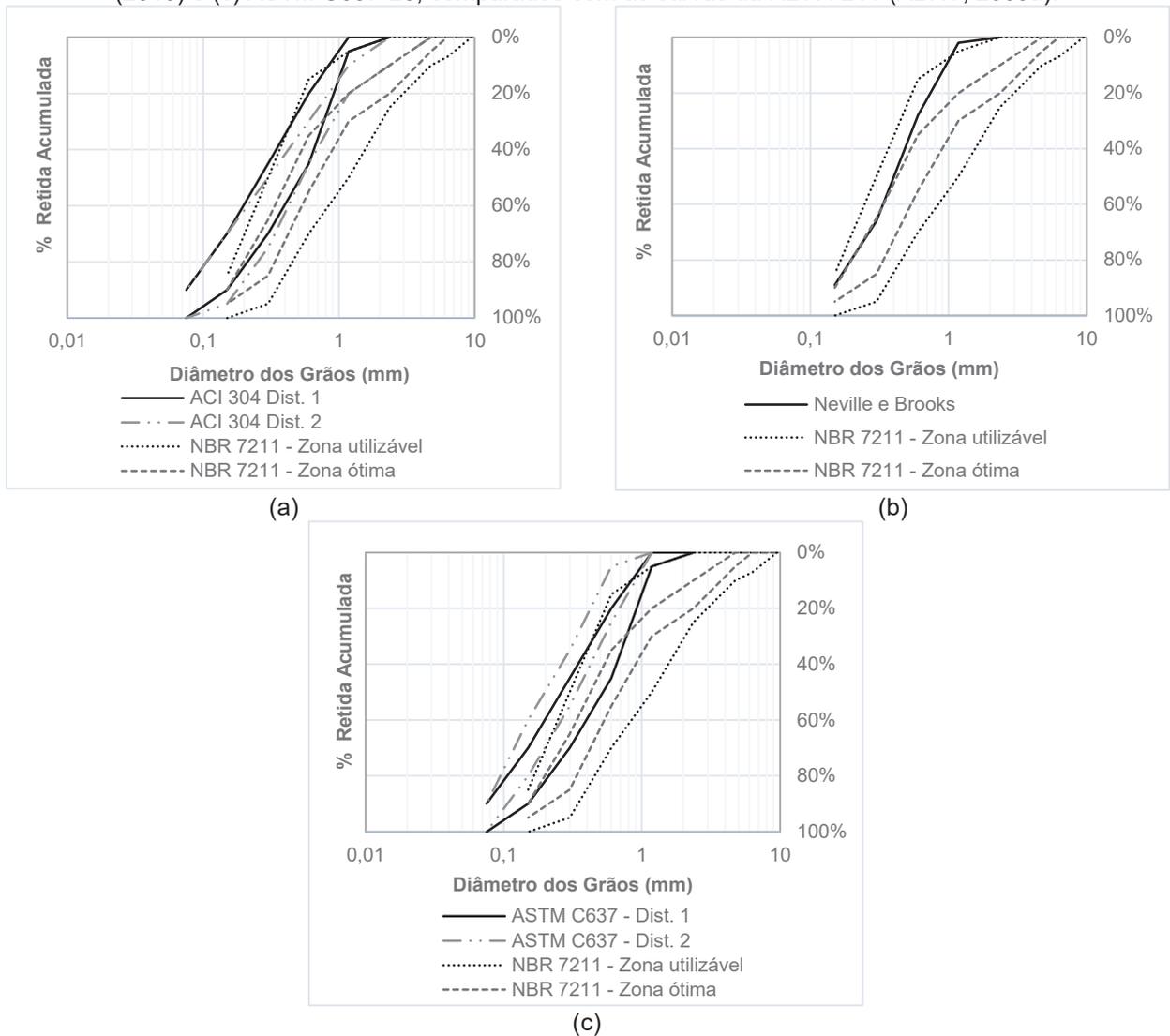
Segundo a norma ASTM C939-19 - *Standard Practice for Proportioning Grout Mixtures for Preplaced-Aggregate Concrete* (ASTM, 2019), o graute para TSC deve ter consistência fluida e ser composto por agregados miúdos, aglomerantes, aditivos químicos e água. Detalhes sobre os componentes do graute serão discutidos a seguir.

2.1.2.2.1 Agregado miúdo

A areia componente do graute deverá ser resistente, estável e livre de impurezas. A forma e distribuição granulométrica do agregado miúdo tem papel importante nas propriedades do graute no estado fresco, como sua habilidade de fluir entre os agregados graúdos. Um agregado miúdo fino e bem graduado promove maior estabilidade ao graute, reduzindo o risco de segregação (ACI, 1997; O'MALLEY; ABDELGADER, 2010). Porém um agregado miúdo muito fino pode contribuir com o aumento da demanda de água devido à maior área superficial, o que pode levar a uma redução da resistência e aumento da fissuração por retração. Pelo mesmo motivo é preferível o uso de areias naturais, com os grãos arredondados, àquelas provenientes de processos de britagem. Diversos estudos analisados na revisão sistemática utilizam areia natural para produção do graute utilizado no TSC (ABDELGADER, 1999; ABDELGADER et al., 2019; ABDELGADER; GÓRSKI, 2001; ABDUL AWAL, 1988, 1992; ALRSHOUDI et al., 2020a, 2020b; ALYOUSEF, 2021; CHENG et al., 2019; COO; PHEERAPHAN, 2015, 2016; DAS; LAM, 2019; DAS; LAM; TANG, 2020; DU et al., 2017; LV et al., 2023; LV; ZHOU; LI, 2020b; MANOHAR et al., 2020; MOHAMMADHOSSEINI et al., 2020a, 2020b; MURALI et al., 2019a, 2019b; MURALI; RAMPRASAD, 2018; PONNAMBALAM et al., 2022; RAM PRASAD et al., 2018). Também há estudos que utilizam areia proveniente de britagem (ABDUL AWAL, 2017; MOHAMMADHOSSEINI; ABDUL AWAL; SAM, 2016). A origem da areia não é especificada em outros estudos, que definem o agregado miúdo utilizado apenas como areia silicosa (ABDELGADER, 1996; ESMAEILI; AMIRI, 2022; LI et al., 2019; NAJJAR et al., 2017; NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2016, 2017; NEHDI et al., 2017a, 2017b; SAUD; ABDELGADER; EL-BADEN, 2014), areia quartzosa (ABDELGADER; GÓRSKI, 2003) e areia fina (NOWEK et al., 2007).

Na Figura 2.9 podem ser vistas distribuições granulométricas sugeridas para produção de graute para TSC.

Figura 2.9 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos para TSC (a) ACI 304.1 (b) Neville e Brooks (2010) e (c) ASTM C637-20, comparados com as curvas da NBR 7211 (ABNT, 2009a).



FONTE: A autora (2023).

A Figura 2.9(a) mostra as duas distribuições para a areia sugeridas pela ACI 304: uma com diâmetros até 2.36 mm, e outra até 4.75 mm. Para elementos estruturais de pequenas seções, por exemplo, a norma indica a distribuição com areia de menor diâmetro. A norma traz ainda a possibilidade de uso de areia com distribuição granulométrica diferente das indicadas, desde que o grante produzido atenda aos requisitos de trabalhabilidade e exsudação. A primeira curva apresenta módulo de finura variando de 1,30 a 2,10, e a segunda curva apresenta valores de 1,60 a 2,45. Os valores tendem a ser menores quando comparados aos valores da NBR 7211 (ABNT, 2009a), que varia seus módulos entre 1,55 e 2,90 para a zona utilizável, e de 2,20 a 3,50 para a zona ótima. Isso indica que a areia para produção do TSC

deve ser fina, justamente para garantir a estabilidade do graute, conforme apontado anteriormente.

Já Neville e Brooks (2010), apesar de indicarem três diferentes distribuições para agregado graúdo, apresentam apenas uma distribuição indicada para areia, conforme Figura 2.9(b). O diâmetro máximo indicado pelos autores é de 2.36 mm, e a curva apresenta um módulo de finura de 1,85. A curva encontra-se quase completamente compreendida entre os limites superiores da zona utilizável e ótima dada pela NBR 7211 (ABNT, 2009a), e trata-se também de uma areia fina.

A ASTM C637 (ASTM, 2020) relaciona o uso das duas diferentes curvas, apresentadas no Figura 2.9(c), com a densidade específica da areia. Para areias com massa específica menor ou igual a $3,0 \text{ g/cm}^3$ a distribuição 1 é indicada; para aquelas com massa específica maior de $3,0 \text{ g/cm}^3$, a norma indica a distribuição 2. Os módulos de finura são os menores entre as três fontes citadas, variando de 1,30 a 2,10 para a distribuição 1, e de 1,00 a 1,60 para a distribuição 2. As distribuições propostas por esta norma não se enquadram totalmente nos limites estabelecidos pelas NBR 7211 (ABNT, 2009a). Na Tabela 2.2 pode-se observar o módulo de finura das areias utilizadas pelos autores analisados na revisão sistemática.

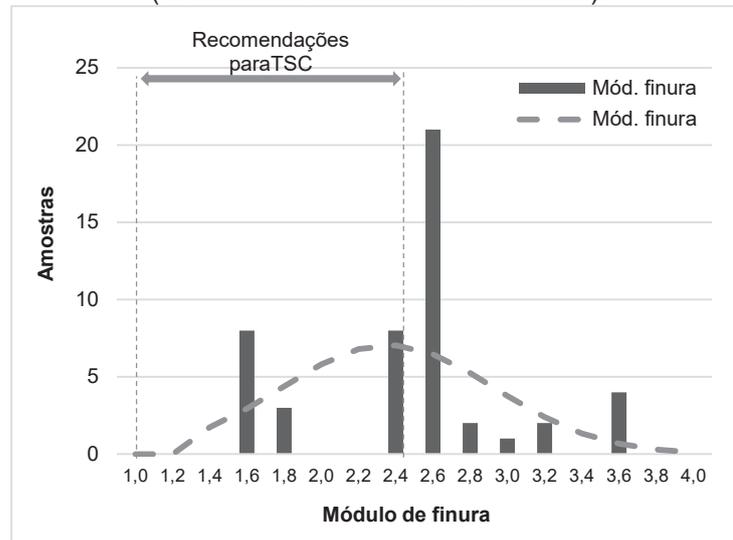
Tabela 2.2 – Módulo de finura dos agregados miúdos utilizados por diversos autores para produção de graute para TSC (49 trabalhos considerados na análise).

Autores	Módulo de finura
(ABDUL AWAL, 1988)	1,70
(ABDUL AWAL, 1992)	
(LI et al., 2011)	1,80
(COO; PHEERAPHAN, 2015)	2,41
(YOON et al., 2015)	2,58
(COO; PHEERAPHAN, 2016)	2,41
(MOHAMMADHOSSEINI; ABDUL AWAL; SAM, 2016)	2,30
(NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2016)	1,47
(ABDUL AWAL, 2017)	2,30
(DU et al., 2017)	2,70
(NAJJAR et al., 2017)	
(NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2017)	
(NEHDI et al., 2017b)	
(NEHDI et al., 2017a)	1,47
(RAM PRASAD et al., 2018)	
(ALFAYEZ; OMAR; NEHDI, 2019)	
(MURALI et al., 2019b)	
(ALRSHOUDI et al., 2020b)	
(ALRSHOUDI et al., 2020a)	2,30
(DAS; LAM; TANG, 2020)	2,41
(JAISHANKAR et al., 2020)	3,20
(LV et al., 2020)	
(LV; ZHOU; LI, 2020a)	3,58
(LV; ZHOU; LI, 2020b)	
(MANOHAR et al., 2020)	3,20
(MOHAMMADHOSSEINI et al., 2020c)	
(MOHAMMADHOSSEINI et al., 2020b)	2,30
(MURALI et al., 2020)	2,41
(RAJABI; OMIDI MOAF; ABDELGADER, 2020)	2,21
(JAVED et al., 2021)	
(LOGANAGANANDAN et al., 2021)	2,41
(MURALI et al., 2021)	
(PRASAD et al., 2021a)	2,62
(PRASAD et al., 2021b)	3,58
(PRASAD; MURALI, 2021)	2,39
(RAMAKRISHNAN et al., 2021)	
(SALAIMANIMAGUDAM et al., 2021)	2,41
(KARTHIKEYAN et al., 2022)	2,60
(KHANZADA et al., 2022)	
(MOHAN; DIVIYABHARRATHI; MURALI, 2022)	
(MURALI; ABID; VATIN, 2022)	
(MURALI et al., 2022a)	
(MURALI et al., 2022b)	2,41
(PONNAMBALAM et al., 2022)	
(SWAMINATHAN et al., 2022)	
(VATIN et al., 2022)	
(LV et al., 2023)	
(MURALI et al., 2023)	2,60

FONTE: A autora (2023).

A Figura 2.10 apresenta, com base nos dados da Tabela 2.2, o histograma dos módulos de finura utilizados nas diferentes publicações analisadas.

Figura 2.10 – Histograma do módulo de finura utilizado por diversos autores para produção de graute para TSC (49 trabalhos considerados na análise).



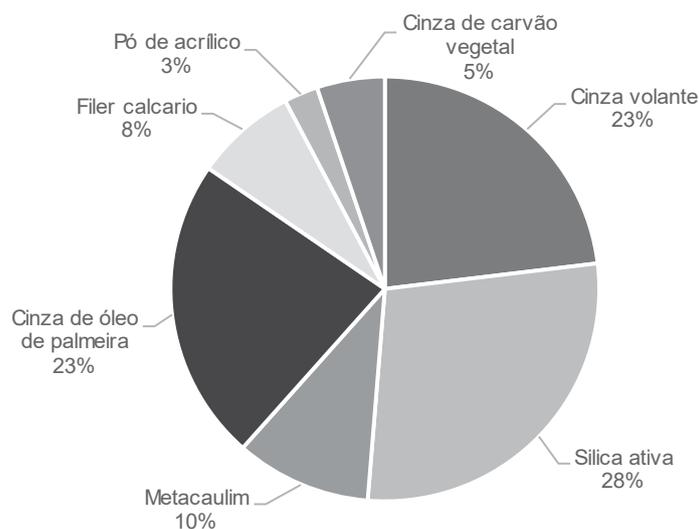
FONTE: A autora (2023).

Da análise dos dados apresentados na Tabela 2.2 e Figura 2.10, observa-se que, apesar de a literatura e normas internacionais indicarem módulos de finura variando de 1,00 a 2,45, os autores optam por valores distantes do limite inferior e, em trabalhos mais recentes valores acima do máximo. Isso pode ocorrer pois apesar de areias mais finas serem preferíveis por aumentarem a estabilidade do graute, o uso de areias com módulo de finura mais altos reduz o consumo de água, o que impacta positivamente na resistência mecânica dos grautes.

2.1.2.2.2 Aglomerantes

Além do cimento Portland, material mais usado na produção de graute para TSC, as adições minerais ativas também vêm sendo usadas para sua produção. Isto se deve ao fato destas adições contribuírem nas propriedades do concreto endurecido pelo aumento da densidade de empacotamento e do grau de hidratação, além do refinamento da microestrutura, reduzindo sua permeabilidade e melhorando a resistência mecânica e durabilidade (NAJJAR et al., 2017). Na Figura 2.11 pode-se observar as adições já utilizadas em estudos de TSC.

Figura 2.11 – Adições utilizadas para produção de grautes para TSC (27 trabalhos considerados na análise).



FONTE: A autora (2023).

Da análise da Figura 2.11, observa-se que as adições mais utilizadas foram a sílica ativa e a cinza volante, cada uma presente em 11 e 9 dos trabalhos analisados, respectivamente. Em seis trabalhos mais de uma adição foi utilizada em conjunto com o cimento, resultando em combinações ternárias de aglomerantes. Não foram localizados trabalhos que combinem 3 ou mais adições com cimento para produção de grautes para TSC.

Segundo Neville e Brooks (2010) o propósito do uso das pozolanas é diminuir a exsudação e a segregação. A estabilidade do graute, que pode ser definida como a coesão da mistura e a resistência à segregação, é uma condição de extrema importância para as propriedades do TSC. Isto porque quando há segregação não se pode garantir a homogeneidade do material concretado, e quando esta é combinada com a exsudação a ligação entre o graute e o agregado graúdo é comprometida (O'MALLEY; ABDELGADER, 2010).

Além dos benefícios nas propriedades do TSC, o uso de adições minerais em substituição parcial ao cimento Portland traz vantagens ambientais por contribuir para a diminuição de emissão de gases do efeito estufa.

2.1.2.2.3 Aditivos químicos

A norma ASTM C937-16 - *Standard Specification for Grout Fluidifier for Preplaced-Aggregate Concrete* (ASTM, 2016a) especifica um aditivo fluidificador para ser usado na produção de TSC. Segundo a norma, os efeitos do uso deste aditivo devem ser a redução da água de amassamento, permitindo manter ou aumentar a resistência mecânica, sem prejuízo à fluidez. Os requisitos deste aditivo podem ser vistos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Requisitos do aditivo fluidificador de graute, segundo requisitos da norma ASTM C937-16 (ASTM, 2016a).

Requisito físico		Limite
Redução da água de amassamento, em relação ao controle*		> 3%
Expansão 3h após mistura, relativo ao teor de álcalis do cimento	0,80 ou maior	7 a 14%
	0,40 a 0,79	5 a 12%
	0,39 ou menos	3 a 9%
Exsudação máxima 3h após a mistura		2%
Aumento mínimo na retenção de água		60%
Tempo mínimo para início de pega		4 horas
Tempo máximo para o final de pega		24 horas
Resistencia mínima à compressão aos 7 e 28 dias, em relação ao controle*		>90%

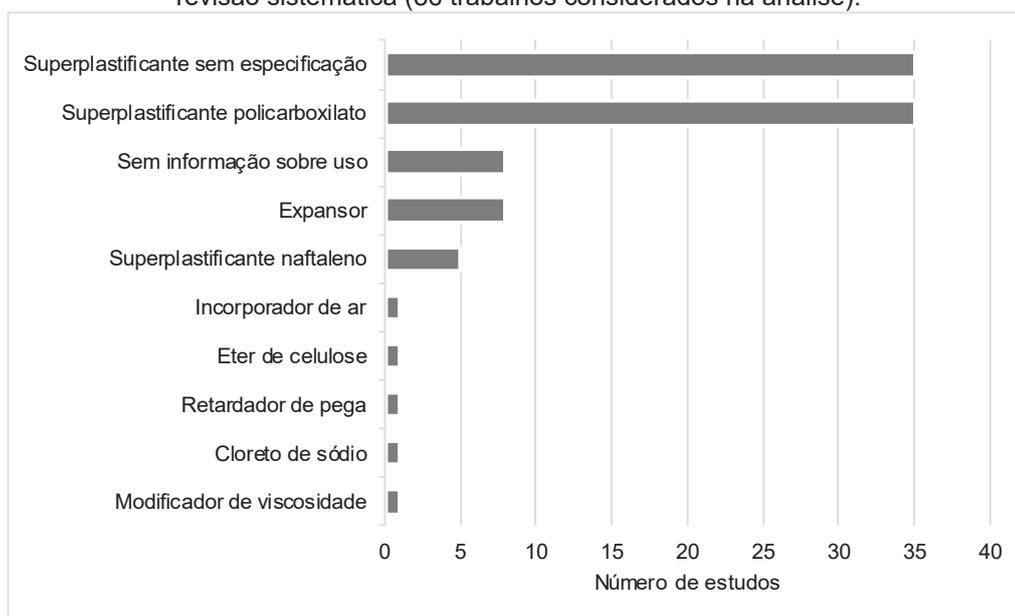
Controle refere-se ao graute produzido sem o aditivo fluidificador

FONTE: ASTM (2016a).

O fluidificador de graute normalmente consiste em redutor de água, agente expansivo e outros. A principal função do agente expansivo é a de preencher possíveis vazios deixados durante a etapa de preenchimento das formas com o graute (ABDUL AWAL, 1984; NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2014), porém, utilizando-se graute de propriedade reológicas adequadas, é possível garantir o efetivo preenchimento de vazios sem a necessidade de aditivo expansor. Agentes expansivos costumam apresentar mistura de sulfoaluminato de cálcio e óxido de cálcio. Quando utilizados, ocorre a formação etringita e portlandita nos minutos iniciais de cura, que geram uma expansão interna. Essa expansão reduz os efeitos da retração autógena e pode causar alteração na pressão de cristalização dos produtos hidratados (GAGNÉ, 2016). A dosagem recomendada é de 1% em massa dos aglomerantes, salvo recomendação diferente do fabricante (ACI, 1997; ASTM, 2019). Outros aditivos com usos propostos pela norma ACI 304 são: incorporador de ar, cloreto de cálcio, redutor de água, retardador de pega e superplastificantes.

Apesar das recomendações de diferentes tipos de aditivos presentes nas normas citadas acima, o avanço da tecnologia permitiu a produção de grautes estáveis e de trabalhabilidade adequada com uso apenas de aditivos superplastificantes. Os estudos acerca do TSC convergem para uso de superplastificante em sua produção, como pode ser visto na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Aditivos químicos utilizados para produção de grautes para TSC dentre os estudos lidos na revisão sistemática (86 trabalhos considerados na análise).



FONTE: A autora (2023).

Dos artigos experimentais analisados na revisão sistemática, cerca de 91% utilizaram ao menos um aditivo na formulação do graute para produção do TSC. Destes, como pode se observar no Figura 2.12, cerca de 87% dos trabalhos utilizaram superplastificantes, com destaque ao com base de policarboxilato, conhecido como superplastificante de terceira geração, utilizado em aproximadamente 41% dos trabalhos. O último trabalho que cita a utilização de superplastificantes com base naftaleno data de 2003 (ABDELGADER; GÓRSKI, 2003). Dos trabalhos publicados nos últimos 10 anos, apenas 3 não utilizaram superplastificantes: Rajabi e Omid Moaf (2017) e Rajabi, Omid Moaf e Abdelgader (2020) optaram por utilizar apenas aditivos expansores, enquanto Lee et al. (2018b) utilizaram apenas retardador de pega no graute.

O superplastificante é utilizado nos estudos em dosagens de até 2,0% em relação à massa de aglomerantes. O uso deste aditivo promove maior trabalhabilidade ao graute mesmo

com baixas relações água/aglomerante (a/agl), facilitando o preenchimento dos vazios entre os agregados graúdos. Acredita-se que as novas tecnologias presentes nos aditivos permitam a produção de grautes com trabalhabilidade adequada para a produção de TSC. Seu uso em dosagens adequadas pode eliminar a necessidade de equipamentos especiais para mistura, e permitir a produção de graute sem segregação após aplicação. Os requisitos reológicos do graute e as formas de dosagem do superplastificante serão detalhadamente discutidos no tópico 2.1.3 a seguir.

2.1.3 PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS DO GRAUTE

Para o proporcionamento do graute, diversas misturas são produzidas variando-se as relações agregado miúdo/aglomerante (a_m/agl) e água/aglomerante (a/agl) de forma a atingir 21 ± 2 segundos no teste *flow cone*, descrito na ASTM C939 (ASTM, 2010). Outro parâmetro que deve ser monitorado é a exsudação, com procedimentos descritos na ASTM C940 (ASTM, 2016b), que não deve ultrapassar 0,5% (ACI, 1997). Tem-se, então, que o controle dos parâmetros reológicos e de exsudação são essenciais no desenvolvimento do graute, e essas propriedades são em grande parte determinadas pelas relações a_m/agl e a/agl (NAJJAR; SOLIMAN; NEHDI, 2014).

A ASTM C938 (ASTM, 2019) indica que o início do desenvolvimento do graute deve ocorrer com relação a_m/agl de 1:1 e água suficiente para atingir a trabalhabilidade desejada. Já a ACI 304 (ACI, 1997) recomenda 3 diferentes relações a_m/agl , de 1:1 em aplicações usuais; 1,15:1 para aplicações de grandes volumes, com diâmetro mínimo do agregado graúdo de 19 mm e de 3:1 para casos em que os agregados graúdos têm tamanho mínimo de 37,5 mm e utilizada a técnica de injeção do graute.

No Figura 2.13 é possível observar as relações a_m/agl e a/agl utilizada por diversos autores nos trabalhos analisados na revisão sistemática, e na Figura 2.14 pode-se observar o histograma com dados de todos os traços produzidos pelos autores.

Figura 2.13 – Relações (a) Agregado miúdo/aglomerante e (b) Água/aglomerante utilizadas por diversos autores.

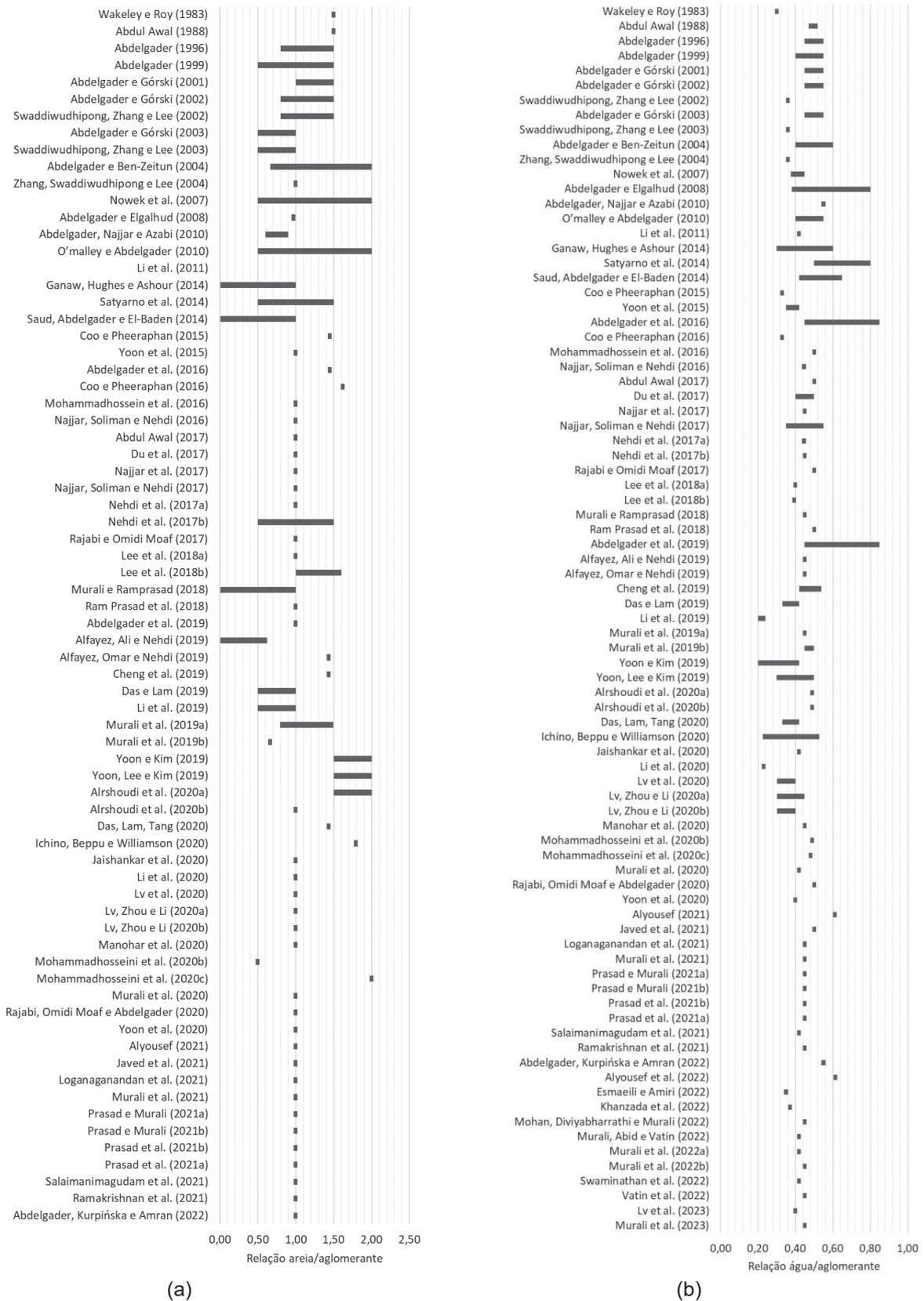
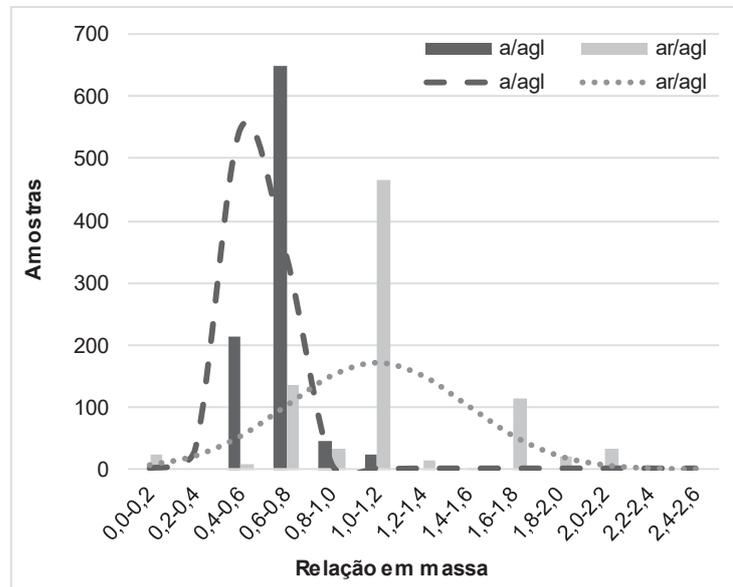


Figura 2.14 – Histograma das relações agregado miúdo/aglomerante e água/aglomerante utilizadas por diversos autores.



FONTE: A autora (2023).

Na Figura 2.13(a), onde são mostradas as relações a_m/agl utilizadas nas pesquisas, pode-se observar que há variação nos teores utilizados pelos diversos autores, porém há certa predominância da utilização de relações próximas a 1:1 entre areia e aglomerante. Esse fato é corroborado pelo histograma apresentado na Figura 2.14, onde observa-se que a média da relação a_m/agl utilizada pelos autores é 1:1. Acredita-se que essa seja a escolha mais popular por ser a recomendada pelas principais normas. Segundo Abdul Awal (1984) a resistência à compressão desejada e a capacidade de bombeamento do graute são fatores limitantes para a quantidade de areia a ser utilizada.

Da análise do Figura 2.13(b) e Figura 2.14 pode-se concluir que a maioria dos autores utiliza valores para a relação a/agl próximas ou maiores que 0,40, sendo que o valor médio para essa relação obtida no histograma é 0,47. Apenas em pesquisas mais recentes, a partir de 2019, que uso de relações menores vem sendo utilizada como, por exemplo, as relações de 0,20 a 0,24 utilizadas por Li et al. (2019). No referido estudo o objetivo é a produção de TSC de ultra alto desempenho, e a resistência à compressão alcançada com a menor relação a/agl atinge valores próximos a 110 MPa. Essas relações foram encontradas através do ajuste da trabalhabilidade buscando-se atingir de 35 a 40 cm de raio no ensaio do índice de consistência pelo método cone de Hägermann, descrito pela norma europeia BS EN 1015-3 (BSI, 1999).

O ajuste da relação a/agl para atingir a consistência desejada, conforme preconiza a ACI 304, é a metodologia seguida pela maioria dos trabalhos apresentados na Figura 2.13(b). Desta forma, pode-se mais uma vez inferir que o avanço da tecnologia dos aditivos superplastificantes vem tornando possível a produção de grautes com a trabalhabilidade adequada com relações a/agl cada vez menores.

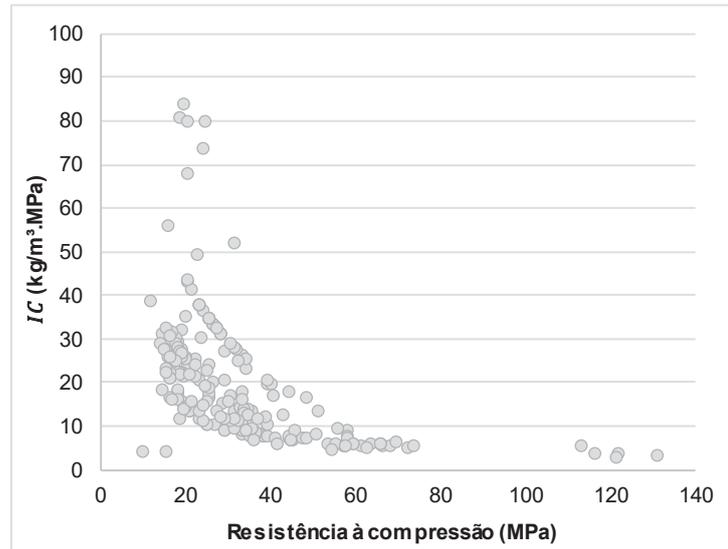
O consumo de cimento para produção dos grautes é bastante variável. No estudo de Nowek et al. (2007), onde o graute é produzido também com sílica ativa, o menor consumo de cimento foi de cerca de 350 kg/m³. Já Swaddiwudhipong, Zhang e Lee (2002), Zhang, Swaddiwudhipong e Lee (2004), Najjar, Soliman e Nehdi (2017) e Li et al. (2019) produziram grautes com consumos de cimento próximos a 1000 kg/m³. O maior consumo de cimento para produção de graute para TSC dentre os estudos apontados na revisão sistemática realizada foi de Yoon e Kim (2019), com o valor de mais de 1900 kg/m³.

A mesma variação ocorre nos consumos de cimento para a produção do TSC propriamente dito. Coe e Pheeraphan (2016) apresentaram o menor consumo de cimento para produção do TSC. O TSC produzido pelos autores com consumo de cimento de cerca de 40 kg/m³ atingiu resistências de aproximadamente 10 MPa aos 28 dias, contudo o TSC contava também com cinza volante em sua composição. Já Najjar; Soliman; Nehdi (2016) produziram TSC com consumo de cimento de até 875 kg/m³, a/agl de 0,45, superplastificante base policarboxilato (0,40% da massa de aglomerantes), sem utilizar outras adições minerais, e obtiveram resistências próximas a 32 MPa. As maiores resistências foram atingidas por Li et al. (2019): os autores alçaram resistências à compressão na faixa de 140 MPa, com consumo de cimento de aproximadamente 430 kg/m³ e uso de micro sílica e filler calcário. A fim de comparar os consumos de cimento para a produção de TSC, foram calculados os valores para o índice de eficiência do cimento (IC) dos estudos analisados na revisão sistemática. O IC mede a ecoeficiência de concretos ao relacionar a quantidade de cimento necessária para obtenção de 1 MPa de resistência à compressão (GRAZIA et al., 2019), conforme apresentado na equação 2.1. Os valores de IC calculados para os estudos da revisão sistemática são apresentados na Figura 2.15, que ainda relaciona esses valores com os de resistência à compressão.

$$IC = \frac{CP}{f_c} \quad 2.1$$

em que IC é índice de eficiência do cimento, em $kg/m^3.MPa$, CP é o consumo de cimento Portland em kg/m^3 , e f_c é a resistência à compressão, em MPa .

Figura 2.15 – Relação entre IC e resistência à compressão dos traços de TSC analisados na revisão sistemática.



FONTE: A autora (2023).

No que diz respeito a concretos convencionais, os valores do IC estão comumente entre 9 e 14 $kg/m^3.MPa$ (GRAZIA et al., 2019), e para concretos de alto desempenho os valores ficam próximos 5 $kg/m^3.MPa$ (DAMINELLI et al., 2010). Concretos com valores de IC iguais ou menores que 5 $kg/m^3.MPa$ são considerados ecoeficientes (GRAZIA et al., 2019). Pode-se observar na Figura 2.15 que a grande maioria dos pontos possui IC acima 5 $kg/m^3.MPa$, o que indica que o TSC costuma apresentar um elevado consumo de cimento quando comparado aos concretos ecoeficientes. Portanto, há uma lacuna tecnológica a ser mais bem explorada no TSC, visando a redução do consumo de aglomerantes para sua produção.

Similarmente ao encontrado para os agregados graúdos, não foi possível encontrar na literatura estudos que desenvolvam grautes para produção de TSC a partir de teorias de empacotamento de partículas. Apenas Li et al. (2020) citam que a distribuição granulométrica do agregado miúdo foi ajustada para atingir uma melhor densidade de empacotamento, utilizando o modelo de Andreasen e Andersen modificado ajustado para $q=0,22$, porém não há ajustes em relação às outras frações finas, como dos aglomerantes e adições. Do ponto de vista da ecoeficiência do uso do cimento esse estudo é fundamental, uma vez que um melhor empacotamento pode levar a produção de grautes de resistências equivalentes com menor consumo de aglomerantes.

2.1.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO GRAUTE

O processo de produção do graute para TSC conta com a etapa de ajuste da quantidade de água e superplastificante, visando buscar a trabalhabilidade adequada ao método. O ensaio para determinação da trabalhabilidade do graute é descrito na norma C939-10 “*Standard test method for flow of grout for preplaced-aggregate concrete (flow cone method)*” (ASTM, 2010). O ensaio consiste em determinar o tempo necessário para que um volume de 1725 ml flua por um cone com abertura de saída de 12,7 mm. De acordo com a norma ASTM C938 (ASTM, 2019) o tempo de fluxo adequado para graute visando a produção de TSC é de 21 ± 2 segundos. A ACI 304 (ACI, 1997) também cita esse valor, indicando-o como adequado para o uso. A norma prevê ainda outras consistências possíveis: pode-se produzir grautes que atinjam de 18 a 26 segundos, sendo estes adequados para grandes construções, nas quais o tamanho mínimo do agregado graúdo é grande, acima de 38 mm. Já nos casos em que há maior controle tecnológico do concreto e maiores resistências são necessárias, um tempo de 35 a 40 segundos pode ser utilizado.

Em seu estudo Li et al. (2019) optaram por ajustar a trabalhabilidade do graute através de ensaio de espalhamento, buscando atingir um diâmetro de 35 a 40 cm utilizando o Hägermann cone, com procedimentos normatizados pela BS EN 1015-3 (BSI, 1999).

2.1.5 PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO DO TSC

A ACI 304 (ACI, 1997) descreve os principais procedimentos para execução do TSC: a primeira etapa é a preparação das formas. Estas devem ser impermeáveis, resistentes o suficiente para suportar as cargas dos agregados graúdos. Formas de madeira podem ser utilizadas para este fim, devendo-se apenas reforçar as laterais de forma a evitar deformações. Para concretagens submersas a norma indica o uso de formas metálicas que resistam a pressão da água, inclusive com ancoragens internas, a depender da profundidade da construção.

Após a montagem das formas deve-se proceder o posicionamento dos tubos pelos quais será injetado o graute. Os tubos de injeção devem ter entre 20 e 30 mm para concretos convencionais, podendo chegar a até 40 mm no caso de concreto massa, e devem ser posicionados de forma a garantir o enchimento uniforme das formas. O final do tubo de injeção de graute deve estar 150 mm acima do fundo da forma, de forma a permitir o espalhamento do graute por toda parte inferior da forma. No caso de profundidades de concretagem muito altas, pode-se inserir tubos em diferentes alturas.

A etapa seguinte envolve o posicionamento das armaduras, caso existam, seguida do preenchimento das formas com os agregados graúdos. De acordo com a norma ACI 304 (ACI, 1997) a colocação dos agregados e armaduras pode ser realizada de forma intercalada, a depender da profundidade da estrutura e espaçamento entre as barras. A norma ressalta que, caso haja necessidade de saturação dos agregados, esta deve ser feita anteriormente à colocação nas formas para evitar acúmulo de materiais finos no fundo da forma. Caso a adição de água precise ser realizada com os agregados já dentro das formas, ela deve ser feita através dos tubos de injeção e não diretamente sobre os agregados, e posteriormente deve ser retirada com auxílio de bombeamento.

Deve-se tomar especial atenção na velocidade do fluxo de graute: velocidades muito baixas podem acarretar segregação e entupimento da linha; já velocidades muito altas podem fazer com que o graute “empurre” os agregados próximos ao invés de preencher os vazios entre eles. Apesar de a norma ACI 304 (ACI, 1997) sugerir taxas de injeção entre 30 e 110 L/min, trabalhos encontrados na revisão sistemática que trazem essa informação utilizaram taxas menores, de 8 L/min (DAS; LAM, 2019) e 1 L/min (COO; PHEERAPHAN, 2015). Após os procedimentos descritos, a cura do concreto deve ser realizada de forma similar à do concreto convencional (ACI, 1997).

2.1.6 DURABILIDADE DO TSC

Os estudos sobre durabilidade do TSC ainda são incipientes, e poucas pesquisas foram desenvolvidas sobre o comportamento deste concreto frente a agentes agressivos, como ataques por cloretos ou sulfatos (MOHAMMADHOSSEINI et al., 2020a; NAJJAR et al., 2017). A alta porcentagem de agregados graúdos e, conseqüentemente, baixa quantidade de

pasta faz com que a distribuição de poros do TSC seja diferente do encontrado no CC, o que influencia em sua capacidade de resistir a ataques (NAJJAR et al., 2017).

Dentre os estudos analisados na revisão sistemática da literatura, apenas 6 trabalhos fizeram estudos de durabilidade. Foram analisados parâmetros como ataque por sulfatos (MOHAMMADHOSSEINI et al., 2020b; NAJJAR et al., 2017), ataque por cloretos (DAS; LAM, 2019; DAS; LAM; TANG, 2020; MOHAMMADHOSSEINI et al., 2020a), profundidade de carbonatação (MOHAMMADHOSSEINI et al., 2020b) e ciclos de gelo e degelo (NEHDI et al., 2017a).

Mohammadhosseini et al. (2020a) desenvolveram em sua pesquisa TSC com adições minerais e fibras sintéticas. Os autores concluíram que tanto as adições minerais como as fibras sintéticas diminuíram a absorção de água do TSC, similarmente ao que ocorre no CC. Também foi observado que o método por injeção produz concretos com menos absorção do que os produzidos por gravidade. No mesmo estudo foi conduzido ensaio de penetração de cloretos e, novamente, o reforço com fibras, as adições minerais e o método de injeção produziram concretos mais resistentes ao ataque.

Das, Lam e Tang (2020) também conduziram pesquisa sobre penetração de cloretos em TSC com incorporação de diferentes porcentagens de adições minerais. Em comparação aos concretos produzidos pelo método tradicional, com mesmas relações a/agl , a_m/agl e mesmas porcentagens de adições minerais, todas as composições de TSC apresentaram maior resistência à penetração de cloretos. Em outro estudo, com variação do diâmetro dos agregados e método de injeção, Das e Lam (2019) concluíram que a diminuição do diâmetro do agregado graúdo, desde que garantida a qualidade da concretagem, sem vazios internos, aumenta a resistência à penetração de cloretos. Já em relação ao método de produção, o TSC produzido pelo método de injeção apresentou maior resistência ao ataque de cloretos do que os produzidos por gravidade.

2.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

O estudo do empacotamento de partículas pode ser definido como um método para a seleção da melhor proporção entre os materiais particulados. Busca-se preencher os vazios maiores com partículas menores, cujos vazios serão preenchidos por partículas ainda menores, e assim sucessivamente, obtendo desta forma um sistema com significativa diminuição no volume de vazios (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017; OLIVEIRA et al., 2000). O interesse pela sua aplicação no concreto dá-se pelo fato de que os materiais utilizados em sua composição, sejam naturais ou manufacturados, possuem variadas formas e tamanhos. As características do concreto dependem diretamente das características desses materiais e principalmente da interação entre eles (OLIVEIRA et al., 2018; STROEVEN; STROEVEN, 1999).

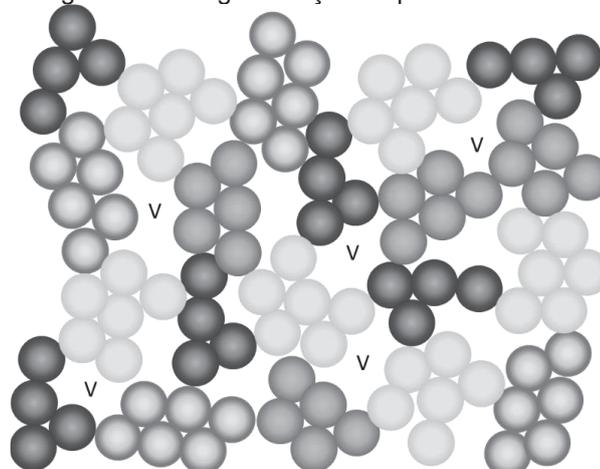
A densidade de empacotamento dos materiais constituintes do concreto tem fundamental importância na demanda de água. Em um sistema de partículas granulares, como é o caso do concreto, a mobilidade dos grãos é proporcional ao afastamento entre eles provocado por um fluido. Quando não há fluido algum os grãos ficam em contato entre si, não têm mobilidade e apresentam vazios intergranulares. Ao se inserir fluido no sistema primeiramente há a cobertura da superfície dos grãos, seguido do preenchimento dos vazios entre eles e, caso seja inserido fluido em volume maior do que o volume dos vazios, os grãos se afastam, permitindo sua mobilidade (VOGT, 2010).

Caso a área superficial dos grãos e o volume de vazios entre eles sejam altos, haverá necessidade de um grande volume de fluido para garantir fluidez adequada. A otimização do empacotamento dos grãos possibilitará a redução do volume de vazios. Quando analisado o empacotamento dos agregados, haverá menor consumo de pasta e conseqüentemente menor consumo de cimento, criando concretos mais ecoeficientes (BALLIEU, 2014; CAI, 2017; FENNIS, 2011; KWAN; MORA, 2002; LONDERO et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2000; POWERS, 1968). O mesmo princípio pode ser aplicado quanto trata-se apenas de pastas, com cimento e adições ativas ou inertes: o aumento da densidade de empacotamento dos materiais finos leva a uma menor relação a/agl , fator determinante para diversas propriedades do concreto, como a resistência e porosidade (OLIVEIRA et al., 2000; REBMANN, 2017). Desta forma, concretos de mesma trabalhabilidade podem ser formulados com menor quantidade de água.

Os materiais constituintes do concreto apresentam diversas distribuições granulométricas, podendo ser contínuas e/ou descontínuas, levando a sistemas com altas densidades de empacotamento até misturas que se aproximam de monodispersões. A morfologia das partículas, como a forma e textura superficial, também apresenta fundamental importância: as partículas com forma menos esférica e mais rugosas apresentam menor densidade de empacotamento devido ao atrito causado pela superfície irregular. Quanto mais finas as partículas mais esse efeito é importante, devido a maior área superficial específica das partículas (KWAN; MORA, 2002; OLIVEIRA et al., 2000). Outros fatores como estabilidade de forma, adesão e molhabilidade das partículas também influenciam no empacotamento (FENNIS, 2011).

A otimização dada através do empacotamento de partículas é útil no desenvolvimento de novas composições de concreto. Além de ser uma ferramenta útil para o emprego nas frações relativas aos agregados, modelos de empacotamento mais refinados permitem a composição do concreto com partículas finas ($<125\ \mu\text{m}$) e podem ser usados para o desenvolvimento de pastas, argamassas e grautes. Porém, quando se trata de partículas finas, especial atenção deve ser dada à aglomeração, causada por forças de coesão entre as mesmas. Quando apresentam diâmetros muito pequenos, baixa massa e grande área superficial as forças de Van der Waals, cargas eletrostáticas e ligações químicas são maiores que as forças que podem separar os aglomerados, como gravidade e cisalhamento e esse efeito faz com que as partículas se aglomerem (DAMINELLI; PILEGGI; JOHN, 2017; FENNIS, 2011; FENNIS; WALRAVEN; DEN UIJL, 2013), como ilustrado na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Aglomeração de partículas finas.



FONTE: Traduzido de Fennis (2011).

Além de tornar mais difícil as ações de mistura e compactação, os aglomerados de partículas diminuem a densidade de empacotamento, pois restam regiões de alta porosidade entre grãos, os vazios indicados como “V” na Figura 2.16. A aglomeração ainda influencia na eficiência dos ligantes, pois a área superficial disponível para as reações de hidratação é diminuída. Altas energias de mistura e compactação, bem como o uso de aditivos superplastificantes são fundamentais para “quebrar”, ao menos parcialmente, as aglomerações (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017; FENNIS, 2011).

2.2.1 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

O início dos estudos de empacotamento deu-se com a busca dos pesquisadores pela otimização das curvas granulométricas dos agregados. Em 1907, Füller e Thompson propuseram uma curva granulométrica, apresentada na Equação 2.2, que apresentava a distribuição contínua ideal dos agregados para atingir densidade ótima. A otimização dos agregados baseados em curvas granulométricas predefinidas é ainda bastante utilizada para dosagem de concreto (CAI, 2017; FENNIS, 2011; LONDERO et al., 2017).

$$CPFT(\%) = 100 \cdot \left(\frac{D}{D_{max}} \right)^q \quad 2.2$$

em que $CPFT(\%)$ é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D , D é o diâmetro da partícula, D_{max} é o diâmetro da maior partícula do conjunto e q é o coeficiente de distribuição.

Füller e Thompson propuseram o uso de um coeficiente de distribuição q igual a 0,5, e não havia consideração sobre o tamanho mínimo da partícula. A falta de um D_{min} impossibilita que a curva proposta na equação seja reproduzida na prática, uma vez que o tamanho mínimo das partículas é limitado e maior que zero. Em 1930 Andreasen e Andersen propuseram que o volume de vazios estava diretamente relacionado ao valor de q , e estabeleceram em seus trabalhos a faixa de variação de 0,33 a 0,50 para o coeficiente q . A variação do q resulta em diferentes curvas granulométricas (HUNGER, 2010). Em 1980, Funk e Dinger apresentaram uma adaptação da Equação 2.2, considerando o tamanho mínimo das

partículas, conforme apresentado na Equação 2.3. Esse modelo também é conhecido como Andreasen e Andersen modificado ou modelo de Alfred.

$$CPFT(\%) = 100 \cdot \left(\frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \right) \quad 2.3$$

em que $CPFT(\%)$ é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D , D é diâmetro da partícula, D_{min} é o diâmetro da menor partícula do conjunto, D_{max} é o diâmetro da maior partícula e q é o coeficiente de distribuição

A equação do modelo de Andreasen e Andersen modificado permite a produção de misturas de diferentes características com a variação do coeficiente q : quando o coeficiente é mais alto tem-se misturas com maior porcentagem de grãos maiores, porém com maior potencial de segregação; enquanto valores menores de q resultam em misturas mais ricas em finos e, por esse motivo, com maior viscosidade. Os autores propuseram o valor de $q = 0.37$ como o que resulta no empacotamento ótimo.

Todos os modelos discutidos até o presente momento baseiam-se no fato de que as partículas são esféricas, o que não condiz com os agregados disponíveis. Aqueles de origem natural, como seixos de rios, que apresentam forma mais arredondada tendem a ser menos consumidos devido à preservação de recursos naturais e a tendência é o uso de agregados mais angulares (HUNGER, 2010).

Além disso, mesmo a distribuição granulométrica que promove o maior empacotamento dos agregados pode não resultar na mistura de maior densidade quando o cimento e a água são adicionados. Isso porque partículas finas como o cimento não preenchem os vazios da mesma maneira que partículas maiores, mesmo que geometricamente similares (CAI, 2017; FENNIS, 2011; HUNGER, 2010).

Os modelos de empacotamento levam em consideração tanto a distribuição granulométrica quanto a densidade de empacotamento das partículas. Com o uso desses modelos é possível desenvolver misturas que envolvem o uso de grãos de diferentes dimensões, levando em conta também a interação entre eles. Existem dois grupos de modelos de empacotamento: os contínuos, que consideram a distribuição granulométrica das partículas, e os modelos discretos, que considera as partículas individualmente. O primeiro modelo discreto foi o de Furnas, desenvolvido em 1929, que considera o empacotamento de partículas de dois tamanhos bastante diferentes, sem levar em consideração a interação entre

elas. Posteriormente foram apresentados os modelos de Toufar, Toufar modificado e modelo de Dewar (FENNIS, 2011).

Em 1986 foi apresentado o modelo de empacotamento linear (*Linear packing model – LPM*) (STOVALL; DE LARRARD; BUIL, 1986). O LPM, além de ser um modelo que permite o uso de várias classes de tamanho de grãos, e não apenas de duas como o modelo de Furnas previa inicialmente, leva em consideração a interação geométrica entre as partículas: os chamados efeito parede e efeito afastamento, que serão explicados na seção 2.2.1.1.

Apesar destas vantagens, o modelo não considera a energia necessária para compactação dos grãos. O Modelo de empacotamento compressível (*Compressible packing model – CPM*) é uma extensão do LPM, com as considerações do índice de compactação (K) e da interferência de partículas de tamanhos próximos (FENNIS, 2011). Este modelo, que será usado ao longo do trabalho, está detalhado na seção 2.2.1.1.

2.2.1.1 Modelo de empacotamento compressível - CPM

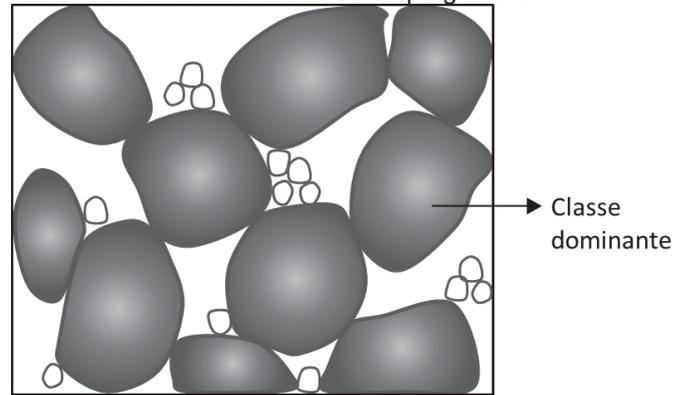
Após mais de uma década de estudos, De Larrard e sua equipe do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* desenvolveram um modelo de empacotamento que possibilita a combinação de n classes de tamanho de grãos, que permite o desenvolvimento de misturas com todos os componentes utilizados para produção do concreto (GOMES; BARROS, 2009). Esse modelo pode ser dividido em duas etapas: primeiramente é calculado o empacotamento virtual – o maior possível para determinada mistura – e, posteriormente, correlaciona-se o empacotamento virtual ao real por meio da aplicação de um coeficiente de compactação (K)

No empacotamento virtual considera-se um arranjo geométrico ideal das partículas, com empilhamento dos grãos um a um. No caso de uma distribuição monodispersa (partículas com aproximadamente mesmo tamanho) de partículas perfeitamente cúbicas, o empacotamento virtual seria de 1,00; já no caso de partículas esféricas o empacotamento máximo seria de 0,74. No empacotamento real, porém, não é possível atingir esses valores devido às interações geométricas entre os grãos, bem como da forma de compactação da mistura (DE LARRARD, 1999).

Desta forma, classe de grãos dominante é um conceito relevante para a elaboração do CPM. Em uma mistura de grãos de diferentes classes, sendo $d_1 > \dots > d_i > \dots > d_n$, pode-se dizer que a classe i é dominante caso ela garanta a continuidade do corpo granular,

conforme exemplificado na Figura 2.17. Caso não haja continuidade sólida da mistura, ela seria constituída por uma suspensão, e não haveria empacotamento (AMARIO, 2015).

Figura 2.17 - Continuidade sólida do corpo granular.

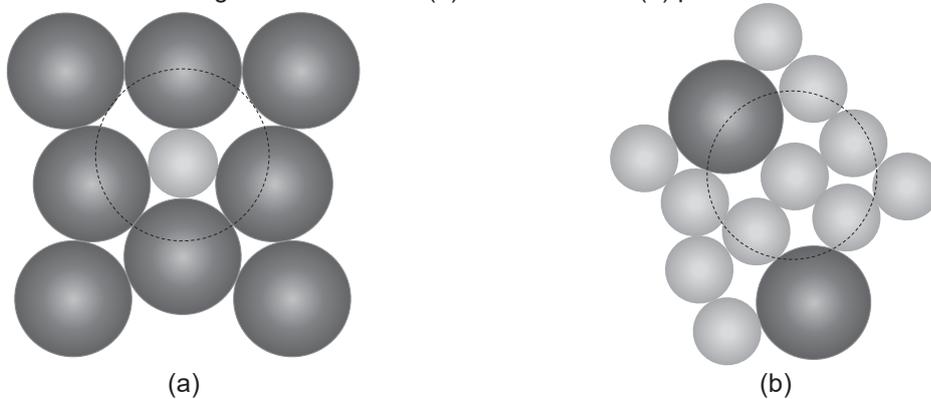


FONTE: Adaptado de De Larrard (1999).

A figura mostra a classe i dominante. No caso apresentado acima os grãos mais grossos são a classe dominante. Neste caso, a classe dominante preenche o volume como se não houvesse grãos finos. Já quando a classe dominante é a de menor diâmetro, ela fica empacotada na porosidade deixada pelos grãos mais grossos (DE LARRARD, 1999).

O empacotamento máximo é atingido quando os grãos de menor diâmetro preenchem os espaços vazios deixados pelos grãos de maior diâmetro. Porém existem casos em que a interação entre as partículas diminui a compacidade da mistura. Essas configurações, conhecidas como efeito parede e efeito afastamento, ocorrem em classes granulares de diâmetros relativamente próximos, e são apresentadas nas Figura 2.18.

Figura 2.18 – Efeito (a) afastamento e (b) parede.



FONTE: Adaptado de Abu-Lebdeh et al. (2022).

Um conjunto de partículas com mesmo diâmetro apresenta certo volume de vazios quando em um volume infinito. A esse sistema podem ser inseridas partículas finas nos vazios deixados pelas maiores e, caso seu diâmetro seja muito menor, essa adição não exercerá influência sobre a densidade de empacotamento das partículas maiores. Porém, caso seu diâmetro não seja pequeno o suficiente para ocupar os vazios existentes, há um afastamento das partículas maiores (Figura 2.18(a)) o que leva, de forma geral, a uma diminuição da densidade de empacotamento. A esse fenômeno dá-se o nome de efeito afastamento.

De forma análoga, quando uma partícula grossa é inserida em um sistema empacotado em que a classe dominante é a mais fina, a superfície dos grãos maiores funciona como um plano ao contato das partículas finas. Por esse motivo, a densidade das partículas finas ao redor dos grãos mais grossos é diminuída (Figura 2.18(b)), o que também induz a uma diminuição da densidade de empacotamento das partículas finas. Esse é chamado de efeito parede (LONDERO et al., 2017; REBMANN, 2017; ROUSSEL, 2012).

Os coeficientes a_{ij} e b_{ij} , que correspondem respectivamente aos efeitos afastamento e parede, podem ser calculados pelas equações 2.4 e 2.5 (DE LARRARD, 1999).

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1,02}} \quad 2.4$$

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1,50} \quad 2.5$$

em que d_i é o diâmetro da partícula em consideração, e d_j corresponde ao diâmetro da partícula que está causando interferência (afastamento na equação 2.4, e parede na equação 2.5).

Pode-se perceber que, nas equações 2.4 e 2.5, quanto mais próximos os diâmetros de d_i e d_j os coeficientes tendem a um. De forma análoga, quanto mais distintos os diâmetros o coeficiente tende a zero. A densidade de empacotamento virtual de uma mistura polidispersa contendo n classes, é apresentada na equação 2.6 (DE LARRARD, 1999).

$$\gamma_i = \min_{1 \leq i \leq n} \left(\frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij} \cdot \beta_i \left(1 - \frac{1}{b_j}\right)\right] \cdot y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - a_{ij} \cdot \frac{\beta_i}{\beta_j}\right] \cdot y_j} \right) \quad 2.6$$

em que β_i e β_j correspondem a densidade de empacotamento de cada classe de tamanho de grãos, determinada experimentalmente e y_j é a proporção volumétrica da classe i . A densidade de empacotamento virtual γ_i deve ser calculada considerando cada uma das n classes como dominante, e a densidade de empacotamento virtual da mistura será a menor dentre as calculadas. A relação entre o empacotamento virtual (γ_i) e o empacotamento real (Φ) é dada pelo índice compactação (K), calculado pela equação 2.7 (DE LARRARD, 1999).

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{y_i}} \quad 2.7$$

O índice K depende da energia de compactação aplicada. A Tabela 2.4 apresenta valores de K determinados para diferentes métodos de compactação.

Tabela 2.4 - Valores para o índice de compactação K.

Processo de compactação	K
Lançamento simples	4,10
Apiloamento	4,50
Vibração	4,75
Demanda de água	6,70
Vibração e compressão de 10kPa	9,00
Proctor teste	12,00
Partículas finas	12,20

FONTE: De Larrard e Sedran (2002); Fennis (2011) e De Larrard (1999).

2.2.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO

Existem diversos modos de se determinar a densidade de empacotamento de materiais granulares, e a escolha de qual usar depende da dimensão da partícula e da forma em que estas serão utilizadas. Pode-se dividir os métodos em dois grupos: métodos a seco ou métodos úmidos, que determinam a densidade de empacotamento na presença de água.

O concreto após misturado apresenta, na grande maioria das vezes, aspecto úmido. Isso pode levar a crer que todos os seus constituintes devem ter a densidade de

empacotamento determinada por métodos do tipo úmido. Porém as partículas mais grossas dos agregados são afetadas apenas pelas forças de gravidade e cisalhamento, e não por forças superficiais como as de aglomeração. Por esse motivo, os agregados podem ter a densidade medida a seco (BALLIEU, 2014; FENNIS, 2011).

A definição da densidade de empacotamento para agregados é dada pelo índice de vazios, conforme equação 2.8 abaixo:

$$\beta = 1 - IV = 1 - \frac{m_e - m_u}{m_e} = \frac{m_u}{m_e} \quad 2.8$$

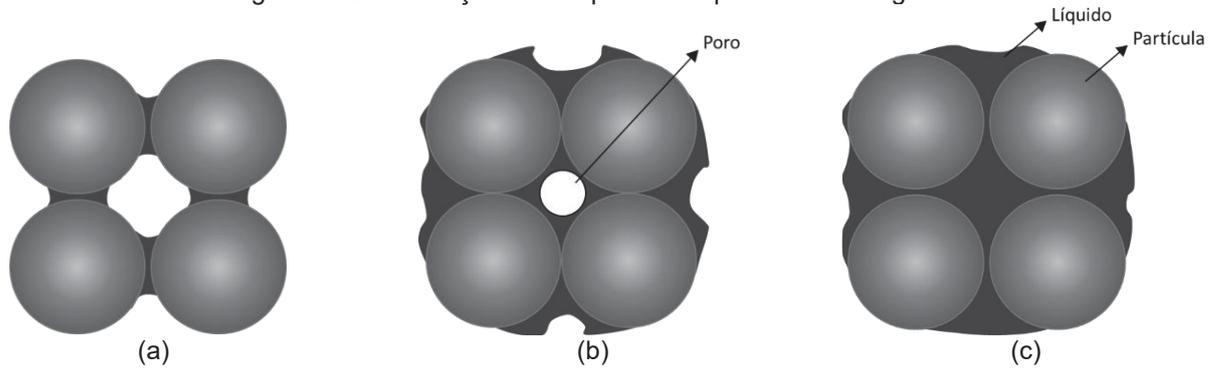
em que β é a densidade de empacotamento, IV é o índice de vazios do agregado, m_u é a massa unitária, calculada pela NBR 16972 (ABNT, 2021a), e m_e é a massa específica. A massa específica dos agregados graúdos é calculada pela NBR 16917 (ABNT, 2021b), já a dos agregados miúdos é calculada segundo a NBR 16916 (ABNT, 2021c).

Os métodos úmidos, com medições realizadas na presença de água e aditivos superplastificantes, são indicados para partículas finas, com tamanhos inferiores a 125 μ m. Isso porque as partículas finas podem apresentar aglomeração, devido às forças de Van der Waals. A aglomeração dos grãos diminui a densidade de empacotamento do material e, além disso, pode haver variação nas medidas dependendo do método de compactação utilizado (BALLIEU, 2014; FENNIS, 2011)

Segundo Fennis (2008) não há consenso sobre o melhor método para determinação da densidade de empacotamento. Em seu trabalho, a autora comparou diversos métodos para a determinação e em suas conclusões um dos métodos recomendados é o da “Demanda de água pela energia de mistura”, descrito por Marquardt (2001).

Esse método se destaca por ser um teste rápido e com consumo moderado de materiais. O método descrito pelo autor baseia-se na condição de dispersão dos grãos na mistura, conforme ilustrado na Figura 2.19.

Figura 2.19 – Condições de dispersão de partículas em água.



FONTE: Adaptado de Fennis (2011).

Quando adicionada lentamente a água forma pontes capilares entre os grãos, chamadas de ligações pendulares. Porém, caso seja adicionada em pequena quantidade, o volume de água não será suficiente para envolver completamente todas as partículas e se concentrará nos pontos de contato entre os grãos (Figura 2.19(a)), promovendo uma certa distância entre eles e, conseqüentemente, diminuindo a concentração de sólidos da mistura. Conforme aumenta-se a relação água/sólidos (a/s) alcança-se a condição de continuidade do filme de água em torno de todos os grãos da mistura, de modo que as partículas se aproximam umas das outras devido à tensão superficial da água, até o ponto em que há água apenas suficiente para envolver todas as partículas, porém ainda com poros de ar no interior da mistura. Neste ponto (Figura 2.19(b)) a relação de vazios é mínima e a concentração de sólidos é máxima. Com o progressivo aumento da relação a/s após esse ponto a concentração de sólidos volta a diminuir, pois o excesso de água na mistura faz com que as partículas do sistema se afastem umas das outras novamente, ficando dispersas em água (Figura 2.19(c)) (CAMPOS et al., 2019; FENNIS, 2011; KLEIN, 2012; LI; KWAN, 2013).

Marquardt relaciona, em sua proposta de método de ensaio, a demanda de água com o consumo de energia de uma argamassadeira durante o processo de mistura das pastas, com adição constante de água. O princípio básico do ensaio é a resistência que as pastas apresentam à força de cisalhamento frente a diferentes níveis de umidade. Um pó seco apresentará pouca resistência ao cisalhamento, o que resultará em um baixo consumo de energia. Ao adicionar água gradualmente à mistura, as citadas forças pendulares entre as partículas vão crescendo e, com isso, a resistência ao cisalhamento e consumo de energia do equipamento de mistura também apresentam aumento até atingirem um ponto máximo (Figura 2.19(b)). Ao continuar a adição de água as partículas se afastam, levando a liquefação da mistura e diminuição da energia registrada (FENNIS, 2011; HUNGER, 2010).

Foi realizado estudo (SOTO et al., 2023) em que os resultados do ensaio de demanda de água pela energia de mistura foram comparados com os obtidos pelo método úmido proposto por Wong e Kwan (2008). Este método consiste em produzir pastas com diferentes relações a/s, e posteriormente determinar a densidade aparente de forma experimental, medindo a massa de um volume conhecido de pasta produzida. Nas pastas produzidas com relações a/s baixas, a quantidade de água não será suficiente para envolver todas as partículas, o que acarretará certo afastamento entre elas, como demonstrado na Figura 2.19(a). Esse distanciamento implica em uma diminuição na concentração de sólidos na mistura. Ao se produzir pastas com relações a/s maiores, alcança-se a condição em que todas as partículas se aproximam devido à tensão superficial da água (Figura 2.19(b)), e a concentração de sólidos é máxima. Após esse ponto, o aumento da relação a/s promove um afastamento das partículas, que ficam dispersas em água (Figura 2.19(c)), o que faz com que a concentração de sólidos volte a diminuir.

Apesar de os métodos apresentarem resultados semelhantes para densidade de empacotamento, o ensaio da demanda de água pela energia de mistura consumiu cerca de sete vezes menos material e foi realizado em 15% do tempo necessário quando comparado com o método de (WONG; KWAN, 2008). Além disso, o método da demanda de água pela energia de mistura permite uma melhor estimativa da demanda de água, uma vez que fornece resultados discretos ao longo do tempo do ensaio, e não sofre as influências da evaporação da água e compactação da mistura.

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados, de forma detalhada, a caracterização dos materiais utilizados e o planejamento experimental, que se divide em três etapas: (I) desenvolvimento do graute, (II) desenvolvimento do esqueleto granular e ajuste da fluidez do graute e (III) produção do TSC e avaliação de suas propriedades.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Cimento Portland e adições minerais

Para o desenvolvimento dos grautes foram utilizados: cimento Portland e adições minerais (cinza volante, fíler calcário, metacaulim e sílica ativa). Optou-se por utilizar o cimento Portland CPV-ARI, devido ao seu baixo teor de adição, até 10% de fíler calcário em relação à massa de clínquer + sulfatos de cálcio (ABNT, 2018a). O cimento apresentou massa específica de $3,13 \text{ g/cm}^3$, conforme resultado do fabricante, seguindo a NBR 16605 (ABNT, 2017).

A caracterização físico-química do cimento foi obtida diretamente com o fabricante. A distribuição granulométrica do cimento foi obtida por difração à laser em analisador de tamanho de partículas (CILAS 920), com capacidade para leituras entre 0,3 e 400 μm e utilizando laser diodo de 850 nm. A dispersão do material foi realizada por pulverização em peneira de 355 μm , dissolução em água sem utilização de agente dispersante e aplicação de ultrassom por 60 segundos (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017; DE ALMEIDA et al., 2017).

As adições minerais (cinza volante, fíler calcário, metacaulim e sílica ativa) foram caracterizadas por ensaios físicos e químicos: composição química por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), teor de hidróxido de cálcio fixado (Método Chapelle modificado) (exceto fíler calcário) e massa específica conforme estabelece a NBR 16605 (ABNT, 2017).

A composição química das adições foi realizada em espectrômetro Rigaku ZSX Primus II. A análise foi realizada após pulverização do material em peneira de 355 μm e prensagem em forma de pastilha, utilizando ácido bórico como aglutinante. Os resultados da análise química foram devidamente corrigidos pela perda ao fogo realizada em mufla à 950°C conforme determina NBR NM 18 (ABNT, 2012a).

A distribuição granulométrica da cinza volante, fíler calcário e metacaulim foi realizada por difratometria a laser, seguindo os mesmos parâmetros utilizados para o cimento. O fíler calcário apresentou partículas com diâmetros acima de 355 μm e, por esse motivo, sua curva granulométrica foi composta com a utilização de dois métodos: a fração acima de 355 μm foi avaliada por peneiramento conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003); e as partículas finas por difração a laser – permitindo, assim, a composição completa da distribuição granulométrica.

Devido ao menor diâmetro médio de suas partículas, a sílica ativa teve sua distribuição granulométrica caracterizada pela técnica DLS - Dynamic Light Scattering (Microtrac Nanotrac), que utiliza laser em 785 nm e capacidade de leitura entre 0,8 nm e 6,3 μm . O preparo da amostra seguiu recomendações de Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016), com a dispersão realizada por dissolução em água destilada com 5% de dispersante em relação ao volume de solvente (PowerFlow 4001, base policarboxilato). A amostra foi diluída na proporção de 2 mg/ml em 50 ml da solução e dispersada em lavadora de ultrassom (Schuster L-100, 160W, 42000 Hz) por 15 minutos. Cerca de 3 ml do material em suspensão foi adicionado a uma cubeta de vidro para realização do ensaio, que realizou a média de 4 varreduras de 30 s cada. A análise foi realizada pela técnica de reflexão e foram utilizados os dados fornecidos pelo equipamento para o índice de refração e viscosidade dos líquidos.

O teor de hidróxido de cálcio fixado (Chapelle Modificado), que avalia a capacidade de reação de uma pozolana com a portlandita, foi realizado de acordo com a NBR 15895 (ABNT, 2010a). Para isso, óxido de cálcio P.A. e a adição mineral ativa (sem a realização da etapa de peneiramento) são misturados na proporção 2:1 em massa, em 250 ml de água destilada. A solução é mantida à temperatura de 90°C por 16 horas. Após o período determinado, o teor de cal remanescente (livre) é titulado com ácido clorídrico, utilizando-se fenolftaleína como indicador.

A composição mineralógica das adições minerais foi realizada por difratometria de raios-X (DRX), utilizando equipamento Rigaku, Ultima IV, operando a 40kV/30mA com tubo de Cobre. As amostras foram preparadas, após pulverização do material em peneira de 355 μm , por preenchimento do porta amostras com o pó solto e regularização da superfície. Os parâmetros de ensaio foram: faixa de varredura de 5° a 75° 2 θ , passo de 0,02° 2 θ e velocidade de varredura de 2° 2 θ /min. A análise dos resultados foi realizada a partir do banco de dados cristalográfico do COD (*Crystallography Open Database*) de 2021. Para a quantificação das fases minerais e do teor amorfo foi adicionado às amostras 5% em massa de rutilo (óxido de titânio PA 99% de pureza tratado à 1000°C), e aplicado o método de refinamento numérico de

Rietveld. O rutilo foi utilizado como padrão interno por apresentar picos característicos bem definidos, não apresentar sobreposição com os picos dos materiais estudados e por ter comportamento inerte, não provocando interferências na detecção das fases.

O teor do fíler calcário (carbonato de cálcio) no cimento anidro e o teor de portlandita (hidróxido de cálcio) disponível após a hidratação do cimento foram determinados por análise termogravimétrica (ATG), realizada em Sistema de Análises Térmicas (labsys Evo Dta/Dsc, marca Setaram Instrumentation), operando com uma taxa de aquecimento de 10°C/min até a temperatura de 1000°C, sob atmosfera inerte de argônio 5.0 com fluxo de 20 ml/min. Na amostra de cimento anidro, o ensaio foi realizado na condição fornecida pelo fabricante com aproximadamente 30 mg de amostra em cadinho de alumina de 4,4ml sem tampa. Para a realização do ensaio no cimento hidratado foi preparada pasta de cimento Portland com relação a/agl de 0,4, curada por imersão em água saturada com cal por 91 dias (DIAS et al., 2008). Posteriormente à cura, a amostra foi submersa em álcool isopropílico P.A. por 24 horas e seca a 40°C até constância de massa (HOPPE FILHO et al., 2021). Para realização do ensaio, a amostra foi previamente moída e peneirada em malha 75 μ m.

A partir das perdas de massa características do cimento, foi possível realizar o cálculo da água quimicamente combinada como portlandita, bem como do anidrido carbônico liberado devido à descarbonização da calcita. Os teores destas fases minerais foram calculados de acordo com as Equação 3.1 (cálculo do teor de portlandita) e Equação 3.2 (cálculo do teor de calcita) (FÖLDEVÁRI, 2011; HOPPE FILHO, 2008; NIQUES, 2003; RAMACHANDRAN et al., 2002; WENDLANDT, 1965).

$$Ca(OH)_2 = \frac{MM_{Ca(OH)_2}}{MM_{H_2O}} \cdot H_2O = 4,11 \cdot H_2O \quad 3.1$$

em que $Ca(OH)_2$ é o teor de portlandita (hidróxido de cálcio); $MM_{Ca(OH)_2}$ é a massa molecular de hidróxido de cálcio (74,09 u); MM_{H_2O} é a massa molecular da água (18,02 u) e H_2O é a perda de massa percentual no ensaio ATG referente à decomposição da portlandita entre 400 e 600°C (%).

$$CaCO_3 = \frac{MM_{CaCO_3}}{MM_{CO_2}} \cdot CO_2 = 2,27 \cdot CO_2 \quad 3.2$$

em que $CaCO_3$ é o teor de calcita (carbonato de cálcio); MM_{CaCO_3} é a massa molecular do carbonato de cálcio (100,09 u); MM_{CO_2} é a massa molecular do anidrido carbônico (44,01 u) e CO_2 é a perda de massa percentual no ensaio ATG referente à decomposição da calcita entre 600 e 1000°C (%).

Uma vez que o peso da fração sólida da amostra se altera durante a hidratação, alterando a massa residual, os resultados têm de ser ajustados para a base anidra (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016). As quantificações químicas, portanto, precisam ser corrigidas para base de não voláteis (desconsiderando a parcela de H_2O e CO_2 do percentual total da quantificação), o que permite a comparação de amostras que possuem diferentes teores de perda ao fogo. A conversão para base de não voláteis, referente à massa anidra de cimento, pode ser calculada conforme Equação 3.3.

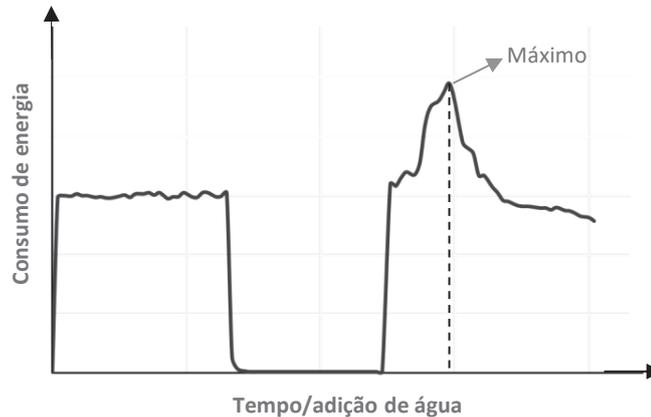
$$\% b. n. v. = \frac{\% teor}{100 - \% P. F.} \quad 3.3$$

em que % *b. n. v.* é o teor na base de não voláteis; % *teor* é o teor na base volátil; % *P. F.* é a perda ao fogo à 1000°C.

A densidade de empacotamento e a demanda de água dos materiais finos foram avaliadas pelo gasto energético para misturar a pasta (método *mixing energy*) como forma alternativa ao ensaio proposto por Wong e Kwan (WONG; KWAN, 2008), o qual impõe gasto elevado de materiais para sua realização. Um estudo comparativo entre os dois métodos de ensaio foi realizado, com o objetivo de avaliar a influência de adaptações propostas nos procedimentos, e possibilitar a determinação da densidade de empacotamento e demanda de água de forma mais rápida, precisa e com um menor consumo de materiais. O planejamento experimental realizado, assim como os resultados do estudo constam em artigo já publicado em periódico (SOTO et al., 2023) e serviram de base para a escolha do método a ser utilizado para a caracterização dos finos. O método *mixing energy*, proposto por Marquardt (MARQUARDT, 2001), baseia-se no princípio de que as ligações pendulares aumentam ao adicionar-se água aos materiais granulados, como já foi previamente discutido no item 2.2.2, Figura 2.19. Espera-se um maior consumo de energia quando o estado funicular é atingido, uma vez que a mistura atingirá maior tensão de cisalhamento devido à proximidade das partículas (FENNIS, 2011). Após este ponto, ocorre diminuição no consumo de energia devido ao aumento da camada de água em torno das partículas e, conseqüentemente, diminuição da

tensão de cisalhamento (MARQUARDT, 2001). Uma representação do resultado do consumo de energia ao longo do ensaio pode ser observada na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Representação do resultado do ensaio *mixing energy*, com aumento do consumo de energia em função da adição de água ao longo do tempo.



FONTE: A autora (2023).

O teste foi realizado em duplicata para o cimento e adições minerais (cinza volante, fíler calcário, metacaulim e sílica ativa), sendo a densidade de empacotamento calculada pela Equação 3.4, na qual Φ é a concentração de sólidos; V_s é o volume de materiais sólidos (cm^3); V_a é o volume de aditivo (cm^3) e; u_w é a relação água/materiais finos em volume, no ponto de máximo consumo de energia.

$$\Phi = \frac{V_s}{V_s + V_a + u_w} \quad 3.4$$

Para a realização do ensaio, Fennis (2008) sugere o uso de 1,5 kg de cimento e relação água/sólidos inicial de 0,176, com adição constante de água na taxa de 1,5 ml/s. Já Hunger e Brouwers (2009) indicam a utilização de adições de 10 ml de água a cada 20 segundos, devido ao atraso para homogeneização da água quando adicionada continuamente. Contudo, os estudos preliminares realizados indicaram que o uso de 1 kg de cimento reduz as chances de travamento do misturador, e a adição constante de água de 0,5 ml/s usando um dispositivo de gotejamento intravenoso melhora a precisão da detecção do ponto de consumo máximo de energia e reduz o atraso do efeito da água na reologia da mistura (SOTO et al., 2023).

A massa inicialmente proposta de material fino, de 1 kg, mostrou-se inadequada para realização do método na sílica ativa. Essa massa apresentava volume muito grande, inadequado à capacidade da cuba do misturador (ressalta-se que o estudo comparativo realizado foi feito apenas com o cimento Portland). Por esse motivo, a massa inicial de sílica ativa foi reduzida em 25%. Para os demais materiais a massa inicial de 1 kg permitiu a realização normal do ensaio.

A relação água/sólidos também foi ajustada para atender à particularidade de cada material analisado. Para o metacaulim e sílica ativa, a relação inicialmente proposta era baixa, o que acarretava tempo muito longo do ensaio. Desta forma a relação água/sólidos foi elevada para essas misturas de forma a permitir um tempo de ensaio adequado ao volume de água do reservatório do gotejador. Para o fíler calcário a relação proposta originalmente produzia uma mistura muito fluida (com excesso de água) e foi reduzida em 50%. A Tabela 3.1 apresenta resumo dos parâmetros utilizados para cada material fino.

Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados para cada material na realização do ensaio *mixing energy*.

Adição	Massa seca (kg)	Relação água/sólidos inicial (em massa)
Cimento CPV-ARI	1,00	0,176
Fíler calcário	1,00	0,088
Cinza	1,00	0,176
Metacaulim	1,00	0,264
Sílica ativa	0,75	0,606

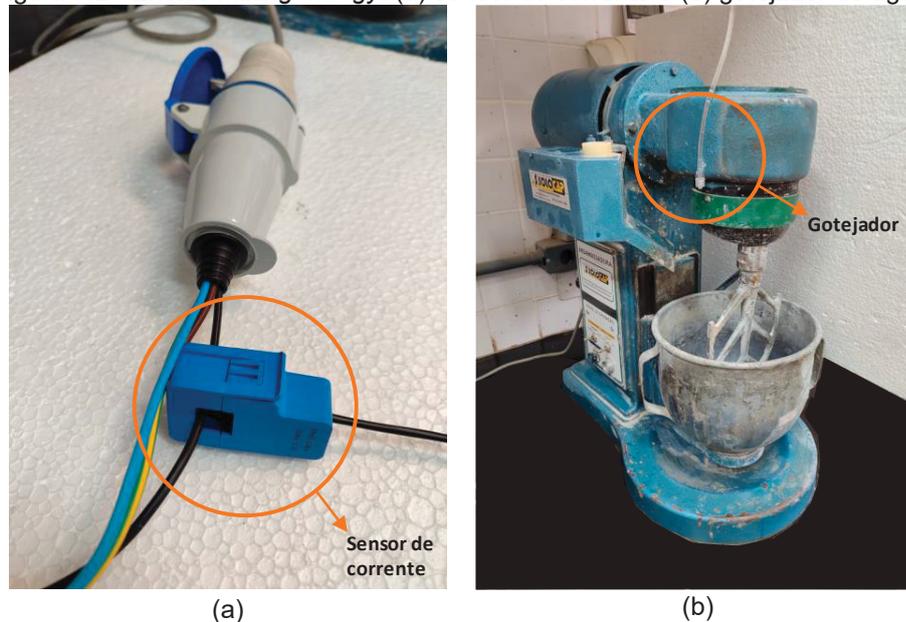
FONTE: A autora (2023).

O processo de mistura dá-se da seguinte forma: inicialmente é colocada na cuba da argamassadeira a massa total do material em estudo, a água relativa à relação água/sólidos inicial (valores dados na Tabela 3.1), e a totalidade da massa de aditivo superplastificante. A dosagem deste aditivo foi determinada conforme exposto no item 3.1.3. A argamassadeira é então ligada na velocidade baixa, e procede-se a mistura inicial durante 60 segundos, seguido de intervalo de repouso de 60 segundos. Durante esse intervalo a cuba deve ser raspada para garantir que todo material seco foi incorporado à mistura. Após o período de descanso a argamassadeira é religada em velocidade baixa, instante em que se inicia também a adição constante de água, com auxílio do gotejador. O ensaio é conduzido até que a mistura fique liquefeita, ou que se observe queda na leitura do consumo de energia.

Durante o processo de mistura, o consumo de energia do misturador foi monitorado utilizando um sistema de baixo custo, com placa de prototipagem eletrônica de fonte aberta

(Arduino Nano) com sensor de corrente SCT013 nas ligações de alimentação do misturador, como mostra a Figura 3.2(a). A potência consumida foi calculada considerando a tensão de 127V utilizada pelo motor. O uso de sensores ligados aos sistemas Arduino tem sido utilizado com sucesso em estudos sobre compósitos cimentícios recentemente publicados (BARROCA et al., 2013; FRAILE-GARCIA et al., 2017; GOUDAR et al., 2020; MORÓN et al., 2019; NALON et al., 2020; VEGA et al., 2020; YEDRA ÁLVAREZ et al., 2020). Os esquemas de configuração eletrônica e o código de programação são apresentados no Apêndice C. Na Figura 3.2(b) pode-se visualizar o gotejador fixado ao misturador, que permite a adição da água diretamente na cuba em que se está realizando a mistura.

Figura 3.2 –Ensaio *mixing energy*: (a) sensor de corrente e (b) gotejador de água.



FONTE: A autora (2023).

3.1.2 Agregados

Para a confecção do TSC foi utilizado agregado miúdo quartzoso natural de rio na composição dos grautes e agregados graúdos (brita 0 e brita 1) de origem calcária no esqueleto granular. Os agregados foram avaliados pelos ensaios de massa específica (NBR 16916 (ABNT, 2021c) e NBR 16917 (ABNT, 2021b)), massa unitária solta e compactada (NBR 16972 (ABNT, 2021a)), absorção (NBR 16917 (ABNT, 2021b) e NBR 16916 (ABNT, 2021c)), material pulverulento (NBR 16973 (ABNT, 2021d)), granulometria (NBR NM 248 (ABNT, 2003))

e densidade de empacotamento calculada (β) conforme Equação 2.8, previamente apresentada.

Para avaliação da forma dos agregados graúdos foi determinado o coeficiente de forma e índice de lamelaridade, utilizando-se o método GTEC-UFSC (WEIDMANN, 2008). Ambos parâmetros são volumétricos, ou seja, estabelecem relação entre o volume do grãos e o volume da esfera que os circunscribe, não limitados a análise bi-dimensional do formato da partícula.

O método GTEC-UFSC (WEIDMANN, 2008) utiliza processamento digital de imagens para medir a maior e menor dimensão dos grãos, mais precisa que a medição manual proposta em outros métodos. O método foi escolhido também por tratar-se de um parâmetro volumétrico, que estabelece relação entre o volume do grão e o volume da esfera que o circunscribe. Resultados de coeficiente de forma mais próximos de 1 indicam grão com formato mais arredondado, sendo que os a agregados naturais apresentam coeficiente de forma maiores do que os encontrados para agregados britados (FABRO; GAVA; GRIGOLI, 2011).

A obtenção das imagens que posteriormente fornecerão informações sobre os agregados analisados seguiu os seguintes procedimentos (WEIDMANN, 2008):

- Agregados foram lavados na peneira 0,075 mm para retirada do material fino;
- O material retido foi então peneriado, separando-se o material retido em cada peneira separado nas seguintes frações: 3,33 mm, 4,75 mm, 6,3 mm, 9,5 mm e 12,5 mm;
- De cada fração foi separada uma amostra: 200 grãos para a fração retida na peneira 3,33 mm, e 100 grãos para as demais frações;
- Determinou-se a massa de cada amostra e os grãos correspondentes foram dispostos sobre a placa de vidro do scanner para digitalização, evitando contato direto entre eles. Juntamente aos grãos é também digitalizada uma escala métrica;
- Posicionou-se uma caixa escura ao redor do scanner, de forma a conferir o maior contraste possível entre o fundo da imagens e a amosta analisada, e foi realizada a aquisição das imagens, com resolução mínima de 1000 dpi;

- As imagens foram então processadas em programa de análise de imagens, de onde se obtiveram as propriedades geométricas de cada grão (área de projeção e dimensões).

Após a obtenção dos dados necessários, é possível calcular o coeficiente de forma de cada fração, baseado na normativa XP P18-540 (AFNOR, 1997) conforme equação 3.5.

$$c_{f_{\text{fração}}} = \frac{m_{\text{fração}}}{\frac{\pi}{6} \cdot \sum L^3} \quad 3.5$$

em que $m_{\text{fração}}$ é a massa de todos os grãos contidos na imagem (g); $d_{\text{fração}}$ é a massa específica da fração analisada (g/cm^3) e L é maior dimensão de cada grão (cm).

Para o cálculo do coeficiente de forma do agregado, utiliza-se a equação 3.6.

$$c_{f_{\text{agregado}}} = \frac{\sum (c_{f_{\text{fração } i}} * \%ret_{\text{ da fração } i})}{\sum \text{ das } \%ret} \quad 3.6$$

em que $\%ret$ é a percentagem retida da fração na peneira. O índice de lamelaridade, proposto por Mora, Kwan e Chan (1998), é um parâmetro que estima a espessura média das partículas, e é obtido pela equação 3.7.

$$\lambda = \frac{m}{\rho \sum (L \cdot A)} \quad 3.7$$

em que λ o índice de lamelaridade, m é a massa total da amostra de agregados analisada (g); ρ é a massa específica do agregado analisado (g/cm^3); L é maior dimensão de cada grão (cm) e A corresponde à área projetada de cada grão (cm^2).

O método propõe que a espessura da partícula de agregado pode ser obtida a partir da equação 3.8.

$$\text{espessura média da partícula} = \lambda \cdot \text{largura da partícula} \quad 3.8$$

3.1.3 Aditivo

Para o ajuste da consistência dos grautes foi utilizado superplastificante químico de terceira geração, composto por polímeros de éter carboxílico modificados (MC-Bauchemie, PowerFlow4001). O aditivo químico cumpre os requisitos da NBR 11768-1(ABNT, 2019) e apresenta massa específica de $1,12 \text{ g/cm}^3$. Conforme comentado no item 2.1.2.2.3, as gerações mais recentes de aditivos superplastificantes tem se mostrado eficientes para a produção de grautes adequados para produção de TSC e, por esse motivo, não foi utilizado aditivo expensor.

O ponto de saturação do aditivo superplastificante foi determinado pelo método de Kantro (WEDDING; KANTRO, 1980) em pasta de cimento Portland, utilizando CPV-ARI. Durante os testes, a relação água/aglomerante (a/agl) foi mantida constante em 0,3, e os teores de aditivo testados foram de 0,25%, 0,5%, 0,75%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5% e 3,0% (em relação à massa de cimento). O ponto de saturação foi atingido no ponto em que houve constância do diâmetro de espalhamento do material.

3.2 ETAPA I - DESENVOLVIMENTO DO GRAUTE

Na primeira etapa deste trabalho diferentes composições para grautes foram desenvolvidas com base no modelo de empacotamento CPM (DE LARRARD, 1999), considerando a capacidade de combinação química das adições minerais com o teor remanescente de portlandita produzida na hidratação do cimento Portland. Ao final deste item apresenta-se uma tabela resumo do planejamento experimental da Etapa I (Tabela 3.3), onde constam as informações dos ensaios realizados e total de amostras produzidas.

3.2.1 Planejamento experimental dos grautes

Para a definição da composição dos grautes foi utilizado o modelo de empacotamento de partículas COM (DE LARRARD, 1999), que tem como dados de entrada o diâmetro médio de cada classe de tamanho de partícula (d_i), a densidade de empacotamento de cada classe (β_i), e a proporção volumétrica de cada classe (y_i) conforme Equação 2.6 previamente

apresentada. O diâmetro médio e a densidade de empacotamento de cada classe (considerou-se que cada material fino compunha uma classe de tamanho de grãos, representada por seu diâmetro médio) foram determinados experimentalmente, conforme consta no item 3.1 deste trabalho.

Foram desenvolvidas 4 diferentes composições para o graute: uma delas conta com a presença de areia, cimento e fíler calcário. As demais composições, além destes 3 componentes, continham também uma adição mineral ativa, conforme apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Materiais presentes em cada composição estudada para graute.

Composição	Areia	Cimento	Fíler calcário	Cinza volante	Metacaulim	Sílica ativa
CP	x	x	x			
CV	x	x	x	x		
MK	x	x	x		x	
SA	x	x	x			x

FONTE: A autora (2023).

Como o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de TSC ecoeficiente, com diminuição do uso de cimento, as misturas foram desenvolvidas para máxima utilização possível das adições minerais ativas considerando o teor de hidróxido de cálcio disponível no cimento Portland CPV-ARI após 91 dias. Com esse teor, determinado pelo ensaio de termogravimetria (ATG), e a capacidade de combinação química das adições minerais, determinada pelo ensaio Chapelle modificado, é possível calcular o teor máximo de adição em relação à massa de cimento possível de se adicionar às misturas para que haja portlandita suficiente para as reações. Este é um ponto importante de se considerar para o uso eficiente das adições minerais ativas, para evitar que tenham um papel exclusivamente de enchimento nas misturas, sem ação química, já que tem sido reportado na literatura recente (Figura 1.4) que algumas delas vêm se tornando escassas (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018).

A Equação 3.9 permite o cálculo do teor máximo de adição mineral pozolânica em relação à massa de cimento (*%AM adicionada*), e a Equação 3.10 calcula o teor máximo de adição em substituição ao cimento (*%AM substituição*). A dedução das equações pode ser encontrada no Apêndice D. As equações se diferem porque a retirada de parte do cimento (substituição por uma adição mineral) irá gerar uma redução proporcional no teor de Portlandita disponível na mistura (CAMPOS; KLEIN; MARQUES FILHO, 2020a; MACIOSKI et al., 2016).

$$\%AM \text{ adicionada} = \frac{\% \text{ Portlandita}}{\text{Chapelle (g/g)}} \quad 3.9$$

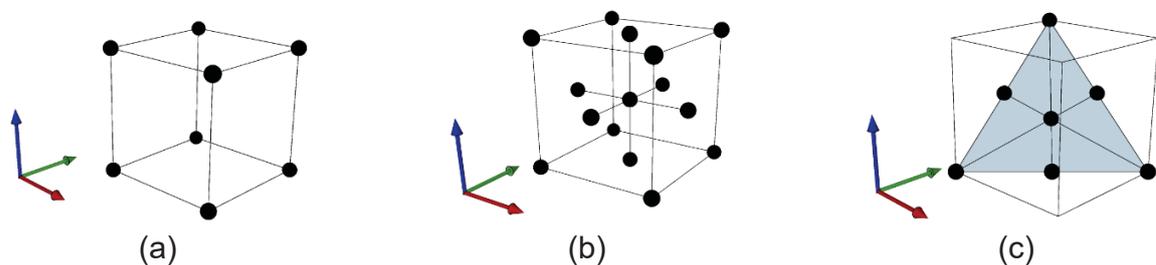
$$\%AM \text{ substituição} = \frac{\% \text{ Portlandita}}{\text{Chapelle (g/g)} + \% \text{ Portlandita}} \quad 3.10$$

em que $\% \text{ Portlandita}$ é o teor de Ca(OH)_2 produzido pelas reações de hidratação do cimento Portland (%) e Chapelle (g/g) é o valor obtido no ensaio Chapelle modificado ($\text{g Ca(OH)}_2/\text{g}$ adição mineral ativa).

Desta forma, o teor das adições minerais ativas nos grautes foi fixada com base no teor máximo de adição, conforme calculado pela equação 3.10. Assim, para cada composição foi estabelecida a relação entre cimento e adição mineral ativa. Os fatores: areia, fíler calcário e aglomerantes foram variados de forma a atingir a maior densidade de empacotamento no modelo CPM.

O alto número possível de combinações de serem calculadas torna os experimentos inviáveis economicamente, visto que os custos e o tempo de execução são elevados (GALDAMEZ; CARPINETTI, 2004). Devido a esse fato, optou-se por utilizar o Design de Experimentos (DoE), que é uma abordagem estatística utilizada para a otimização do processo e que permite a variação de diferentes fatores ao mesmo tempo, com o objetivo de otimizar misturas e verificar interações nas amostras (MONTGOMERY, 2017). Alguns destes modelos podem ser observados na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Modelos de planejamento experimentais: (a) planejamento fatorial 3^2 ; (b) Planejamento composto de face centrada e; (c) Planejamento Simplex.



FONTE: A autora (2023).

De acordo com Neto, Scarminio e Bruns (2010) no planejamento fatorial de “k” fatores (Figura 3.3(a)) são avaliadas todas as possíveis combinações dos níveis entre os fatores. A lista dessas combinações é chamada de matriz de planejamento, que ainda pode ser expandida com pontos ao redor do centro do planejamento (planejamento composto) (Figura

3.3(b)). Contudo, estes modelos geram um número elevado de amostras quando existem muitos fatores e níveis a serem considerados. Para otimização de misturas, no qual a soma dos fatores deve ser igual a 100%, o ideal é a utilização do planejamento simplex (Figura 3.3(c)). Para uma mistura entre 2 fatores o simplex será uma linha, e para misturas entre 3 fatores, como o caso do presente estudo, o simplex será um triângulo equilátero (CORNELL, 2011; SANTANA, 2022).

Desta forma, utilizou-se a metodologia de modelagem numérico experimental rede Simplex com 3 fatores para simular as diversas combinações possíveis entre os materiais constantes na Tabela 3.2. Utilizou-se neste planejamento combinações em vértice e centrais, totalizando 10 composições na matriz de planejamento.

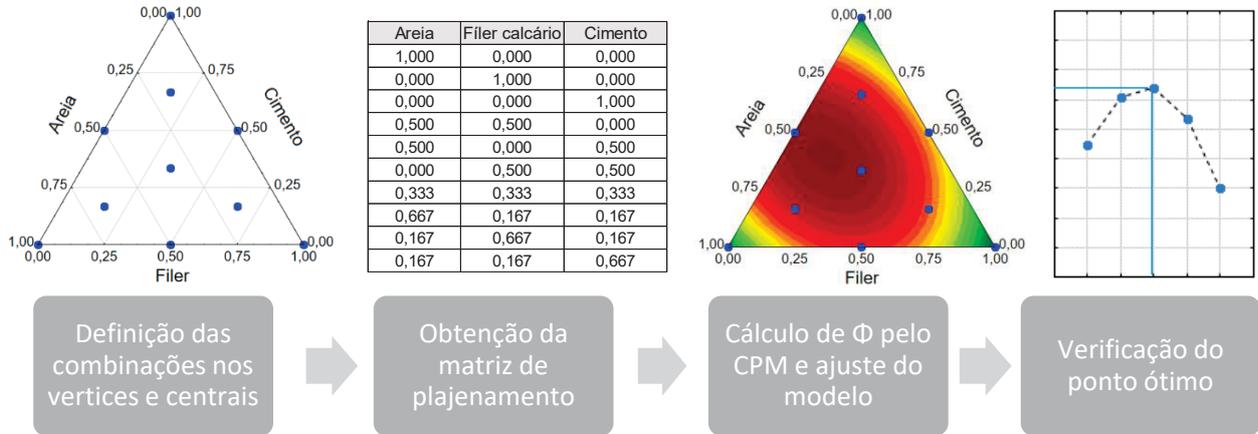
As composições constantes na matriz de planejamento foram então aplicadas ao modelo CPM para o cálculo da densidade de empacotamento real. Foi adotado o coeficiente de compactação $K=12,2$, conforme proposto por Fennis (2011).

A partir dos resultados de densidade de empacotamento real obtidos para o conjunto composições, são estabelecidos modelos matemáticos de regressão polinomial entre as variáveis e a resposta, de forma que respostas podem ser previstas para qualquer outra composição desejada dentro do domínio válido para o modelo proposto (MONTGOMERY, 2017; SANTANA, 2022; SCHEFFÉ, 1958). Para a determinação e ajuste da superfície de resposta foram analisados dois modelos numéricos: linear e quadrático.

Ao realizar os cálculos do modelo, pode-se observar que o ajuste aos dados do modelo linear não foi satisfatório, havendo então necessidade de aumentar o grau do modelo, uma vez que os modelos de empacotamento como o CPM costumam apresentar comportamento não linear para a máxima densidade de empacotamento. O ajuste aos dados utilizando o modelo quadrático resultou em uma melhora considerável no ajuste do modelo, apresentando correlação satisfatório. Este foi então o modelo utilizado para a determinação da superfície de resposta.

A partir da superfície de resposta gerada foi possível encontrar o ponto ótimo do sistema (funções *Desirability*). As proporções entre os materiais que resultaram no ponto ótimo foram aplicadas ao modelo CPM; para cálculo do erro e validação do modelo utilizado. O procedimento de análise pode ser mais bem visualizado na Figura 3.4.

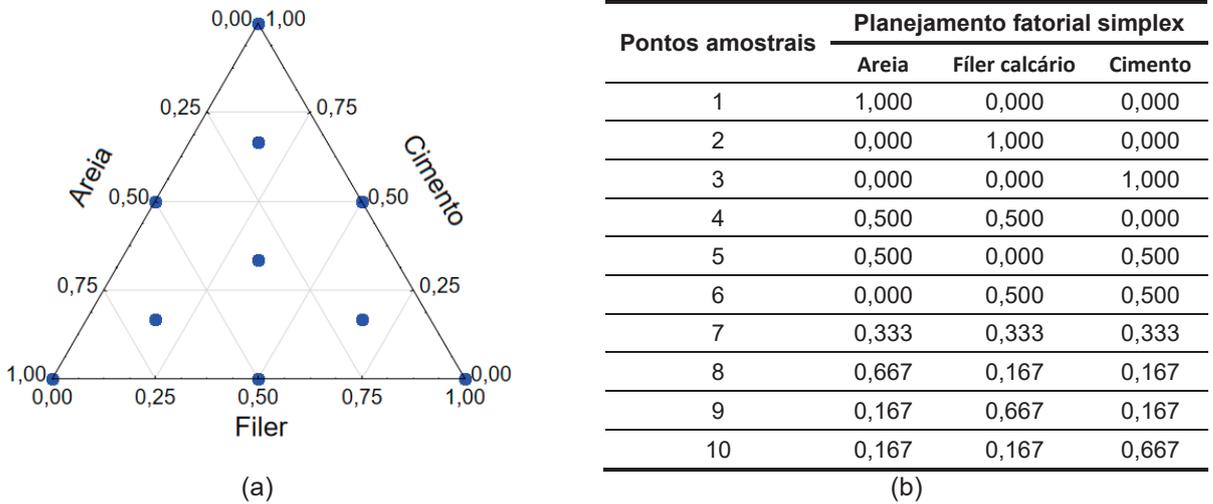
Figura 3.4 – Processo de análise do planejamento experimental.



FONTE: A autora (2023).

De acordo com o apresentado previamente na Tabela 3.2, foi primeiramente estudada a composição CP, que conta com a presença apenas de areia, fíler calcário e cimento Portland. Primeiramente foram determinados pelo planejamento experimental simplex combinações nos vértices e centrais, que resultaram na matriz de planejamento (Figura 3.5(a) e (b)).

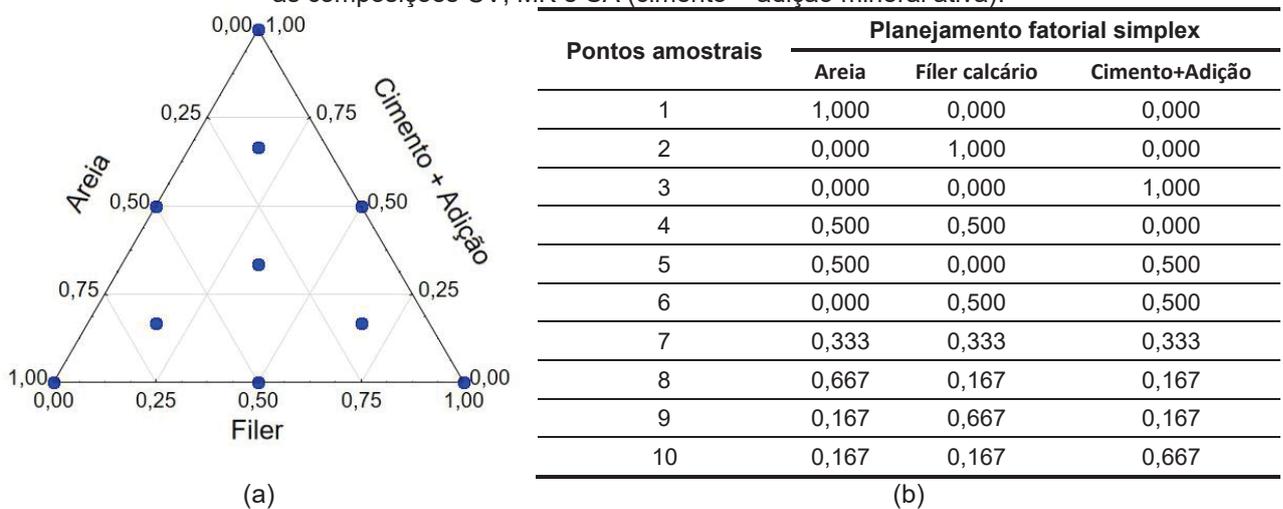
Figura 3.5 – Planejamento Simplex – (a) combinações nos vértices e centrais e (b) matriz de planejamento para a composição CP.



FONTE: A autora (2023).

De forma semelhante, foram definidos combinações nos vértices e centrais e a matriz de planejamento, apresentados na Figura 3.6, para cada uma das composições contendo adição mineral ativa constantes na Tabela 3.2.

Figura 3.6 – Planejamento Simplex – (a) combinações nos vértices e centrais e (b) matriz de planejamento para as composições CV, MK e SA (cimento + adição mineral ativa).



FONTE: A autora (2023).

Cada uma das 10 combinações de areia, fíler e (cimento + adição mineral ativa) das matrizes experimentais das composições (CP, CV, MK e AS) foram aplicadas ao CPM para cálculo da densidade de empacotamento real, e os resultados foram representados na forma de superfícies de resposta, que serão apresentadas e analisadas no item 4.2.2.

3.2.2 Caracterização dos grautes

Após definidas pelo modelo analítico CPM as proporções entre os materiais, o ensaio *mixing energy* foi realizado novamente para a determinação da demanda de água e validação experimental da densidade de empacotamento teórica obtida para cada graute. Esta determinação permite a estimativa da relação a/agl mínima para cada composição, ou seja, aquela na qual a concentração de sólidos é máxima. Cada composição foi então avaliada com a demanda de água determinada pelo ensaio *mixing energy*, conforme descrito por Soto et al. (2023).

Ainda no estado fresco, para determinar o tempo de início de pega, os grautes foram avaliados pelo método semi-adiabático (calorimetria), que consiste em determinar a variação de temperatura proveniente das reações de hidratação em função do tempo. A aplicação do método foi baseada na normativa RILEM TC 119-TCE (RILEM, 1997). Para aquisição de dados foi utilizado interrogador ótico SM-125 em conjunto com sensor ótico FBG operando em 1550 nm.

Amostras prismáticas de (40x40x160) mm foram moldadas e posteriormente curadas em tanque de imersão com água saturada de cal conforme NBR 13279 (ABNT, 2005). Seis amostras de cada composição foram submetidas ao ensaio de resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial, conforme procedimentos descritos na NBR 13279 (ABNT, 2005). Também foram realizados ensaios em triplicada de massa específica, absorção de água e índice de vazios conforme NBR 9778 (ABNT, 2009b).

As amostras de graute foram submetidas também à análise termogravimétrica, nas mesmas condições de ensaio da avaliação do cimento Portland (item 3.1.1). Para a realização do ensaio, as amostras de graute foram curadas por imersão em água saturada com cal por 91 dias. Após a cura, as amostras foram submersas em álcool isopropílico P.A. por 24 horas e secas a 40°C até constância de massa (HOPPE FILHO et al., 2021). Para realização do ensaio, a amostra foi previamente moída e peneirada em malha 75 µm. Os grautes foram analisados ainda em termos de ecoeficiência através de dois índices: o índice de eficiência do cimento (IC), definido pela relação entre o consumo de cimento e a resistência à compressão, conforme equação 2.1; e do índice de emissão de CO₂, que relaciona as emissões de CO₂, apresentadas na Tabela 1.2, necessárias para obtenção de 1 MPa de resistência à compressão, conforme apresentado na equação 3.11.

$$IC_{CO_2} = \frac{c}{f_c} \quad 3.11$$

em que IC_{CO_2} é o índice de emissão de CO₂, em kg CO₂/m³.MPa, c é o total de emissões de CO₂, em kg/m³, e f_c é a resistência à compressão, em MPa.

Baseado no desempenho mecânico e ecoeficiência das misturas, uma composição foi escolhida para ser avaliada em conjunto com o esqueleto granular para produção do TSC. Na Tabela 3.3 pode-se observar um resumo do planejamento experimental da Etapa I.

Tabela 3.3 – Tabela resumo dos ensaios da Etapa I.

Ensaio	Normativa	Composição	Nº de amostras	Idade	Dimensão CP's
Densidade de empacotamento e demanda de água	Equação 3.4	CP	3	Estado fresco	-
		CV	3		
		MK	3		
		SA	3		
Calorimetria	RILEM TC 119-TCE (RILEM, 1997)	CP	1	Estado fresco	-
		CV	1		
		MK	1		
		SA	1		
Termogravimetria	-	CP	1	91 dias	40x40x160 mm
		CV	1		
		MK	1		
		SA	1		
Massa específica (g/cm³)	NBR 9778 (ABNT, 2009b)	CP	3	28 dias	40x40x160 mm
		CV	3		
		MK	3		
		SA	3		
Resistência à tração na flexão (MPa)	NBR 13279 (ABNT, 2005)	CP	6	28 e 91 dias	40x40x160 mm
		CV	6		
		MK	6		
		SA	6		
Resistência à compressão (MPa)	NBR 13279 (ABNT, 2005)	CP	12	28 e 91 dias	40x40x160 mm
		CV	12		
		MK	12		
		SA	12		
Total de CP's produzidos para a Etapa I				104	

FONTE: A autora (2023).

3.3 ETAPA II – ESQUELETO GRANULAR E AJUSTE DE FLUIDEZ DO GRAUTE

Na segunda etapa deste trabalho foram desenvolvidos e avaliados esqueletos granulares otimizados (agregado graúdo) por técnicas de empacotamento de partículas, bem como foi realizado o ajuste da fluidez do graute selecionado na Etapa I. Foram analisadas a influência da dimensão e forma das partículas e do índice de vazios dos agregados graúdos na capacidade de penetração do graute nos vazios do esqueleto granular. Ao final deste item será apresentada uma tabela resumo (Tabela 3.4) do planejamento experimental da Etapa II, onde constam as informações dos ensaios realizados e total de amostras produzidas.

3.3.1 Definição e caracterização do esqueleto granular

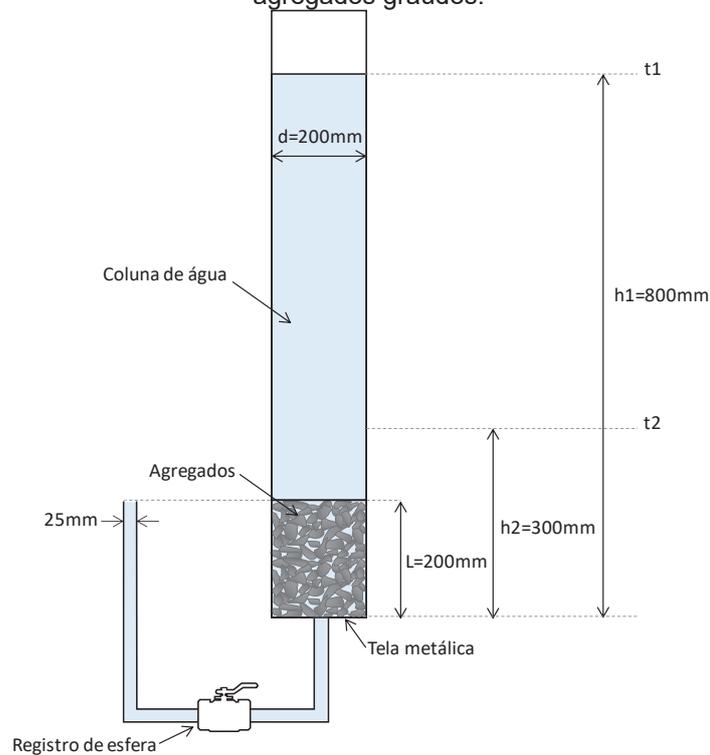
Para a produção dos TSCs, três esqueletos granulares foram propostos para compreender suas propriedades físicas e sua interação com o graute. Conforme já discutido

no item 2.1.2.1, ainda que as normativas existentes indiquem a utilização de agregados de diâmetro elevado e distribuições contínuas ou uniformes (Figura 2.4, Figura 2.5 e Figura 2.6), um alto empacotamento dos agregados graúdos e o uso de diâmetros menores possibilitariam um menor consumo de grante e, conseqüentemente, menor consumo de cimento. Assim, com a otimização do esqueleto granular associado ao uso de superplastificantes de terceira geração, seria possível viabilizar a produção de TSC com baixo consumo de cimento utilizando agregados disponíveis comercialmente no Brasil.

Para isso, misturas de brita 0 e brita 1 em teores variando em 5% foram avaliadas pelo ensaio de massa unitária, conforme orientações da NBR 16972 (ABNT, 2021a), utilizando o método C, que considera a determinação da massa unitária do material no estado solto, com 3 repetições para cada combinação. Esse método foi escolhido pois, ao se colocar os agregados na forma para produção do TSC, não é realizada nenhuma ação de compactação, sendo o estado solto o que mais se assemelha à forma como o agregado será utilizado. A densidade de empacotamento das composições foi determinada segundo a equação 2.8, previamente apresentada.

O TSC foi produzido com 3 diferentes esqueletos granulares, sendo eles compostos de: 100% de brita 0, 100% de brita 1 e, a partir dos resultados do ensaio descrito no parágrafo anterior, foi escolhida a combinação de maior massa unitária. Os esqueletos granulares selecionados também foram analisados através do ensaio de permeabilidade, utilizando o método de carga variável. Este método, aplicado na avaliação de concretos permeáveis, foi baseado no trabalho de Olek et al. (2003), e adaptado neste trabalho para aplicação em agregados, como apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Configuração do ensaio de permeabilidade pelo método de carga variável, adaptado para agregados graúdos.



FONTE: Adaptado de Olek et al. (2003).

O método de ensaio consiste na colocação da mistura de agregados saturados dentro de tubo com diâmetro interno de 200 mm, até altura (L) de 200 mm. Segundo Jones e Jones (1989) as laterais do permeâmetro afetam o empacotamento dos agregados, criando uma área de maior permeabilidade que pode levar a resultados inconsistentes. Para reduzir esse efeito os autores sugerem que a razão entre diâmetro do tubo do permeâmetro e do agregado seja de 8 a 12. Desta forma optou-se por utilizar diâmetro de 200 mm, 10 vezes maior que a partícula de maior diâmetro (19 mm). Os agregados ficam apoiados em uma tela plástica com abertura de 0,5 mm, e o restante do tubo, com comprimento de 900 mm acima dos agregados, é usado para formar um reservatório sobre a amostra. A tubulação de saída possuía conexões de 25mm e foi utilizado um registro de esfera para acionamento do fluxo de água.

Para realização do ensaio é adicionada água no tubo, que percola pela amostra e atravessa os tubos até a saída. Durante o ensaio, é medido o tempo que a coluna de água demora a percolar entre dois pontos da coluna de água – conforme ilustrado na Figura 3.7, foi utilizado no presente estudo $h_1=800\text{ mm}$ e $h_2=300\text{ mm}$. Para isso é realizada a gravação em vídeo do ensaio, e os pontos são determinados com uso de um nível de mangueira, fixado externamente ao tubo. Um registro de esfera é utilizado para controlar o início e o final do fluxo

de água. Com estes dados foi calculado o coeficiente de permeabilidade pela lei de Darcy (MONTES; HASELBACH, 2006), em triplicata, pela Equação 3.12 conforme NBR 14545 (ABNT, 2021e).

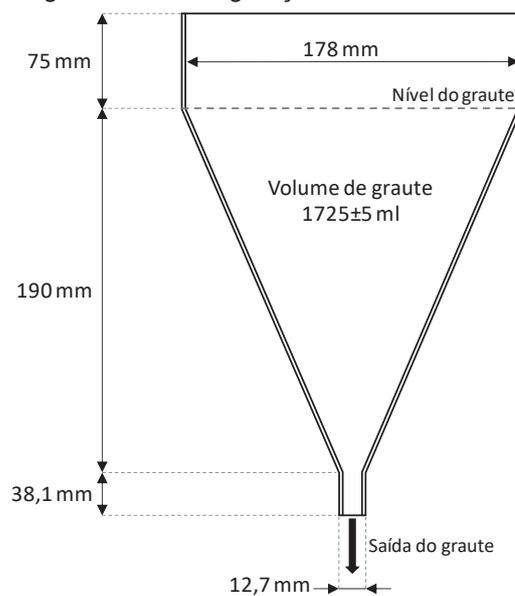
$$k = \frac{A_1 L}{A_2 t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad 3.12$$

em que k é o coeficiente de permeabilidade (cm/s); A_1 é a área da seção transversal do tubo de diâmetro d com a carga hidráulica (cm²); L é a altura da amostra cilíndrica (cm); A_2 é a área da seção transversal da amostra (cm²) do tubo com diâmetro d ; t é o tempo decorrido de escoamento entre h_1 e h_2 (s); h_1 é a altura inicial da lamina d'água (cm); e h_2 é a altura final da lamina d'água (cm).

3.3.2 Ajuste da fluidez dos grautes

O graute mais ecoeficiente desenvolvido na ETAPA I desta tese foi avaliado por meio do ensaio de fluidez. A ACI 304 (ACI, 1997) indica que grautes para TSC devem ser avaliados pelo ensaio de fluidez descrito na ASTM C939 (ASTM, 2010), que utiliza funil com saída de Ø12,7 mm e volume total de 1725 ml, conforme ilustrado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Configuração do ensaio de fluidez do graute.



FONTE: Adaptado da ASTM C939 (ASTM, 2010).

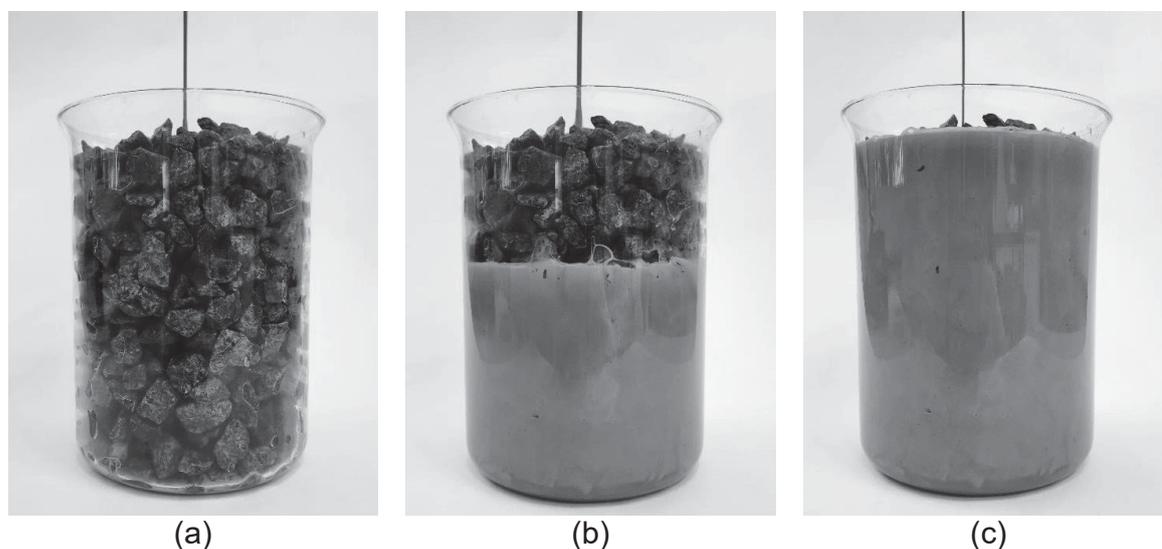
O objetivo do ensaio é encontrar relações água/aglomerante para que o graute atinja tempos de escoamento de 18, 21 e 35 segundos. Os tempos de escoamento foram estabelecidos de acordo com a norma ACI 304 (ACI, 1997), que preconiza tempos de 18 a 26 segundos para grandes construções, 21 ± 2 segundos para obras convencionais, e 35 a 40 segundos para construções de maior controle tecnológico e maiores necessidades de resistência. Ainda no estado fresco, foi realizado o ensaio de exsudação conforme NBR 7681-3 (ABNT, 2013).

Desta forma, foram obtidos grautes de mesma composição de materiais finos e 3 diferentes relações a/agl , determinadas experimentalmente. Estas composições foram então avaliadas pelo ensaio de compressão axial aos 28 dias em 6 amostras prismáticas de (40x40x160) mm seguindo os procedimentos da NBR 13279 (ABNT, 2005).

3.3.3 Penetração dos grautes no esqueleto granular e moldagem das amostras

Os grautes com 3 diferentes relações água/aglomerantes foram aplicados nos 3 esqueletos granulares desenvolvidos, tendo sido a brita colocada nas formas na condição saturada superfície seca (SSS). A moldagem foi realizada por meio do método por gravidade, com a colocação do graute acontecendo pelo topo do corpo de prova. A Figura 3.9. apresenta o processo de aplicação do graute por gravidade sobre o esqueleto granular B1, em um Becker de vidro de 2L, para ilustrar do preenchimento dos vazios pelo graute ao longo do tempo. As amostras foram desmoldadas após 24 h e seguiram para cura em tanque de imersão saturada de cal até a idade dos ensaios. Na Tabela 3.4 pode-se observar um resumo do planejamento experimental da Etapa II.

Figura 3.9 – Processo de moldagem dos corpos de prova de TSC: (a) agregados pré colocados; (b) início do grauteamento e; (c) esqueleto granular preenchido por graute.



FONTE: A autora (2023).

Tabela 3.4 – Tabela resumo dos ensaios da Etapa II.

Ensaio	Normativa	Composição	Nº de amostras	Idade	Dimensão CP's
Densidade de empacotamento (β)	NBR 16972 (ABNT, 2021a)	Misturas de B0 e B1 em teores de 5%	3	-	-
Permeabilidade à água (cm/s)	Eq. 3.12	EG01	3	-	-
		EG02	3		
		EG03	3		
Fluidez (s)	ASTM C939 (ASTM, 2010)	GR18 s	3	Estado fresco	-
		GR21 s	3		
		GR35 s	3		
Exsudação (%)	NBR 7681-3 (ABNT, 2013)	GR18 s	3	Estado fresco	-
		GR21 s	3		
		GR35 s	3		
Total de CP's produzidos para a Etapa II					30

FONTE: A autora (2023).

3.4 ETAPA III – PROPRIEDADES DO TSC

A partir dos resultados obtidos na Etapa II foi possível avaliar o desempenho da combinação entre os diferentes grautes e os esqueletos granulares, bem como avaliar os efeitos da relação a/agl e do esqueleto granular na resistência mecânica dos TSCs produzidos. Assim, foi possível selecionar o concreto baseado no desempenho e ecoeficiência

dos traços estudados. A partir disso, nesta Etapa III, as propriedades no estado endurecido e parâmetros de ecoeficiência deste TSC foram determinadas. Ao final deste item será apresentada uma tabela resumo do planejamento experimental da Etapa III (Tabela 3.5), onde constam as informações dos ensaios realizados e total de amostras produzidas.

3.4.1 Caracterização dos grautes e TSCs

Os concretos produzidos foram avaliados pelos ensaios de resistência à compressão axial segundo NBR 5739 (ABNT, 2018b), resistividade elétrica superficial seguindo orientações da UNE 83988-2 (AENC, 2014), absorção de água, índice de vazios e massa específica, conforme orientações da NBR 9778 (ABNT, 2009b). Foi realizada também inspeção visual da superfície dos corpos de prova, a fim de se avaliar os vazios relacionados a falhas de concretagem. Ainda com objetivo de avaliar a qualidade dos CPs, um corpo de prova cilíndrico de (100x200) mm de cada traço foi cortado ao meio verticalmente e foi realizada inspeção visual. Foram avaliados ainda o consumo de materiais dos traços finais obtidos para os concretos, bem como parâmetros de eficiência como o índice de eficiência do cimento (*IC*) (GRAZIA et al., 2019; LI et al., 2019) e índice de emissão de CO₂ (*ICO₂*).

Para avaliação da resistividade elétrica superficial (RES), tanto dos grautes como dos concretos, foi utilizado o método dos quatro pontos, ou método de Wenner. A RES é um parâmetro indicativo da mobilidade iônica na solução dos poros dos compósitos cimentícios, e é utilizada como parâmetro de durabilidade uma vez que pode ser relacionada à tortuosidade e porosidade de compósitos (ARAUJO; MACIOSKI; MEDEIROS, 2022; AZARSA; GUPTA, 2017; MENDES; MEDEIROS-JUNIOR; MUNHOS, 2019). Neste ensaio, baseado na normativa espanhola UNE 83988-2 (AENC, 2014), a resistividade elétrica superficial da amostra foi obtida por meio da medição da voltagem resultante da indução de uma corrente conhecida no corpo de prova. Para realização do ensaio foi utilizada sonda Wenner (marca Proceq, Resipod), com espaçamento entre os eletrodos de 50 mm, frequência de 40Hz e corrente variando entre 10-200 µA. As amostras permaneceram em câmara úmida até o momento da leitura, garantindo assim a condição saturada das amostras. O valor apresentado é resultante da média de 4 leituras realizadas em 6 corpos de prova de cada composição. De acordo com a UNE 83988-2 (AENC, 2014) é necessária a aplicação de fatores de correção aos resultados das leituras de acordo com a geometria das amostras. Para os corpos de prova de TSC cilíndricos de

(100x200) mm foi utilizado o valor de correção proposto na norma de 0,606. A norma não apresenta valores para correção de leituras feitas em argamassas e grautes e, por esse motivo, os dados de RES dos grautes apresentados nesse trabalho serão os valores sem correção, a serem utilizados como forma de comparação entre as misturas. As medições de RES foram realizadas nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias.

Aos 28 dias foi realizada inspeção visual da superfície dos corpos de prova de forma a avaliar vazios relacionados a falhas de concretagem. Ainda com objetivo de avaliar o processo de grauteamento, um corpo de prova cilíndrico de (100x200) mm de cada traço foi cortado ao meio verticalmente e foi realizada inspeção visual. Foram realizados também os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica, conforme orientações da NBR 9778 (ABNT, 2009b).

Por fim, também aos 28 dias, 6 corpos de prova cilíndricos de (100x200) mm foram avaliados pelo ensaio de compressão axial após retificação do topo das amostras. Os ensaios foram executados em prensa hidráulica (FORTEST, 100 tF), com procedimentos realizados conforme preconiza NBR 5739 (ABNT, 2018b). Os traços foram analisados ainda em termos de ecoeficiência, considerando o índice de emissão de CO₂ (IC_{CO_2}) e o índice de eficiência do cimento (IC), de forma semelhante à avaliação realizada nos grautes.

Para a Etapa III também foram elaborados dois diferentes traços de concreto para serem produzidos de forma convencional (CC). O primeiro foi produzido com o mesmo consumo de materiais do TSC selecionado da etapa anterior, alterando-se apenas a forma de produção, que seguiu os procedimentos prescritos na NBR 12821 (ABNT, 2009c). Esta composição foi planejada de forma a se verificar o impacto da falta de argamassa e da alteração no método de moldagem no desempenho do concreto com a mesma composição do TSC.

Foi produzido também um segundo CC, alterando-se a proporção entre os agregados graúdos e o graute. Para isso, iniciou com o traço do TSC obtido ao final da ETAPA II, e foram realizados os acréscimos sucessivos do mesmo graute na mistura de concreto, até atingir o teor de argamassa na mistura que permitisse a ocupação dos vazios do agregado graúdo, mantendo-se, assim, a mesma relação a/agl . Através de observações visuais, manuseio da colher de pedreiro, verificação do aspecto de trabalhabilidade e acabamento e ensaio *slump* foi determinado a proporção ótima entre esqueleto granular e graute. Esta análise foi feita de modo similar à determinação do teor ótimo de argamassa proposto no método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992). A moldagem dos corpos de prova de ambos CCs foi realizada

conforme orientações da NBR 5738 (ABNT, 2015). As amostras foram desmoldadas após 24 h e seguiram para cura em tanque de imersão saturada de cal até a idade dos ensaios. Na Tabela 3.5 pode-se observar um resumo do planejamento experimental da Etapa III.

Tabela 3.5 – Tabela resumo dos ensaios da Etapa II.

Ensaio	Normativa	Composição	Nº de amostras	Idade	Dimensão CP's
Resistividade elétrica superficial ($k\Omega.cm$) - Graute	UNE 83988-2 (AENC, 2014)	GR18 s	6	7, 14, 21 e 28 dias	(40x40x160) mm
		GR21 s	6		
		GR35 s	6		
Resistência à compressão (MPa) - Graute	NBR 13279 (ABNT, 2005)	GR18 s	6	28 e 90 dias	(40x40x160) mm
		GR21 s	6		
		GR35 s	6		
Análise visual superficial	-	9 combinações TSC	6	28 dias	(100x200) mm
Análise visual do interior dos corpos de prova	-	9 combinações TSC	1	28 dias	(100x200) mm
Absorção de água, índice de vazios e massa específica (%)	NBR 9778 (ABNT, 2009b)	9 combinações TSC	3	28 dias	(100x200) mm
Resistividade elétrica superficial ($k\Omega.cm$) - TSC	UNE 83988-2 (AENC, 2014)	9 combinações TSC	6	7, 14, 21 e 28 dias	(100x200) mm
Resistência à compressão (MPa) - TSC	NBR 5739 (ABNT, 2018b).	9 combinações TSC	6	28 dias	(100x200) mm
Total de CP's produzidos para a Etapa II					58

FONTE: A autora (2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DOS MATERIAIS UTILIZADOS

4.1.1 Cimento Portland

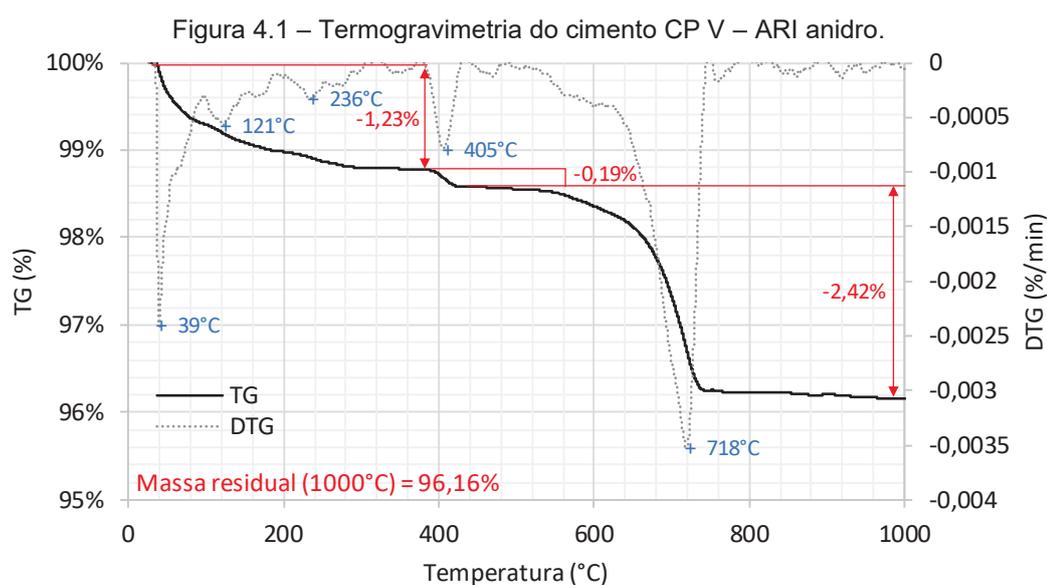
Os resultados de caracterização do cimento são apresentados na Tabela 4.1, obtidos diretamente com o fabricante. A partir dos resultados apresentados é possível afirmar que o cimento atende aos requisitos físicos e químicos da NBR 16697 (ABNT, 2018a). A Figura 4.1, por sua vez, apresenta o resultado da análise termogravimétrica do cimento anidro.

Tabela 4.1 – Composição química e características físicas do cimento.

Composição Química									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	CaO l.	P. Fogo	R. Ins.	Eq. Alc.
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
61,57	19,08	4,38	3,15	3,08	2,97	0,95	3,58	0,77	0,66

Características físicas										
Exp. Quente	Tempo de pega		Cons. Normal	Blaine	#200	#325	Massa específica	Resistencia à compressão (MPa)		
	Início	Fim						1 dia	7 dias	28 dias
0,05	203	248	30,1	4,443	0,10	0,44	3,09	24,3	46,3	54,6

FONTE: Autor (composição química) e dados fornecidos pelo fabricante (demais).



FONTE: A autora (2023).

Na análise termogravimétrica do cimento anidro é possível observar três principais faixas de perda de massa. A primeira, compreendida até 375°C, refere-se à água livre no sistema (umidade) e decomposição do C-S-H, gipsita (bassanita) e etringita. Ainda que se trate de uma amostra de cimento anidro, ele pode apresentar baixo grau de hidratação devido à absorção de umidade atmosférica, fato que justifica a presença de fases hidratadas em baixo teor.

A segunda faixa, próxima à 405°C, apresenta perda de massa bem definida relativa à decomposição da portlandita, quantificada pela Equação 3.1 em 0,78% (0,81% na base de não voláteis). Este teor está associado à hidratação parcial da cal livre (quantificada em 0,95% pelo ensaio químico) e da hidratação parcial das fases silicato (alita e belita) com formação de hidróxido de cálcio – que ocorreu durante a estocagem do material.

Na terceira faixa, próxima à 718°C, ocorre a decomposição do carbonato de cálcio, quantificado pela Equação 3.2 em 5,50% (5,72% na base de não voláteis). Destaca-se que este teor se encontra dentro do limite da NBR 16697 (ABNT, 2018a), que estabelece teor máximo de 10% de material carbonático para o cimento CP V-ARI, e será considerado como o teor de fíler calcário adicionado ao clínquer. A perda ao fogo encontra-se próximo ao valor da perda de massa encontrado no ensaio de termogravimetria e, portanto, é coerente com os resultados obtidos.

A caracterização do cimento quanto à distribuição granulométrica será apresentada em conjunto com as adições minerais, no item 4.1.2, para facilitar comparações.

4.1.2 Adições minerais

A Tabela 4.2 apresentam-se os resultados da composição química das adições minerais, bem como a perda ao fogo, massa específica e Chapelle modificado.

Tabela 4.2 – Composição química e características físicas das adições minerais.

Material	Composição química (%)									Massa específica (g/cm ³)	Chapelle Modificado (mg Ca(OH) ₂ /g)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Outros	Perda ao fogo		
Cinza volante	59,48	26,98	0,92	0,57	4,04	1,36	3,06	2,10	1,50	2,000	660,76
Metacaulim	50,41	42,99	0,20	0,04	1,68	0,08	1,41	1,47	1,71	2,492	1265,67
Sílica ativa	94,07	0,20	0,71	0,12	0,06	0,31	0,82	0,55	3,17	1,972	1276,76
Fíler calcário	9,21	3,02	5,57	0,11	0,63	42,63	0,44	0,03	38,37	2,784	-

FONTE: A autora (2023).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.2 é possível verificar que a sílica ativa, metacaulim e cinza volante atendem aos requisitos químicos normativos (ABNT, 2010b, 2012b, 2014) para serem classificadas como materiais pozolânicos, e serão identificadas neste trabalho como adições minerais ativas. Estas adições apresentam ainda resultados no ensaio Chappelle modificado superiores ao limite de 436 mg de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de pozolana (equivalente a 330 mg de CaO/g), limite estabelecido por Raverdy et al. (1980) para classificação da reatividade de pozolanas. O metacaulim atende ainda ao limite de 700 mg de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ estabelecido pela NBR 15894-1 (ABNT, 2010b), específica para este material. Dentre estas adições minerais classificadas como ativas, a sílica ativa foi a que apresentou maior reatividade de acordo com os resultados de Chappelle modificado, e também maior porcentagem de sílica em sua composição.

O fíler calcário, denominado neste trabalho como adição mineral inerte, apresentou alto resultado de perda ao fogo (38,37%), indicativo de que o material não passou por nenhum processo de calcinação, o que justifica a elevada presença de carbonatos. Por tratar-se de material carbonático inerte não foi realizado ensaio Chappelle modificado. O fíler calcário em estudo apresenta teor de MgO de 5,57. De acordo com Cincotto, Quarcioni e John (2007), materiais que apresentam essa relação entre 1,2 e 10,8 são classificados como dolomíticos, o que pode ser confirmado devido à presença de 20% de dolomita - $\text{CaMg(CO}_3)_2$ - conforme quantificação do DRX, apresentada a frente.

Os resultados referentes à distribuição granulométrica das adições minerais e cimento podem ser encontrados no Figura 4.2. As dimensões médias dos materiais são apresentadas na Tabela 4.3.

Figura 4.2 – Distribuição granulométrica do cimento e adições minerais.

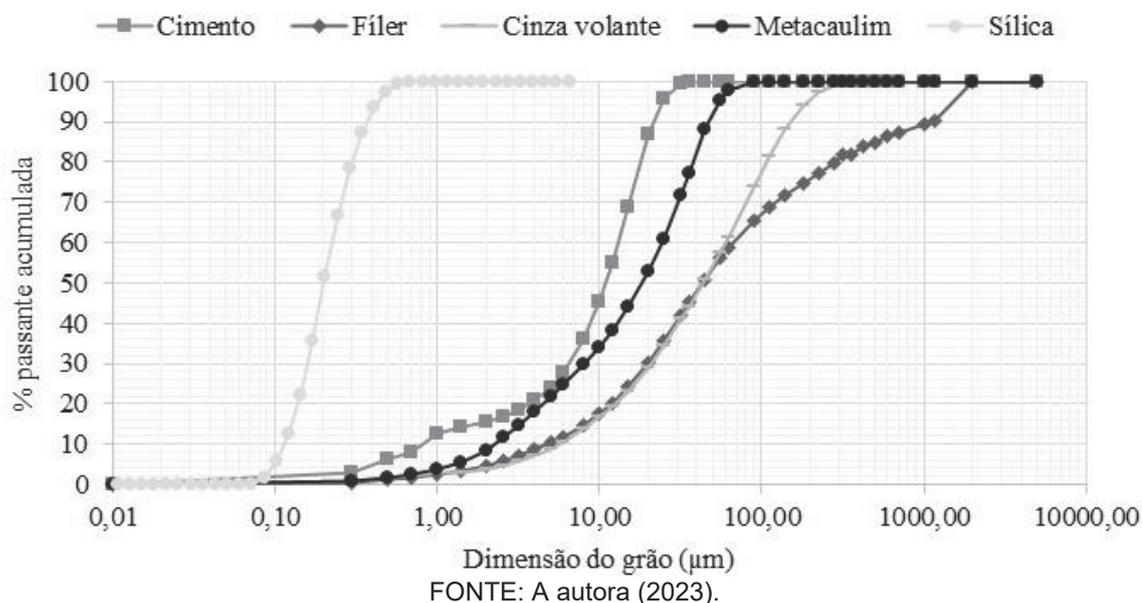


Tabela 4.3 – Dimensões médias do cimento e adições minerais.

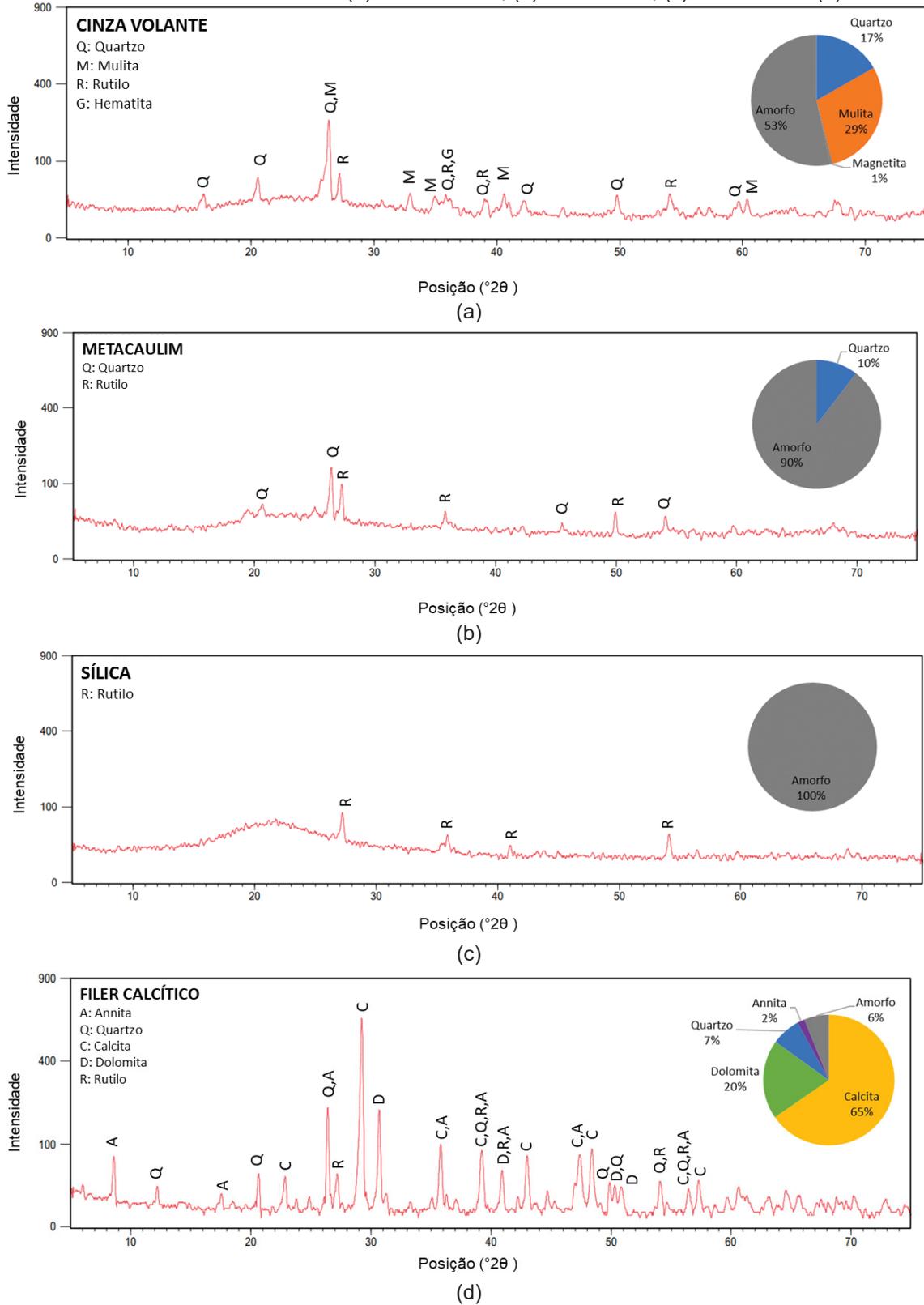
Adição	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
Cimento CPV-ARI	0,83	10,99	21,67
Cinza Volante	5,69	44,14	152,78
Fíler calcário	4,81	43,55	1131,36
Metacaulim	2,26	18,45	47,96
Sílica ativa	0,11	0,20	0,37

Fonte: A autora (2023).

Com base nos resultados apresentados, é possível notar que o cimento, cinza volante, fíler calcário e metacaulim apresentam curvas granulométricas mais próximas umas das outras, indicando que a sílica ativa é bem mais fina que estes materiais. O fíler apresentou cerca de 20% de material retido na peneira 355 μm e, por esse motivo, sua curva granulométrica foi composta com a fração mais fina analisada através da difração a laser, e com a fração mais grossa (acima de 355 μm) analisada por meio do peneiramento manual. A dimensão média foi determinada com a composição das duas curvas. Já a sílica ativa apresentou o menor valor de D50 dentre as adições avaliadas.

A partir dos resultados dos ensaios de difração de raios X nas adições minerais, foram obtidos os difratogramas apresentados na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Difratometria de raios X da (a) cinza volante, (b) metacaulim, (c) sílica ativa e (d) filler calcário.



FONTE: A autora (2023).

Da análise dos difratogramas das adições minerais, observa-se primeiramente na Figura 4.3(a), que a cinza volante apresenta em sua composição picos relativos ao quartzo e mulita, resultados coerentes com a presença de SiO_2 e Al_2O_3 encontrados na amostra (Tabela 4.2). A presença desses picos no difratograma da adição indica que parte desses óxidos se encontram na forma cristalina, contudo a amostra ainda apresenta 53% de sua composição na forma amorfa, resultado coerente com a menor reatividade dentre as adições minerais ativas encontrada no ensaio Chapelle modificado.

Os difratogramas do metacaulim (Figura 4.3(b)) e da sílica ativa (Figura 4.3(c)) indicaram alto grau de amorfismo na estrutura desses materiais, de 90 e 100% respectivamente. A sílica ativa apresentou em sua análise química teor elevado de SiO_2 , que está presente na amostra de forma amorfa. Já o metacaulim apresentou 10% de quartzo cristalino em sua composição e, apesar de apresentar elevado teor de Al_2O_3 , similar à cinza volante, não foram detectados picos relativos à mulita, muscovita ou anita neste material - comuns em amostras de metacaulim. Isso indica que o óxido de alumínio presente na amostra encontra-se em maior parte combinado como metacaulinita (SANTOS, 1975), de característica amorfa e, portanto, não identificada de forma específica na DRX.

Destaca-se que devido ao alto grau de amorfismo e, por consequência, baixa cristalinidade das adições minerais ativas, os difratogramas destes materiais apresentam picos de baixa intensidade, bem como presença de halo na linha de base, o que indica a presença de material amorfo nas amostras analisadas. De forma diversa, pode-se observar que o difratograma do filer calcário (Figura 4.3(d)) apresenta picos de raios X de maior intensidade, e ausência de halo na linha de base. Esse fato se deve à presença de fases cristalinas bem definidas no material. Observa-se no filer contaminação por argila devido à presença de Anita, além de 20% de Dolomita (carbonato de cálcio e magnésio), comum na formação geológica no estado do Paraná (MINERAIS DO PARANÁ S/A, 2009) e coerente com a composição química e elevada perda ao fogo do material.

As informações complementares e quantificação das fases minerais por Rietveld das adições minerais podem ser observadas na Tabela 4.4, na qual também é apresentado o parâmetro estatístico do ajuste numérico realizado (GoF), considerado adequado quando os valores são próximos a 1,0 (KLINE, 2015).

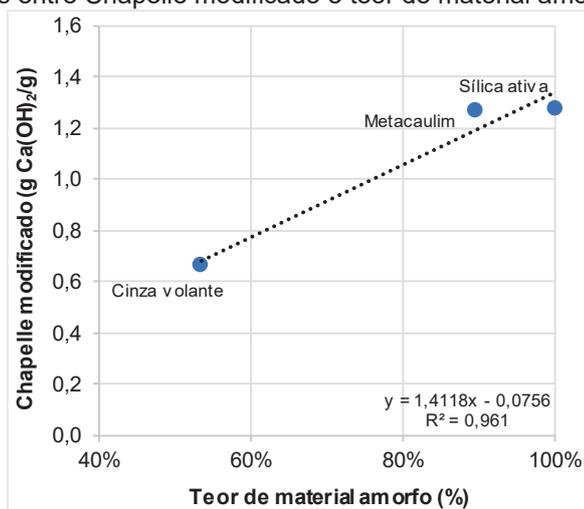
Tabela 4.4 – Quantificação de fases minerais das adições minerais por Rietveld.

Mineral	Ref. COD	Fórmula	Filer Calcário	Cinza volante	Metacaulim	Sílica ativa
Calcita	96-901-6707	CaCO ₃	65,4%	-	-	-
Dolomita	96-900-3522	CaMg(CO ₃) ₂	19,6%	-	-	-
Quartzo	96-900-8093	SiO ₂	7,2%	16,7%	10,4%	-
Annita	96-900-2315	KFe ₃ ⁺² (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	1,8%	-	-	-
Mulita	96-900-2662	3Al ₂ O ₃ 2SiO ₂	-	29,4%	-	-
Magnetita	96-900-5817	Fe ₃ O ₄	-	0,5%	-	-
Amorfo	-	-	6,1%	53,4%	89,6%	100,0%
TOTAL			100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Goodness of Fit (GoF)			0,89	1,04	1,09	0,97

FONTE: A autora (2023).

A partir da quantificação das fases minerais por Rietveld, apresentada na Tabela 4.4, foi possível elaborar a correlação dos resultados do Chapelle modificado com o teor total de material amorfo presente nas adições minerais ativas, apresentada na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Correlações entre Chapelle modificado e teor de material amorfo das adições minerais.



FONTE: A autora (2023).

Observa-se na Figura 4.4 que o teor total de material amorfo apresenta um bom ajuste aos resultados do ensaio Chapelle modificado, indicando que maior será a capacidade de combinação química com o hidróxido de cálcio quanto maior for este teor na composição das adições minerais. Isto ocorre devido aos arranjos atômicos aleatórios e transitórios em materiais amorfos terem maior facilidade de combinação química e transformações de fase (CALLISTER, 2010), ainda que as reações possam ocorrer com menor velocidade em fases minerais cristalinas alteradas que apresentem defeitos cristalográficos, extinção ondulante e lamelas de deformação em sua estrutura cristalina (HASPARYK, 2022).

4.1.3 Agregados

A caracterização dos agregados pode ser observada na Tabela 4.5. A distribuição granulométrica, obtida por peneiramento dos agregados, pode ser observada na Figura 4.5, que também apresenta os limites da NBR 7211 (ABNT, 2009a).

Tabela 4.5 – Caracterização dos agregados miúdos e graúdos.

Ensaio	Normativa	Areia	Brita 0 (Z.G. ^c 4,75/12,5)	Brita 1 (Z.G. ^c 9,5/25)
Massa específica (g/cm ³)	NBR 16916 (ABNT, 2021c) NBR 16917 (ABNT, 2021b)	2,695 ± 0,005	2,696 ± 0,004	2,701 ± 0,009
Massa unitária solta (g/cm ³)	NBR 16972 (ABNT, 2021a)	1,579 ± 0,004	1,475 ± 0,006	1,503 ± 0,003
Densidade de empacotamento (β_i)	Eq. 2.8	0,585	0,557	0,546
Massa unitária compactada (g/cm ³)	NBR 16972 (ABNT, 2021a)	1,658 ± 0,005	1,550 ± 0,001	1,590 ± 0,003
Absorção (%)	NBR 16917 (ABNT, 2021b) NBR 16919 (ABNT, 2021c)	1,40 ± 0,01	0,65 ± 0,03	0,20 ± 0,05
Material pulverulento (%)	NBR 16973 (ABNT, 2021d)	3,007 ± 0,007	0,32 ± 0,01	0,04 ± 0,01
Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	D.M.C. ^A : 2,36mm M.F. ^B : 2,28	D.M.C. ^A : 9,5mm M.F. ^B : 5,75	D.M.C. ^A : 19mm M.F. ^B : 6,88

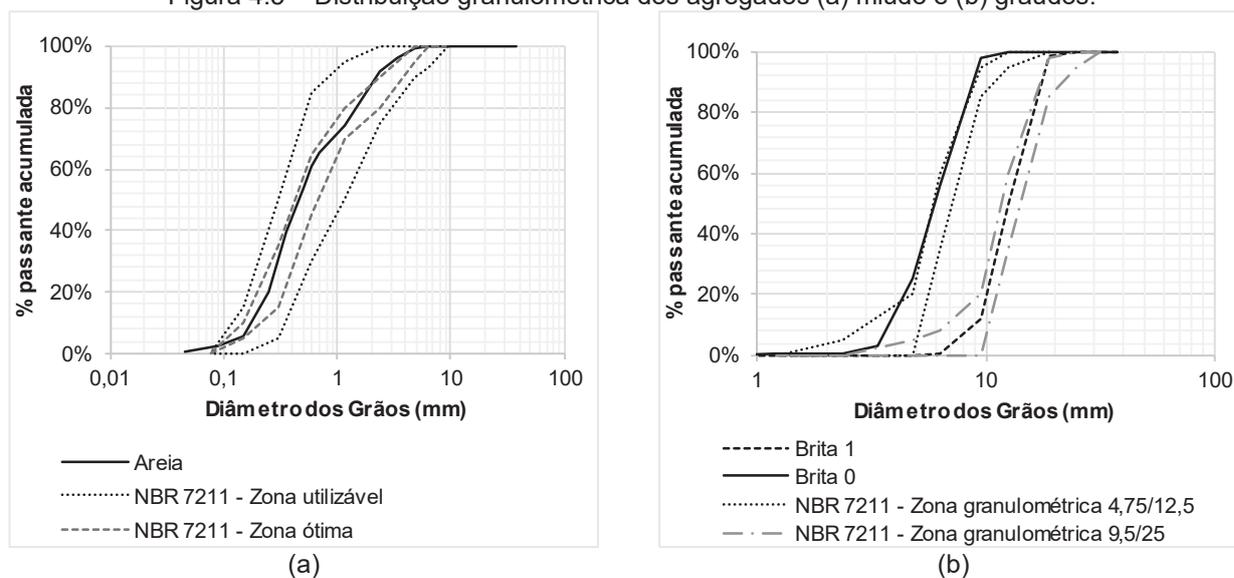
^AD.M.C – dimensão máxima característica

^BM.F. – módulo de finura

^CZ.G. – zona granulométrica

FONTE: A autora (2023).

Figura 4.5 – Distribuição granulométrica dos agregados (a) miúdo e (b) graúdos.



FONTE: A autora (2023).

Conforme discutido no item 2.1.2.2.1, o módulo de finura do agregado miúdo estabelecido pela literatura de normas internacionais deve variar entre 1,0 a 2,45, sendo que os estudos mais recentes tem utilizado areais com módulo de finura mais próximos ou maiores que o limite superior. A areia utilizada nesse estudo segue esta tendência e apresenta, conforme exposto na Tabela 4.5, módulo de finura de 2,28. A dimensão máxima característica da areia utilizada, de 2,36 mm, está de acordo com o estabelecido por (Neville e Brooks (2010) e também pela ACI 304 (ACI, 1997). Conforme já discutido anteriormente, areais mais finas são importantes para a produção do graute para TSC, pois contribuem para a estabilidade e reduzem a possibilidade de segregação.

Na Tabela 4.6 são apresentadas as dimensões mínimas dos agregados graúdos utilizados, bem como o coeficiente de forma e índice de lamelaridade.

Tabela 4.6 – Dimensão mínima dos agregados graúdos utilizados.

Material	Dimensão mínima (mm)	Coeficiente de forma	Índice de lamelaridade
Brita 1	6,30 mm	0,213	0,250
Brita 0	3,33 mm	0,167	0,200

FONTE: A autora (2023).

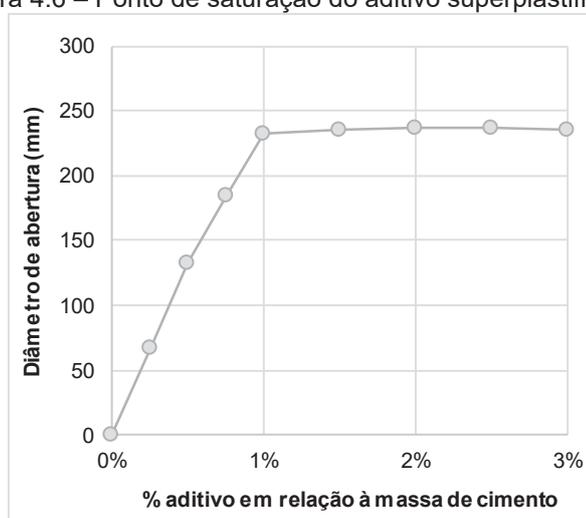
Em relação à dimensão mínima dos grãos dos agregados graúdos utilizados, estas são menores do que os mínimos sugeridos pela ACI 304 (ACI, 1997) e ASTM C637-20 (ASTM, 2020) – de 12,5 mm, e por (NEVILLE; BROOKS, 2010) – de 19 mm. Agregados graúdos de dimensões menores já vêm sendo utilizados com sucesso para produção de TSC em estudos mais recentes (LI et al., 2019; LV et al., 2020; LV; ZHOU; LI, 2020b; YOON; LEE; KIM, 2019), conforme explanado no item 2.1.2.1 desta tese.

A brita 1 apresentou valores maiores de coeficiente de forma e índice de lamelaridade quando comparados aos resultados da brita 0, o que indica que os grãos da brita 1 possuem formato mais cúbico, fator que evita a formação de canais estreitos que impedem a passagem adequada do graute, que poderia dificultar o processo de concretagem. Desta forma, é esperado que o esqueleto granular composto apenas por brita 1 apresente maior facilidade no processo de concretagem.

4.1.4 Aditivo

O ponto de saturação do aditivo superplastificante foi determinado pelo método de Kantro (WEDDING; KANTRO, 1980) em pasta de cimento Portland. Durante os testes, a relação água/materiais secos (a/m) foi mantida constante em 0,3, e os teores de aditivo testados foram de 0,25% a 3,0% (em relação à massa de cimento). O ponto de saturação foi atingido quando o diâmetro médio de abertura parou de aumentar, como pode ser observado na Figura 4.6. Assim, o teor de 1% em relação à massa de cimento foi determinado como ponto de saturação e foi utilizado ao longo de todo o trabalho.

Figura 4.6 – Ponto de saturação do aditivo superplastificante.

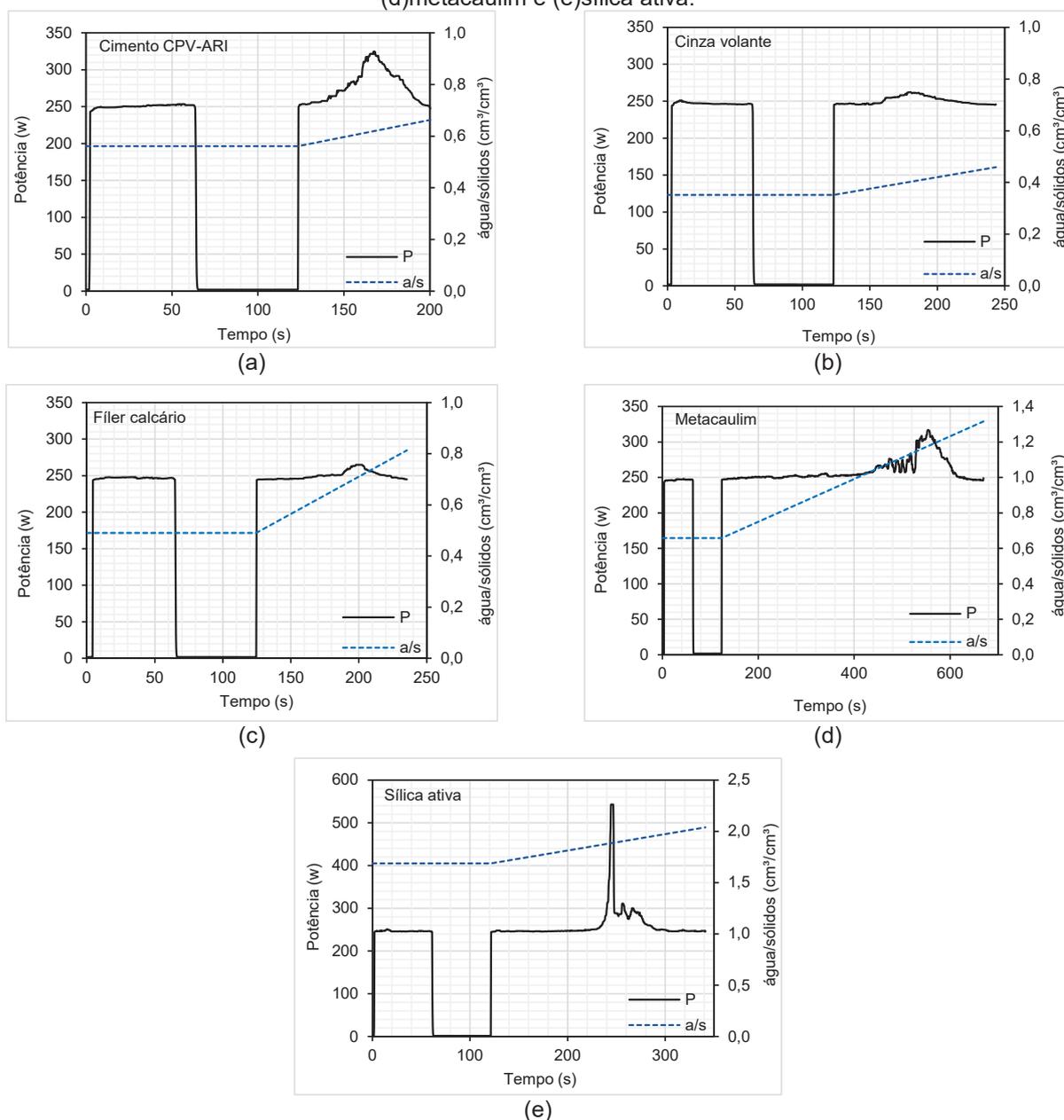


FONTE: A autora (2023).

4.1.5 Densidade de empacotamento dos finos

Na Figura 4.7 são apresentados os resultados do ensaio *mixing energy* realizados no cimento e nas adições minerais, e a Tabela 4.7 apresenta o resultado da densidade de empacotamento e demanda de água para cada material.

Figura 4.7 – Resultado dos ensaios *mixing energy* para (a) cimento CPV-ARI, (b) cinza volante, (c) fíler calcário, (d) metacaulim e (e) sílica ativa.



FONTE: A autora (2023).

Tabela 4.7 – Densidade de empacotamento e demanda de água das adições minerais.

Adição	Densidade de empacotamento (β)	Demanda de água (g/g)	Demanda de água (cm^3/cm^3)
Cimento CPV-ARI	0,607	0,194	0,619
Cinza Volante	0,704	0,200	0,402
Fíler calcário	0,578	0,126	0,704
Metacaulim	0,455	0,472	1,177
Sílica ativa	0,344	0,677	1,885

FONTE: A autora (2023).

No ensaio *mixing energy*, inicialmente, todas as pastas apresentaram consumo de energia próximo à 250 W de potência durante a mistura lenta. Após o período de repouso o consumo de energia foi reestabelecido. Com a adição contínua de água ocorreu aumento gradativo no consumo de energia, relativo à aproximação das partículas, até que se atingiu o estado funicular (consumo máximo de energia), onde as partículas estão em contato, a densidade de empacotamento e a demanda mínima de água são definidas. Após este ponto, todas as pastas passaram a reduzir o consumo de energia devido ao excesso de água, que passou a afastar as partículas e reduzir a viscosidade destas pastas.

Com relação ao consumo de energia para mistura das pastas, nota-se pela Figura 4.7 que o cimento e o metacaulim apresentaram comportamentos semelhantes, com picos de energia intermediários. Destaca-se que estes materiais apresentaram diâmetro médio de aproximadamente 11 e 18 μm , respectivamente. Já a cinza volante e o fíler calcário (com diâmetros na ordem de 40 μm) exigiram um baixo consumo de energia no seu ponto máximo. A sílica ativa (de diâmetro médio de 0,2 μm) apresentou um pico intenso e bem definido de consumo energético durante a mistura. O pico de consumo de energia é mais intenso quanto menor for o diâmetro das partículas, uma vez que partículas de menor diâmetro irão exercer forças de atração mais elevadas quando comparadas ao ensaio realizado em grãos mais grossos.

Comparando-se os 5 materiais apresentados na Tabela 4.7, observa-se que o maior valor de densidade de empacotamento foi obtido para a cinza volante, o menor foi o encontrado para a sílica ativa, conforme fornecida pelo fabricante; e o cimento, fíler calcário e metacaulim apresentaram valores intermediários. Essas diferenças ocorrem, e são esperadas, devido às diferenças nas distribuições granulométricas de cada um dos materiais.

Valores para a densidade de empacotamento do cimento Portland semelhantes ao encontrado foram obtidos na bibliografia: Wong e Kwan (2008), utilizando método proposto por eles, obtiveram valores de densidade de empacotamento para o cimento Portland de 0,622 na presença de aditivo; Klein et al. (2016) com uso de 1,0% de superplastificante, obtiveram densidade de empacotamento de 0,599 para cimento Portland.

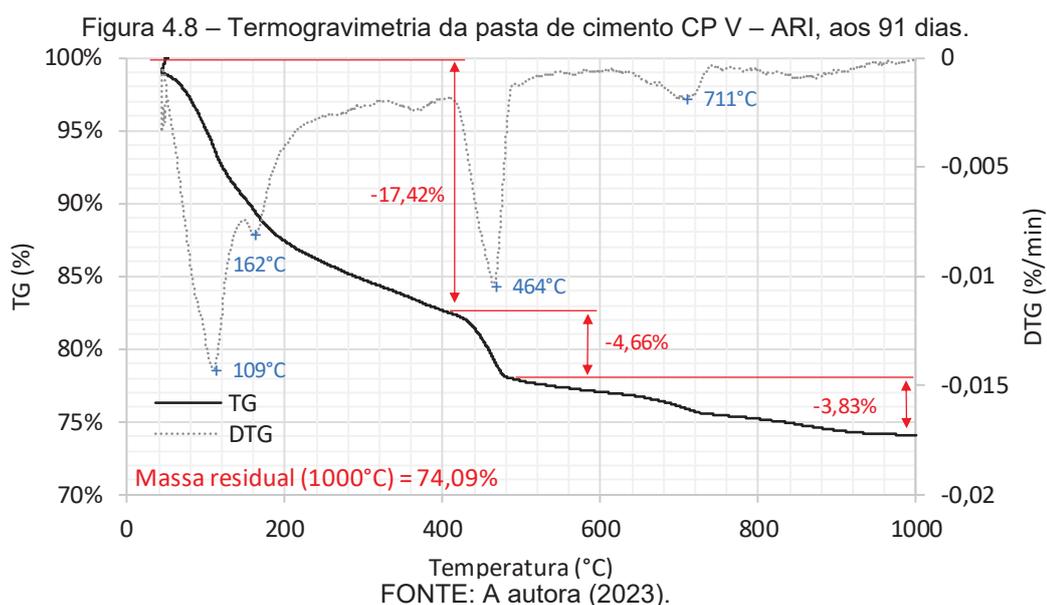
A densidade de empacotamento da sílica ativa é inferior às demais. Por outro lado, a demanda de água desse material foi a maior entre os estudados. Esse fato demonstra a necessidade de uma quantidade de água (*a/s*) superior para se obter a máxima concentração de sólidos. Tendo em vista que a demanda de água é função da superfície específica, pode-se inferir que a sílica apresenta uma alta área específica ainda que densificada. Os valores de

densidade de empacotamento serão usados a seguir como dados de entrada no modelo de empacotamento de partículas.

4.2 ETAPA I - DESENVOLVIMENTO DO GRAUTE

4.2.1 Definição dos teores de substituição do cimento por adições minerais ativas

Inicialmente, o teor de portlandita produzida no final da hidratação do cimento foi calculado a partir da análise termogravimetria do cimento CP V-ARI, realizada em pasta de cimento produzida com relação a/agl de 0,4 e ensaiada após 91 dias de hidratação. Estes parâmetros foram escolhidos para garantir água suficiente e tempo para hidratação do cimento. O resultado deste ensaio pode ser observado na Figura 4.8.



Na Figura 4.8 é possível observar, mais uma vez, três faixas de perda de massa características. Na primeira ocorre a perda de aproximadamente 17% da massa, referente à perda de água quimicamente combinada como C-S-H, fases aluminatos (hidrogranada, etringita e monossulfato) e compostos de magnésio. Na segunda faixa, próxima à 464°C ocorre a decomposição da portlandita, estimada em 19,16% pela Equação 3.1 (25,86% na base de

não voláteis). Este teor será considerado como o disponível para combinação química com as adições minerais ativas.

Por fim, ocorre a perda de massa relativa à decomposição do fíler calcário adicionado no cimento. Este teor, calculado como carbonato de cálcio, pode ser estimado em 8,69% (11,73% na base de não voláteis) - aumento de 51% no valor inicialmente encontrado no cimento anidro. Isso ocorre pois, além da decomposição do fíler, são incorporados nesse cálculo a decomposição de fases hidratadas contendo carbonatos (como o hemi e monocarboaluminato e hidrotalcita) e da própria carbonatação da amostra (reação ambiente com a portlandita), que pode ter ocorrido durante a moagem do material.

Considerando a composição química do cimento fornecida pelo fabricante (Tabela 4.1) e a análise termogravimétrica realizada (Figura 4.8), foi possível o cálculo do teor de CaO do clínquer (Tabela 4.8) e a aplicação da equação de Bogue para quantificação das fases anidras (Tabela 4.9). Assim, foi possível o cálculo da produção de fases hidratadas por estequiometria e, portanto, a estimativa teórica do teor de portlandita precipitada a partir da hidratação das fases C_3S e C_2S , calculada como 26,95%. Este valor é cerca de 4,22% superior ao determinado experimentalmente pelo ensaio de termogravimetria na base de não voláteis. Contudo, o cálculo teórico considera um grau de hidratação de 100%, o que dificilmente ocorre. Assim, o valor experimental de 25,86% será considerado no trabalho como o teor real de hidróxido de cálcio disponível para reação com as adições minerais ativas. Os cálculos referentes à composição teórica potencial do cimento são apresentados no Apêndice E.

Tabela 4.8 – Composição química do cimento utilizado (FRX e TG).

Elemento	Teor (%)
CaO	61,57%
SiO ₂	19,08%
Al ₂ O ₃	4,38%
Fe ₂ O ₃	2,97%
SO ₃	3,08%
MgO	0,72%
Óxidos menores	4,62%
Perda ao Fogo	3,58%
TOTAL	100,00%

FONTE: A autora (2023).

Tabela 4.9 – Composição teórica potencial do cimento anidro.

Fase	Teor (%)
C ₃ S	46,70%
C ₂ S	19,50%
C ₃ A	6,60%
C ₄ AF	9,00%
Clínquer (C ₃ S, C ₂ S, C ₃ A e C ₄ AF)	81,81%
Gipsita	6,62%
Fíler calcário	5,50%
CaO livre	0,95%
Resíduo insolúvel	0,77%
MgO	3,15%
Na ₂ O eq	0,66%
TOTAL	99,51

FONTE: A autora (2023).

Considerando, portanto, o teor de 25,86% de Ca(OH)₂, foi possível calcular o teor máximo que poderia ser adicionado e de substituição do cimento Portland pelas adições minerais ativas, conforme equações 3.9 e 3.10 como pode ser observado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Teores de adição e substituição máximos das adições minerais ativas, baseadas nos resultados do Chapelle.

Adição	Chapelle modificado (g Ca(OH) ₂ /g)	Teor de adição máximo (% massa)	Teor de substituição máximo (% massa)
Cinza Volante	0,661	20,25%	16,84%
Metacaulim	1,266	39,14%	28,13%
Sílica ativa	1,266	20,43%	16,97%

FONTE: A autora (2023).

É esperado que os teores calculados na Tabela 4.10 estejam superestimados, pois o Chapelle é realizado em solução aquosa aquecida, e as reações nas pastas de cimento ocorrem em temperatura ambiente. Além disso, nas pastas de cimento há baixa mobilidade das partículas, o que acarreta maior dificuldade de interação química. Ainda assim os valores calculados possibilitam estabelecer limites para a substituição do cimento no graute, de forma a impedir a presença de adições minerais ativas não reagidas devido à não disponibilidade de portlandita, e que estariam atuando apenas com a função de preenchimento.

Ainda que o ensaio Chapelle modificado estabeleça o teor de portlandita consumido pela adição mineral reativa, destaca-se que essa determinação é realizada em condições

diferentes do que ocorre na pasta. O ensaio é realizado em solução aquosa, o que facilita a mobilidade dos íons e a consequente formação de compostos hidratados, diferente do que ocorre na pasta, onde o baixo teor de água dificulta a dissolução dos reagentes e a interação iônica. Outro ponto importante a se considerar é a temperatura: o ensaio é realizado com solução a 90°C, o que acelera a precipitação de produtos hidratados; já as pastas costumam ser produzidas em temperatura ambiente. Apenas por estas condições do ensaio, já é esperado que o Chapelle modificado superestime a capacidade de reação das adições minerais ativas.

Assim, considerando que os teores de adição e substituição calculados na Tabela 4.10 estariam superestimados, optou-se pela aplicação de um fator (F_c) de 75%¹ sobre o valor calculado, de forma a compensar a baixa mobilidade do sistema com adição mineral. Este fator adotado visa otimizar o uso das adições minerais com base em sua reatividade, evitando a presença de uma parcela não reagida da adição. Assim, os teores finais de substituição, apresentados na Tabela 4.11, sofrem uma redução, conforme equação

$$\%AM \text{ adicionada} = \frac{\% \text{ Portlandita}}{\text{Chapelle (g/g)}} \cdot F_c \quad 4.1$$

em que $\% \text{ Portlandita}$ é o teor de Ca(OH)_2 produzido pelas reações de hidratação do cimento Portland (%) e Chapelle (g/g) é o valor obtido no ensaio Chapelle modificado (g Ca(OH)_2 /g adição mineral ativa) e F_c o fator de ponderação da reatividade efetiva da adição.

Tabela 4.11 – Teores de adição e substituição ponderados das adições minerais ativas, baseadas nos resultados do Chapelle.

Adição	Teor de adição final (% massa)
Cinza Volante	28,99%
Metacaulim	15,13%
Sílica ativa	15,00%

FONTE: A autora (2023).

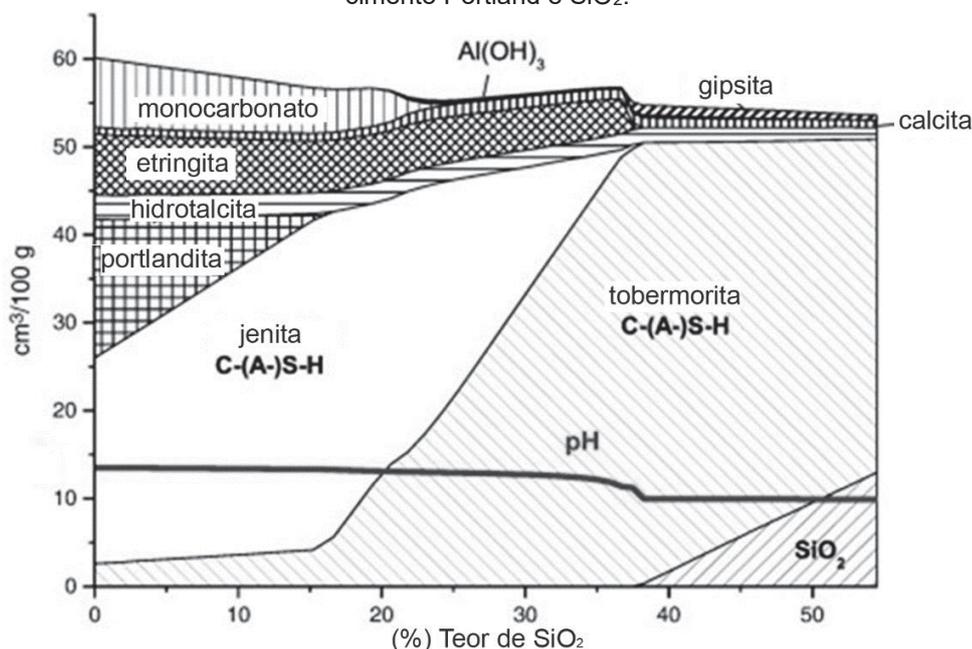
Outro ponto a ser discutido é se o uso de adições minerais ativas no limite estabelecido pelo ensaio Chapelle modificado seria capaz de baixar o pH de tal forma que a passivação das

¹ Devido à indisponibilidade de referências específicas que pudessem orientar a determinação precisa desse fator, o valor de F_c foi arbitrado.

armaduras fosse prejudicada. O pH básico de uma solução é regido pela concentração de íons OH^- . Sabe-se que o valor de pH de uma solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é 12,45 (BATES; BOWER; SMITH, 1956), porém devido à presença adicional de NaOH e KOH, a faixa de pH da solução de poros do concreto recém-curado é entre 12,5 e 13,5 (POURSAEE, 2016). De acordo com o potencial eletroquímico do ferro, ele não será corroído até que o pH fique abaixo de 9,0. A carbonatação é capaz de reduzir o pH do concreto para valores próximos de 8,0 (PU et al., 2012), e por isso pode causar desp passivação da armadura e deixar o material suscetível à corrosão (PACEWSKA; WILIŃSKA, 2020).

Contudo, o uso de adições minerais ativas não é capaz de reduzir o pH do concreto de forma considerável como a carbonatação. De acordo com modelos termodinâmicos avaliados em alguns estudos (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011), a adição de sílica amorfa, por exemplo, causará inicialmente o consumo total da portlandita com formação de fases C-(A)-S-H sem alterações significativas no pH. Lothenbac e Wieland (2012) explicam que o uso de sílica ocasiona, inicialmente, consumo de portlandita com formação de C-S-H alto cálcio (tipo jenita). A adição de teores mais elevados de SiO_2 resulta na desestabilização de fases aluminatos, com formação de C-S-H baixo cálcio (tipo tobermorita), que pode passar a incorporar íons alumínio. A nova formação leva à redução do teor de cálcio e álcalis dissolvidos, levando à uma pequena diminuição do pH (de 14 para 10) ao final destas reações. Após toda interação da sílica amorfa com as demais fases do cimento, já em teores elevados, o material permanecerá não reagido no sistema, como pode ser observado na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Modelo da hidratação do cimento Portland com adição de SiO_2 , assumindo a reação completa do cimento Portland e SiO_2 .



FONTE: Traduzido de Lothenbach, Scrivener e Hooton (2011).

Este mesmo comportamento foi confirmado experimentalmente (GLOSSER, 2020), em que substituições de até 80% do cimento por cinza volante de alta reatividade causaram a redução do pH para valores próximos à 11, acima do limite para que a armadura passe a apresentar alta probabilidade de corrosão.

Deschner et al. (2012) avaliaram a solução de poros de pastas com adições minerais. Os autores explicam que durante a reação pozolânica ocorre a redução da concentração de íons Ca^{2+} nos primeiros 7 dias de hidratação, devido à sua combinação com a sílica da adição mineral. Já os íons OH^- da portlandita permanecem na solução de poros. Pode ocorrer uma pequena redução no pH da solução dos poros devido a combinação de parte das hidroxilas nas estruturas formadas, mas o pH normalmente é mantido entre 13 e 14 (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

Este comportamento foi também verificado por Thomas (2011), que avaliou a solução de poros de concretos produzidos com altos teores de adições minerais ativas (substituições de até 50%). Em seu estudo o autor demonstrou que, mesmo após dois anos, a concentração de OH^- na solução de poros em todas as amostras apresentou valores superiores a 0,1 mol/L, valor que já garante à solução pH acima de 13 ao redor das armaduras.

Isto posto, pode-se concluir que o uso de teores altos de adições minerais ativas não causa queda significativa na alcalinidade do concreto. Apesar disso pode-se considerar que o

uso de teores elevados de adições minerais ativas pode gerar desestabilização de algumas fases hidratadas. Por este motivo, o uso do ensaio Chapelle modificado para a estimativa de substituição do cimento por adições minerais pode ser considerado seguro e não causará o consumo total da base. Lothenbach, Scrivener e Hooton (2011) explicam que é importante que exista portlandita remanescente após a ocorrência de grande parte da atividade pozolânica (91 a 182 dias). Isso porque a solubilidade da sílica amorfa é sensível a variações do pH, e quanto mais alto for o pH maior será a taxa de reação. Desde que permaneçam em solução íons OH^- suficientes para manter o pH da solução de poros, as reações das adições minerais ativas continuarão, a uma taxa muito pequena, após um período superior a 91 dias.

4.2.2 Definição das proporções entre os materiais do graute

Além do teor de substituição do cimento pelas adições minerais ativas, apresentado na Tabela 4.10, foram usados como parâmetros de entrada no modelo CPM a densidade de empacotamento (Tabela 4.7) e o diâmetro médio de cada material (Tabela 4.3), conforme apresentado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Densidade de empacotamento e diâmetro médio das classes.

Material	Densidade de empacotamento β_i	Diâmetro médio (μm)
Cimento CPV-ARI	0,607	10,99
Cinza volante	0,704	44,14
Fíler calcário	0,578	43,55
Metacaulim	0,455	18,45
Sílica ativa	0,344	0,201
Areia	0,586	457,89

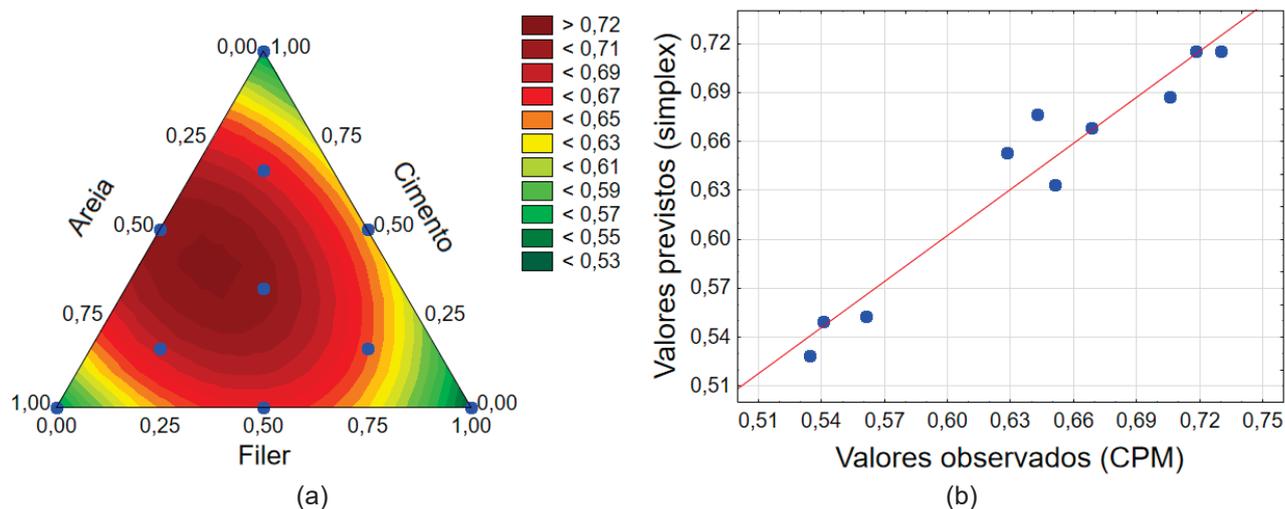
FONTE: A autora (2023).

Os valores apresentados na Tabela 4.12 foram utilizados para obtenção dos valores de densidade de empacotamento real das misturas pelo modelo CPM (DE LARRARD, 1999). A proporção entre os materiais foi definida através do planejamento fatorial simplex, apresentadas na Figura 3.4 a Figura 3.6.

Inicialmente foi estudada a composição CP. Cada combinação de areia, fíler e cimento da matriz de planejamento gerou resultados de densidade de empacotamento real obtidos pelo modelo CPM, e foi possível gerar superfície de resposta utilizando modelo quadrático (Figura 4.10(a)) para representar estes resultados. O modelo obtido é descrito pela equação 4.2. Pode-

se dizer que o modelo apresentou bom ajuste ($R^2=0,94$) uma vez que os pontos teóricos se aproximaram dos esperados, como pode ser observado na Figura 4.10(b).

Figura 4.10 – Superfície de resposta e ajuste do modelo para a composição CP.

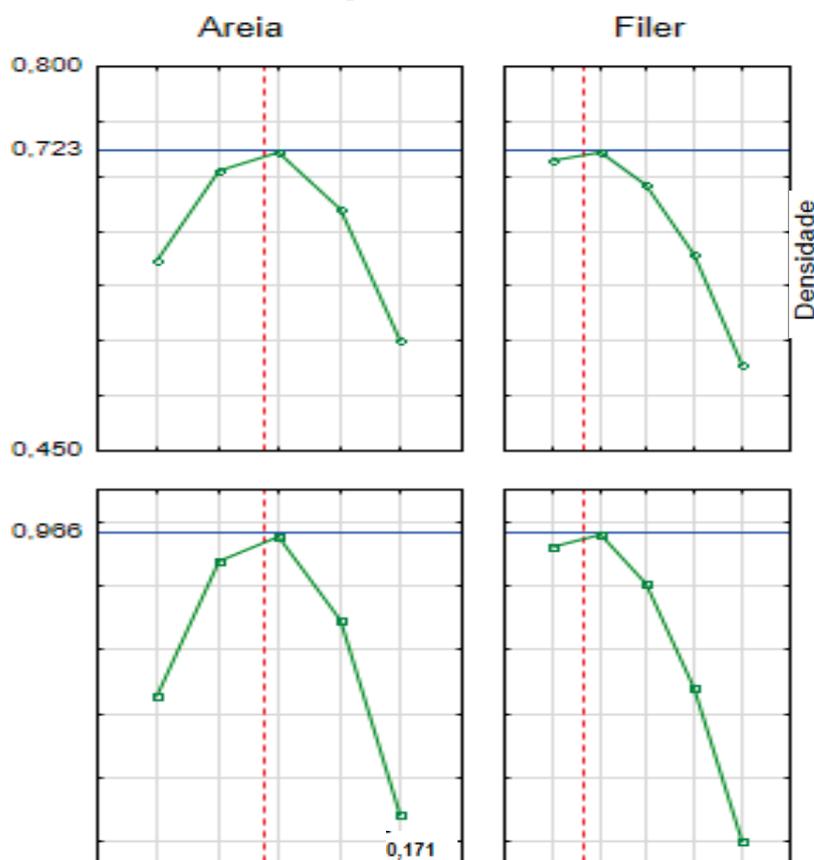


FONTE: A autora (2023).

$$\Phi = 0,5507. \%Areia + 0,5287. \%Fíler + 0,5525. \%Cimento + 0,5161. \%Areia. \%Fíler + 0,6555. \%Areia. \%Cimento + 0,3717. \%Fíler. \%Cimento \quad 4.2$$

Com base no modelo quadrático obtido é possível determinar a combinação de fatores (areia, fíler calcário e cimento) para que a maior densidade de empacotamento real seja obtida (área em vermelho escuro na Figura 4.10(a)). Esta análise, feita com o auxílio do software Statistica, é apresentada na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Valores preditos e desejabilidade de densidade de empacotamento da superfície de resposta do graute CP.

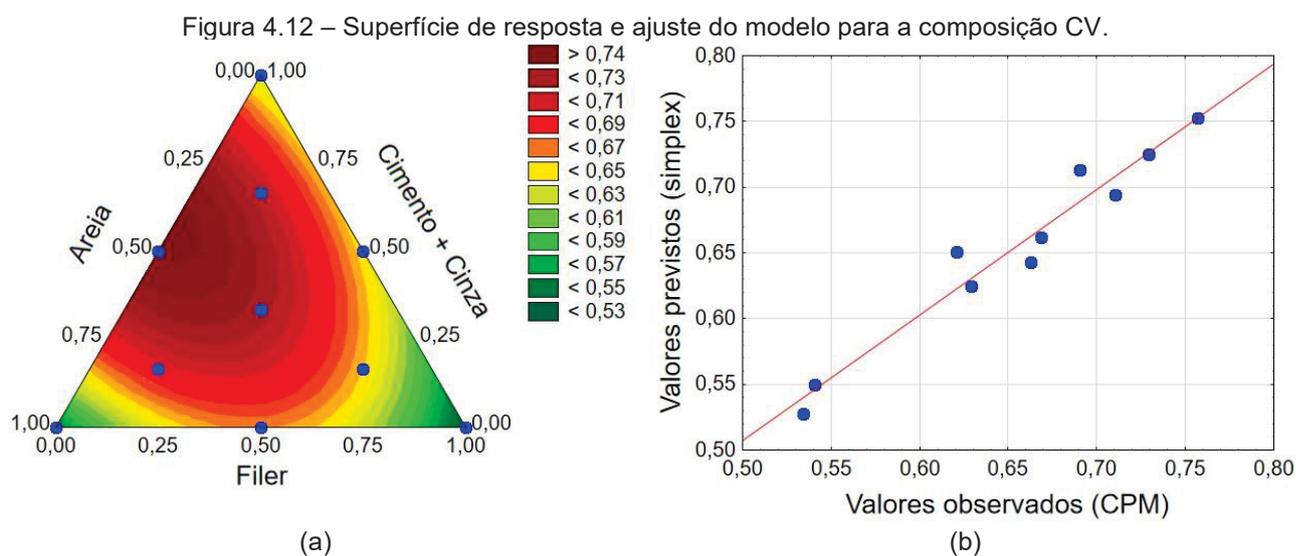


FONTE: A autora (2023).

Na Figura 4.11 verifica-se que os 3 primeiros perfis são relativos à variação de cada um dos fatores para que se atinja o maior valor de densidade de empacotamento. Já os 3 perfis abaixo mostram a desejabilidade individual para cada fator ($0 \leq d \leq 1$), conforme abordagem desenvolvida por Derringer e Suich (1980). Quanto mais próximo de 1 mais conveniente é a resposta do sistema, ou seja, maior é a sua sensibilidade. As linhas verticais vermelhas presentes nos gráficos correspondem aos valores ótimos dos parâmetros analisados. Pode-se observar na Figura 4.11 que a combinação de 43,2% areia, 17,1% fíler calcário e 39,7% cimento é a que apresenta maior densidade de empacotamento real, com previsão de atingir valor de 0,7234.

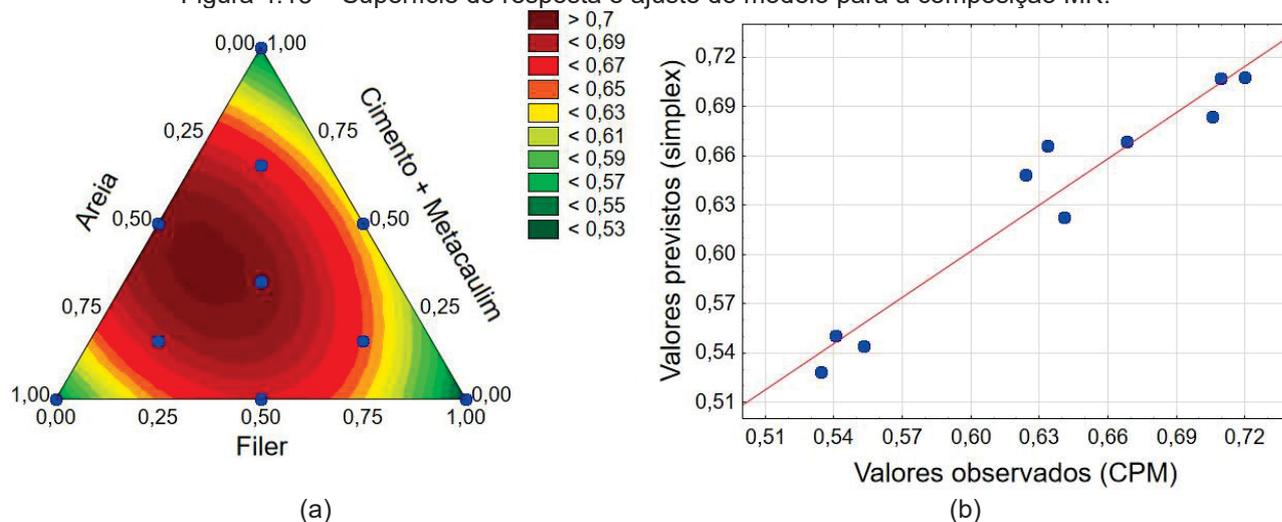
A combinação otimizada obtida através da análise da superfície de resposta foi então aplicada ao modelo CPM para validação. O valor de densidade de empacotamento real obtida pelo modelo de empacotamento compressível foi de 0,7355, o que representa um erro de 1,61% em comparação ao valor obtido pelo modelo quadrático. Portanto, esta combinação foi considerada como a composição ideal para o graute CP.

O mesmo procedimento utilizado para a composição CP foi utilizado nas demais combinações apresentadas na Tabela 3.2, que consideram que além do cimento como aglomerante, haverá a adição de cinza volante, metacaulim ou sílica ativa (composições CV, MK e SA, respectivamente) que passaram a representar uma classe extra de tamanho de grãos no modelo CPM, nas proporções apresentadas na Tabela 4.10. As superfícies de resposta geradas pelo modelo quadrático, bem como as equações que descrevem o modelo teórico para cada uma das composições, são apresentadas na Figura 4.12 a Figura 4.14, e equações 4.3 a 4.5. Para fins de representação, o teor de cimento e adição mineral ativa foram somados de forma a representar uma variável na superfície de resposta, referente aos aglomerantes.



$$\Phi = 0,5507. \%Areia + 0,5278. \%Fíler + 0,6248. (\%Cimento + \%Cinza\ volante) + 0,4910. \%Areia. \%Fíler + 0,6614. \%Areia. (\%Cimento + \%Cinza\ volante) + 0,2676. \%Fíler. (\%Cimento + \%Cinza\ volante) \quad 4.3$$

Figura 4.13 – Superfície de resposta e ajuste do modelo para a composição MK.

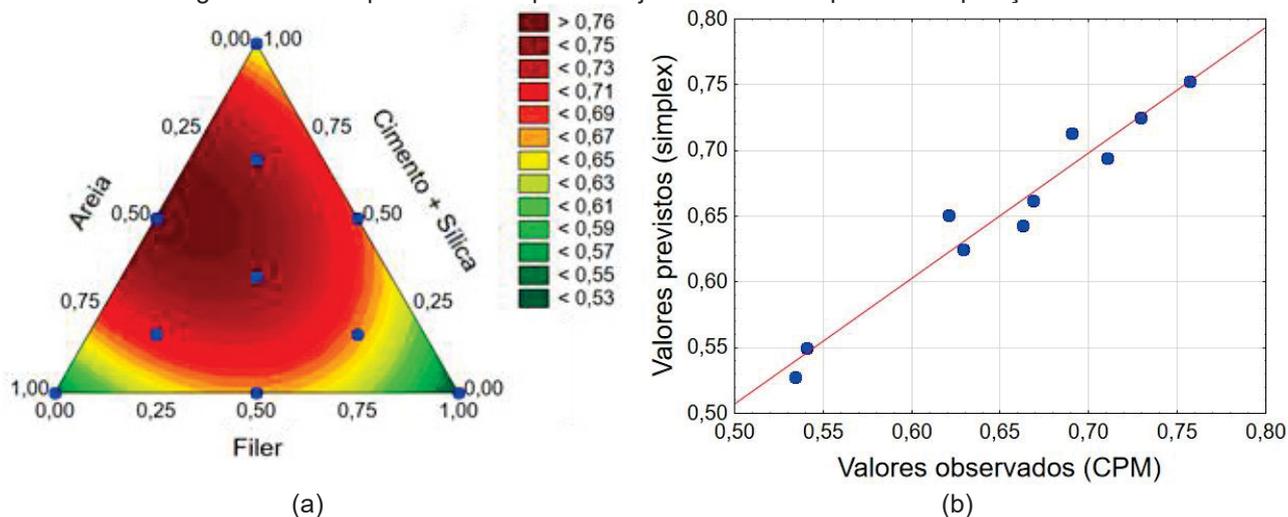


FONTE: A autora (2023).

$$\Phi = 0,5516. \%Areia + 0,5286. \%Filer + 0,5444. (\%Cimento + \%Metacaulim) + 0,5160. \%Areia. \%Filer + 0,6366. \%Areia. (\%Cimento + \%Metacaulim) + 0,3454. \%Filer. (\%Cimento + \%Metacaulim)$$

4.4

Figura 4.14 – Superfície de resposta e ajuste do modelo para a composição SA.



FONTE: A autora (2023).

$$\Phi = 0,5491. \%Areia + 0,5278. \%Filer + 0,6365. (\%Cimento + \%Silica Ativa) + 0,5057. \%Areia. \%Filer + 0,6904. \%Areia. (\%Cimento + \%Silica Ativa) + 0,3982. \%Filer. (\%Cimento + \%Silica Ativa)$$

4.5

Nota-se, pela análise das superfícies de resposta apresentadas na Figura 4.12(a), Figura 4.13(a) e Figura 4.14(a), que as três composições apresentam comportamento

semelhante, com densidades de empacotamento reais no ponto ótimo próximas de 0,73. Em relação às equações que descrevem os modelos, pode-se dizer que todas apresentaram bom ajuste (CV→R²=0,95; MK→R²=0,94; SA→R²=0,95), uma vez que os pontos teóricos se aproximaram dos observados, como pode ser visto na Figura 4.12(b), Figura 4.13(b) e Figura 4.14(b).

Foi realizada a análise do ponto ótimo das superfícies apresentadas para as composições CV, MK e SA, para determinação da composição de maior densidade de empacotamento, que foi avaliada no modelo CPM. A Tabela 4.13 apresenta os resultados das composições obtidas, que serão reproduzidas experimentalmente na próxima etapa do estudo, e a Tabela 4.14 apresenta o consumo de materiais das composições

Tabela 4.13 – Relação percentual em massa das composições CP, CV, MK e SA.

Composição	Areia	Cimento	Fíler calcário	Cinza volante	Metacaulim	Sílica ativa	Densidade de empacotamento real, calculada pelo CPM	Erro do modelo
CP	43,20%	39,69%	17,11%	-	-	-	0,7355	1,64%
CV	44,42%	43,09%	0,00%	12,49%	-	-	0,7428	-1,67%
MK	43,95%	33,00%	18,05%	-	5,00%	-	0,7314	2,15%
SA	40,99%	45,79%	6,35%	-	-	6,87%	0,7582	-1,46%

FONTE: A autora (2023).

Tabela 4.14 – Consumo de materiais (kg/m³) das composições CP, CV, MK e SA.

Composição	Consumo (kg/m ³)							
	Areia	Cimento	Fíler calcário	Cinza volante	Metacaulim	Sílica ativa	Aditivo	Água
CP	919,10	844,46	364,01	-	-	-	8,44	250,35
CV	912,55	885,37	0,00	256,64	-	-	8,85	241,75
MK	917,57	689,03	376,80	-	104,28	-	6,89	255,62
SA	830,56	927,65	128,70	-	-	139,18	9,28	269,78

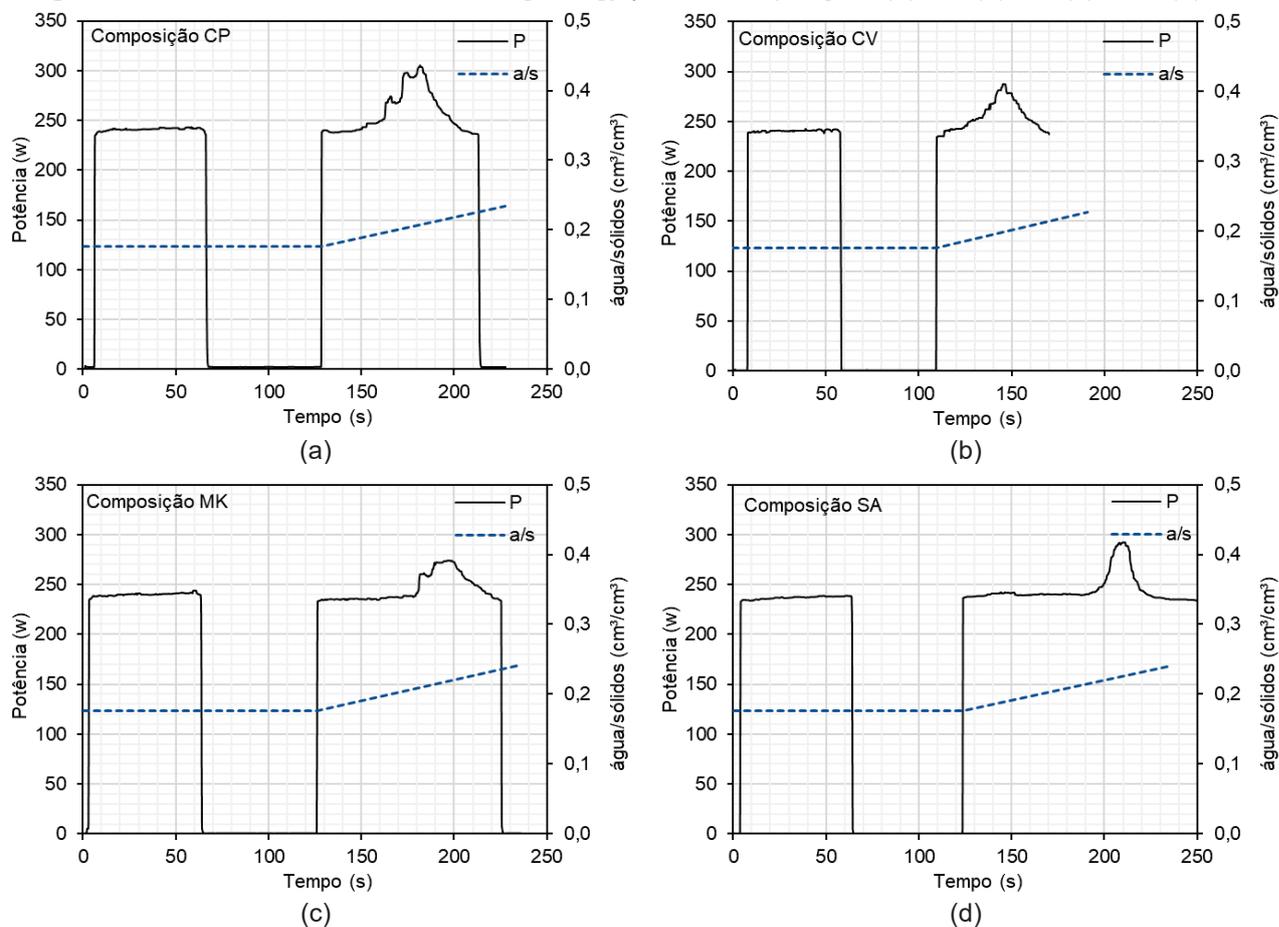
FONTE: A autora (2023).

Observa-se na Tabela 4.13 que as 4 composições formuladas apresentam relação a_m/agl (cimento + adição mineral ativa) variando de 0,8 a 1,16, valores próximos à relação 1:1 recomendada pelas normas ASTM C938 (ASTM, 2019) e ACI 304 (ACI, 1997). Esses valores também se encontram no intervalo das relações mais utilizadas pelos autores analisados, conforme apresentado na Figura 2.14. Destaca-se que a composição CV não contém fíler calcário em sua formulação. Isso ocorre porque a cinza volante e o fíler calcário

apresentam diâmetros médios semelhantes e, na análise das possíveis variações dessa composição, qualquer adição de filer acarretava diminuição da densidade de empacotamento.

As formulações apresentadas na Tabela 4.13 foram avaliadas pelo ensaio *mixing energy*, através do qual foi determinada a demanda de água mínima. Na Figura 4.15 são apresentados os resultados do ensaio *mixing energy*, e a Tabela 4.15 apresenta o resultado da densidade de empacotamento e demanda de água para cada composição avaliada.

Figura 4.15 – Resultado dos ensaios *mixing energy* para as composições (a) CP, (b) CV, (c) MK e (d) SA.



FONTE: A autora (2023).

Tabela 4.15 – Densidade de empacotamento e demanda de água das composições avaliadas.

Composição	Densidade de empacotamento real (CPM)	Densidade de empacotamento experimental (β)	Erro do modelo	Demanda de água (g/g)	Demanda de água (cm ³ /cm ³)	Relação a/agl
CP	0,7355	0,7475	1,64%	0,1177	0,3378	0,207
CV	0,7428	0,7031	-1,67%	0,1530	0,4224	0,199
MK	0,7314	0,7426	2,15%	0,1224	0,3466	0,218
SA	0,7582	0,7277	-1,46%	0,1332	0,3742	0,226

FONTE: A autora (2023).

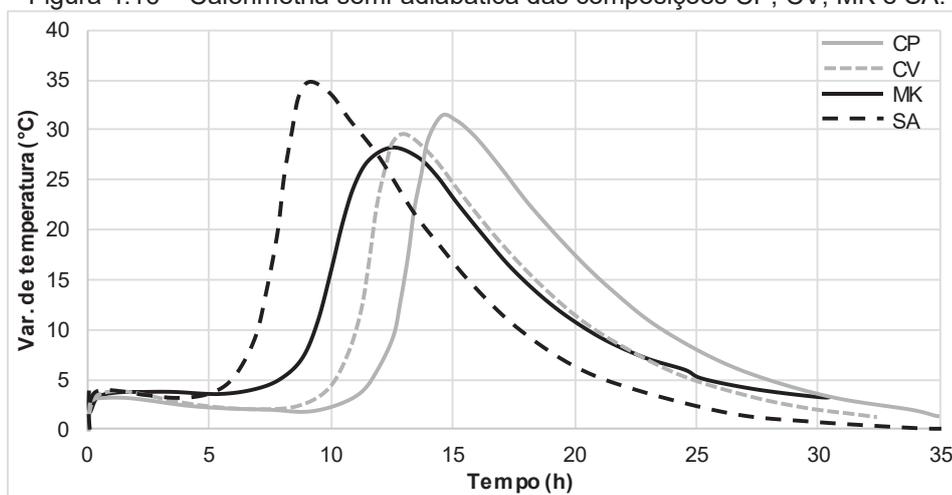
No ensaio *mixing energy*, inicialmente, todas as composições analisadas apresentaram consumo de energia próximo à 250W de potência durante a mistura lenta. Após o período de descanso e com a adição contínua de água ocorreu aumento gradativo no consumo de energia, relativo à aproximação das partículas, até que se atingiu o estado funicular, no qual a densidade de empacotamento e a demanda mínima de água foram definidas. Após este ponto, todas as composições reduziram o consumo de energia devido ao excesso de água, que passou a afastar as partículas e reduzir a viscosidade.

A demanda de água apenas para o cimento era de 0,194 (conforme Tabela 4.7), após a mistura com areia e filer para a composição CP, ocorreu um aumento da demanda para 0,207 devido à absorção de água dos materiais e variação da granulometria da mistura. Com relação ao consumo de energia para mistura dos grautes, nota-se pela Figura 4.15 que a composição SA foi a que apresentou pico mais deslocado para a direita, atingindo seu consumo máximo após a faixa de 200 segundos de ensaio e, conseqüentemente, foi a composição que apresentou maior demanda de água. Esse resultado é coerente com as características previamente apresentadas para a sílica ativa, que apresentou menor diâmetro médio e maior demanda de água entre os materiais estudados. De forma geral pode-se afirmar que o coeficiente de compactação adotado para o CPM foi adequado, pois resultou em densidades de empacotamento teóricas próximas dos valores obtidos experimentalmente, conforme verificado pelo baixo erro observado.

4.2.3 Caracterização do graute

No estado fresco, as composições foram avaliadas em calorímetro semi-adiabático, e os resultados podem ser observados na Figura 4.16. Destaca-se que as curvas não apresentam período de pré-indução que ocorre nos primeiros segundos de dissolução do cimento pois o sensor foi inserido na amostra apenas após o fim do processo de mistura.

Figura 4.16 – Calorimetria semi-adiabática das composições CP, CV, MK e SA.



FONTE: A autora (2023).

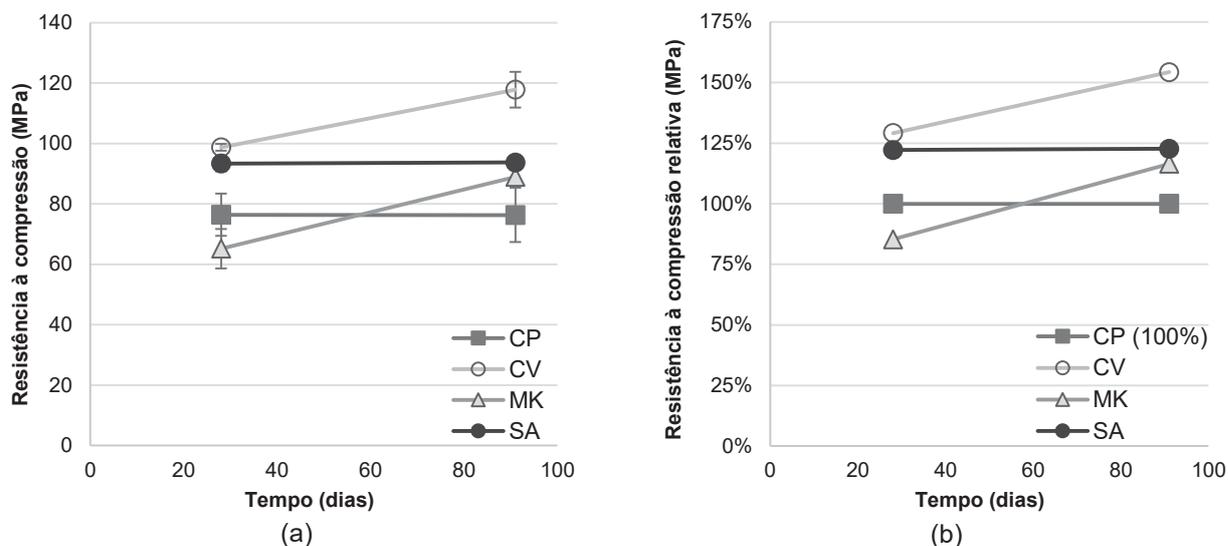
Todas as composições avaliadas apresentaram período de indução, relacionado à dissolução de íons até a supersaturação da solução, quando uma intensa precipitação de C-S-H começa sobre o C_3S . Na Figura 4.16, é possível observar que os tempos de início de pega variaram de 5 a 11 horas – valores superiores ao tempo de pega determinado pelo aparelho de Vicat para o CPV. Este aumento do tempo de início de pega se deve à baixa disponibilidade de água e mobilidade das partículas para o início das reações. Com a solução supersaturada de cálcio, há um aumento de temperatura para todas as composições devido precipitação de portlandita e C-S-H. A composição SA apresentou menor tempo de início de pega e maior liberação de calor, o que pode ser atribuído ao menor diâmetro das partículas dessa adição: partículas mais finas facilitam o processo de nucleação e precipitação de fases hidratadas, além da composição possuir o maior teor de cimento Portland que também, o que contribui para a geração de calor.

Uma vez que todas as composições contendo adição mineral apresentaram pico de temperatura antes da composição CP, pode-se inferir que a presença de adições minerais ativas interfere nos processos de dissolução e precipitação devido à suas propriedades químicas e conteúdo amorfo, mesmo quando apresentam partículas maiores que o cimento. Após o pico de temperatura, não foi possível observar evento térmico definido relacionado a formação de etringita ou monossulfatoaluminatos. Os resultados obtidos são semelhantes aos observados por outros autores que realizaram ensaio de calorimetria em argamassas contendo adições minerais (ABRÃO, 2019; AGOSTINHO et al., 2020; GÓMEZ-ZAMORANO; GARCÍA-

GUILLÉ; ACEVEDO-DÁVILA, 2015), com redução do tempo de pega e aumento do calor liberado quando em presença de pozolanas.

Foram moldados corpos de prova para cada uma das composições propostas com a demanda mínima de água determinada. A Figura 4.17 apresenta os resultados obtidos para a média de resistência à compressão para cada composição, aos 28 e 91 dias.

Figura 4.17 – (a) Resistência à compressão e (b) resistência à compressão relativa (CP = 100%) para as composições CP, CV, MK e SA, aos 28 e 91 dias.

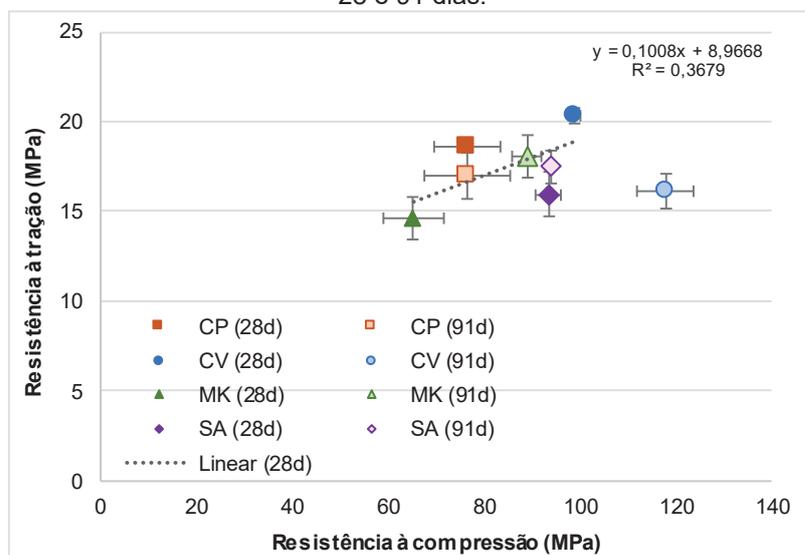


FONTE: A autora (2023).

Da análise dos gráficos apresentados na Figura 4.17, e após análise estatística (Tukey com confiabilidade de 95% - Tabela G.2) para a comparação de médias, pode-se concluir que nenhuma composição apresentou aumento significativo da resistência à compressão de 28 para 91 dias, assim as composições atingiram a resistência máxima já aos 28 dias, mesmo contendo adição mineral. Aos 91 dias, as composições CV e SA apresentaram resultados sem diferenças significativas entre si, com as maiores resistências à compressão. Os resultados das análises estatísticas desta tese são apresentados no Apêndice G.

Na Figura 4.18, é possível observar a correlação entre os valores obtidos para resistência à compressão e tração das composições estudadas.

Figura 4.18 – Correlação entre resistência à compressão e tração para as composições CP, CV, MK e AS, aos 28 e 91 dias.

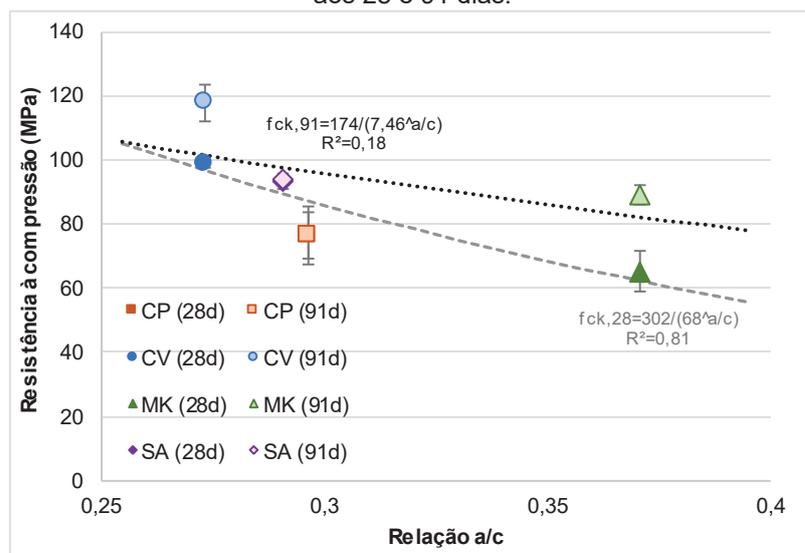


FONTE: A autora (2023).

Da análise dos resultados, pode-se concluir que existe uma baixa correlação entre resistência à tração e à compressão das amostras aos 28 dias ($R^2 = 0,3679$), e aos 90 dias não foi possível obter correlação entre as propriedades avaliadas.

A Figura 4.19 apresenta a correlação entre a resistência à compressão e relação água/cimento das composições produzidas.

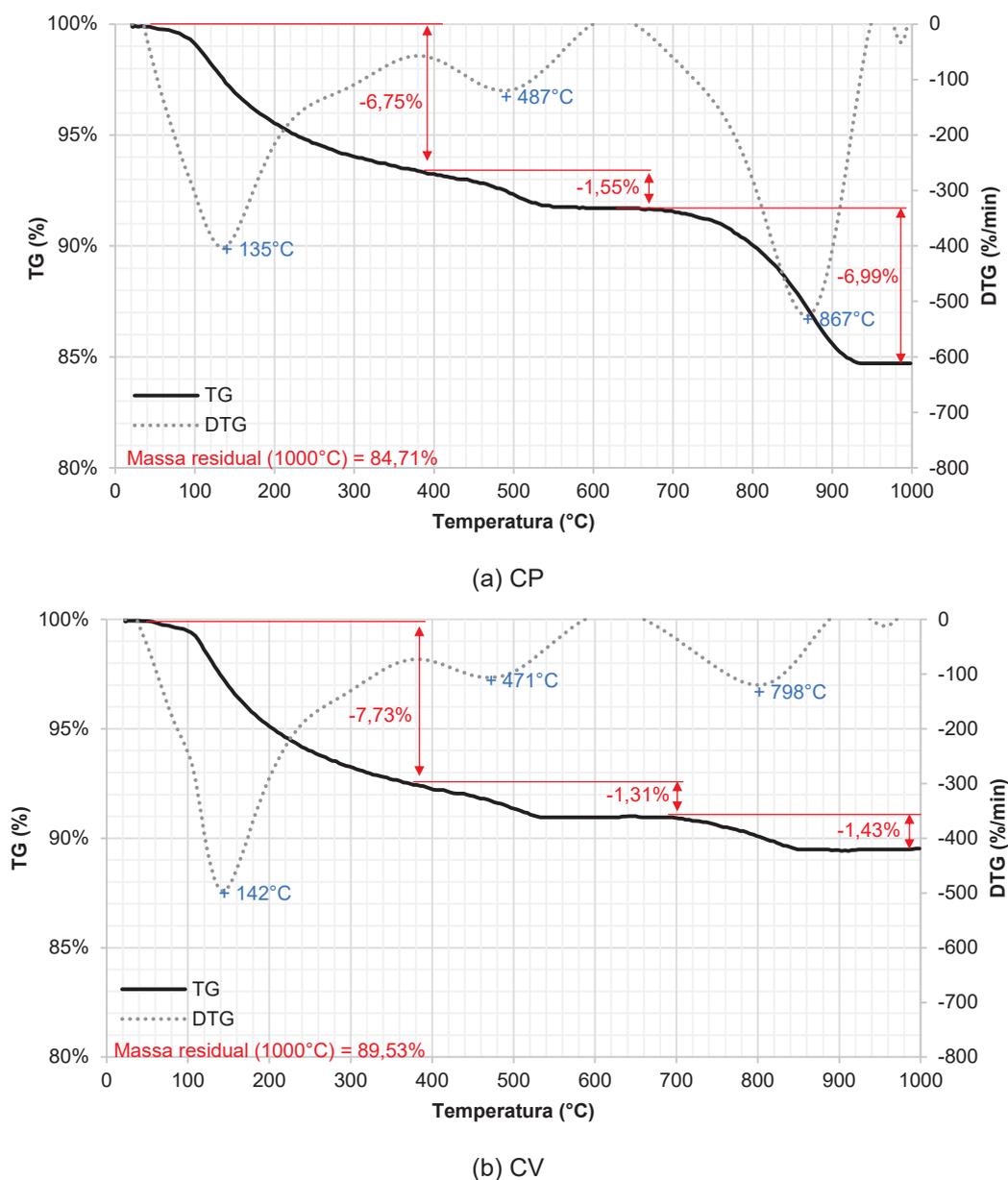
Figura 4.19 – Correlação entre resistência à compressão e relação a/c, para as composições CP, CV, MK e SA aos 28 e 91 dias.

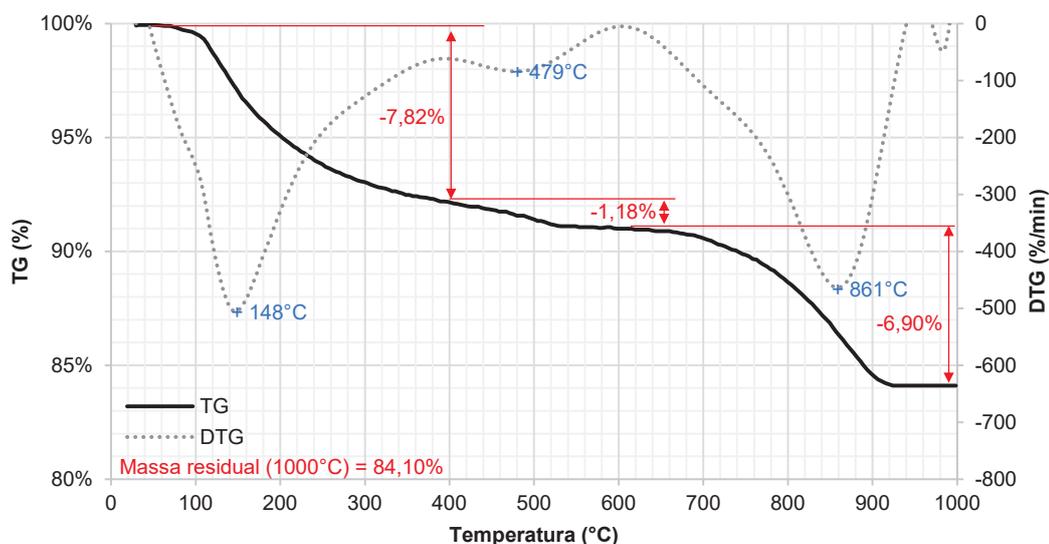


FONTE: A autora (2023).

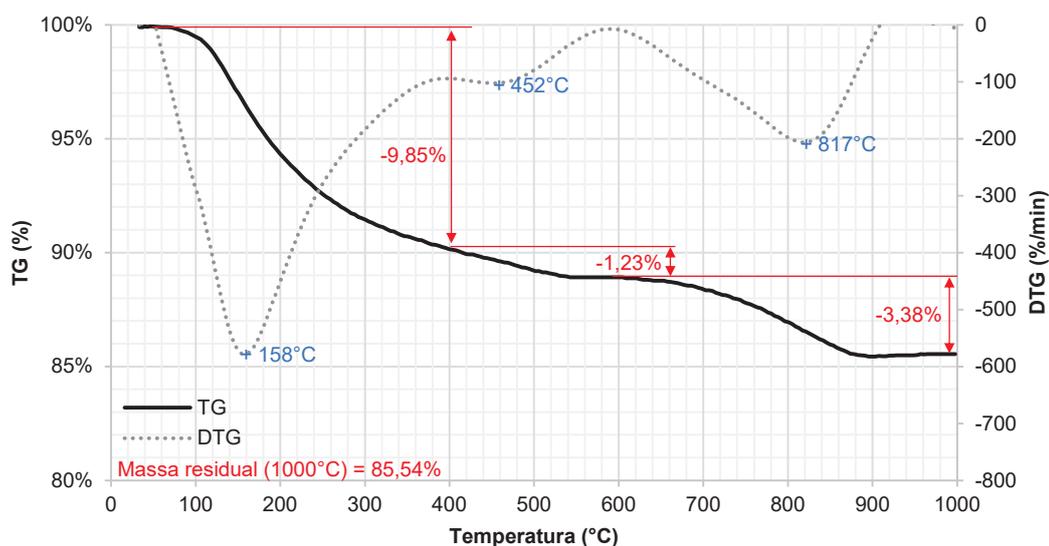
A correlação com a Lei de Abrams é apresentada na Figura 4.19, que prevê a redução da resistência à compressão com o aumento da relação a/c. Contudo, a partir dos ajustes realizados, observou-se um baixo coeficiente de correlação (R^2), que pode ter ocorrido devido à influência do uso de adições minerais nas composições, que interferiram no ganho de resistência. A Figura 4.20 apresenta o resultado da termogravimetria (TG) das composições analisadas.

Figura 4.20 – Resultados de termogravimetria (TG) para as composições CP, CV, MK e SA.





(c) MK



(d) SA

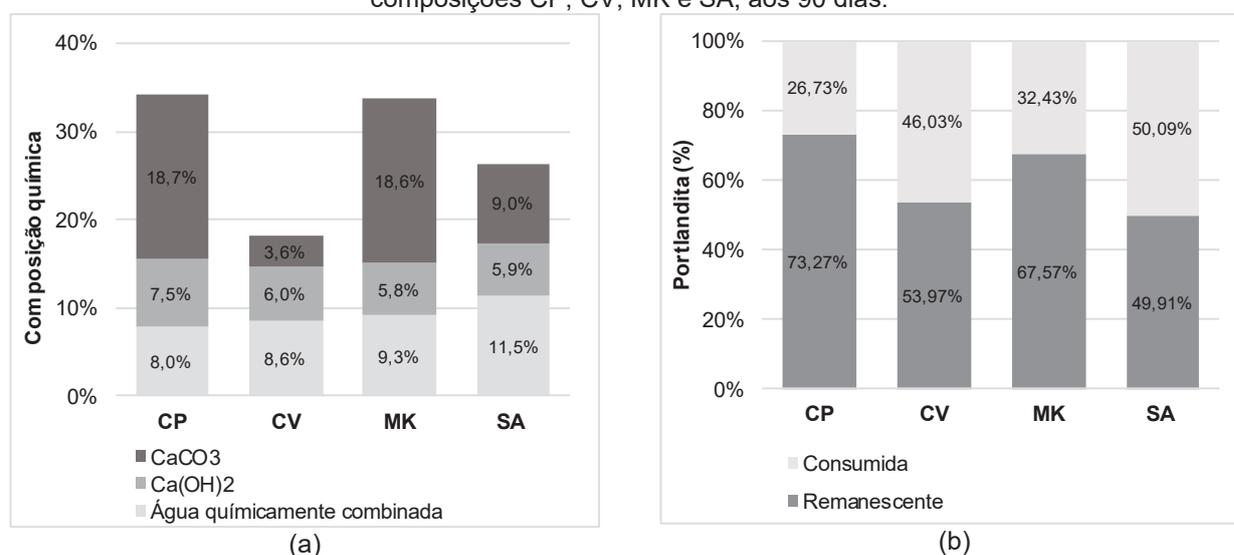
FONTE: A autora (2023).

Baseado nos resultados apresentados na Figura 4.20, foi possível calcular a água quimicamente combinada como portlandita e o teor de anidrido carbônico combinado como calcita após 91 dias. A composição CP apresentou a menor perda de massa relativa às fases hidratadas formadas, o que corrobora a formação de fases adicionais devido ao uso de adições minerais ativas nas demais composições.

Foi possível verificar que não houve consumo total da portlandita em nenhuma das composições. Isso acontece pela diferença das condições do ensaio Chappelle e dos grautes produzidos, conforme exposto no item 3.2.1. Considerando o teor inicial de portlandita

disponível (determinada pelo ensaio ATG do cimento Portland hidratado e a composição dos grautes - Figura 4.8) e o teor de base remanescente (determinado pelo ensaio ATG do graute – Figura 4.20), foi calculado o teor de portlandita consumido. Os cálculos são apresentados no Apêndice H. Os resultados do teor de portlandita consumida e remanescente da Figura 4.21 foram normalizados para 100% (em relação ao teor de portlandita teórica inicial), de forma a permitir a comparação entre as amostras.

Figura 4.21 – (a) Composição química (base de não voláteis) e (b) consumo de portlandita para as composições CP, CV, MK e SA, aos 90 dias.



FONTE: A autora (2023).

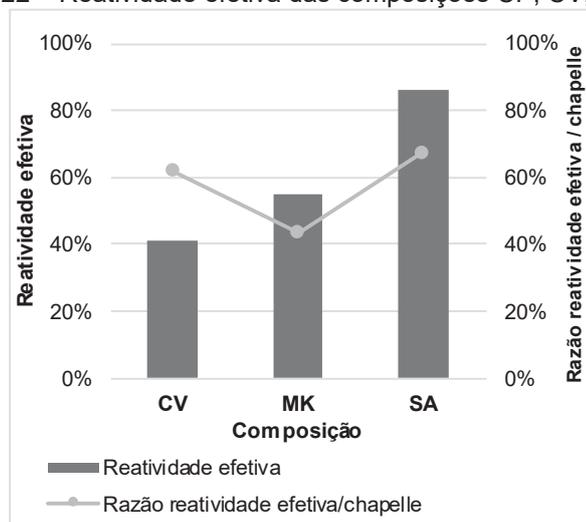
A composição CP apresentou redução de 26,73% no teor de portlandita disponível ao final dos 91 de hidratação, em relação ao teor teórico inicial. Considerando que não foi utilizada adição mineral ativa nesta composição, ou seja, não houve consumo por reações pozolânicas, este resultado indica a liberação de hidróxido de cálcio pela hidratação do C₂S e C₃S não ocorreu em sua totalidade, e que a amostra não atingiu 100% no grau de hidratação devido à presença dos demais componentes e quantidade de água utilizada ($a/agl = 0,207$).

As composições CV e SA apresentaram maior consumo de portlandita e consequentes maiores valores de resistência (Figura 4.17). Mesmo com uma elevada reatividade, a composição contendo metacaulim (MK) consumiu apenas 32,43% da base disponível. Vale destacar que a composição MK apresentava o menor teor de cimento Portland (33%) e de adição (5% de metacaulim). Esses fatores podem ter reduzido a velocidade da reação pozolânica durante o processo de hidratação, que acarreta menor disponibilidade de portlandita para se combinar quimicamente.

O teor de calcita nas amostras foi proporcional ao teor de fíler calcário presente em suas composições. Os 3,6% de CaCO_3 presentes na composição CV estão relacionados ao fíler calcário presente no cimento Portland, uma vez que não foi utilizado fíler calcário nesta composição (conforme Tabela 4.13). A discussão relativa ao fíler calcário e carbonatação das amostras não será feita neste estudo devido à ausência de quantificação química do teor de carbonatos do fíler calcário por ATG.

Considerando o resultado de consumo efetivo de portlandita, foi possível estabelecer uma relação do teor de portlandita consumida de cada graute em função do teor de adição mineral utilizada nas misturas. Essa relação, que será denominada de reatividade efetiva da composição, foi obtida de forma semelhante ao cálculo realizado no ensaio Chappelle modificado, que estabelece o teor de portlandita fixada por grama de pozolana adicionada. Os cálculos também são apresentados no Apêndice H e a reatividade efetiva, razão entre a reatividade efetiva e os resultados do ensaio Chappelle modificado das adições são apresentados na Figura 4.22.

Figura 4.22 – Reatividade efetiva das composições CP, CV, MK e SA.

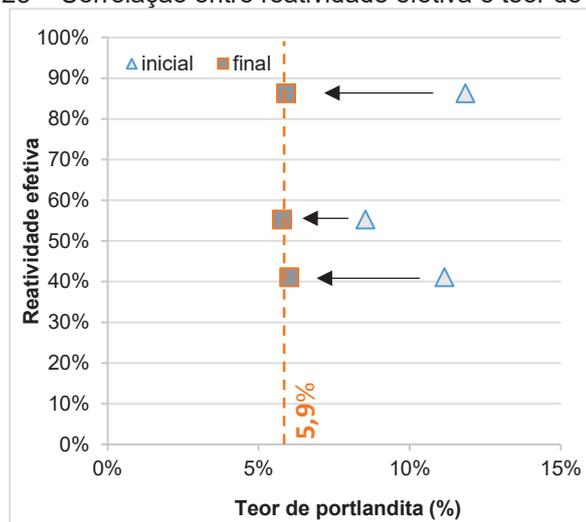


FONTE: A autora (2023).

É possível observar, na Figura 4.22, que as composições CV, MK e SA apresentaram reatividades efetivas de 41,10%, 55,28% e 86,34%, respectivamente. Ou seja, apenas uma parcela das adições é capaz de consumir a portlandita, mesmo quando a adição possui 100% de conteúdo amorfo, como no caso da sílica ativa. As composições consumiram entre 44% e 68% do valor teórico Chappelle. Neste sentido, a adoção do fator de ponderação - $F_c=75\%$ - do teor de substituição de cimento calculado a partir do cimento se aproximou da capacidade

máxima de combinação química observada nas composições. Na Figura 4.23 é possível observar a correlação da reatividade efetiva com a disponibilidade de portlandita no início e final da hidratação.

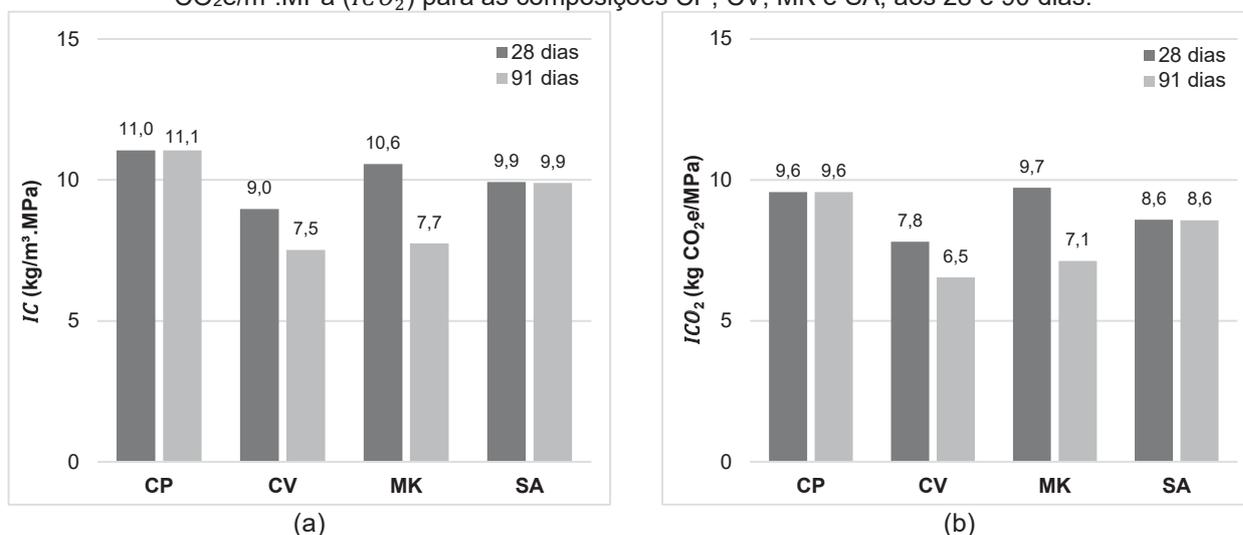
Figura 4.23 – Correlação entre reatividade efetiva e teor de portlandita



FONTE: A autora (2023).

A partir das correlações apresentadas na Figura 4.23 pode-se inferir que a cinética da reação pozolânica também está associada à disponibilidade de base no início da reação, uma vez que a dissolução da sílica é facilitada em ambiente mais alcalino (CHAN, 1989) e parece estabilizar no mesmo balanço químico ao final da reação em 5,9% de portlandita remanescente, o que garante o pH mínimo dos compósitos. Os grautes produzidos foram avaliados ainda em função de parâmetros de ecoeficiência, apresentados na Figura 4.24.

Figura 4.24 – (a) Consumo de cimento para se obter 1MPa de resistência à compressão (IC) e (b) emissões de $CO_2e/m^3.MPa$ (ICO_2) para as composições CP, CV, MK e SA, aos 28 e 90 dias.



FONTE: A autora (2023).

A composição CV, contendo cinza volante, apresentou o menor IC , com valor de 7,5 kg/m³.MPa aos 90 dias, com observado na Figura 4.24(a). Essa composição foi também a que apresentou maior valor de resistência à compressão aos 91 dias, sendo a mistura mais eficiente entre as estudadas. A redução no consumo de cimento/m³.MPa foi de cerca de 32,4% quando comparada com a composição CP (sem adições minerais ativas). Pode-se observar que, apesar de a composição CV apresentar densidade de empacotamento menor que CP, o impacto do uso da cinza volante foi significativo no IC , o que indica um uso mais racional do cimento devido ao refinamento de poros decorrente da atividade pozolânica e aumento da resistência à compressão a longo prazo.

Conforme Figura 4.24(b), a composição CV apresentou também a menor taxa de emissão de carbono aos 91 dias, com valor de 6,5 kg CO₂e/m³.MPa. Esse valor representa uma redução de cerca de 32,3% do ICO_2 da composição CV em relação a composição CP.

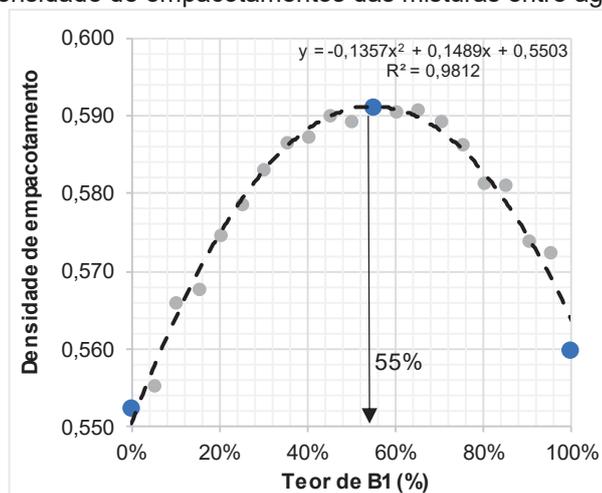
Assim, por apresentar melhor desempenho mecânico e ecoeficiência, a composição de graute CV foi adotada para ser utilizada na moldagem do concreto TSC, com diferentes esqueletos granulares, que serão investigados no item 4.3 a seguir.

4.3 ETAPA II - ESQUELETO GRANULAR E AJUSTE DE FLUIDEZ DO GRAUTE

4.3.1 Definição e caracterização do esqueleto granular

Para a definição dos esqueletos granulares foram preparadas misturas entre as britas 0 e 1, com variações de 5%. Essas composições foram avaliadas pelo ensaio de massa unitária no estado solto e a densidade de empacotamento das misturas foi calculada. Os resultados são apresentados no Figura 4.25.

Figura 4.25 – Densidade de empacotamentos das misturas entre agregados graúdos.



FONTE: A autora (2023).

Visando analisar a adequabilidade dos agregados locais conforme fornecido pelos fabricantes para produção do TSC, um esqueleto granular foi composto por 100% B0, e um segundo foi composto por 100% B1. Da análise do Figura 4.25, é possível observar que o esqueleto composto de 100% B0 apresentou a menor densidade de empacotamento. A partir desse ponto houve aumento gradual no valor dessa propriedade com o aumento do teor de B1, até atingir um valor máximo na combinação entre 45% B0 + 55% B1. Após esse ponto houve uma tendência de redução nos valores de densidade de empacotamento até o ponto correspondente a 100% B1. Observa-se ainda uma boa correlação ($R^2 > 0,98$) para os pontos experimentais.

De acordo com os resultados obtidos, foram selecionados três esqueletos granulares, correspondentes aos pontos destacados na Figura 4.25: um composto por 100% B0, um formado por 100% B1 e aquele com a maior densidade de empacotamento (45% B0 +

55% B1), sendo denominados doravante neste trabalho com o B0, B1 e BX respectivamente. A densidade de empacotamento e índice de vazios dos esqueletos granulares podem ser observados Tabela 4.16.

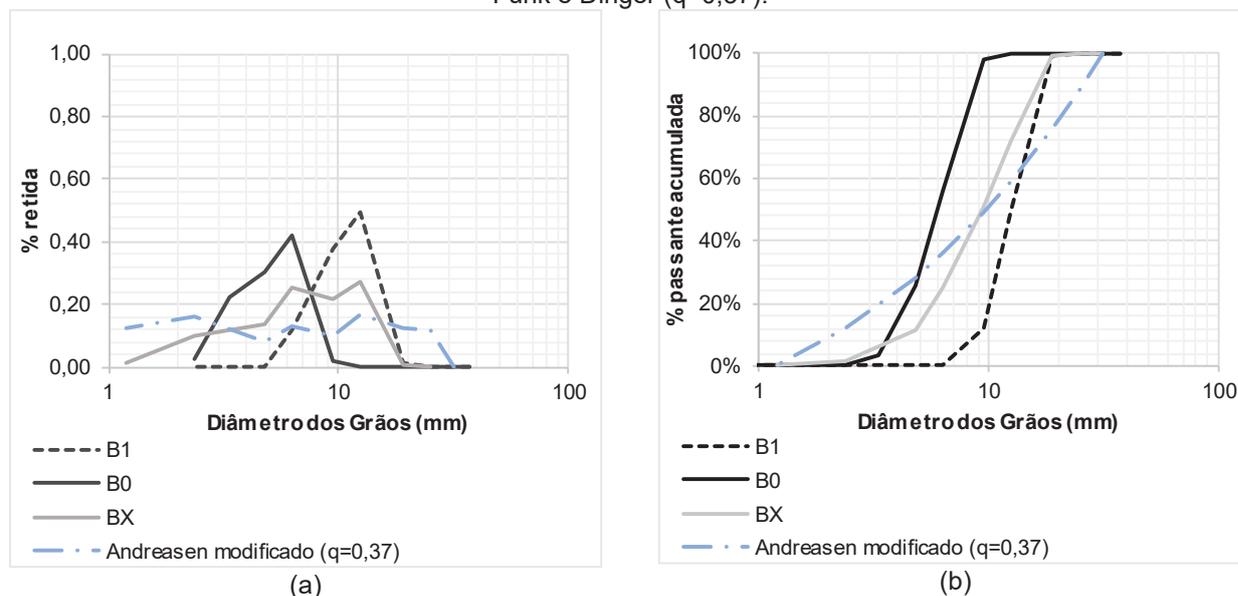
Tabela 4.16 – Composição dos esqueletos granulares.

Esqueleto granular	B0 (%)	B1 (%)	Densidade de empacotamento (β)	Índice de vazios
B0	100	0	0,552	0,448
BX	45	55	0,591	0,409
B1	0	100	0,560	0,440

FONTE: A autora (2023).

Na Figura 4.26 é apresentada a distribuição granulométrica discreta e acumulada dos esqueletos granulares elaborados, bem como a curva de maior empacotamento ($q=0,37$) segundo modelo de Andreasen modificado (HUNGER, 2010).

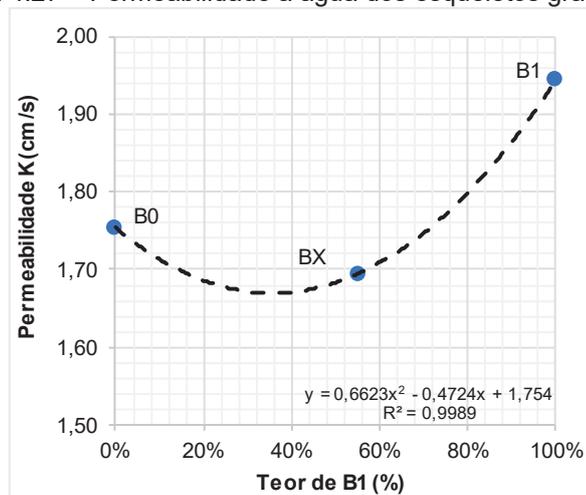
Figura 4.26 – Distribuição granulométrica (a) discreta e (b) acumulada dos esqueletos granulares e do modelo Funk e Dinger ($q=0,37$).



FONTE: A autora (2023).

Quando comparadas as distribuições granulométricas dos esqueletos granulares ao modelo de empacotamento de Andreasen modificado, pode-se observar que BX é o esqueleto granular que mais se aproxima da distribuição de máximo empacotamento, corroborando os resultados obtidos no ensaio de massa unitária. Os esqueletos granulares definidos foram avaliados ainda pelo ensaio de permeabilidade a água, e os resultados podem ser observados na Figura 4.27.

Figura 4.27 – Permeabilidade à água dos esqueletos granulares.



FONTE: A autora (2023).

Da análise da Figura 4.27 pode-se observar que o esqueleto BX foi o que apresentou menor permeabilidade, fato condizente com a maior densidade de empacotamento determinada pelo ensaio de massa unitária. Já os esqueletos B0 e B1, apesar dos valores de densidade de empacotamento próximas, apresentaram maior diferença na permeabilidade. Isso ocorre porque a permeabilidade de materiais granulares depende também de outros fatores como a distribuição, interconectividade e forma dos poros, que impactam diretamente na área específica do material. Outro fator determinante para a permeabilidade a água de um meio poroso é a tortuosidade (NEITHALATH; SUMANASOORIYA; DEO, 2010; NEITHALATH; WEISS; OLEK, 2006).

A tortuosidade de um meio poroso varia em função da forma dos grãos. Partículas mais angulares, por exemplo, promovem um caminho mais tortuoso no meio, o que diminui a sua permeabilidade. Já partículas esféricas possibilitam um caminho mais direto pelo meio e, como resultado, a permeabilidade aumenta. O diâmetro dos grãos também influencia na tortuosidade e, de forma geral, um aumento no diâmetro das partículas acarreta um aumento da permeabilidade (GHABCHI et al., 2015). Esse fato é corroborado pelos resultados apresentados para os esqueletos B0 e B1, onde a composição com 100% de B1 apresentou permeabilidade maior que a composição com 100% de B0. Pode-se esperar, a partir desses resultados, que o esqueleto B1 seja o que promova melhor penetração do graute.

Considerando que apenas os vazios existentes no esqueleto granular serão preenchidos com graute, podemos observar na Tabela 4.16 que volumes de 55 a 60% do TSC

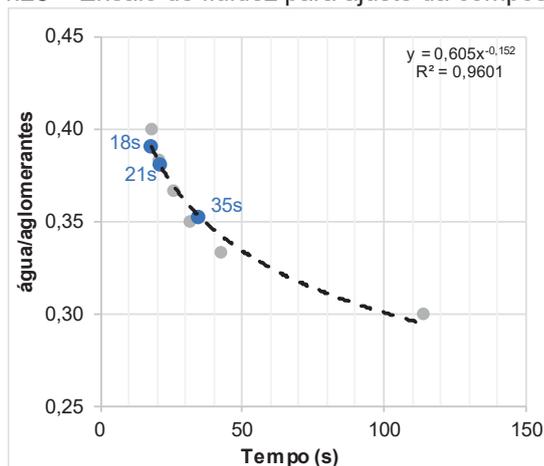
serão compostos por agregados graúdos, volumes superiores aos usuais 40% do concreto convencional (NOWEK et al., 2007).

4.3.2 Ajuste da fluidez dos grautes

Ao final da análise dos resultados de caracterização dos grautes, exposta no item 4.2.3, determinou-se que a composição CV seria utilizada para o prosseguimento deste trabalho. Procedeu-se então ensaios para ajustar a fluidez do graute através do funil descrito no item 3.3.2 aos tempos de 18, 21 e 35 segundos – adequados para aplicação do graute no esqueleto granular.

Primeiramente realizou-se o ensaio com a relação a/agl mínima determinada no ensaio *mixing energy* (Tabela 4.15), igual a 0,199. Não foi possível, para esta relação, determinar o tempo de escoamento no funil, pois devido à consistência do graute não houve escoamento contínuo do material e o tempo para que todo o volume escoasse foi maior que 5 minutos. Aumentou-se gradativamente a relação a/agl , que a partir de 0,300 passou a apresentar fluidez no funil. Para todos os testes foi utilizado o teor fixo de superplastificante, de 1% em relação a massa de cimento, conforme apresentado no item 4.1.4. Os resultados para as demais relações a/agl ensaiadas podem ser observados na Figura 4.28

Figura 4.28 – Ensaio de fluidez para ajuste da composição CV.



FONTE: A autora (2023).

Da análise dos resultados, pode-se observar que, conforme esperado, o tempo de escoamento do funil diminuiu a cada aumento da quantidade de água. Foi encontrada uma boa correlação entre a relação a/agl e o tempo de escoamento em segundos ($R^2 > 0,96$). A

partir da equação obtida, foi possível determinar as relações a/agl para os tempos estabelecidos, conforme pontos destacados na Figura 4.28. Essas relações, a nomenclatura adotada e a relação percentual em massa dos grautes podem ser observadas na Tabela 4.17. O consumo de materiais das composições é apresentado na Tabela 4.18.

Tabela 4.17 – Relação percentual em massa dos grautes GR18, GR21 e GR35, tempos de escoamento e relação a/agl .

Composição	Tempo de escoamento (s)	Areia	Cimento	Cinza volante	Relação a/agl	Relação a/c
GR18	18	44,42%	43,09%	12,49%	0,390	0,503
GR21	21				0,381	0,491
GR35	35				0,352	0,455

FONTE: A autora (2023).

Tabela 4.18 – Consumo de materiais (kg/m^3) dos grautes GR18, GR21 e GR35.

Composição	Consumo (kg/m^3)				
	Areia	Cimento	Cinza volante	Aditivo	Água
GR18	758,23	735,60	213,28	7,36	369,97
GR21	764,79	741,96	215,12	7,42	364,52
GR35	786,20	762,73	221,14	7,63	346,73

FONTE: A autora (2023).

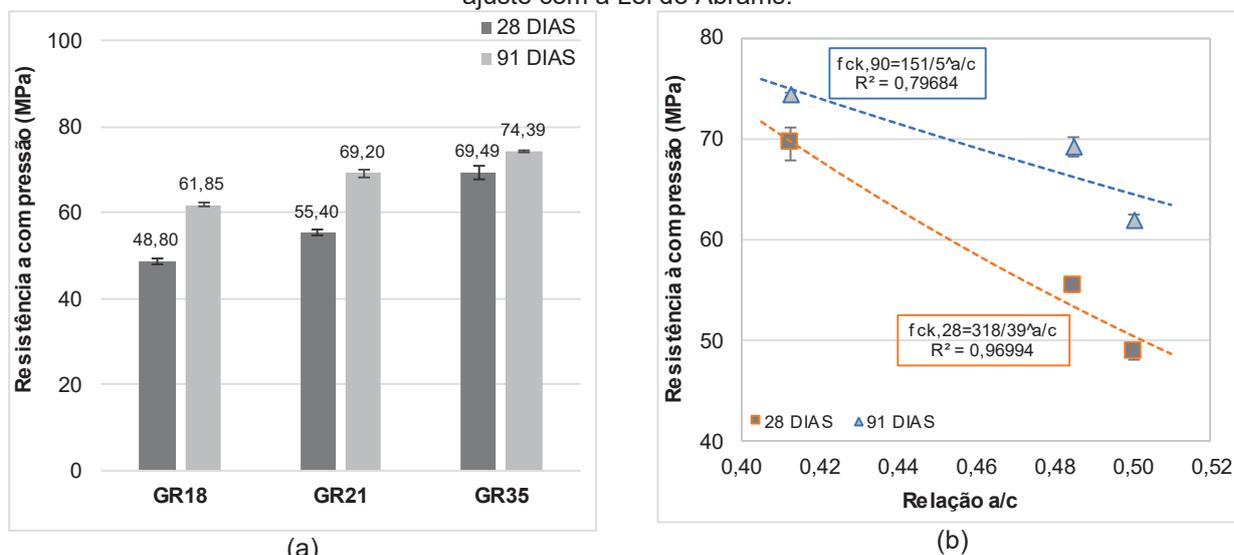
Ainda no estado fresco os grautes foram avaliados em relação a exsudação. Conforme exposto na ACI 304 (ACI, 1997), o valor máximo de exsudação do graute para aplicação do TSC deve ser de 0,5%. Os valores encontrados foram de 0,1% para o GR35, de menor relação a/agl , e de 0,3% para os grautes GR18 e GR21. Desta forma, pode-se concluir que os três grautes formulados atendem aos requisitos de exsudação.

4.4 ETAPA III - PROPRIEDADES DO TSC

4.4.1 Caracterização dos grautes

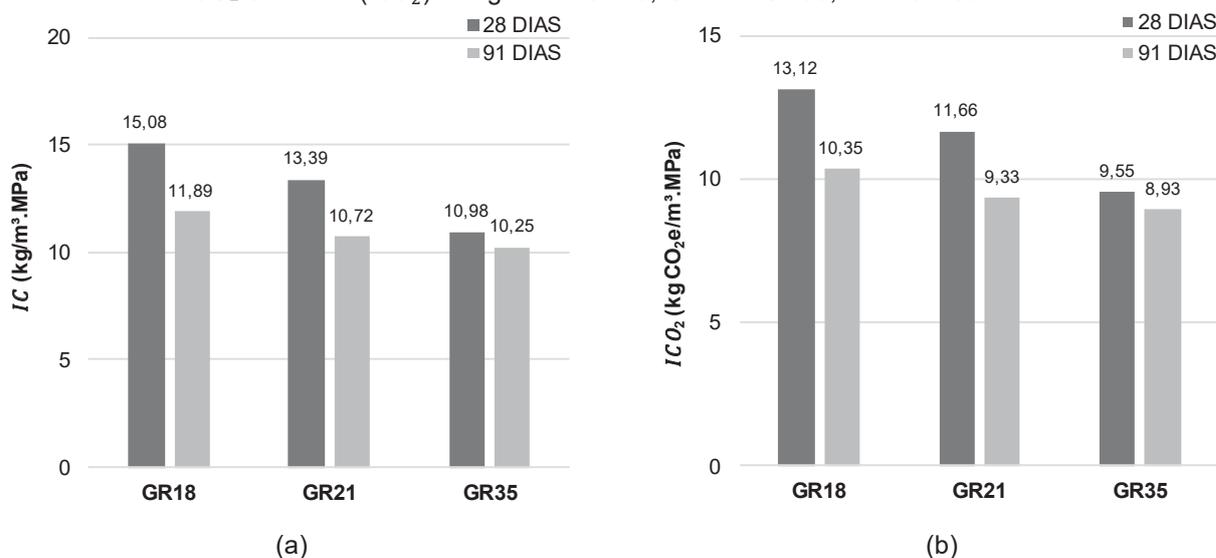
A resistência à compressão dos grautes aos 28 e 90 dias é apresentada na Figura 4.29, juntamente ao seu ajuste à Lei de Abrams. Também são apresentados os resultados do índice IC e IC_{O_2} na Figura 4.30. Foi realizada ainda análise de variância para verificação da existência de diferença significativa entre os resultados.

Figura 4.29 – (a) Resistência à compressão para os grautes GR18, GR21 e GR35, aos 28 e 91 dias, e (b) ajuste com a Lei de Abrams.



FONTE: A autora (2023).

Figura 4.30 – (a) Consumo de cimento para se obter 1MPa de resistência à compressão (IC) e (b) emissões de CO_2 e/m³.MPa (IC_{CO_2}) dos grautes GR18, GR21 e GR35, aos 28 e 90 dias.



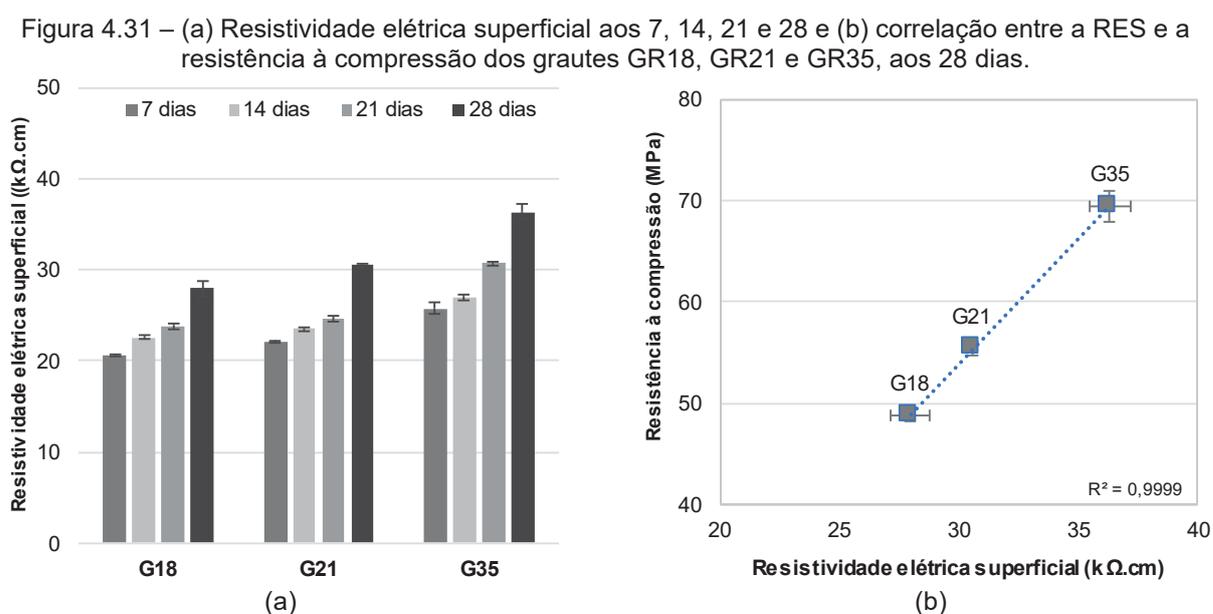
FONTE: A autora (2023).

A comparação múltipla de médias (Tukey a 95% de probabilidade – Tabela G.4) comprova que os 3 grautes apresentam resultados diferentes entre si aos 28 e 91 dias. De acordo com os resultados apresentados é possível observar que os grautes estudados se comportam de acordo com a Lei de Abrams (Figura 4.29(b)), uma vez que o aumento da relação a/c resultou em queda na resistência em ambas as idades. Segundo Bentz e Aïtcin (2008), a relação a/c está diretamente relacionada com o espaçamento das partículas de cimento na pasta. Quando menor a relação a/c, menor é o espaçamento entre as partículas, e

os vazios deixados entre elas serão mais rapidamente preenchidos com fases hidratadas, reduzindo a porosidade e criando uma matriz mais densificada, que resulta em maior resistência mecânica. Segundo Bentz e Aïtcin (2008), a relação a/c está diretamente relacionada com o espaçamento das partículas de cimento na pasta - quanto menor a relação a/c , mais densificada é a matriz, que resulta em maior resistência mecânica. O GR35, que apresenta a menor relação a/c , apresentou resistência à compressão de 74,39 MPa aos 91 dias, valor 20% e 7% maior que o apresentados pelo GR18 e GR21, respectivamente, conforme esperado devido ao aumento da água nestas composições.

A Figura 4.30(a) mostra que o GR35 obteve também o menor IC nas duas idades estudadas. Seria, portanto, a mistura mais eficiente, apresentado redução no consumo de cimento/ $m^3.MPa$ de aproximadamente 13,8% em relação ao GR18 aos 91 dias, indicando um uso mais racional deste material. Em relação às emissões de $CO_2e/m^3.MPa$, apresentado na Figura 4.30(b), o GR35 também foi o que apresentou os menores valores de IC_{CO_2} , indicando um menor impacto ambiental desta mistura.

A Figura 4.31 apresenta os resultados de resistividade elétrica superficial (dados sem tratamento com os fatores geométricos, conforme explanado no programa experimental) aos 7, 14, 21 e 28 dias, e a correlação dos resultados de RES com a resistência à compressão, aos 28 dias.



Da análise dos dados apresentados na Figura 4.31(a), pode-se concluir que os três grautes estudados apresentaram um crescimento na resistividade elétrica superficial com o aumento da idade, devido à evolução das reações de hidratação, que tornam a estrutura mais densificada. O teste ANOVA comprovou influência significativa da idade e do tipo de graute.

Após realizada a comparação múltipla de média (Tukey a 95% de probabilidade – Tabela G.6) com os dados de RES aos 28 dias, foi possível observar que os três grautes apresentaram diferenças estatisticamente significativas, sendo o GR35 o graute que obteve os maiores valores de resistividade elétrica, 30% e 19% superiores aos encontrados para GR18 e GR21, respectivamente. Desta forma, pode-se concluir que a diminuição da relação a/agl resultou em aumento da RES, conforme esperado. Uma vez que a relação a/agl pode ser considerada um fator controlador da matriz porosa e do índice de vazios da matriz cimentícia, uma a/agl menor diminui o índice de vazios e a matriz tende a apresentar menor porosidade, com uma rede de poros mais fina e menos interconectada, o que leva a uma maior resistividade elétrica, conforme observado.

4.4.2 Penetração dos grautes no esqueleto granular e moldagem das amostras

Os grautes com 3 diferentes relações água/aglomerantes (GR18, GR21 e GR35) foram aplicados nos 3 esqueletos granulares desenvolvidos (B0, B1 e BX), resultando em 9 diferentes TSC. O consumo de materiais dos TSC produzidos pode ser observada na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Consumo de materiais (kg/m³) das 9 composições de TSC estudadas.

TSC	Consumo (kg/m ³)						
	Areia	Cimento	Cinza volante	Brita 0	Brita 1	Aditivo	Água
B0GR18	339,69	329,55	95,55	1490,83	-	3,30	165,75
B1GR18	333,62	323,66	93,84	-	1509,93	3,24	162,79
BXGR18	310,12	300,86	87,23	718,27	876,43	3,01	151,32
B0GR21	342,62	332,40	96,37	1490,83	-	3,32	163,31
B1GR21	336,51	326,46	94,65	-	1509,93	3,26	160,39
BXGR21	312,80	303,46	87,98	718,27	876,43	3,03	149,09
B0GR35	352,22	341,70	99,07	1490,83	-	3,42	155,34
B1GR35	345,93	335,60	97,30	-	1509,93	3,36	152,56
BXGR35	321,55	311,96	90,45	718,27	876,43	3,12	141,81

FONTE: A autora (2023).

O método utilizado para a moldagem foi por gravidade, no qual o graute foi derramado no topo do corpo de prova. A colocação do graute foi feita de forma lenta e foi utilizada toda a superfície do topo do molde, não concentrando a colocação do graute só no ponto central. O derramamento lento e descentralizado mostrou ser a forma mais eficiente de utilização do método da gravidade, pois proporciona tempo suficiente para o graute escoar e as bolhas de ar escaparem para a superfície.

Nas Figura 4.32 a Figura 4.34 pode-se observar a superfície externa, corte transversal e longitudinal das composições produzidas. Destaca-se que, para fins de comparação, são expostas as fotografias dos corpos de prova que mais apresentaram falhas de concretagem de cada combinação.

Figura 4.32 – Superfície externa dos corpos de prova das 9 composições de TSC estudadas.

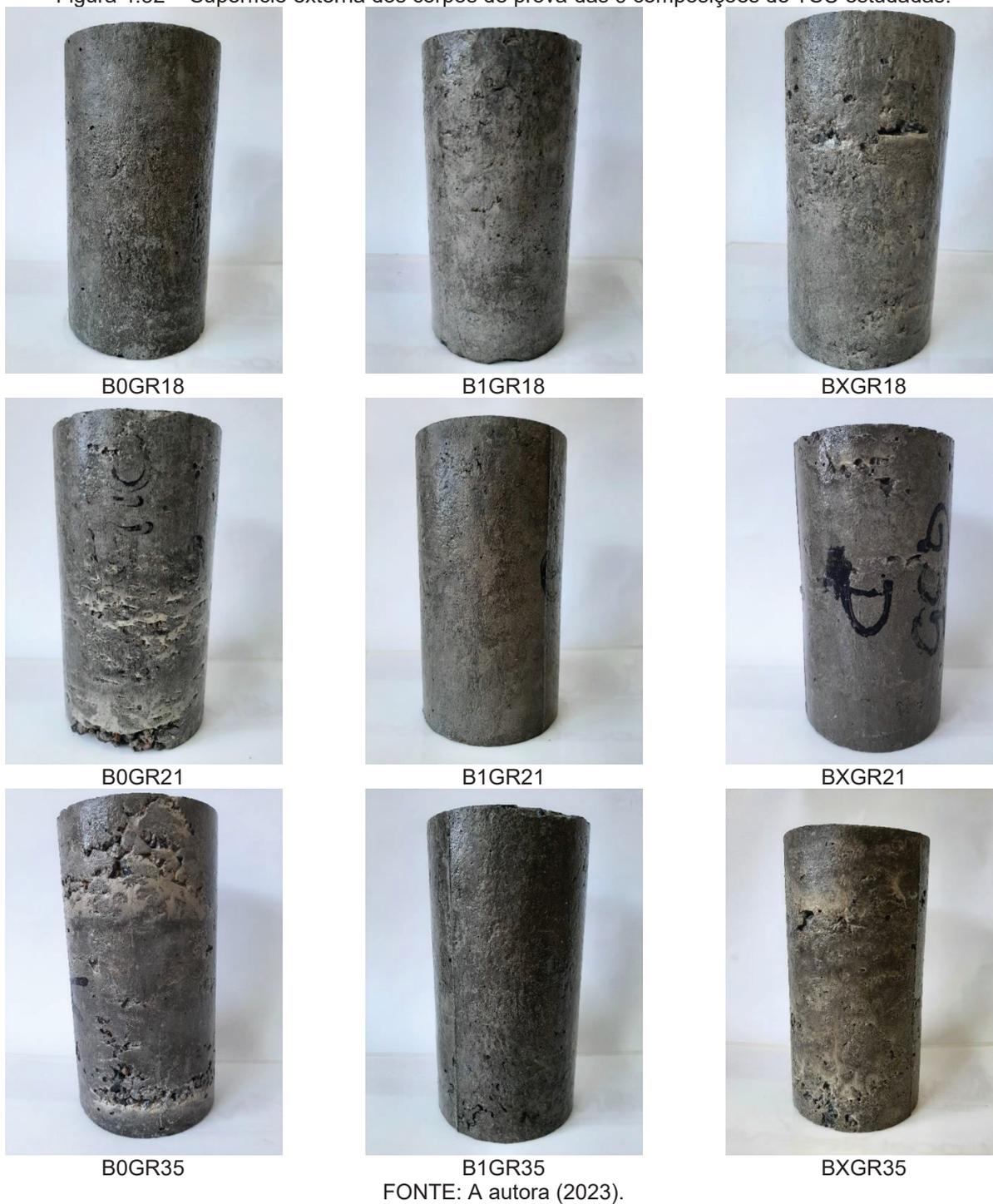
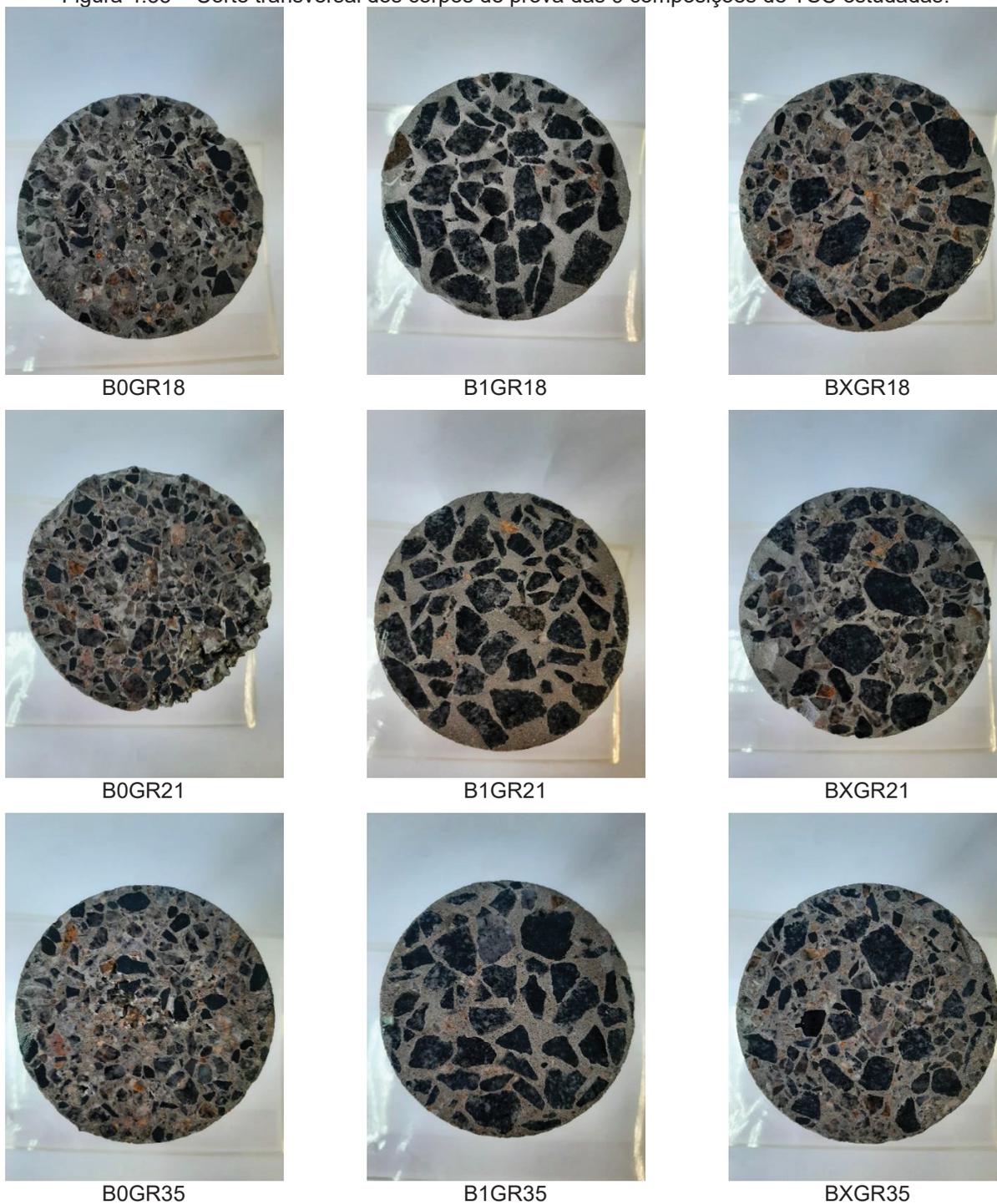


Figura 4.33 – Corte transversal dos corpos de prova das 9 composições de TSC estudadas.



FONTE: A autora (2023).

Figura 4.34 – Fotografias do corte longitudinal dos corpos de prova das 9 composições de TSC estudadas.



B0GR18



B1GR18



BXGR18



B0GR21



B1GR21



BXGR21



B0GR35



B1GR35



BXGR35

FONTE: A autora (2023).

Como pode-se observar, a combinação do GR18 com os três esqueletos granulares foi capaz de produzir corpos de prova uniformes. Esse fato indica que a maior fluidez deste graute propicia um preenchimento dos vazios mais efetivo.

Já da análise dos corpos de prova produzidos com o GR21, é possível observar que houve dificuldade no preenchimento dos vazios pelo graute nos esqueletos B0 e BX. A composição B0GR21 apresentou vazios de concretagem – fato que pode ser observado na Figura 4.34 – o que sugere que o graute teve dificuldade de escoar pelo esqueleto granular. Fato semelhante ocorreu, em menor intensidade, na composição BXGR21, porém sem a formação de vazios tão acentuados no corpo de prova.

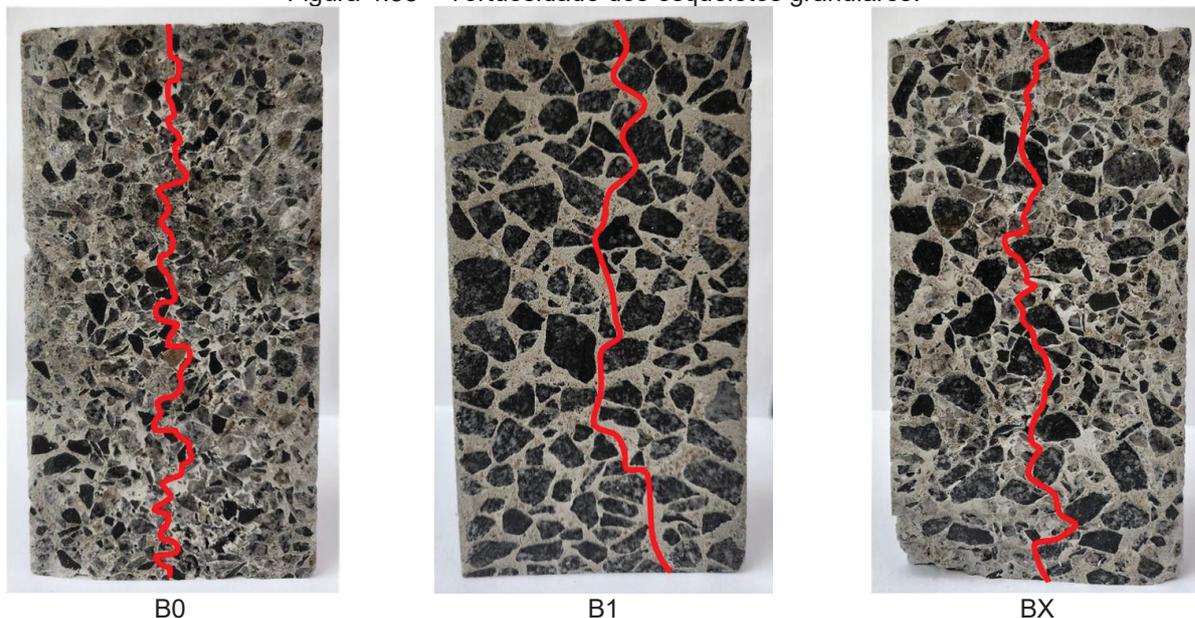
Com relação às composições moldadas com o GR35 – graute com menor a/agl entre os estudados – observou-se que o graute novamente teve dificuldade ao penetrar no esqueleto B0, produzindo corpo de prova com falhas em diversos pontos de sua superfície externa. A combinação BXGR35 também apresentou falhas no grauteamento em menor quantidade.

O esqueleto granular B1 foi capaz de produzir corpos de prova com superfície mais uniforme para os 3 grautes estudados. Quando comparado à BX esse é um comportamento esperando, uma vez que B1 tem menor densidade de empacotamento e maior índice de vazios, o que propicia maior facilidade de grauteamento.

Porém, da análise visual dos corpos de prova, observa-se que B1 produziu corpos de prova mais uniformes que B0, apesar de ambos apresentarem densidade de empacotamento semelhante, conforme apresentado na Tabela 4.16. Um dos fatores que pode ser analisado para compreender esse fato é o índice de forma dos agregados: o esqueleto B0 é constituído de 100% de brita 0, que apresenta coeficiente de forma e índice de lamelaridade menores que os encontrados para a brita 1. Esse fato indica que os grãos da brita 0 são menos arredondados, ou mais lamelares, o que propicia a formação de canais mais estreitos em comparação aos formados nos esqueletos B1 e BX, fato que pode impedir a passagem adequada do graute e levar a formação de falhas como as observadas.

Outro fator que influencia na capacidade de penetração dos grautes é a tortuosidade, definida como a relação entre o comprimento efetivo percorrido nesse caso pelo graute, e o comprimento da amostra (YAVUZ et al., 2023). Uma representação da tortuosidade dos três esqueletos granulares é apresentada na Figura 4.35.

Figura 4.35 – Tortuosidade dos esqueletos granulares.



FONTE: A autora (2023).

Para um índice de vazios similar, a condutividade hidráulica – capacidade de penetração do graute no caso do TSC – diminui com o aumento da tortuosidade (ZHONG et al., 2016). Partículas mais lamelares como a da brita 0 utilizada, promovem caminho mais tortuoso no meio, enquanto partículas mais esféricas como as da brita 1 possibilitam um caminho mais direto. Como resultado, a capacidade de penetração do graute no esqueleto granular B1 é maior, devido à sua menor tortuosidade.

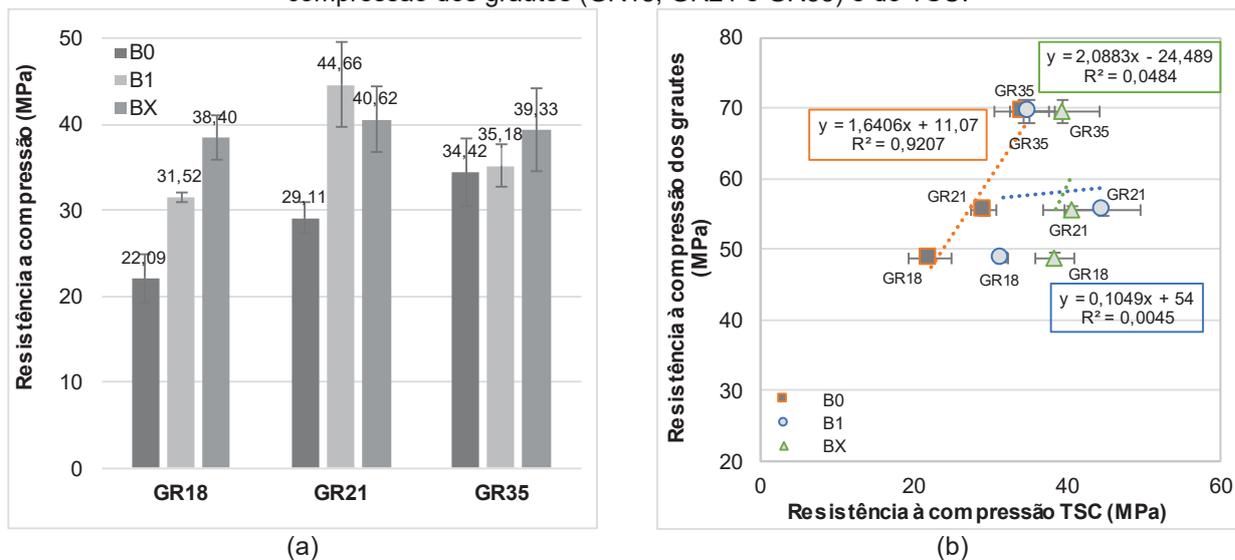
O diâmetro dos grãos também influencia na tortuosidade, uma vez que agregados maiores geram poros maiores, e isso aumenta a interconectividade entre eles (YAVUZ et al., 2023; ZHONG et al., 2016). Dessa forma, o esqueleto B1 apresenta menor tortuosidade, devido ao maior diâmetro de suas partículas, como pode ser observado na Figura 4.35.

Fica demonstrado que os efeitos da densidade de empacotamento e da dimensão do grão do esqueleto granular exercem influência no TSC. Uma maior densidade de empacotamento, como a de BX, promove menor índice de vazios, o que leva a um menor consumo de graute. Porém a presença dos grãos de menor dimensão - que promoveram o maior empacotamento - aumentam também a tortuosidade do meio e dificultam o grauteamento, o que pode levar à uma menor resistência mecânica desses concretos.

4.4.3 Caracterização dos TSCs

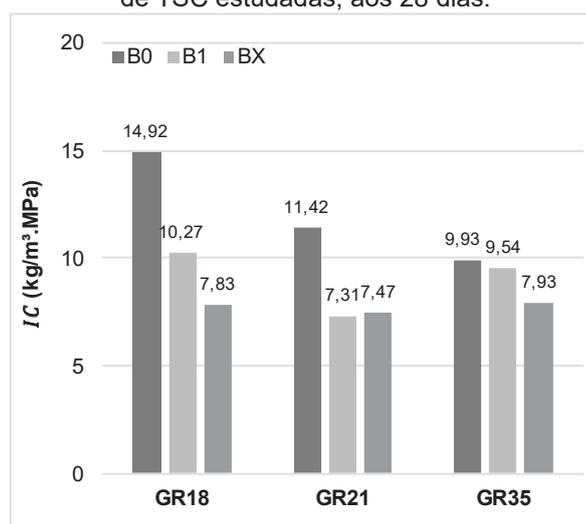
A resistência à compressão dos TSC aos 28 dias, e sua correlação com a resistência à compressão dos grautes, é apresentada na Figura 4.36. Também são apresentados os resultados do *IC* na Figura 4.37. Foi realizada ainda análise estatística para verificação da existência de diferença significativa entre os resultados.

Figura 4.36 – (a) Resistência à compressão para os TSC aos 28 dias e (b) correlação entre a resistência à compressão dos grautes (GR18, GR21 e GR35) e do TSC.



FONTE: A autora (2023).

Figura 4.37 – Consumo de cimento para se obter 1MPa de resistência à compressão (*IC*) das 9 composições de TSC estudadas, aos 28 dias.

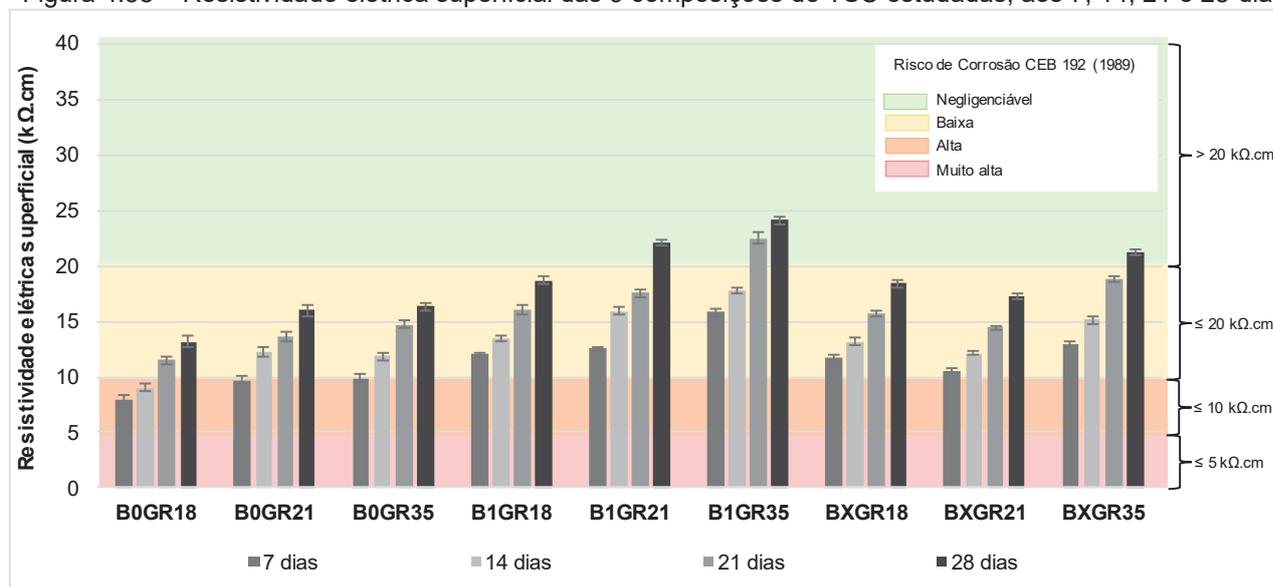


FONTE: A autora (2023).

Após teste ANOVA, observou-se que o esqueleto exerce influência significativa na resistência à compressão dos TSC. Da análise estatística (Tukey a 95% de probabilidade –

Tabela G.8) pode-se concluir, primeiramente, que os grupos de esqueletos granulares B1 e BX não apresentaram diferenças significativas entre si na resistência à compressão, e ambos foram superiores a B0, que apresentou uma redução significativa de 28% neste resultado. A mesma análise demonstrou que os diferentes grupos de graute não apresentaram diferenças significativas entre si (Tabela G.9). Na Figura 4.36(b) é possível observar que não há boa correlação entre a resistência à compressão dos grautes e dos concretos correspondentes. Este comportamento reforça as características exclusivas do TSC, que não apresenta a mesma correlação encontrada para concretos convencionais devido ao contato direto entre agregados, e da influência da capacidade de penetração do graute, que exige procedimentos de dosagem específicos para este tipo de material. A composição B1GR21 foi a que apresentou maior resultado de resistência à compressão, ainda que apresentando diferença significativa apenas com a composição B0GR18 (Tabela G.10). Prosseguindo na análise dos resultados do TSC, pode-se observar na Figura 4.38 os resultados de RES dos concretos produzidos.

Figura 4.38 – Resistividade elétrica superficial das 9 composições de TSC estudadas, aos 7, 14, 21 e 28 dias.



FONTE: A autora (2023).

Após realizada a análise estatística (ANOVA, a 95% de probabilidade), observou-se que o esqueleto granular exerceu influência significativa nos valores de resistividade, o que reforça a influência do agregado nesta propriedade. Já a idade e o tipo de graute não geraram diferenças estatisticamente significativas entre as médias das populações, assim como observado na resistência à compressão. Após realizada comparação de médias (Tukey a 95%

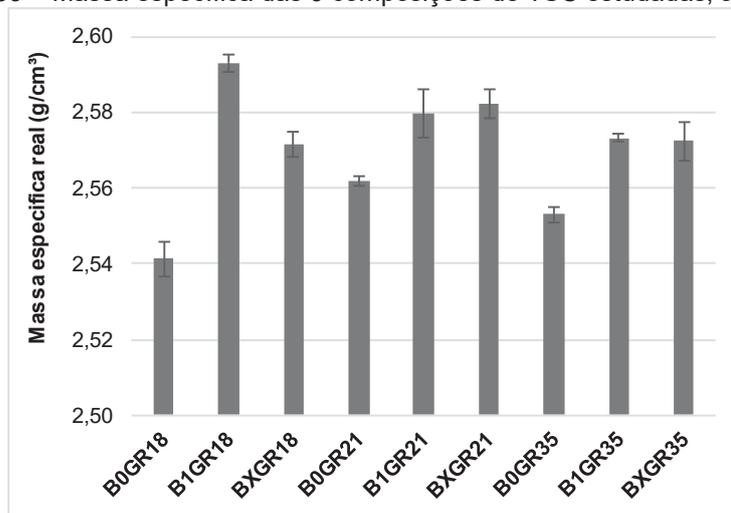
de probabilidade – Tabela G.12) observou-se que, aos 28 dias, no esqueleto BX o graute GR18 gerou redução significativa na RES, nos esqueletos B1 e B0 nenhum graute apresentou influência significativa na propriedade. Este resultado reforça que o esqueleto granular exerceu diferenças entre os valores de resistividade lidos devido à influência do agregado nesta propriedade.

De forma geral, os agregados graúdos apresentam maior RES em relação a matriz cimentícia: como esses agregados apresentam porosidade bastante inferior à da matriz, a corrente elétrica tem maior dificuldade de passar por eles (AZARSA; GUPTA, 2017; SANTOS; SILVA; LEITE, 2021). Desta forma, um aumento do percentual de agregados no concreto leva a um aumento da resistividade elétrica superficial. A distribuição granulométrica dos agregados graúdos também influencia na RES, sendo que os agregados com grãos de maior dimensão resultam em concretos de maior resistividade, uma vez que agregados menores geram mais zonas de transição - a qual apresenta maior porosidade em comparação com o restante da matriz cimentícia (SENGUL, 2014).

A brita 0, conforme apresentado no item 4.1.3, apresenta menor coeficiente de forma e índice de lamelaridade quando comparado com a brita 1. Esse fato indica que os grãos da brita 0 são mais lamelares, o que aumenta a tortuosidade e também reduz a RES (SENGUL, 2014).

Ao comparar os resultados de RES apresentados na Figura 4.38, pode-se observar que os valores encontrados para os esqueletos B1 são maiores que os encontrados para B0, para o mesmo graute e idade. Aos 28 dias os concretos com esqueleto B1 apresentaram RES 41%, 38% e 48% maiores que os produzidos com B0 para os grautes GR18, GR21e GR35 respectivamente. Como ambos os esqueletos apresentam densidade de empacotamento e índice de vazios semelhantes, pode-se atribuir a maior RES ao maior diâmetro médio dos agregados graúdos do esqueleto B1, e também a menor tortuosidade deste. Os menores valores de RES encontrados para os concretos do esqueleto BX, em comparação ao B1, podem ser atribuídos também às falhas de concretagem identificada nas imagens apresentadas na Figura 4.32 a Figura 4.34. Analisando os valores de RES, e os associando aos limites estabelecidos pelo CRB 192, pode-se verificar que, aos 28 dias, todos os traços estudados apresentaram RES enquadrados nas faixas de baixo ou negligenciável risco a corrosão, com resistências à compressão variando de 22 a 44 MPa. Aos 28 dias também foi realizado o ensaio de massa específica, absorção e índice de vazios, e os resultados são apresentados na Figura 4.39 e Figura 4.40, respectivamente.

Figura 4.39 – Massa específica das 9 composições de TSC estudadas, aos 28 dias.

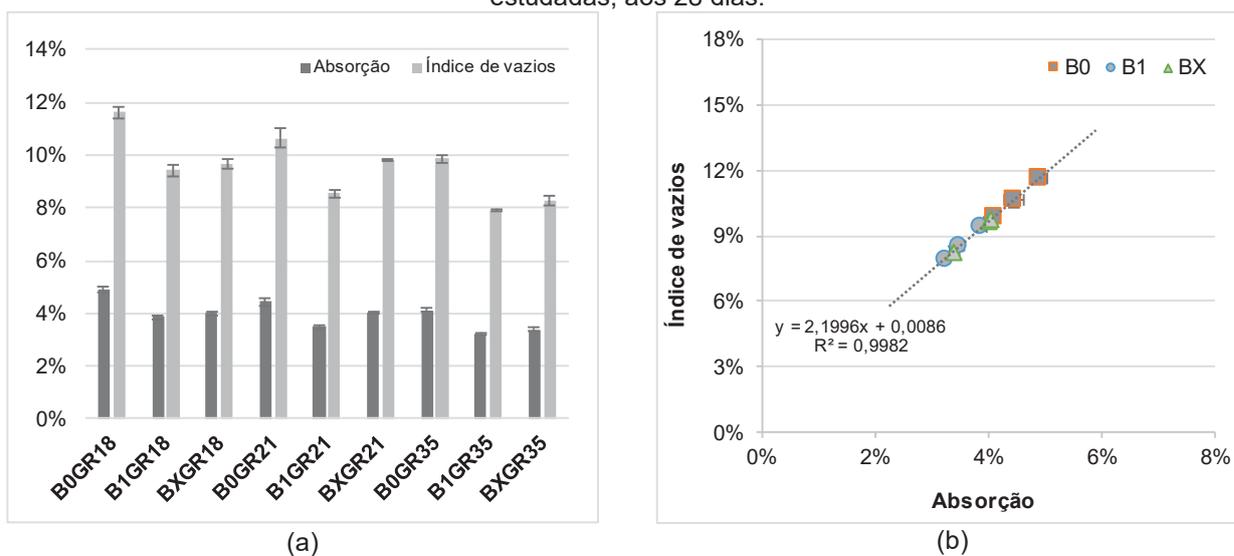


FONTE: A autora (2023).

Após realizada a análise estatística (Tukey, a 95% de probabilidade – Tabela G.22) pode-se observar os TSC de maior massa específica foram os 3 produzidos com o esqueleto B1, também o BXGR21, apresentando valor médio de 2,58g/cm³.

A Figura 4.40 apresenta os resultados da absorção e índice de vazios, bem como a correlação entre as medidas.

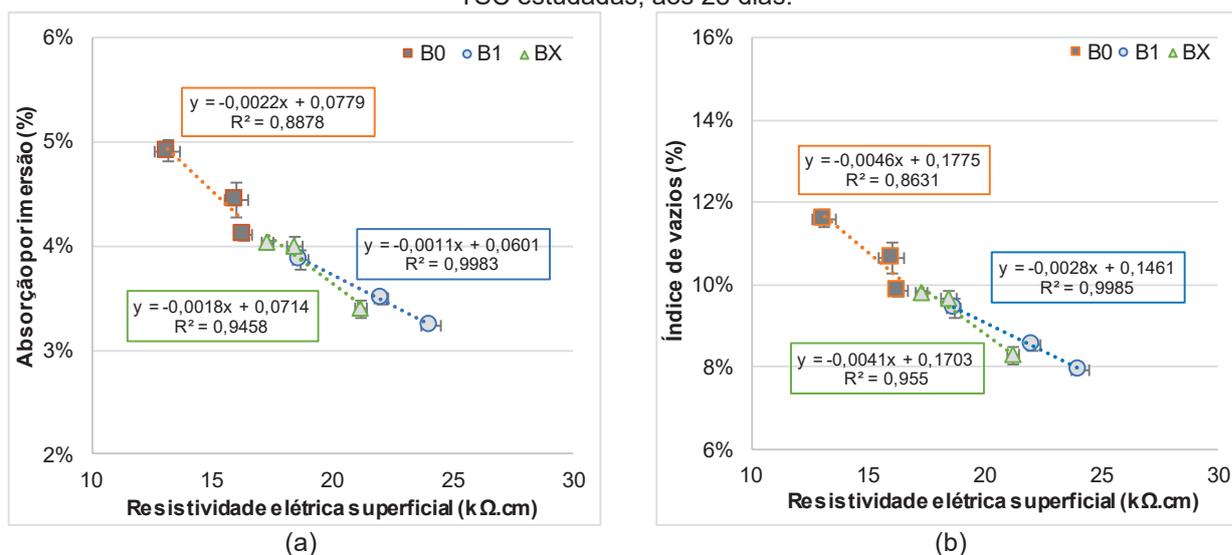
Figura 4.40 – (a) Absorção por imersão e índice de vazios e (b) sua correlação, para as 9 composições de TSC estudadas, aos 28 dias.



FONTE: A autora (2023).

Com relação à absorção e índice de vazios, o esqueleto granular influenciou significativamente os resultados obtidos (ANOVA, a 95% de probabilidade – Tabela G.13 e Tabela G.17) devido à variação do teor de agregados nas composições. Pode-se observar ainda que o graute também exerce influência significativa na propriedade, devido à variação da relação a/agl para ajuste da fluidez. Os resultados de absorção variaram de 3,2% a 5,0% enquanto o índice de vazios de 7,9% a 11,8%. Considerando que o ensaio da NBR 9778 avalia apenas os poros permeáveis, não é possível traçar conclusões acerca das falhas de concretagem e dificuldade de penetração dos grautes a partir dos resultados de índice de vazios. Na Figura 4.41 pode-se observar a correlação entre a RES e a absorção por imersão dos concretos aos 28 dias.

Figura 4.41 – Correlação entre RES e (a) absorção por imersão e (b) índice de vazios, das 9 composições de TSC estudadas, aos 28 dias.



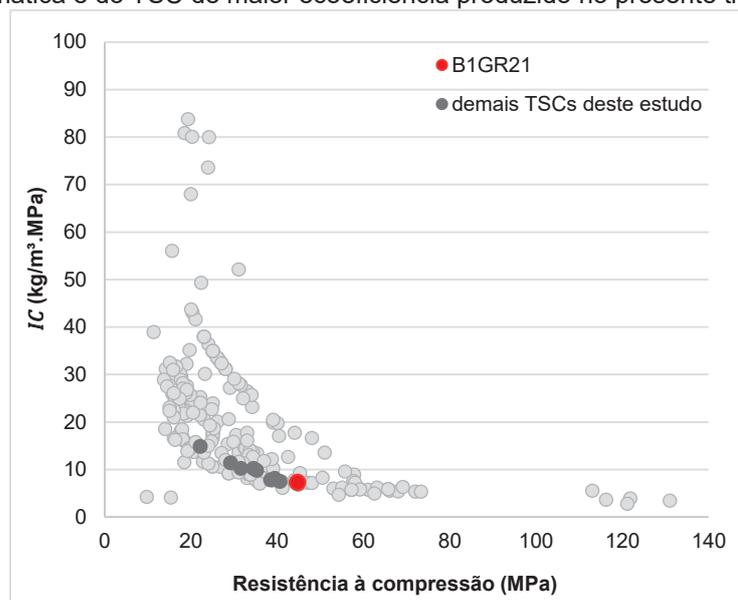
FONTE: A autora (2023).

Pode-se observar que, conforme esperado, a Figura 4.41 mostra uma tendência de aumento da resistividade elétrica superficial do concreto com a redução da absorção por imersão e do índice de vazios. Isso ocorre porque a água absorvida pelo concreto aumenta a sua condutividade elétrica, fato que, conseqüentemente, reduz a resistividade elétrica. Em relação às equações que descrevem os modelos, pode-se dizer que todas apresentaram bom ajuste, apresentando $R^2 > 0,86$.

Sintetizando os resultados apresentados para as combinações de esqueletos granulares e grautes, a composição B1GR21 apresentou o maior valor de resistência à compressão (Figura 4.36) atrelada a uma elevada RES (Figura 4.38). A Figura 4.37 demonstra

ainda que o concreto B1GR21 obteve o menor IC dentre as composições estudadas. Esta seria, portanto, a mistura mais eficiente, apresentando redução no consumo de cimento/ m^3 .MPa de aproximadamente 51% em relação ao B0GR18 (que apresentou maior IC), indicando um uso mais racional deste material. O valor do índice IC obtido para B1GR21 foi de 7,31 kg/m^3 .MPa, valor inferior à média indicada por Grazia et al. (2019) para concretos convencionais, na mesma faixa de resistência dos TSC estudados neste trabalho, que varia de 9 a 14 kg/m^3 .MPa. O valor encontrado também é inferior à média encontrada por Damineli et al. (2010) para concretos brasileiros na faixa de 40 MPa: segundo os autores, o valor médio para essa faixa de resistência é de 10 a 12 kg/m^3 .MPa. Apesar de não ter atingido marca inferior a 5 kg/m^3 .MPa – valor apontado por Damineli et al. (2010) para concretos ecoeficientes – o valor de IC obtido se destaca quando comparado aos valores obtidos por outros autores na produção de TSC, como pode ser observado na Figura 4.42.

Figura 4.42 – Relação entre o índice IC e resistência à compressão dos traços de TSC analisados na revisão sistemática e do TSC de maior ecoeficiência produzido no presente trabalho.

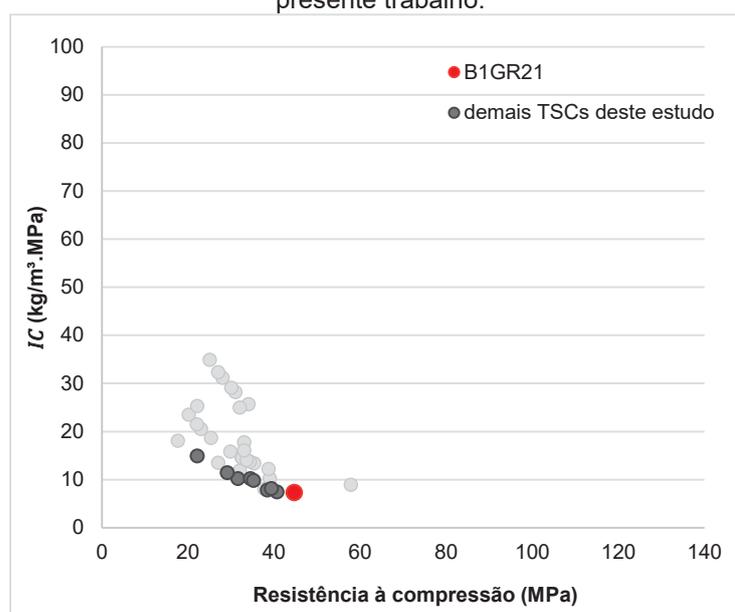


FONTE: A autora (2023).

Analisando a Figura 4.42 pode-se observar, primeiramente, que o B1GR21 atingiu valor médio de resistência à compressão acima dos valores atingidos por 85% dos autores analisados na revisão sistemática. Esse fato indica que as técnicas aplicadas para dosagem dos concretos deste estudo foram adequadas e produziram concretos com faixas de resistência acima da média encontrada nos estudos. Em relação ao IC , o B1GR21, com consumo de 7.31 kg/m^3 .MPa, alcançou valor inferior ao obtido por 86% dos autores analisados.

Na Figura 4.43 pode-se observar os resultados de resistência à compressão e IC obtidos por diversos autores, com base na revisão sistemática realizada no capítulo 2 desta tese, que utilizaram parâmetros semelhantes ao utilizado no presente trabalho – TSC produzido pelo método da gravidade e sem o uso de fibras.

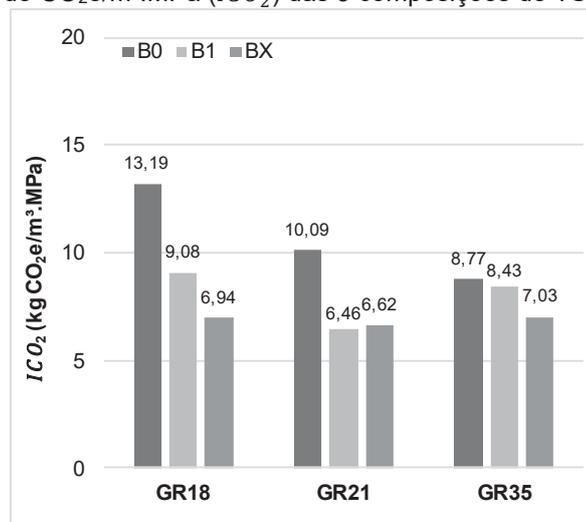
Figura 4.43 – Relação entre IC e resistência à compressão dos traços de TSC analisados na revisão sistemática produzidos pelo método da gravidade e sem fibras, e do TSC de maior ecoeficiência produzido no presente trabalho.



FONTE: A autora (2023).

Do universo de pesquisas analisadas que utilizaram o método da gravidade e não utilizaram fibras na composição do TSC, o B1GR21 apresentou o menor IC , fato que indica que o método utilizado para dosagem do concreto foi adequado e permitiu a produção de concretos que utilizaram de forma mais eficiente o cimento. O IC_{O_2} dos TSC produzidos podem ser observadas na Figura 4.44.

Figura 4.44 – Emissões de $\text{CO}_2\text{e}/\text{m}^3\cdot\text{MPa}$ (ICO_2) das 9 composições de TSC estudadas, aos 28 dias.



FONTE: A autora (2023).

É possível observar que o B1GR21 foi o concreto que obteve menor valor de ICO_2 dentre todos os concretos produzidos, apresentando valor até 51% menor do que o encontrado nas demais composições. Segundo Damini et al. (2010), o valor médio estimado da literatura é de $7.1 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^3\cdot\text{MPa}$ para dados internacionais e de $9.1 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^3\cdot\text{MPa}$ quando considerados apenas dados brasileiros. Desta forma, pode-se concluir que o B1GR21 apresentou valores de emissão de CO_2 inferiores à média internacional.

Assim, o uso de um graute com tempo de fluidez intermediário e esqueleto granular de maior diâmetro resultou em um melhor desempenho, fato que evidencia que a simples redução da relação a/agl ou aumento do empacotamento do esqueleto não estão diretamente ligados ao aumento da resistência mecânica do TSC, devido à interação entre graute e esqueleto granular.

A partir do estudo e formulação dos grautes, esqueletos granulares e produção do TSC pode-se concluir, primeiramente, que a metodologia utilizada para o ajuste da trabalhabilidade do graute foi adequada e permitiu produzir grautes estáveis para aplicação no TSC. Em relação ao esqueleto granular, pode-se concluir que a busca pelo maior empacotamento – e, conseqüentemente, do menor consumo de graute – não garante a produção dos concretos com maior ecoeficiência. Isto porque fatores além da densidade de empacotamento, como forma do agregado e tortuosidade do esqueleto, interagem com as características reológicas do graute e influenciam na qualidade da concretagem do TSC. Porém fica evidenciada também a possibilidade de produção de TSCs a partir de esqueletos granulares com diâmetro mínimo de agregados graúdos menores do que aqueles indicados pelas normativas vigentes, bem como

a adequabilidade do uso de aditivos superplastificantes de terceira geração para a produção de grautes para TSC. O esqueleto granular B1, que produziu o concreto de menores IC e ICO_2 dentre os estudados, possui dimensão mínima do agregado graúdo de 6.3 mm, aproximadamente metade do diâmetro mínimo indicado pelas normativas (ACI, 1997; ASTM, 2020).

Ainda em relação ao esqueleto granular, pode-se concluir que os agregados nacionais, especialmente os contidos na zona granulométrica 9,5/25, são adequados para a produção de TSC com grautes de trabalhabilidade que atenda a qualquer dos três tempos de funil sugeridos pela norma. Destaca-se que o agregado graúdo dessa faixa granulométrica possui dimensão mínima dos grãos de 9,5 mm, menor do que a dimensão mínima estabelecida pelas normativas ACI 304 (ACI, 1997), ASTM C637-20 (ASTM, 2020) e por Neville e Brooks (2010), o que comprova que atualmente existe tecnologia para produção de grautes estáveis para aplicação em esqueletos granulares com grãos de menor dimensão.

Pode-se concluir também que a metodologia proposta para proporcionamento dos materiais para produção do TSC foi adequada e capaz de produzir concretos de caráter mais ecoeficiente. Dentre os concretos produzidos e analisados, o B1GR21 apresentou maior eficiência no uso do cimento, utilizando 7,31 kg de cimento/m³.MPa, valor 39% inferior à média encontrada por Damineli et al. (2010) para concretos brasileiros na faixa de 40 MPa. O IC do B1GR21 foi também o menor dentre os TSC analisados na revisão sistemática que utilizaram características semelhantes de produção.

Por fim, pode-se concluir ainda em termos de propriedades mecânicas aliada a características de ecoeficiência que B1GR21 foi o concreto que apresentou o menor ICO_2 , atingindo valor de 6,46 CO₂e/m³.MPa, valor 29% inferior à média da emissão dos concretos convencionais nacionais.

4.4.4 Influência do método de mistura

Com base nos resultados obtidos, foi realizada a dosagem de dois concretos com mistura por método convencional (CC) baseados na composição de B1GR21 para verificação da influência do método de mistura nas propriedades dos concretos. Para o primeiro concreto, denominado doravante de CC1, foi utilizado o mesmo traço correspondente ao B1GR21, porém empregou-se o método tradicional de mistura. A consistência fluida do graute acarretou

a segregação da fração graúda do CC1 e, de forma a manter a relação a/agl e permitir comparações com o B1GR21, não foi utilizado aditivo superplastificante neste traço, medida que se mostrou eficaz para sanar a segregação. Na Tabela 4.20 é apresentado o consumo dos materiais do traço CC1.

Para o segundo concreto denominado CC2, foram utilizadas as mesmas composições do B1GR21 para o graute e esqueleto granular, mas com variações na proporção entre eles. Para evitar a segregação no CC2, também não foi utilizado aditivo superplastificante neste concreto. O estudo iniciou com uma proporção de 45% de graute e 55% de agregado graúdo, e foram feitas adições sucessivas de graute, em incrementos de 2% aproximadamente, até que fosse atingida a proporção ótima entre esqueleto granular e graute, mantendo-se, assim, a mesma relação a/agl . Esse procedimento é semelhante ao ajuste de teor ótimo de argamassa proposto pelo método de dosagem IPT/EPUSP para concretos convencionais (HELENE; TERZIAN, 1992). Na Figura 4.45 pode-se observar o aspecto e acabamento nas diferentes proporções testadas. Na Figura 4.46 é apresentado o *slump test* de parte dos concretos testados.

Figura 4.45 – Aspecto e acabamento dos traços testados para o CC2, em função do teor de graute (argamassa úmida).



45,0%



46,9%



48,9%



51,0%



53,0%



55,0%



57,0%



58,9%



61,0%



63,0%



65,0%



67,0%

FONTE: A autora (2023).

Figura 4.46 – *Slump test* dos traços testados para o CC2, em função do teor de graute (argamassa úmida).



FONTE: A autora (2023).

Pode-se observar, na Figura 4.45, que a proporção inicial de graute, de 45%, não foi suficiente para recobrir todos os agregados e preencher o vazio entre eles. O mesmo ocorreu nas adições seguintes de graute, até atingir a proporção de 58,9% - primeira composição a apresentar *slump* diferente de zero, como pode ser observado na Figura 4.46.

Apesar de apresentar algum abatimento – 45 mm com 58,9% de graute – ao se fazer os movimentos de vai e vem com a colher de pedreiro, ainda foi possível observar vazios na superfície do concreto na betoneira, fato indicativo da falta de graute para preencher os vazios do agregado graúdo no concreto. Ao se atingir a proporção de 33% de agregados graúdos e 67% de graute, foi possível verificar preenchimento dos vazios da brita pelo graute. Além disso, o *slump* atingido também foi adequado, com abatimento de 70mm. Na Tabela 4.20 é

apresentado o consumo dos materiais do traço CC2, bem como das demais composições de concreto.

Tabela 4.20 – Consumo de materiais (kg/m³) do traço CC1, CC2 e B1GR21.

Composição	Consumo (kg/m ³)							
	Areia	Cimento	Cinza volante	Agregado graúdo	Aditivo	Água	Relação a/agl	Relação a/c
CC1	337,45	327,38	94,92	1509,93	-	158,70	0,38	0,48
CC2	518,83	503,34	145,94	889,50	-	244,00	0,38	0,48
B1GR21	336,51	326,46	94,65	1509,93	3,26	160,39	0,38	0,48

FONTE: A autora (2023).

Para a moldagem do TSC, foi empregado o método da gravidade, tal qual explicado no item 4.4.2 do presente estudo. Já os concretos CC1 e CC2 foram moldados de acordo com as diretrizes da NBR 5738 (ABNT, 2015), utilizando adensamento manual. Esse método de adensamento foi o escolhido pois é adequado ao *slump* de 70 mm obtido para o CC2. Na Figura 4.47 é possível observar a superfície externa dos corpos de prova produzidos após desmoldagem.

Figura 4.47 – Superfície externa dos corpos de prova do B1GR21, CC1 e CC2.

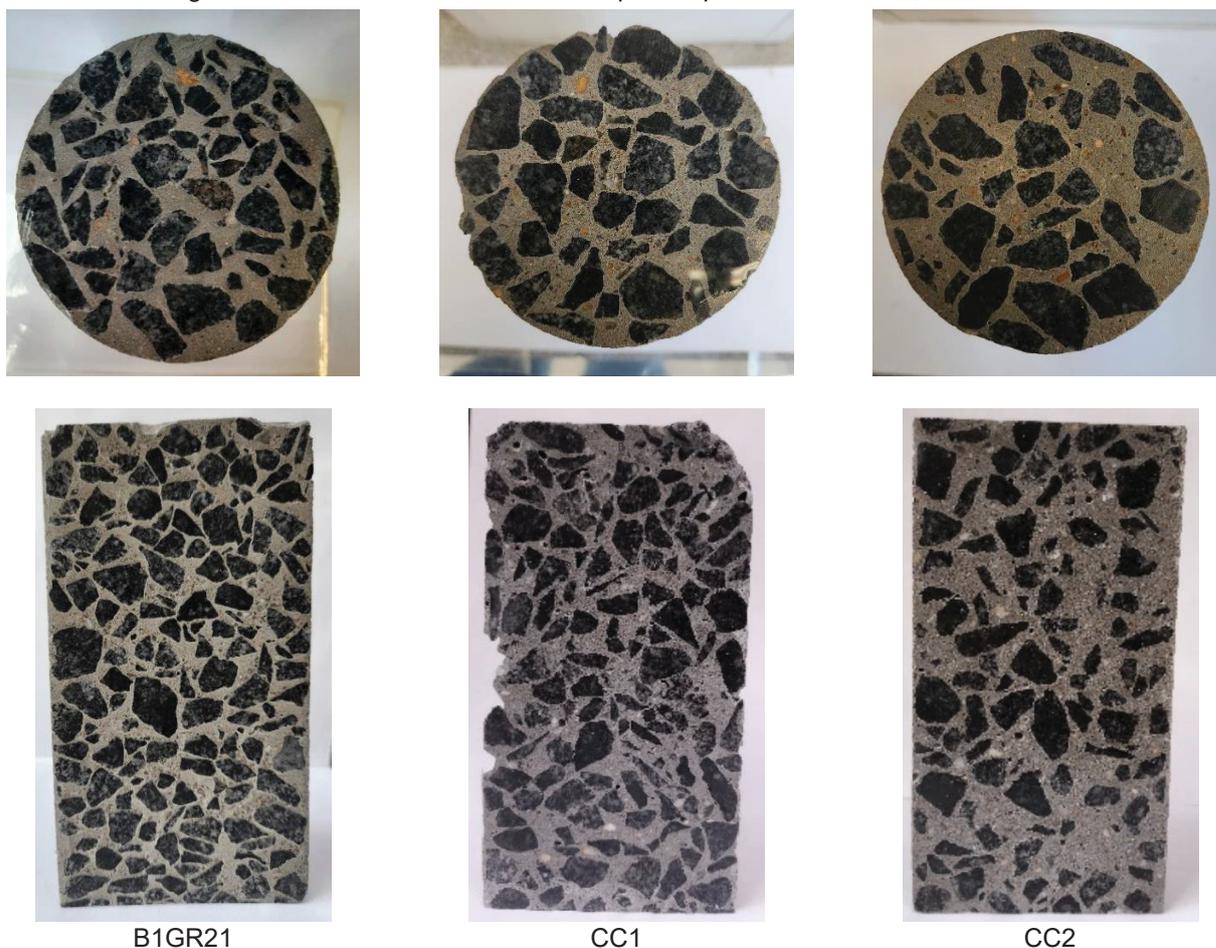


FONTE: A autora (2023).

Conforme já discutido no item 4.4.2 desta tese, a combinação do graute GR21 com o esqueleto B1 foi capaz de produzir corpos de prova com a superfície uniforme, Figura 4.47(a), o que indica a adequabilidade entre os espaços deixados pelo esqueleto e a composição e trabalhabilidade do graute.

Já o CC1 produziu corpos de prova com muitas falhas na superfície, como pode ser observado na Figura 4.47(b). Isso se deve ao fato de o traço do CC1 não conter graute em quantidade suficiente para recobrir todos os grãos de agregado graúdo, dando a trabalhabilidade necessária à mistura para lançamento convencional e ainda completar os vazios deixados entre eles. Isso destaca a característica distintiva do TSC, que consiste em produzir concretos com uma proporção maior de agregados graúdos em comparação ao concreto convencional, o que é viável devido ao método de lançamento diferenciado do TSC. Por outro lado, na Figura 4.47(c), fica evidente que o aumento da proporção de graute é necessário para um preenchimento eficaz dos vazios. No caso CC2, que conta com 67% de graute em sua composição, os corpos de prova apresentaram uma superfície uniforme, exibindo apenas pequenas bolhas de ar. Na Figura 4.48 são apresentados os cortes transversal e longitudinal dos corpos de prova.

Figura 4.48 – Corte transversal dos corpos de prova do B1GR21, CC1 e CC2.

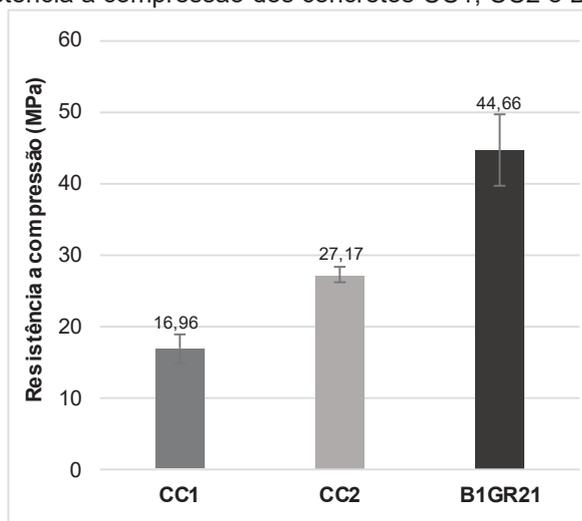


FONTE: A autora (2023).

Por apresentarem a mesma proporção de agregados graúdos, os cortes apresentados de B1GR21 e CC1 tem aspectos semelhantes. É possível observar também que o adensamento realizado no CC1 foi capaz de preencher eficazmente os vazios no interior do concreto, concentrando as falhas de concretagem na superfície, fato que pode indicar a necessidade de maior energia de adensamento. Já da análise do CC2 fica evidente o uso da maior proporção de graute: nas imagens apresentadas os agregados graúdos estão mais distantes entre si, e em menor quantidade, o que pode ser observado quando comparado ao B1GR1 e CC1. Não são observadas falhas na concretagem de CC2, o que indica que o adensamento manual foi adequado para essa formulação de concreto.

Na Figura 4.49 são apresentados os resultados referentes à resistência à compressão dos concretos analisados.

Figura 4.49 – Resistência à compressão dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.



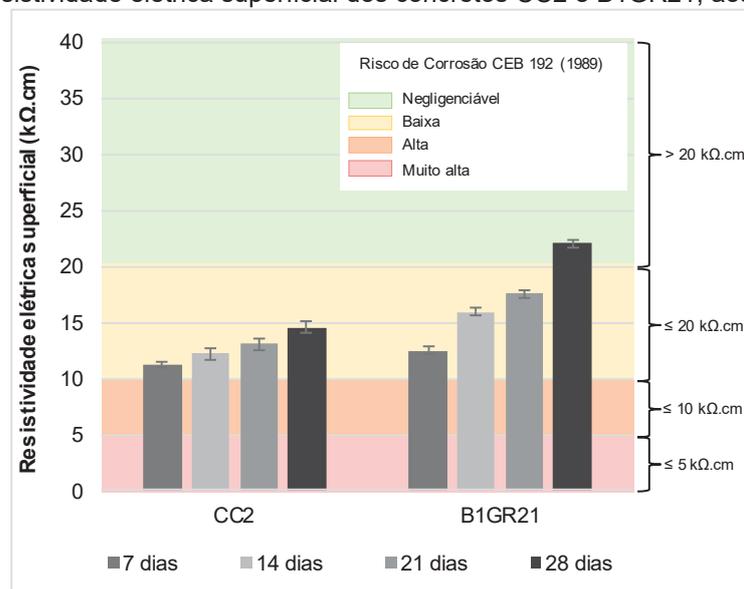
FONTE: A autora (2023).

Após realizar a comparação múltipla de médias (Tukey, a 95% de probabilidade), foi possível comprovar que os concretos apresentaram diferenças significativas nos resultados de resistência à compressão. Assim, observa-se primeiramente, na Figura 4.49, que o CC1 foi o que obteve o menor valor de resistência à compressão. O valor atingido, de 16,96 MPa, é aproximadamente 2,6 vezes menor do que o encontrado para B1GR21. Ressalta-se que ambos os concretos possuem mesmo traço, diferenciando-se pelo método de mistura e moldagem dos corpos de prova. A redução observada está relacionada às falhas de concretagem deixadas devido à falta de argamassa para preencher os vazios da amostra moldada pelo método convencional, causando redução da resistência à compressão.

Também é possível observar que o CC2 atingiu 27,17 MPa de resistência à compressão, valor 39% menor que a obtida pelo B1GR21. Este resultado foi obtido utilizando no CC2 a mesma relação a/c e consumo de cimento cerca de 53% maior quando comparado ao TSC. O contato entre os agregados e seu intertravamento na estrutura interna do TSC podem explicar o melhor desempenho mecânico deste tipo de concreto, pois ele apresenta baixa correlação com a resistência do graute/argamassa, reforçando que a resistência mecânica deste tipo de concreto não depende apenas da relação a/c.

Foi realizado o ensaio de resistividade elétrica superficial nos concretos produzidos. No entanto, devido às falhas na superfície apresentadas na Figura 4.47(b), não foi possível realizar o ensaio no CC1. Isso ocorreu devido às dificuldades encontradas no posicionamento dos eletrodos do equipamento do ensaio. Para viabilizar as leituras nos corpos de prova do CC1 era necessário apoiar os eletrodos diretamente sobre os agregados graúdos, e os valores obtidos nas leituras eram muito dispersos e incoerentes com o material estudado. Com isto posto, são apresentados na Figura 4.50 os resultados das RES obtidos.

Figura 4.50 – Resistividade elétrica superficial dos concretos CC2 e B1GR21, aos 7, 14, 21 e 28 dias.

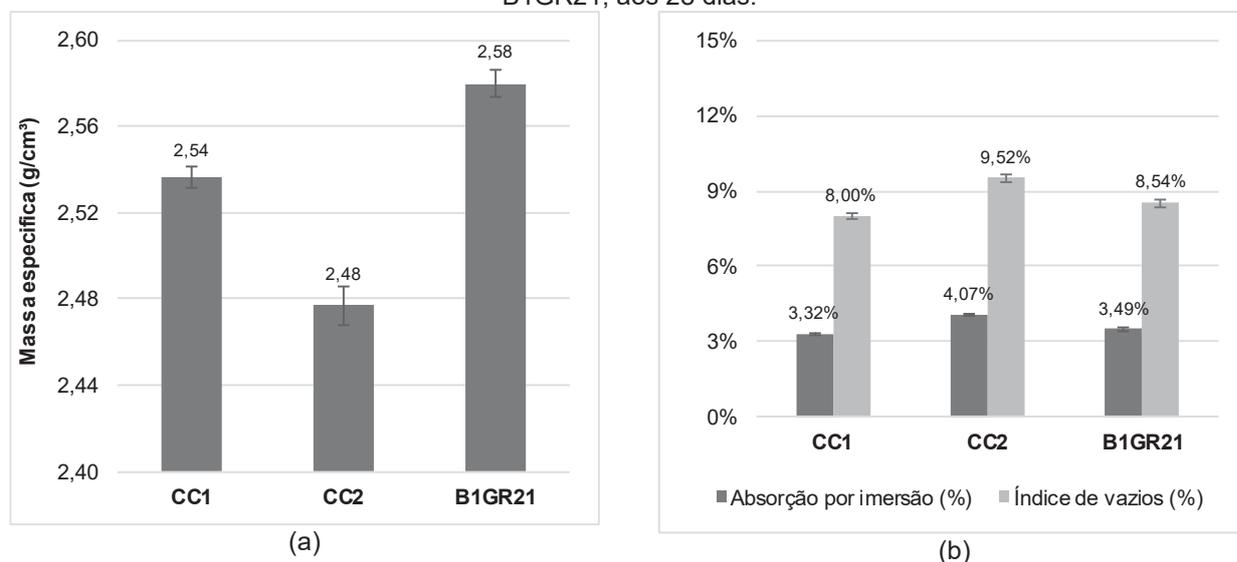


FONTE: A autora (2023).

Na Figura 4.50 é possível observar que, para todas as idades, o B1GR21 apresentou valores de resistividade elétrica superficial superior ao CC2. Na comparação múltipla de médias (Tukey, a 95% de probabilidade), foi possível confirmar que existem diferenças estatisticamente significativas entre os resultados de RES aos 28 para os diferentes concretos.

Aos 28 dias, o valor de RES alcançado pelo B1GR21 foi aproximadamente 50% maior do que registrado para CC2. Conforme mencionado no item 4.4.2, os agregados graúdos apresentam, de forma geral, resistividade elétrica superficial superior à da matriz cimentícia devido à porosidade inferior à da matriz (AZARSA; GUPTA, 2017; SANTOS; SILVA; LEITE, 2021). Observa-se também que, apesar de mostrar uma tendência de aumento com o tempo, aos 28 dias, o CC2 apresentou RES na faixa de baixo risco de corrosão, enquanto o B1GR21 já demonstra risco negligenciável para a mesma idade. Os resultados dos ensaios de massa específica, absorção por imersão e índice de vazios dos concretos pode ser observado na Figura 4.49.

Figura 4.51 –(a) Massa específica e (b) absorção por imersão e índice de vazios dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.



FONTE: A autora (2023).

Ao realizar análise estatística (Tukey, a 95% de probabilidade), foi possível comprovar que o concreto CC2 apresentou diferenças estatisticamente significativas para massa específica, índice de vazios e absorção por imersão. A redução da massa específica do CC2 foi causada pela redução no teor de agregado da amostra, que apresenta uma densidade superior à da argamassa. Já a absorção por imersão mede o incremento de massa do corpo de prova devido à penetração de água em seus poros permeáveis, e o índice de vazios é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Como os agregados graúdos possuem absorção muito baixa, essas propriedades são influenciadas principalmente pela porosidade da pasta que está associada. Como os três concretos analisados nessa etapa possuem o mesmo fator a/agl , infere-se que o aumento do teor de argamassa do concreto

CC2 permitiu também um aumento da absorção e índice de vazios. Analisando a superfície do corpo de prova deste concreto (Figura 4.47) pode-se observar a presença de poros, pequenas bolhas de ar, os quais acredita-se serem provenientes do aprisionamento de ar no processo de mistura do concreto na betoneira.

Helene (1983) propõe limites que classificam a qualidade do concreto em razão de sua absorção: segundo o autor o concreto pode ser considerado durável quando sua absorção é inferior à 4,2%; normal, quando a absorção está na faixa de 4,2 a 6,3%; e deficientes quando apresentam absorção acima de 6,3%. Desta forma, pode-se classificar os 3 concretos em análise como duráveis. Já em relação ao índice de vazios, os concretos também podem ser considerados como duráveis, uma vez que o autor classifica assim os concretos com índice de vazios inferior a 10%.

Desta forma, pode-se destacar que o método de dosagem proposto para o TSC foi adequado para produzir concretos por esse método, sendo capaz de atingir valores de parâmetros de ecoeficiência inferiores aos encontrados na literatura. Estes fatos comprovam que o método proposto é único e se adequa à essa forma única de produção de concretos, não sendo adequado utilizá-lo na produção de concretos convencionais. Portanto, os resultados obtidos nesta etapa demonstram que o método proposto para a produção de TSC com adições minerais e agregados nacionais foi eficiente em produzir concretos com reduzido impacto ambiental.

5 CONCLUSÕES DA TESE

Esta tese teve como objetivo desenvolver e avaliar as propriedades do TSC, com o desenvolvimento de graute otimizado por modelos de empacotamento de partículas, assim como estudar a interação deste graute com o esqueleto granular, também otimizado por técnicas de empacotamento. A partir dos resultados expostos ao longo desta tese considera-se atingido o objetivo principal do trabalho.

O primeiro objetivo específico do estudo visou adaptações nos métodos de ensaio de densidade de empacotamento de materiais finos na presença de água proposto por Wong e Kwan (2008) e o método de energia da mistura proposto por Marquardt (2001). A partir dos resultados obtidos foi possível concluir:

- O ensaio *mixing energy* permitiu a determinação da densidade de empacotamento dos materiais finos na presença de água, com resultados variando de 0,344 a 0,704. O método passou por adaptações para aplicação em diferentes adições minerais e apresentou resultados com boa reprodutibilidade, reduzido tempo de execução e promovendo maior exatidão nas determinações. O ensaio também foi efetivo na determinação da demanda de água mínima utilizada nas composições de grautes.

O segundo objetivo específico desta tese visou estabelecer critérios para determinar o teor de substituição do cimento Portland por adições minerais em pastas considerando aspectos químicos de reatividade das adições e reserva alcalina do cimento. A partir dos resultados obtidos foi possível concluir:

- Os teores de substituição de cimento Portland foram determinados para cada adição com base na produção de portlandita (hidróxido de cálcio) ao final da hidratação do cimento e o resultado da capacidade de fixação desta base no ensaio Chapelle modificado. Os teores de substituição de cimento Portland variaram de 20 a 39%, enquanto a relação água/aglomerante mínima para os traços variou de 0,199 a 0,207.

- A definição da composição dos grautes foi determinada com base no modelo de empacotamento compressível (CPM) associado ao planejamento de misturas simplex. Com esta abordagem, foi possível a redução do número de iterações necessárias para obtenção da combinação de materiais que proporcionou a maior densidade de empacotamento possível, com erros inferiores à 2,15%. As composições obtidas apresentaram relações areia/aglomerante compatíveis com as normas vigentes e literatura.

- Os grautes obtidos na Etapa I apresentaram resistências de até 118 MPa e aumento de 52% na resistência aos 91 dias com a substituição do cimento por cinza volante. Após avaliação do teor remanescente de portlandita ao final dos 91 dias, não foi possível observar extinção da base que apresentou em média o valor remanescente de 5,9%. A capacidade de combinação química das adições foi de 44% a 68% do valor do ensaio Chapelle modificado que, portanto, superestimou a capacidade de combinação das adições devido à condição de realização do ensaio.

- As composições analisadas nessa etapa, produzidas com a demanda de água mínima, apresentaram índice de eficiência do cimento inferiores a 11 kg/m³.MPa, com destaque para a composição CV que obteve redução de 32% neste índice - reforçando a característica ecoeficiente do método de dosagem adotado.

- Os critérios estabelecidos para a estimativa do teor de substituição nas composições baseados no teor de portlandita remanescente ao final da hidratação do cimento e a adoção do fator de 75% do resultado do teor de hidróxido fixado pelas adições minerais pelo Chapelle foi adequada para definição do teor de substituição do cimento.

O terceiro objetivo específico desta tese foi analisar o desempenho mecânico e ambiental de TSC dosados por técnicas de empacotamento de partículas, correlacionando a fluidez do graute com a capacidade de penetração no esqueleto granular. A partir dos resultados obtidos foi possível concluir:

- O ensaio do tempo de funil foi adequado para determinar as relações a/agl dos grautes, sendo que o graute GR35 apresentou menores índices IC e IC_{O_2} , devido à sua menor relação a/agl . O graute com maior fluidez (GR18) foi capaz de penetrar bem em todos os esqueletos granulares, enquanto o graute de menor fluidez (GR35) não preencheu eficazmente todos os vazios deixados pelos esqueletos. O esqueleto que promoveu melhor grauteamento foi o B1, devido à maior dimensão de suas partículas, que promovem um caminho menos tortuoso para a penetração do graute - gerando os maiores valores de RES.

- Ao analisar-se a resistência à compressão dos concretos produzidos, o concreto B1GR21 apresentou maior valor (44,66 MPa), sem correlação com a resistência à compressão dos grautes. Isso ocorre porque o TSC tem uma distribuição de tensões diferente do concreto convencional devido ao contato direto dos grãos do esqueleto granular. Além disso, grautes de menor relação a/agl , que tem maior resistência, são também mais viscosos, o que dificulta o processo de concretagem que afeta a resistência mecânica do material.

- O concreto B1GR21 foi o que apresentou, dentre os concretos produzidos, os menores parâmetros de ecoeficiência. Em relação ao índice de eficiência do cimento (*IC*), a metodologia proposta conseguiu produzir TSC com consumo de 7,31 kg de cimento/m³.MPa, valor inferior à média esperada para concretos convencionais - *IC* inferior à 85% dos trabalhos analisados na revisão sistemática. O concreto também apresentou *IC* inferior aos de concretos convencionais brasileiros na faixa de 40 MPa e o menor *IC* quando comparado à TSC moldado pelo método da gravidade sem o uso de fibras. Em relação às emissões de carbono, o B1GR21 também apresentou um bom desempenho, com *IC*O₂ inferior à média internacional.

Assim, com base nas informações e conclusões apresentadas, pode-se afirmar que o objetivo geral da tese foi alcançado. O estudo e desenvolvimento de concretos ecoeficientes desempenham papel fundamental no avanço sustentável da indústria da construção, e apresentam um vasto potencial de aplicação, considerando todas as vantagens associadas ao seu uso. Portanto, é importante e recomendável que pesquisas nessa área continuem sendo desenvolvidas e aprofundadas. Com base nisso, são feitas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Investigar o desempenho mecânico e a durabilidade do TSC a longo prazo, realizando pesquisas que abranjam aspectos como carbonatação, penetração de cloretos e resistência a sulfatos;
- Realizar estudos de TSC com agregados reativos, a fim de avaliar os impactos das reações álcali-sílica nesse tipo de concreto;
- Avaliar a viabilidade do uso de agregados reciclados e de agregados leves para produção de TSC, bem como de outras adições minerais e fibras;
- Analisar a viabilidade econômica do TSC, incluindo os custos com materiais, análise do ciclo de vida, transporte e processos de produção deste concreto, comparado a outros métodos tradicionais.

REFERÊNCIAS

ABDELGADER, H. S. Effect of the quantity of sand on the compressive strength of two-stage concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 48, n. 177, p. 353–360, dez. 1996.

ABDELGADER, H. S. How to design concrete produced by a two-stage concreting method. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 3, p. 331–337, mar. 1999.

ABDELGADER, H. S. et al. Mechanical properties of two-stage concrete modified by silica fume. **Magazine of Civil Engineering**, v. 89, n. 5, p. 26–38, 2019.

ABDELGADER, H. S.; GÓRSKI, J. Prediction of mechanical properties in two-stage concrete [Bestimmung mechanischer eigenschaften des “Zweiphasenbetons”]. **Betonwerk und Fertigteil-Technik/Concrete Precasting Plant and Technology**, v. 67, n. 9, p. 54–63, 2001.

ABDELGADER, H. S.; GÓRSKI, J. Stress-Strain Relations and Modulus of Elasticity of Two-Stage Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 15, n. 4, p. 329–334, ago. 2003.

ABDUL AWAL, A. S. M. **Manufacture and properties of prepacked aggregate concrete**. Tese - University of Melbourne, Melbourne, 1984.

ABDUL AWAL, A. S. M. Failure mechanism of prepacked concrete. **Journal of Structural Engineering (United States)**, v. 114, n. 3, p. 727–732, 1988.

ABDUL AWAL, A. S. M. Creep recovery of prepacked aggregate concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 4, n. 3, p. 320–325, 1992.

ABDUL AWAL, A. S. M. Mechanical properties and thermal behaviour of two-stage concrete containing palm oil fuel ash. **International Journal of Geomate**, 1 abr. 2017.

ABIRAMI, T. et al. Multi-layered two stage fibrous composites against low-velocity falling mass and projectile impact. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118631, jul. 2020.

ABNT. **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. **NBR 13279 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009a.

ABNT. **NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009b.

ABNT. **NBR 12821 - Preparação de concreto em laboratório - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2009c.

ABNT. **NBR 15895 - Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chappelle modificado.** Rio de Janeiro, 2010a.

ABNT. **NBR 15894-1 - Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2010b.

ABNT. **NBR NM 18 - Cimento Portland — Análise química — Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 2012a.

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

ABNT. **NBR 7681-3 - Calda de cimento para injeção Parte 3: Determinação dos índices de exsudação e expansão — Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. **NBR 12653 - Materiais pozolânicos — Requisitos.** Rio de Janeiro, 2014.

ABNT. **NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. **NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. **NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018a.

ABNT. **NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018b.

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

ABNT. **NBR 16972 - Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios.** Rio de Janeiro, 2021a.

ABNT. **NBR 16917 - Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021b.

ABNT. **NBR 16916 - Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021c.

ABNT. **NBR 16973 - Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem.** Rio de Janeiro, 2021d.

ABNT. **NBR 14545 - Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável**. Rio de Janeiro, 2021e.

ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais**. Dissertação - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

ABU-LEBDEH, T. M. et al. A Ternary Model for Particle Packing Optimization. **Journal of Composites Science**, v. 6, n. 4, p. 113, 10 abr. 2022.

ACI. **304.1R- Guide for the Use of Preplaced Aggregate Concrete for Structural and Mass Concrete Applications**. Detroit, 1997.

ACI. **116R-90 - Cement and Concrete Terminology**. Detroit, 2000.

AENC. **UNE 83988-2: Durabilidade del hormigón - métodos de ensayo - determinación de la resistividad eléctrica - parte 2: método de las cuatro puntas o de Wenner**. Madrid, 2014.

AFNOR. **XP P18-540 - Granulats - définitions, conformité, specifications**. Paris, 1997.

AGOSTINHO, L. B. et al. Análise calorimétrica de pastas de cimento Portland contendo polímero superabsorvente (SAP) e nanopartículas de sílica (NS). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 4, 2020.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo, 2000.

ALFAYEZ, S. A. **Eco-Efficient Preplaced Recycled Aggregate Concrete Incorporating Recycled Tire Waste Rubber Granules and Steel Wire Fibre Reinforcement**. Dissertação - Western University, London, 2018.

ALFAYEZ, S. A.; ALI, M. A. E. M.; NEHDI, M. L. Eco-efficient fiber-reinforced preplaced recycled aggregate concrete under impact loading. **Infrastructures**, v. 4, n. 2, 21 jun. 2019.

ALFAYEZ, S. A.; OMAR, T.; NEHDI, M. L. Eco-efficient preplaced recycled aggregate concrete incorporating recycled tyre waste. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability**, v. 173, n. 2, p. 84–96, 1 maio 2019.

ALRSHOUDI, F. et al. Sustainable use of waste polypropylene fibers and palm oil fuel ash in the production of novel prepacked aggregate fiber-reinforced concrete. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 12, 2020a.

ALRSHOUDI, F. et al. Drying shrinkage and creep properties of prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101522, nov. 2020b.

ALYOUSEF, R. Sustainable use of waste polypropylene fibres to enhance the abrasion and skid resistance of two-stage concrete. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 9, 1 maio 2021.

AMARIO, M. **Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de residuo de concreto (ARC)**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

ARAUJO, E. C.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. Concrete surface electrical resistivity: Effects of sample size, geometry, probe spacing and SCMs. **Construction and Building Materials**, v. 324, p. 126659, mar. 2022.

ASTM. **C939-10. Standard test method for flow of grout for preplaced-aggregate concrete (flow cone method)**. West Conshohocken, 2010.

ASTM. **C937-16. Standard Specification for Grout Fluidifier for Preplaced-Aggregate Concrete**. West Conshohocken, 2016a.

ASTM. **C940 - 16. Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory**. West Conshohocken, 2016b.

ASTM. **C938-19. Standard Practice for Proportioning Grout Mixtures for Preplaced-Aggregate Concrete**. West Conshohocken, 2019.

ASTM. **C637-20. Standard Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete**. West Conshohocken, 2020.

AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, p. 1–30, 2017.

BALLIEU, P. **Design of ecological concrete by particle packing optimization**. Dissertação - Universiteit Gent, Gante, 2014.

BARROCA, N. et al. Wireless sensor networks for temperature and humidity monitoring within concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1156–1166, mar. 2013.

BATES, R. G.; BOWER, V. E.; SMITH, E. R. Calcium hydroxide as a highly alkaline pH standard. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v. 56, n. 6, p. 8, 1956.

BAUMANN, P. Use of Prepacked Aggregate Concrete in Major Dam Construction. **ACI Journal Proceedings**, v. 45, n. 11, p. 229–235, 1 nov. 1948.

BAYER, I. R.; TURANLI, L.; MEHTA, P. K. MASS CONCRETE CONSTRUCTION USING SELF-COMPACTING MORTAR. **Turkish Journal of Engineering**, 1 jul. 2019.

BENTZ, D. P.; AİTCIN, P. C. The Hidden Meaning of Water-Cement Ratio. **Concrete Internacional**, v. 30, p. 51–54, 2008.

BORNMANN, L.; HAUNSCHILD, R.; MUTZ, R. Growth rates of modern science: a latent piecewise growth curve approach to model publication numbers from established and new literature databases. **Humanities and Social Sciences Communications**, v. 8, n. 1, p. 224, 7 out. 2021.

BORNMANN, L.; MUTZ, R. Growth rates of modern science: A bibliometric analysis based on the number of publications and cited references. **Journal of the Association for Information Science and Technology**, v. 66, n. 11, p. 2215–2222, nov. 2015.

BSI. **BS EN 1015-3 - Methods of Test for Mortar for Masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)**. London British Standards Institution, , 1999.

CAI, W. **Effect of Particle Packing on Flow Property and Strength of Concrete Mortar**. Dissertação - Iowa State University, Ames, 2017.

CALLISTER, W. D. **Fundamentals of materials science and engineering**. London: Wiley, 2010.

CAMPOS, H. F. et al. Determination of the optimal replacement content of Portland cement by stone powder using particle packing methods and analysis of the influence of the excess water on the consistency of pastes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 2, p. 210–232, abr. 2019.

CAMPOS, H. F. et al. Low-cement high-strength concrete with partial replacement of Portland cement with stone powder and silica fume designed by particle packing optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 121228, 10 jul. 2020.

CAMPOS, H. F. et al. Eco-efficient concrete, optimized by Alfred's particle packing model, with partial replacement of Portland cement by stone powder. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 2, 2022.

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J. Comparison of the Silica Fume Content for High-Strength Concrete Production: Chemical Analysis of the Pozzolanic Reaction and Physical Behavior by Particle Packing. **Materials Research**, v. 23, n. 5, 2020a.

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J. Proposed mix design method for sustainable high-strength concrete using particle packing optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121907, ago. 2020b.

CARVALHO, J. M. F. et al. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 397–409, 10 maio 2019.

CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C. Review: Concepts of particle dispersion and packing for special concretes production. **Cerâmica**, v. 55, p. 18–32, 2009.

CHAMPION, S.; DAVIS, L. T. Grouted concrete construction. **Reinf Concr Rev**, p. 569–608, 1958.

CHAN, S. H. A review on solubility and polymerization of silica. **Geothermics**, v. 18, n. 1–2, p. 49–56, jan. 1989.

CHENG, Y. et al. Preparation of preplaced aggregate concrete and experimental study on its strength. **Construction and Building Materials**, v. 229, 30 dez. 2019.

COO, M.; PHEERAPHAN, T. Effect of sand, fly ash, and coarse aggregate gradation on preplaced aggregate concrete studied through factorial design. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 812–821, set. 2015.

COO, M.; PHEERAPHAN, T. Effect of sand, fly ash and limestone powder on preplaced aggregate concrete mechanical properties and reinforced beam shear capacity. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 581–592, set. 2016.

CORNELL, J. A. **A Primer on Experiments with Mixtures**. John Wiley & Sons, , 2011.

DAMINELI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555–562, 1 set. 2010.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. Tese - Universidade de São Paulo, São Paulo, 25 out. 2013. . Acesso em: 1 abr. 2020

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 5, p. 998–1024, set. 2017.

DAS, K. K.; LAM, E. S. S. Feasibility of producing two-stage (preplaced aggregate) concrete by gravity process. **Structural Concrete**, p. suco.201900356, 6 dez. 2019.

DAS, K. K.; LAM, E. S. S.; TANG, H. H. Partial replacement of cement by ground granulated blast furnace slag and silica fume in two-stage concrete (preplaced aggregate concrete). **Structural Concrete**, 2020.

DAVIS, R. E.; HALTENHOFF, C. E. Mackinac Bridge Pier Construction. **ACI Journal Proceedings**, v. 53, n. 12, p. 581–595, 1 dez. 1956.

DAVIS, R. E.; JANSEN, E. C.; NEELANDS, W. T. Restoration of Barker Dam. **ACI Journal Proceedings**, v. 44, n. 4, p. 633–668, 1 abr. 1948.

DE ALMEIDA, W. F. et al. Efeitos do uso de frequência de ultrassom na dispersão de sedimentos agregados. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 8, n. 3, p. 97–111, 13 ago. 2017.

DE LARRARD, F. **Concrete Mixture Proportioning**. London: CRC Press, 1999.

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

DE MATOS, P. R.; SAKATA, R. D.; PRUDÊNCIO, L. R. Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 941–955, 20 nov. 2019.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. **Journal of Quality Technology**, v. 12, n. 4, p. 214–219, 22 out. 1980.

DESCHNER, F. et al. Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 10, p. 1389–1400, out. 2012.

DIAS, R. et al. Study of the hydration of Portland cement pastes containing ceramic waste by thermal analysis. **Ambiente Construído**, v. 6, n. 4, p. 83–94, 2008.

DU, Q. et al. Use of Preplaced Casting Method in Lightweight Aggregate Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, 2017.

ESMAEILI, M.; AMIRI, H. Laboratory Investigation into the Flexural Behavior of Embedded Concrete Sleepers in Two-Stage Concrete with Preplaced Ballast Aggregate. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 16, n. 1, 1 dez. 2022.

FABRO, F.; GAVA, G.; GRIGOLI, H. Influence of fine aggregates particle shape in concrete performance. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 4, p. 191–212, 2011.

FENNIS, S. A. A. M. Measuring water demand or packing density of micro powders: comparison of methods. Em: **Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization**. Delft: [s.n.]. p. 21.

FENNIS, S. A. A. M. **Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization**. Tese - Delft University of Technology, Delft, 2011.

FENNIS, S. A. A. M.; WALRAVEN, J. C. Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. **Heron**, v. 57, n. 2, p. 73–101, 2012.

FENNIS, S. A. A. M.; WALRAVEN, J. C.; DEN UIJL, J. A. Compaction-interaction packing mode. Regarding the effect of fillers in concrete mixture design. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 46, n. 3, p. 463–478, 2013.

FÖLDVÁRI, M. **Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice**. Budapest: Geological Institute of Hungary, 2011.

FRAILE-GARCIA, E. et al. Implementing a technically and economically viable system for recording data inside concrete. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 860–872, dez. 2017.

GAGNÉ, R. Expansive agents. Em: **Science and Technology of Concrete Admixtures**. [s.l.] Elsevier, 2016. p. 441–456.

GALDAMEZ, E. V. C.; CARPINETTI, L. C. R. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica. **Gestão & Produção**, v. 11, n. 1, p. 121–134, abr. 2004.

GANAW, A. I. **Rheology of Grout for Preplaced Aggregate Concrete**. Tese - University of Bradford, Bradford, 2012.

GARTNER, E.; HIRAO, H. A review of alternative approaches to the reduction of CO₂ emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 126–142, 1 dez. 2015.

GHABCHI, R. et al. Effect of Shape Parameters and Gradation on Laboratory-Measured Permeability of Aggregate Bases. **International Journal of Geomechanics**, v. 15, n. 4, p. 04014070, ago. 2015.

GLOSSER, D. **Equilibrium and Non-equilibrium Thermodynamic Modeling of Cement Pastes Containing Supplementary Cementitious Material**. Tese - Oregon State University, Corvallis, 2020.

GOBBO, L. A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld**. Dissertação - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Pini, 2009.

GÓMEZ-ZAMORANO, L. Y.; GARCÍA-GUILLÉ, G.; ACEVEDO-DÁVILA, J. L. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland com substituições de escória granulada de alto forno, cinza volante e metacaulim: efeito da utilização de dois aditivos superplastificantes. **Rev. ALCONPAT**, v. 5, n. 3, p. 203–218, 2015.

GOUDAR, S. K. et al. Influence of sample preparation techniques on microstructure and nano-mechanical properties of steel-concrete interface. **Construction and Building Materials**, v. 256, p. 119242, set. 2020.

GRAZIA, M. T. et al. Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 524–536, 20 jan. 2019.

HABUSH, A. L.; WALKER, R. F. Fort St. Vrain nuclear generating station construction and testing experience. **Nuclear Engineering and Design**, v. 26, n. 1, p. 16–26, jan. 1974.

HASPARYK, N. P. Reação Álcali-Agregado no Concreto. Em: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2022. v. 2.

HELENE, P. R. L. La agresividad del medio y la durabilidad del hormigón. **Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón**, p. 25–35, 1983.

HELENE, P. R.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

HIGUCHI, T. et al. Development of a new ecological concrete with CO₂ emissions below zero. **Construction and Building Materials**, v. 67, n. PART C, p. 338–343, 30 set. 2014.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese - Universidade de São Paulo, São PauloBiblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, , 25 abr. 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19082008-172648/>>

HOPPE FILHO, J. et al. Atividade pozzolânica de adições minerais para cimento portland (Parte i): índice de atividade pozzolânica (IAP) com cal, difração de raios-x (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e chapelle modificado. **Revista Materia**, v. 22, n. 3, 2017.

HOPPE FILHO, J. et al. Evaluation of sample drying methods to determine the apparent porosity and estimation of degree of hydration of portland cement pastes. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 6, n. 1, p. 1, 16 dez. 2021.

HUANG, M. et al. Rock-filled concrete—Development, investigations and applications. **Int. Water Power Dam Constr**, v. 60, 2008.

HUNGER, M. **An integral design concept for ecological self-compacting concrete**. Tese - Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven (Tese de Doutorado), 2010.

HUNGER, M.; BROUWERS, H. J. H. Flow analysis of water-powder mixtures: Application to specific surface area and shape factor. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 1, p. 39–59, 2009.

ICHINO, H.; BEPPU, M.; WILLIAMSON, E. B. Blast-resistant performance of a two-stage concrete plate subjected to contact explosions. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 119766, out. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. Paris: IEA, 2018.

JAISHANKAR, P. et al. Study of topology optimized hammerhead pier beam made with novel preplaced aggregate fibrous concrete. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v. 65, n. 1, p. 287–298, 14 dez. 2020.

JAVED, M. F. et al. Effect of recycled coarse aggregate and bagasse ash on two-stage concrete. **Crystals**, v. 11, n. 5, 2 maio 2021.

JONES, H. A.; JONES, R. H. Horizontal permeability of compacted aggregates. Em: **Unbound Aggregates in Roads**. [s.l.] Elsevier, 1989. p. 70–77.

KARTHIKEYAN, M. et al. The Combined Effect of Glass Fiber Mesh and Steel Fiber on Two-Layered Preplaced Aggregate Concrete against Drop Weight Impact. **Materials**, 2022.

KHANZADA, F. A. et al. Concrete by Preplaced Aggregate Method Using Silica Fume and Polypropylene Fibres. **Materials**, v. 15, n. 6, 1 mar. 2022.

KING, J. C.; WILSON, A. L. If It's still stanting, it can be repaired. **Concrete Construction - World of Concrete**, v. 33, n. 7, p. 643–650, 1988.

KLEIN, N. S. **El rol físico del agua en mezclas de cemento portland**. Tese - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2012.

KLEIN, N. S. et al. The wetting water in cement-based materials: Modeling and experimental validation. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 34–43, set. 2016.

KLEIN, N. S.; LENZ, L. A.; MAZER, W. Influence of the granular skeleton packing density on the static elastic modulus of conventional concretes. **Construction and Building Materials**, v. 242, p. 118086, 10 maio 2020.

KLINE, R. B. **Principles and practice of structural equation modeling**. Guilford publications New York, 2015.

KWAN, A. K. H.; MORA, C. F. Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles. **Magazine of Concrete Research**, v. 53, p. 91–100, 2002.

LARSEN, P. O.; VON INS, M. The rate of growth in scientific publication and the decline in coverage provided by Science Citation Index. **Scientometrics**, v. 84, n. 3, p. 575–603, 10 set. 2010.

LE SAOÛT, G.; KOCABA, V.; SCRIVENER, K. Application of the Rietveld method to the analysis of anhydrous cement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 2, p. 133–148, fev. 2011.

LEE, K. S. et al. Damping property of prepacked concrete incorporating coarse aggregates coated with polyurethane. **Cement and Concrete Composites**, v. 93, p. 301–308, 2018a.

LEE, S. et al. Effects of Redispersible Polymer Powder on Mechanical and Durability Properties of Preplaced Aggregate Concrete with Recycled Railway Ballast. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, n. 1, 1 dez. 2018b.

LI, H. et al. Experimental study on the steel bar/wire mesh reinforced preplaced aggregate concrete composite strengthening of concrete square columns. **Advanced Materials Research**, v. 163–167, p. 3615–3622, 2011.

LI, L. G.; KWAN, A. K. H. Concrete mix design based on water film thickness and paste film thickness. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 33–42, 1 maio 2013.

LI, P. P. et al. Conceptual design and performance evaluation of two-stage ultra-low binder ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 125, 1 nov. 2019.

LI, P. P. et al. Functionally graded ultra-high performance cementitious composite with enhanced impact properties. **Composites Part B: Engineering**, v. 183, p. 107680, fev. 2020.

LI, S. et al. Application of prepacked aggregate concrete technology in gravity wharf reinforcement. **Applied Mechanics and Materials**, v. 204–208, p. 3926–3929, 2012.

LIFSET, R.; ECKELMAN, M. Material efficiency in a multi-material world. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 371, n. 1986, 13 mar. 2013.

LITTLEJOHN, G. S.; SWART, A. H. Design of permanent intruded plugs at South Deep Gold Mine. **The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 106, 2006.

LOGANAGANANDAN, M. et al. Experimental Study on GFRP Strips Strengthened New Two Stage Concrete Slabs under Falling Mass Collisions. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 25, n. 1, p. 235–244, 1 jan. 2021.

LONDERO, C. et al. 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**, v. 63, n. 365, p. 22–33, 1 jan. 2017.

LONDERO, C.; KLEIN, N. S.; MAZER, W. Study of low-cement concrete mix-design through particle packing techniques. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 103071, out. 2021.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K. L.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, dez. 2011.

LOTHENBACH, B.; WIELAND, E. **Chemical evolution of cementitious materials**. Duebendorf, 2012.

LV, J. et al. Research on the bond behavior of preplaced aggregate concrete-filled steel tube columns. **Materials**, v. 13, n. 2, 1 jan. 2020.

LV, J. et al. Bond-slip behaviours between preplaced aggregate concrete (PAC) and steel bars. **Construction and Building Materials**, v. 364, 18 jan. 2023.

LV, J.; ZHOU, T.; LI, K. Development and investigation of a new low-cement-consumption concrete-preplaced aggregate concrete. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 3, 1 fev. 2020a.

LV, J.; ZHOU, T.; LI, K. Investigation and Application of a New Low-Carbon Material (Preplaced Aggregate Concrete) in Concrete-Filled Steel Tube Stub Columns. **Sustainability**, v. 12, n. 5, p. 1768, 27 fev. 2020b.

MACIOSKI, G. et al. **Estudo teórico da adição máxima de sílica ativa no cimento Portland em função do consumo de hidróxido de cálcio**. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química. **Anais...**Fortaleza, 2016.

MANOHAR, S. N. The production and application of Colcrete. **Indian Concrete Journal**, v. 41, p. 262–275, 1967.

MANOHAR, T. et al. A novel steel-PAFRC composite fender for bridge pier protection under low velocity vessel impacts. **Structures**, v. 26, p. 765–777, 2020.

MARQUARDT, I. **Ein Mischungskonzept für selbstverdichtenden Beton auf der Basis der Volumenkenngößen und Wasseransprüche der Ausgangsstoffe**. Tese - Verlag nicht ermittelbar, Rostock, 2001. . Acesso em: 17 maio. 2020

MASSON-DELMOTTE, V. et al. **Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global**

greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. Geneva: World Meteorological Organization, 2019.

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

MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. Elucidating the role of supplementary cementitious materials on shrinkage and restrained-shrinkage cracking of flowable Eco-concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 3, 1 mar. 2018.

MEHTA, P. K. **Sustainable Cements and Concrete for the Climate Change Era-A Review**. Second 21 International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. **Anais...**Ancona: 2010.

MEHTA, P. K.; MERYMAN, H. Tools for reducing carbon emission due to cement consumption. **Structure magazine**, v. Jan, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Pini, 3ª ed., 2008.

MENDES, A. Z.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; MUNHOS, G. S. Effect of the corrosion degree and the carbonation depth on the electrical resistivity, ultrasonic pulse velocity and corrosion potential. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 4, n. 1, p. 15, 28 dez. 2019.

MILLER, S. A. et al. Comparison indices for design and proportioning of concrete mixtures taking environmental impacts into account. **Cement and Concrete Composites**, v. 68, p. 131–143, 1 abr. 2016.

MILLER, S. A. Supplementary cementitious materials to mitigate greenhouse gas emissions from concrete: can there be too much of a good thing? **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 587–598, mar. 2018.

MINERAIS DO PARANÁ S/A. **Avaliação do Potencial de argilas para uso em cerâmicas vermelhas. Programa de Desenvolvimento da Indústria de Cerâmica Vermelha no Estado do Paraná - RELATÓRIO FINAL**. Curitiba, 2009.

MOHAMMADHOSSEINI, H. et al. Enhancement of strength and transport properties of a novel preplaced aggregate fiber reinforced concrete by adding waste polypropylene carpet fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 27, 1 jan. 2020a.

MOHAMMADHOSSEINI, H. et al. Durability and thermal properties of prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101723, nov. 2020b.

MOHAMMADHOSSEINI, H.; ABDUL AWAL, A. S. M.; SAM, A. R. M. Mechanical and thermal properties of prepacked aggregate concrete incorporating palm oil fuel ash. **Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences**, v. 41, n. 10, p. 1235–1244, 2016.

MOHAN, K. S. R.; DIVIYABHARRATHI, K. B.; MURALI, G. Research on the Development of High Impact Resistant Preplaced Aggregate Fibrous Concrete by the Inclusion of Coarse Aggregates Coated with Asphalt. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 47, n. 4, p. 4265–4286, 1 abr. 2022.

MONTES, F.; HASELBACH, L. Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete. **Environmental Engineering Science**, v. 23, n. 6, p. 960–969, nov. 2006.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. Hoboken: John wiley & sons, 2017.

MORA, C. F.; KWAN, A. K. H.; CHAN, H. C. Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 6, p. 921–932, jun. 1998.

MOROHASHI, N.; MEYER, C.; ABDELGADER, H. S. Concrete with Recycled Aggregates- Two-Stage production method. **CPI – Concrete Plant International – 4 | 2013**, p. 34–41, 2013.

MORÓN, C. et al. Measuring system of capillary rising damp in cement mortars. **Measurement**, v. 135, p. 252–259, mar. 2019.

MURALI, G. et al. Impact Response of Novel Fibre-Reinforced Grouted Aggregate Rubberized Concrete. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 44, n. 10, p. 8451–8463, 2019a.

MURALI, G. et al. Impact Resistance and Strength Reliability of Novel Two-Stage Fibre-Reinforced Concrete. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 44, n. 5, p. 4477–4490, 1 maio 2019b.

MURALI, G. et al. Impact performance of novel multi-layered prepacked aggregate fibrous composites under compression and bending. **Structures**, v. 28, p. 1502–1515, 1 dez. 2020.

MURALI, G. et al. Low-velocity impact response of novel prepacked expanded clay aggregate fibrous concrete produced with carbon nano tube, glass fiber mesh and steel fiber. **Construction and Building Materials**, v. 284, 17 maio 2021.

MURALI, G. et al. Drop Weight Impact Test on Prepacked Aggregate Fibrous Concrete—An Experimental Study. **Materials**, v. 15, n. 9, 1 maio 2022a.

MURALI, G. et al. Response of Functionally Graded Preplaced Aggregate Fibrous Concrete with Superior Impact Strength. **Buildings**, v. 12, n. 5, 1 maio 2022b.

MURALI, G. et al. Pure and mixed-mode (I/III) fracture toughness of preplaced aggregate fibrous concrete and slurry infiltrated fibre concrete and hybrid combination comprising nano carbon tubes. **Construction and Building Materials**, v. 362, 2 jan. 2023.

MURALI, G.; ABID, S.; VATIN, N. Experimental and Analytical Modeling of Flexural Impact Strength of Preplaced Aggregate Fibrous Concrete Beams. **Materials**, v. 15, n. 11, 1 jun. 2022.

MURALI, G.; RAMPRASAD, K. A feasibility of enhancing the impact strength of novel layered two stage fibrous concrete slabs. **Engineering Structures**, v. 175, p. 41–49, 15 nov. 2018.

NAJJAR, M. F. **Innovating Two-Stage Concrete with Improved Rheological, Mechanical and Durability Properties**. London: Western University (Tese de doutorado), 2016.

NAJJAR, M. F. et al. Damage mechanisms of two-stage concrete exposed to chemical and physical sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 141–152, 15 abr. 2017.

NAJJAR, M. F.; ABDELGADER, H. S. **Advances in concreting methods**. SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET. **Anais...**Oran: 2009.

NAJJAR, M. F.; SOLIMAN, A. M.; NEHDI, M. L. Critical overview of two-stage concrete: Properties and applications. **Construction and Building Materials**, v. 62, p. 47–58, 15 jul. 2014.

NAJJAR, M. F.; SOLIMAN, A. M.; NEHDI, M. L. Two-stage concrete made with single, binary and ternary binders. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 49, n. 1–2, p. 317–327, 1 jan. 2016.

NAJJAR, M. F.; SOLIMAN, A. M.; NEHDI, M. L. Grouts Incorporating Supplementary Cementitious Materials for Two-Stage Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 6, p. 04016298, jun. 2017.

NALON, G. H. et al. Effects of different kinds of carbon black nanoparticles on the piezoresistive and mechanical properties of cement-based composites. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101724, nov. 2020.

NAZARI, A.; SANJAYAN, J. G. **Handbook of low carbon concrete**. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2016.

NEHDI, M. L. et al. Novel eco-efficient Two-Stage Concrete incorporating high volume recycled content for sustainable pavement construction. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 9–14, 15 ago. 2017a.

NEHDI, M. L. et al. Novel steel fibre-reinforced preplaced aggregate concrete with superior mechanical performance. **Cement and Concrete Composites**, v. 82, p. 242–251, 1 set. 2017b.

NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M. S.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials Characterization**, v. 61, n. 8, p. 802–813, ago. 2010.

NEITHALATH, N.; WEISS, J.; OLEK, J. Characterizing Enhanced Porosity Concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 11, p. 2074–2085, nov. 2006.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos - Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. Porto Alegre: Bookman Editora, 2010.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. London, 1995.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2. ed. London: Longman Scientific & Technical, 2010.

NIQUES, G. **Efeito do tempo de maturação na microestrutura de uma cal virgem dolomítica**. Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

NOWEK, A. et al. Effect of admixtures on fresh grout and two-stage (pre-placed aggregate) concrete. **Structural Concrete**, v. 8, n. 1, p. 17–23, mar. 2007.

OLEK, J. et al. **Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials**. West Lafayette: Institute for Safe, Quiet and Durable Highways, Purdue University, 2003.

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

OLIVEIRA, I. et al. Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico. **Fazendo arte editorial**, p. 224, 2000.

O'MALLEY, J.; ABDELGADER, H. S. Investigation into viability of using two-stage (pre-placed aggregate) concrete in Irish setting. **Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China**, v. 4, n. 1, p. 127–132, 14 fev. 2010.

ORCHARD, D. F. **Concrete Technology: Properties of materials**. Ann Arbor: Applied Science Publishers, 1979.

PACEWSKA, B.; WILIŃSKA, I. Usage of supplementary cementitious materials: advantages and limitations. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 142, n. 1, p. 371–393, 29 out. 2020.

PAGANI, R. N. et al. Methodi Ordinatio 2.0: revisited under statistical estimation, and presenting FInder and RankIn. **Quality & Quantity**, v. 57, n. 5, p. 4563–4602, 12 out. 2023.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 12 dez. 2015.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. M. Avanços na composição da Methodi Ordinatio para revisão sistemática de literatura. **Revista Ciência da Informação**, v. 46, p. 161–187, 2018.

PAUL, M. J. BRANDYWINE SHOAL LIGHTHOUSE. **Concrete International**, v. 9, n. 6, p. 46–53, 1987.

PONNAMBALAM, N. et al. Impact Strength of Preplaced Aggregate Concrete Comprising Glass Fibre Mesh and Steel Fibres: Experiments and Modeling. **Materials**, v. 15, n. 15, 1 ago. 2022.

POURSAEE, A. Corrosion of steel in concrete structures. Em: **Corrosion of Steel in Concrete Structures**. Sawston: Elsevier, 2016. p. 19–33.

POWERS, T. **The influence of some surfactants on porous concrete properties**. New York: John Wiley & Sons, 1968.

POWERS, T. C. , Rev. Mater. Construct. (Paris), Vol. No. 545, pp. 79–85, 1961. **Rev. Mater. Construct.**, v. 545, p. 79–85, 1961.

PRASAD, N. et al. Response of Novel Functionally-Graded Prepacked Aggregate Fibrous Concrete against Low Velocity Repeated Projectile Impacts. **Materials**, v. 14, n. 2, p. 280, 7 jan. 2021a.

PRASAD, N. et al. Effect of needle type, number of layers on FPAFC composite against low-velocity projectile impact. **Buildings**, v. 11, n. 12, 1 dez. 2021b.

PRASAD, N.; MURALI, G. Research on flexure and impact performance of functionally-graded two-stage fibrous concrete beams of different sizes. **Construction and Building Materials**, v. 288, 21 jun. 2021.

PU, Q. et al. Evolution of pH and chemical composition of pore solution in carbonated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 519–524, mar. 2012.

RAJABI, A. M.; OMIDI MOAF, F. Simple empirical formula to estimate the main geomechanical parameters of preplaced aggregate concrete and conventional concrete. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 485–492, 15 ago. 2017.

RAJABI, A. M.; OMIDI MOAF, F.; ABDELGADER, H. S. Evaluation of Mechanical Properties of Two-Stage Concrete and Conventional Concrete Using Nondestructive Tests. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 7, p. 04020185, jul. 2020.

RAM PRASAD, K. et al. Experimental study on functionally graded steel fibre reinforced preplaced aggregate concrete. **International Journal of Engineering and Technology(UAE)**, v. 7, n. 3.12 Special Issue 12, p. 456–458, 2018.

RAMACHANDRAN, V. S. et al. **Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials | ScienceDirect**. Sawston: Woodhead Publishing, 2002.

RAMAKRISHNAN, K. et al. Standard and modified falling mass impact tests on preplaced aggregate fibrous concrete and slurry infiltrated fibrous concrete. **Construction and Building Materials**, v. 298, 6 set. 2021.

RAMKUMAR, V. R. et al. Development of a novel low carbon cementitious two stage layered fibrous concrete with superior impact strength. **Journal of Building Engineering**, v. 25, p. 100841, 1 set. 2019.

RAVERDY, M. et al. Appréciation de l'activité pouzzolanique de constituents secondaires. **Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement.**, v. 3, p. 36–41, 1980.

REBMANN, M. S. **Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados**. Tese - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

RILEM. Recommendations of TC 119-TCE: Avoidance of thermal cracking in concrete at early ages. **Materials and Structures**, p. 451–464, 1997.

ROBATI, M.; MCCARTHY, T. J.; KOKOGIANNAKIS, G. Incorporating environmental evaluation and thermal properties of concrete mix designs. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 422–435, 15 dez. 2016.

ROUSSEL, N. **Understanding the Rheology of Concrete**. Sawston: Woodhead Publishing, 2012.

SALAIMANIMAGUDAM, M. P. et al. Impact response of preplaced aggregate fibrous concrete hammerhead pier beam designed with topology optimization. **Crystals**, v. 11, n. 2, 1 jan. 2021.

SANTANA, D. S. **O método simplex para planejamento de substrato-inóculo para otimização da produção de biometano a partir dos resíduos de frutas e verduras**. Dissertação - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

SANTOS, H. R.; SILVA, A. P.; LEITE, D. U. ANÁLISE DA CORROSÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA: REVISÃO DE LITERATURA. Em: **A Construção Civil: em uma perspectivas econômica, ambiental e social**. [s.l.] Editora Científica Digital, 2021. p. 202–215.

SANTOS, P. D. S. **Tecnologia de Argilas: aplicada às argilas brasileiras**. São paulo: Edgard Blücher, 1975.

SAUD, A. F.; ABDELGADER, H. S.; EL-BADEN, A. S. Compressive and tensile strength of two-stage concrete. **Advanced Materials Research**, v. 893, p. 585–592, 2014.

SCHEFFÉ, H. Experiments with Mixtures. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, v. 20, n. 2, p. 344–360, 1958.

SCRIVENER, K. L. et al. TC 238-SCM: hydration and microstructure of concrete with SCMs: State of the art on methods to determine degree of reaction of SCMs. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 48, n. 4, p. 835–862, 2015.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, dez. 2018.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. (Crc Press, Ed.) Boca Raton, 2016.

SENGUL, O. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 434–441, dez. 2014.

SGOUROS, G. E.; WEBSTER, T. E.; HENNEGAN, N. M. Repair of Main Pass 69 Waterflood Platform. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 122, n. 4, p. 165–171, jul. 1996.

SHOUBI, M. V.; BAROUGH, A. S.; AMIRSOLEIMANI, O. Assessment of the roles of various cement replacements in achieving the sustainable and high performance concrete. **International Journal of Advances in Engineering & Technology**, v. 6, n. 1, p. 68–77, 2013.

SNIC. **Roadmap tecnológico do cimento: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

SOTO, N. T. A. et al. Measuring packing density and water demand of Portland cement and SCMs by the mixing energy method. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 16, n. 5, 2023.

STOVALL, T.; DE LARRARD, F.; BUIL, M. Linear packing density model of grain mixtures. **Powder Technology**, v. 48, n. 1, p. 1–12, set. 1986.

STROEVEN, M.; STROEVEN, P. SPACE system for simulation of aggregated matter application to cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1299–1304, 1 ago. 1999.

SWADDIWUDHIPONG, S.; ZHANG, J.; LEE, S. L. Viscometric characterisation of cement grout for prediction of prepacked concrete construction. **Magazine of Concrete Research**, v. 54, n. 5, p. 365–376, 2002.

SWAMINATHAN, P. et al. Experimental and Statistical Investigation to Evaluate Impact Strength Variability and Reliability of Preplaced Aggregate Concrete Containing Crumpled Rubber and Fibres. **Materials**, v. 15, n. 15, 1 ago. 2022.

TANG, C. **Properties of prepacked concrete**. Tese - University of Melbourne, Melbourne: [s.n.].

TAPAS, M. J. **Role of Supplementary Cementitious Materials in Mitigating Alkali-Silica Reaction**. Tese - University of Technology Sydney, Sydney, 2020.

THOMAS, M. The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1224–1231, dez. 2011.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2011**. (G. Survey, Ed.)Reston, 2011.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2020**. (Geological Survey, Ed.)Reston, 2020.

VATIN, N. I. et al. Enhancing the Impact Strength of Prepacked Aggregate Fibrous Concrete Using Asphalt-Coated Aggregates. **Materials**, v. 15, n. 7, 1 abr. 2022.

VEGA, D. F. et al. Ensayos alternativos para la determinación del tiempo de fraguado. Métodos capacitivo y resistivo. **Dyna Ingeniería e Industria**, v. 95, n. 1, p. 294–298, 2020.

VOGT, C. **Ultrafine particles in concrete Influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design**. Tese - Royal Institute of Technology, Stockholm, 2010. . Acesso em: 19 maio. 2020

WAKELEY, L. D.; ROY, D. M. Experimental concretes for sealing radioactive-waste repositories in evaporite strata. **Cement and Concrete Research**, v. 13, n. 1, p. 97–106, 1983.

WEDDING, P.; KANTRO, D. D. L. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste—A Miniature Slump Test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95, 1980.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades de concretos de cimento Portland**. Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

WENDLANDT, W. W. Inorganic Thermogravimetric Analysis. By Clement Duval. **Inorganic Chemistry**, v. 4, n. 3, p. 435–436, mar. 1965.

WONG, H. H. C.; KWAN, A. K. H. Packing density of cementitious materials: Part 1- measurement using a wet packing method. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 41, n. 4, p. 689–701, 2008.

YAVUZ, D. et al. A novel approach to estimate the tortuosity of pervious concretes using computed tomography. **Materials and Structures**, v. 56, n. 4, p. 74, 2023.

YEDRA ÁLVAREZ, E. et al. Low cost system for measuring the evolution of mechanical properties in cement mortars as a function of mixing water. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118127, maio 2020.

YOON, J. et al. Lightweight Concrete Produced Using a Two-Stage Casting Process. **Materials**, v. 8, n. 4, p. 1384–1397, 25 mar. 2015.

YOON, J. Y.; KIM, J. H. Mechanical properties of preplaced lightweight aggregates concrete. **Construction and Building Materials**, v. 216, p. 440–449, 20 ago. 2019.

YOON, J. Y.; LEE, J. Y.; KIM, J. H. Use of raw-state bottom ash for aggregates in construction materials. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 21, n. 4, p. 838–849, 8 jul. 2019.

YOUSUF, S.; SANCHEZ, L. F. M.; SHAMMEH, S. A. The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry. **Journal of Building Engineering**, v. 25, p. 100815, 1 set. 2019.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC). **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 29–39, 2014a.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 140–150, 29 ago. 2014b.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 383–394, 2015.

ZHANG, J.; SWADDIWUDHIPONG, S.; LEE, S. L. Parametric Study on Cement Grout and Aggregate Media for Preplaced Aggregate Grouting. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 32, n. 2, p. 120–130, 2004.

ZHONG, R. et al. Influence of pore tortuosity on hydraulic conductivity of pervious concrete: Characterization and modeling. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 1158–1168, 2016.

APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura com foco no tema TSC, tendo sido aplicado o *Methodi Ordinatio*. Este método, por meio da equação *InOrdinatio*, seleciona e classifica os trabalhos de acordo com sua relevância científica. Para isso, considera-se os três parâmetros de maior importância para as publicações: fator de impacto da revista, número de citações e ano de publicação. O método é composto por 9 etapas, que vão do estabelecimento da intenção da pesquisa à análise dos artigos selecionados (PAGANI et al., 2023; PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2018). Estas etapas são detalhadas a seguir.

Etapa 1 – Intenção da pesquisa

O objetivo da aplicação do método na presente pesquisa é de construir um portfólio bibliográfico acerca do TSC, bem como avaliar o ineditismo do objetivo proposto, que aplica as teorias de empacotamento de partículas a este material.

Etapa 2 – Pesquisa preliminar

Na literatura internacional o TSC, ou *two stage concrete*, é conhecido por diversos nomes, a depender do local e das especificidades da técnica utilizada para sua produção, conforme mostrado na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Outros nomes utilizados para o *two stage concrete*.

Nome	Referência
Arbeton	(ACI, 1997)
Colcrete	(MANOHAR, 1967); (ABDELGADER, 1996)
Colloidal concrete	(NEVILLE; BROOKS, 2010)
Grouted aggregate concrete	(CHAMPION; DAVIS, 1958); (ACI, 1997)
Grouted concrete	(NEVILLE; BROOKS, 2010)
Injected aggregate concrete	(ACI, 1997)
Intrusion concrete	(NEVILLE; BROOKS, 2010)
Naturbeton	(ACI, 1997)
PolCrete	(ACI, 1997); (ABDELGADER, 1996)
Prepacked concrete	(BAUMANN, 1948); (TANG, 1977); (NEVILLE; BROOKS, 2010); (ABDUL AWAL, 1984)
Preplaced aggregate concrete	(ACI, 1997); (ABDELGADER, 1996); (NEVILLE; BROOKS, 2010)
Rock filled concrete	(HUANG et al., 2008)

FONTE: Adaptado de Najjar, Soliman e Nehdi (2014).

Logo, utilizou-se os termos apresentados na Tabela A.1 na busca preliminar nas bases de dados. Também foram feitas as seguintes buscas com termos em português: “Concreto em duas etapas” OU “Concreto em dois estágios”.

Etapa 3 - Definição das palavras-chaves e base de dados

Foi realizada busca exaustiva com os sinônimos citados na Tabela A.1 e concluiu-se que os artigos se referem a este material, de forma majoritária, como “two stage concrete”, “prepacked concrete” e “preplaced aggregate concrete”. Os termos apresentados na Tabela A.1 não costumam ser citados nos artigos de forma isolada, mas sim como sinônimos aos três nomes apresentados. Ou seja, quando uma publicação cita por exemplo o termo “Arbeton”, cita-o como sinônimo de um dos três termos definidos no início deste parágrafo. Desta forma, a restrição de palavras-chave não impacta negativamente na busca pelos artigos.

Observou-se também que a combinação de termos “prepacked aggregate concrete”, “prepacked concrete”, “preplaced aggregate concrete” e “preplaced aggregate” eliminavam artigos que não tratavam de agregados convencionais como, por exemplo, “preplaced lightweight aggregates concrete”. Optou-se, então, por fazer a busca dessas palavras-chave sem combiná-las necessariamente com o termo “concrete”.

Já o termo “two stage concrete” foi mantido em conjunto pois a busca apenas com as palavras “two stage” retorna muitos artigos não relacionados ao TSC, como “two stage approach”, “two stage characteristics”, “two stage mixing procedure”, “two stage model”, entre outros.

Desta forma, após análise da resposta preliminar aos termos propostos, foram mantidas as seguintes palavras-chave: “Two stage concrete” OR “Prepacked” OR “Preplaced” AND “Concrete”. Também foi realizada a pesquisa combinando os seguintes termos: “Two stage concrete” OR “Prepacked” OR “Preplaced” AND “Concrete” AND “Packing”.

As bases de dados utilizadas para a pesquisa foram escolhidas de acordo com a relevância no meio científico em que a pesquisa está inserida: SCOPUS, Web of Science e ScienceDirect.

Etapa 4 - Pesquisa definitiva

Após a definição das palavras-chave e base de dados, foram realizadas as pesquisas nas bases entre nos dias 14 e 15/09/2020 e 20 e 21/02/2023, sem restrição de idioma ou ano. Os resultados são apresentados na Tabela A.2.

Tabela A.2 – Resultado da busca nas bases de dados.

Base	Palavras-chave	Número de resultados
Scopus	"Two stage concrete" OR "Prepacked" OR "Preplaced" AND "Concrete"	206
Web of Science		108
ScienceDirect		76
Scopus	"Two stage concrete" OR "Prepacked" OR "Preplaced" AND "Concrete" AND "Packing"	6
Web of Science		7
ScienceDirect		3

FONTE: A autora (2023).

Etapa 5 - Filtragem

Os artigos foram arquivados no gerenciador de referências bibliográficas Mendeley. Foram excluídas as referências duplicadas, bem como publicações em congressos, conferências, livros e normas. Os dados dos 143 artigos remanescentes foram exportados para uma planilha do Excel. Durante a fase de leitura dos resumos dos artigos, 25 foram eliminados pois não tratavam dos temas relativos à presente tese.

Etapa 6 - Identificação do fator de impacto e das citações

O número de citações dos artigos, quando não fornecida pela própria base de dados, foi levantado com o uso da ferramenta Google Scholar. Para determinação do fator de impacto, como orientado pelo método, foi utilizado como primeira opção o InCite Journal Citation Reports (JCR) do ano de 2022, classificação mais recente disponibilizada pela ferramenta na data da pesquisa. Para os periódicos não indexados nessa tabela foi utilizado, nessa ordem, as bases CiteScore, SJR e SNIP, sempre com o FI do último ano em que o periódico foi classificado. Para os artigos publicados em revistas sem classificação em nenhuma das bases foi atribuído FI igual a zero.

Etapa 7 - Ordenação dos artigos por meio da equação *InOrdinatio2.0*

A equação A.1 foi aplicada com o objetivo de obter o índice *InOrdinatio2.0* para cada um dos artigos selecionados:

$$InOrdinatio2.0 = \left\{ [\Delta * (FI)] - \left[\lambda * \left(\frac{Ano_{pesquisa} - Ano_{publicação}}{CitedHalfLife} \right) \right] + \alpha * \left[\frac{CI}{Yr_{research} + 1} - Yr_{publish} \right] \right\} \quad A.1$$

em que Δ é o fator de ponderação do fator de impacto, podendo variar de 0 a 10 (quanto maior o valor, maior a importância); FI é o fator de impacto; λ é o fator de ponderação da atualidade dos artigos, podendo variar de 0 a 10 (quanto maior o valor, maior a importância); $Ano_{pesquisa}$ é o ano em que o método está sendo aplicado; $Ano_{publicação}$ é o ano da publicação do artigo selecionado; $CitedHalfLife$ é a média do Cited Half-Life das publicações JCR (7,6); α é o fator de ponderação do ano de publicação, podendo variar de 0 a 10 (quanto maior o valor, maior a importância); e CI é o número total de citações.

Como a intenção da revisão sistemática era uma busca ampla sobre o assunto, valorizando tanto o conhecimento mais atual sobre o tema quanto às primeiras e mais antigas publicações, optou-se por definir um fator intermediário à ponderação do ano. Desta forma, o fator α foi definido como cinco.

Ao final da classificação, todos os 118 artigos foram selecionados para compor a revisão bibliográfica da presente pesquisa.

Etapa 8 – Localização dos artigos em formato integral

Dos 118 artigos selecionados, 13 não foram encontrados em seu formato integral. Destes, nove artigos têm 20 anos ou mais e as revistas não disponibilizam as edições mais antigas. Houve tentativa de contato com as revistas e autores, porém sem retorno. Os outros quatro artigos, dois publicados no “Journal of Wuhan University of Technology” e dois no “Indian Concrete Journal”, apesar de mais recentes, publicados entre 9 e 18 anos, também não foram localizados em seu formato integral. Foi realizada ainda tentativa de contato com a revista e autores. Mais um artigo foi eliminado pois, apesar de apresentar resumo em inglês, foi publicado em japonês, o que impede sua leitura integral. Desta forma, 104 artigos passam para a próxima etapa do método.

Etapa 9 – Leitura e análise dos artigos

Os artigos selecionados foram lidos de forma integral, e as contribuições mais relevantes de cada estudo são apresentadas e discutidas no corpo desta tese, no capítulo 2.

APÊNDICE B - PERIÓDICOS UTILIZADOS NA REVISÃO SISTEMÁTICA

Tabela B.1 – Resultado da busca nas bases de dados.

Classificação	Autores	Título	Periódico	Ano	InOrdinatio2.0
1	Li, P., Sluijsmans, M., Brouwers, H. and Yu, Q.	Functionally graded ultra-high performance cementitious composite with enhanced impact properties	Composites Part B: Engineering	2020	304,6
2	Li, P.P., Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H. and Chen, W.	Conceptual design and performance evaluation of two-stage ultra-low binder ultra-high performance concrete	Cement and Concrete Research	2019	283,7
3	Najjar, M., Nehdi, M., Soliman, A. and Azabi, T.	Damage mechanisms of two-stage concrete exposed to chemical and physical sulfate attack	Construction and Building Materials	2017	273,8
4	Murali, G., Abid, S.R., Karthikeyan, K., Haridharan, M., Amran, M. and Siva, A.	Low-velocity impact response of novel prepacked expanded clay aggregate fibrous concrete produced with carbon nano tube, glass fiber mesh and steel fiber	Construction and Building Materials	2021	260,0
5	Ramakrishnan, K., Depak, S., Hariharan, K., Abid, S.R., Murali, G., Cecchin, D., Fediuk, R., Mughahed Amran, Y., Abdelgader, H.S. and Khatib, J.M.	Standard and modified falling mass impact tests on preplaced aggregate fibrous concrete and slurry infiltrated fibrous concrete	Construction and Building Materials	2021	236,7
6	Prasad, N. and Murali, G.	Exploring the impact performance of functionally-graded preplaced aggregate concrete incorporating steel and polypropylene fibres	Journal of Building Engineering	2021	221,4
7	Najjar, M., Soliman, A. and Nehdi, M.	Critical overview of two-stage concrete: Properties and applications	Construction and Building Materials	2014	206,2
8	Mohammadhosseini, H., Tahir, M.M., Alaskar, A., Alabduljabbar, H. and Alyousef, R.	Enhancement of strength and transport properties of a novel preplaced aggregate fiber reinforced concrete by adding waste polypropylene carpet fibers	Journal of Building Engineering	2020	202,6
9	Abdelgader, H.S.	How to design concrete produced by a two-stage concreting method	Cement and Concrete Research	1999	200,6
10	Alrshoudi, F., Mohammadhosseini, H., Tahir, M.M., Alyousef, R., Alghamdi, H., Alharbi, Y. and Alsaif, A.	Drying shrinkage and creep properties of prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers	Journal of Building Engineering	2020	187,6

Classificação	Autores	Título	Periódico	Ano	InOrdinatio2.0
11	Nehdi, M.L., Najjar, M.F., Soliman, A.M. and Azabi, T.M.	Novel steel fibre-reinforced preplaced aggregate concrete with superior mechanical performance	Cement and Concrete Composites	2017	183,7
12	Murali, G., Abid, S.R., Mugahed Amran, Y., Abdelgader, H.S., Fediuk, R., Susrutha, A. and Poonguzhali, K.	Impact performance of novel multi-layered prepacked aggregate fibrous composites under compression and bending	Structures	2020	182,1
13	Lee, K.S., Choi, J.-I., Park, S.E., Hwang, J.-S. and Lee, B.Y.	Damping property of prepacked concrete incorporating coarse aggregates coated with polyurethane	Cement and Concrete Composites	2018	181,4
14	Tuyan, M., Zhang, L.V. and Nehdi, M.L.	Development of sustainable alkali-activated slag grout for preplaced aggregate concrete	Journal of Cleaner Production	2020	179,1
15	Murali, G. and Ramprasad, K.	A feasibility of enhancing the impact strength of novel layered two stage fibrous concrete slabs	Engineering Structures	2018	177,1
16	Yoon, J.Y. and Kim, J.H.	Mechanical properties of preplaced lightweight aggregates concrete	Construction and Building Materials	2019	168,7
17	Prasad, N. and Murali, G.	Research on flexure and impact performance of functionally-graded two-stage fibrous concrete beams of different sizes	Construction and Building Materials	2021	163,4
18	Lee, K.S., Choi, J.-I., Kim, S.-K., Lee, B.-K., Hwang, J.-S. and Lee, B.Y.	Damping and mechanical properties of composite composed of polyurethane matrix and preplaced aggregates	Construction and Building Materials	2017	158,1
19	Coo, M. and Pheeraphan, T.	Effect of sand fly ash and coarse aggregate gradation on preplaced aggregate concrete studied through factorial design	Construction and Building Materials	2015	154,4
20	Vatin, N.I., Murali, G., Abid, S.R., Garcez de Azevedo, A.R., Tayeh, B.A. and Dixit, S.	Enhancing the Impact Strength of Prepacked Aggregate Fibrous Concrete Using Asphalt-Coated Aggregates	Materials	2022	145,7
21	Wakeley, L. and Roy, D.	Experimental concretes for sealing radioactive-waste repositories in evaporite strata	Cement and Concrete Research	1983	141,8
22	Cheng, Y., Liu, S., Zhu, B., Liu, R. and Wang, Y.	Preparation of preplaced aggregate concrete and experimental study on its strength	Construction and Building Materials	2019	136,7
23	Mohammadhosseini, H., Alrshoudi, F., Tahir, M.M.,	Durability and thermal properties of prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers	Journal of Building Engineering	2020	135,1

Classificação	Autores	Título	Periódico	Ano	InOrdinatio2.0
	Alyousef, R., Alghamdi, H., Alharbi, Y.R. and Alsaif, A.				
24	Tuyan, M., Zhang, L.V. and Nehdi, M.L.	Development of sustainable preplaced aggregate concrete with alkali-activated slag grout	Construction and Building Materials	2020	134,6
25	Coo, M. and Pheeraphan, T.	Effect of sand fly ash and limestone powder on preplaced aggregate concrete mechanical properties and reinforced beam shear capacity	Construction and Building Materials	2016	133,0
26	Murali, G., Asrani, N.P., Ramkumar, V.R., Siva, A. and Haridharan, M.K.	Impact Resistance and Strength Reliability of Novel Two-Stage Fibre-Reinforced Concrete	Arabian Journal for Science and Engineering	2019	132,7
27	Rajabi, A.M. and Omid Moaf, F.	Simple empirical formula to estimate the main geomechanical parameters of preplaced aggregate concrete and conventional concrete	Construction and Building Materials	2017	132,4
28	Ichino, H., Beppu, M. and Williamson, E.B.	Blast-resistant performance of a two-stage concrete plate subjected to contact explosions	Construction and Building Materials	2020	132,1
29	Nehdi, M.L., Najjar, M.F., Soliman, A.M. and Azabi, T.M.	Novel eco-efficient Two-Stage Concrete incorporating high volume recycled content for sustainable pavement construction	Construction and Building Materials	2017	131,0
30	Murali, G., Abid, S.R., Amran, M., Vatin, N.I. and Fediuk, R.	Drop Weight Impact Test on Prepacked Aggregate Fibrous Concrete—An Experimental Study	Materials	2022	130,7
31	Alrshoudi, F., Mohammadhosseini, H., Tahir, M.M., Alyousef, R., Alghamdi, H., Alharbi, Y.R. and Alsaif, A.	Sustainable use of waste polypropylene fibers and palm oil fuel ash in the production of novel prepacked aggregate fiber-reinforced concrete	Sustainability (Switzerland)	2020	128,6
32	Rajabi, A.M., Omid Moaf, F. and Abdelgader, H.S.	Evaluation of Mechanical Properties of Two-Stage Concrete and Conventional Concrete Using Nondestructive Tests	Journal of Materials in Civil Engineering	2020	123,6
33	Yoon, J., Kim, H., Shin, S.W. and Sim, S.-H.	Rheology-based determination of injectable grout fluidity for preplaced aggregate concrete using ultrasonic tomography	Construction and Building Materials	2020	119,6

Classificação	Autores	Título	Periódico	Ano	InOrdinatio2.0
34	Murali, G., Abid, S.R., Al-Lami, K., Vatin, N.I., Dixit, S. and Fediuk, R.	Pure and mixed-mode (I/III) fracture toughness of preplaced aggregate fibrous concrete and slurry infiltrated fibre concrete and hybrid combination comprising nano carbon tubes	Construction and Building Materials	2023	116,0
35	Lv, J., Yao, S., Zhao, H., Yin, H. and Zhang, J.	Bond-slip behaviours between preplaced aggregate concrete (PAC) and steel bars	Construction and Building Materials	2023	106,0
36	Stempkowska, A., Gawenda, T., Nazjemies, Z., Ostrowski, K.A., Saramak, D. and Surowiak, A.	Impact of the geometrical parameters of dolomite coarse aggregate on the thermal and mechanic properties of preplaced aggregate concrete	Materials	2020	98,1
37	Najjar, M., Soliman, A. and Nehdi, M.	Two-stage concrete made with single binary and ternary binders	Materials and Structures/Materiaux et Constructions	2016	97,8
38	Yoon, J.Y., Lee, J.Y. and Kim, J.H.	Use of raw-state bottom ash for aggregates in construction materials	Journal of Material Cycles and Waste Management	2019	97,7
39	Murali, G., Prasad, N., Abid, S.R. and Vatin, N.I.	Response of Functionally Graded Preplaced Aggregate Fibrous Concrete with Superior Impact Strength	Buildings	2022	96,7
40	Salaïmanimadugam, M.P., Murali, G., Vivek Vardhan, C., Amran, M., Vatin, N., Fediuk, R. and Vasilev, Y.	Impact response of preplaced aggregate fibrous concrete hammerhead pier beam designed with topology optimization	Crystals	2021	92,7
41	Murali, G., Abid, S. and Vatin, N.	Experimental and Analytical Modeling of Flexural Impact Strength of Preplaced Aggregate Fibrous Concrete Beams	Materials	2022	90,7
42	Lv, J., Zhou, T., Du, Q., Li, K. and Jin, L.	Research on the bond behavior of preplaced aggregate concrete-filled steel tube columns	Materials	2020	85,6
43	Prasad, N., Murali, G., Abid, S.R., Vatin, N., Fediuk, R. and Amran, M.	Effect of needle type, number of layers on FPAFC composite against low-velocity projectile impact	Buildings	2021	85,4
44	Yoon, J., Kim, J., Hwang, Y. and Shin, D.	Lightweight concrete produced using a two-stage casting process	Materials	2015	85,4
45	Murali, G., Poka, L., Parthiban, K., Haridharan, M.K. and Siva, A.	Impact Response of Novel Fibre-Reinforced Grouted Aggregate Rubberized Concrete	Arabian Journal for Science and Engineering	2019	84,7

Classificação	Autores	Título	Periódico	Ano	InOrdinatio2.0
46	Alyousef, R., Mohammadhosseini, H., Ebid, A.A.K., Alabduljabbar, H., Ngian, S.P., Huseien, G.F. and Mohamed, A.M.	Enhanced Acoustic Properties of a Novel Prepacked Aggregates Concrete Reinforced with Waste Polypropylene Fibers	Materials	2022	80,7
47	Manohar, T., Suribabu, C., Murali, G. and Salaimanimagudam, M.	A novel steel-PAFRC composite fender for bridge pier protection under low velocity vessel impacts	Structures	2020	79,6
48	Das, K., Lam, E. and Tang, H.	Partial replacement of cement by ground granulated blast furnace slag and silica fume in two-stage concrete (preplaced aggregate concrete)	Structural Concrete	2020	77,1
49	Ly, J., Zhou, T. and Li, K.	Development and investigation of a new low-cement- consumption concrete-preplaced aggregate concrete	Sustainability (Switzerland)	2020	76,1
50	Prasad, N., Murali, G., Fediuk, R., Vatin, N. and Karelina, M.	Response of novel functionally-graded prepacked aggregate fibrous concrete against low velocity repeated projectile impacts	Materials	2021	74,4
51	Najjar, M.F., Nehdi, M.L., Azabi, T.M. and Soliman, A.M.	Fuzzy inference systems based prediction of engineering properties of two-stage concrete	Computers and Concrete	2017	74,0
52	Abdelgader, H. and Elgalhud, A.	Effect of grout proportions on strength of two-stage concrete	Structural Concrete	2008	73,8
53	Mohan, K.S.R., Diviyabharrathi, K. and Murali, G.	Research on the Development of High Impact Resistant Preplaced Aggregate Fibrous Concrete by the Inclusion of Coarse Aggregates Coated with Asphalt	Arabian Journal for Science and Engineering	2022	72,7
54	Abdelgader, H.S., Kurpińska, M. and Amran, M.	Effect of slag coal ash and foamed glass on the mechanical properties of two-stage concrete	Materials Today: Proceedings	2022	71,7
55	Swaminathan, P., Karthikeyan, K., Subbaram, S.R., Sudharsan, J.S., Abid, S.R., Murali, G. and Vatin, N.I.	Experimental and Statistical Investigation to Evaluate Impact Strength Variability and Reliability of Preplaced Aggregate Concrete Containing Crumpled Rubber and Fibres	Materials	2022	70,7
56	Lee, S., Jang, S.Y., Kim, C.Y., Ahn, E.J., Kim, S.P., Gwon, S. and Shin, M.	Effects of Redispersible Polymer Powder on Mechanical and Durability Properties of Preplaced Aggregate Concrete with Recycled Railway Ballast	International Journal of Concrete Structures and Materials	2018	68,4

Classificação	Autores	Título	Periódico	Ano	InOrdinatio2.0
57	Khanzada, F.A., Nazir, K., Ishtiaq, M., Javed, M.F., Kashif-Ur-rehman, S., Aslam, F., Musarat, M.A. and Usanova, K.I.	Concrete by Preplaced Aggregate Method Using Silica Fume and Polypropylene Fibres	Materials	2022	65,7
58	Najjar, M.F., Soliman, A.M. and Nehdi, M.L.	Grouts incorporating supplementary cementitious materials for two-stage concrete	Journal of Materials in Civil Engineering	2017	64,2
59	Abdelgader, H. and Gorski, J.	Stress-strain relations and modulus of elasticity of two-stage concrete	Journal of Materials in Civil Engineering	2003	63,0
60	Alfayez, S., Ali, M. and Nehdi, M.	Eco-efficient fiber-reinforced preplaced recycled aggregate concrete under impact loading	Infrastructures	2019	62,7
61	Cheong, H. and MacAlevey, N.	Experimental behavior of jacketed reinforced concrete beams	Journal of Structural Engineering	2000	62,3
62	Loganandan, M., Murali, G., Salaimanmagudam, M.P., Haridharan, M.K. and Karthikeyan, K.	Experimental Study on GFRP Strips Strengthened New Two Stage Concrete Slabs under Falling Mass Collisions	KSCE Journal of Civil Engineering	2021	61,0
63	Esmaili, M. and Amiri, H.	Laboratory Investigation into the Flexural Behavior of Embedded Concrete Sleepers in Two-Stage Concrete with Preplaced Ballast Aggregate	International Journal of Concrete Structures and Materials	2022	58,7
64	Jaishankar, P., Murali, G., Salaimanmagudam, M.P., Amran, Y.H.M., Fediuk, R. and Karthikeyan, K.	Study of topology optimized hammerhead pier beam made with novel preplaced aggregate fibrous concrete	Periodica Polytechnica Civil Engineering	2020	57,6
65	lv, J., Zhou, T. and Li, K.	Investigation and Application of a New Low-Carbon Material (Preplaced Aggregate Concrete) in Concrete-Filled Steel Tube Stub Columns	Sustainability (Switzerland)	2020	56,1
66	Mohammadhosseini, H., Awal, A.S.M.A. and Sam, A.R.M.	Mechanical and thermal properties of prepacked aggregate concrete incorporating palm oil fuel ash	Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences	2016	55,0
67	Alyousef, R.	Sustainable use of waste polypropylene fibres to enhance the abrasion and skid resistance of two-stage concrete	Sustainability (Switzerland)	2021	54,0

Classificação	Autores	Título	Periódico	Ano	InOrdinatio2.0
68	Satyarno, I., Solehudin, A.P., Meyarto, C., Hadiyatmoko, D., Muhammad, P. and Afnan, R.	Practical Method for Mix Design of Cement-based Grout	Procedia Engineering	2014	53,2
69	Das, K. and Lam, E.	Feasibility of producing two-stage (preplaced aggregate) concrete by gravity process	Structural Concrete	2020	52,1
70	Karthikeyan, M., Verapathran, M., Abid, S.R. and Murali, G.	The Combined Effect of Glass Fiber Mesh and Steel Fiber on Two-Layered Preplaced Aggregate Concrete against Drop Weight Impact	Materials	2022	50,7
71	Javed, M.F., Durrani, A.A., Rehman, S.K.U., Aslam, F., Alabduljabbar, H. and Mosavi, A.	Effect of recycled coarse aggregate and bagasse ash on two-stage concrete	Crystals	2021	49,4
72	Abdelgader, H.S., Fediuk, R.S., Kurpinska, M., Khatib, J., Murali, G., Baranov V. A. and Timokhin, R.A.	Mechanical properties of two-stage concrete modified by silica fume	Magazine of Civil Engineering	2019	47,7
73	Shah, S.N., Mo, K.H., Yap, S.P., Putra, A. and Othman, M.N.	Assessment of lightweight recycled crumb rubber-cement composite produced by preplaced method	ADVANCES IN CONCRETE CONSTRUCTION	2021	46,7
74	Ponnambalam, N., Thangavel, S., Murali, G. and Vatin, N.I.	Impact Strength of Preplaced Aggregate Concrete Comprising Glass Fibre Mesh and Steel Fibres: Experiments and Modeling	Materials	2022	45,7
75	Alfayez, S., Omar, T. and Nehdi, M.	Eco-efficient preplaced recycled aggregate concrete incorporating recycled tyre waste	Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability	2019	41,7
76	Abdelgader, H.S., Najjar, M.F. and Azabi, T.M.	Study of underwater concrete using two-stage (preplaced aggregate) concrete in Libya	Structural Concrete	2010	40,3
77	Abdelgader, H.	Effect of the quantity of sand on the compressive strength of two-stage concrete	Magazine of Concrete Research	1996	38,7
78	Du, Q., Sun, Q., Lv, J. and Yang, J.	Use of Preplaced Casting Method in Lightweight Aggregate Concrete	Advances in Materials Science and Engineering	2017	34,4
79	Nowek, A., Kaszubski, P., Abdelgader, H. and Górski, J.	Effect of admixtures on fresh grout and two-stage (preplaced aggregate) concrete	Structural Concrete	2007	34,4

Classificação	Autores	Título	Periódico	Ano	InOrdinatio2.0
80	Swaddiwudhipong, S., Zhang, J. and Lee, S.	Prepacked grouting process in concrete construction	Journal of Materials in Civil Engineering	2003	33,9
81	Abdelgader, H. and Ben-Zeitun, A.	Effect of grout proportions on tensile strength of two-stage concrete measured by split and double-punch tests	Structural Concrete	2004	28,5
82	Abdelgader, H. and Gorski, J.	Influence of grout proportions on modulus of elasticity of two-stage concrete	Magazine of Concrete Research	2002	28,4
83	Vishwakarma, R.J., Kumari, P., Morkhade, S.G. and Bahekar, P.V.	Engineering properties of two-stage concrete: A critical review	Materials Today: Proceedings	2022	21,7
84	Swaddiwudhipong, S., Zhang, J. and Lee, S.	Viscometric characterisation of cement grout for prediction of prepacked concrete construction	Magazine of Concrete Research	2002	21,6
85	Abdul Awal, A.	Creep recovery of prepacked aggregate concrete	Journal of Materials in Civil Engineering	1992	21,1
86	Abdul Awal, A., Ibrahim, M., Ali, A. and Zakaria Hossain, M.	Mechanical properties and thermal behaviour of two-stage concrete containing palm oil fuel ash	International Journal of Geomate	2017	20,5
87	Abdul Awal, A.	Failure mechanism of prepacked concrete	Journal of Structural Engineering (United States)	1988	20,3
88	O'Malley, J. and Abdelgader, H.	Investigation into viability of using two-stage (pre-placed aggregate) concrete in Irish setting	Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China	2010	15,8
89	Abdelgader, H., Górski, J., Khatib, J. and El-Baden, A.	Two-stage concrete: Effect of silica fume and superplasticizers on strength [Zwei-Phasen-Beton: Wirkung von Microsilica und Hochleistungsfließmitteln auf die Festigkeit]	Betonwerk und Fertigteil-Technik/Concrete Plant and Precast Technology	2016	8,0
90	Shibuya, A. and Iyoda, T.	A review of preplaced-aggregate concrete using recycled aggregate and railway wasted ballast	Lecture Notes in Civil Engineering	2021	5,7
91	Ramakrishnan, K., Depak, S. and Hariharan, K.	Suggested Modification in Bedding, Specimen Surface and Load Transferring Plate of Standard ACI 544—2R RBDWI Test in Fibrous Concrete—SIFCON and Prepacked Aggregate	Lecture Notes in Civil Engineering	2023	5,0
92	Zhang, J., Swaddiwudhipong, S. and Lee, S.	Parametric Study on Cement Grout and Aggregate Media for Preplaced Aggregate Grouting	Journal of Testing and Evaluation	2004	1,5

Classificação	Autores	Título	Periódico	Ano	InOrdinatio2.0
93	Sgouros, G., Webster, T. and Hennegan, N.	Repair of main pass 69 waterflood platform	Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering	1996	0,2
94	Ram Prasad, K., Murali, G., Kathirvel, P., Haridharan, M. and Karthikeyan, K.	Experimental study on functionally graded steel fibre reinforced preplaced aggregate concrete	International Journal of Engineering and Technology(UAE)	2018	-1,3
95	Saud, A., Abdelgader, H. and El-Baden, A.	Compressive and tensile strength of two-stage concrete	Advanced Materials Research	2014	-9,6
96	Ganaw, A., Hughes, D. and Ashour, A.	Grout rheological properties for preplaced aggregate concrete production	Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials	2014	-10,6
97	Li, S., Chen, T., Wang, K. and Ma, G.	Application of prepacked aggregate concrete technology in gravity wharf reinforcement	Applied Mechanics and Materials	2012	-13,4
98	Li, H., Zhen, Z., Liang, C., Dai, M. and Lu, X.	Experimental study on the steel bar/wire mesh reinforced preplaced aggregate concrete composite strengthening of concrete square columns	Advanced Materials Research	2011	-14,6
99	Abdelgader, H. and Górski, J.	Prediction of mechanical properties in two-stage concrete [Bestimmung mechanischer eigenschaften des "Zweiphasenbetons"]	Betonwerk und Fertigteil-Technik/Concrete Precasting Plant and Technology	2001	-27,5
100	Sawada, E.	Repair method for salt-damaged reinforced concrete structures	Concrete International	1990	-40,7
101	King, J.C. and Wilson, A.L.	If it's still standing it can be repaired.	Concrete Construction - World of Concrete	1988	-43,0
102	Paul, M.J.	Brandywine shoal lighthouse.	Concrete International	1987	-46,1
103	O'Rourke, J.E.	Structural grouting for oroville dam coreblock	ASCE J Geotech Eng Div	1977	-60,5
104	ANON	Preplaced aggregate concrete for structural and mass concrete	Journal of the American Concrete Institute	1969	-61,7

FONTE: A autora (2023).

APÊNDICE C – CONFIGURAÇÃO ARDUINO PARA ENSAIO *MIXING ENERGY*

Para medir o consumo de energia durante a realização do ensaio *mixing energy* foi utilizado um Arduino Uno em conjunto com sensor de corrente SCT013. O esquema da ligação eletrônica pode ser visto na Figura C.1, e o código para aquisição do sinal e cálculo do consumo de energia é apresentado na Tabela C.1.

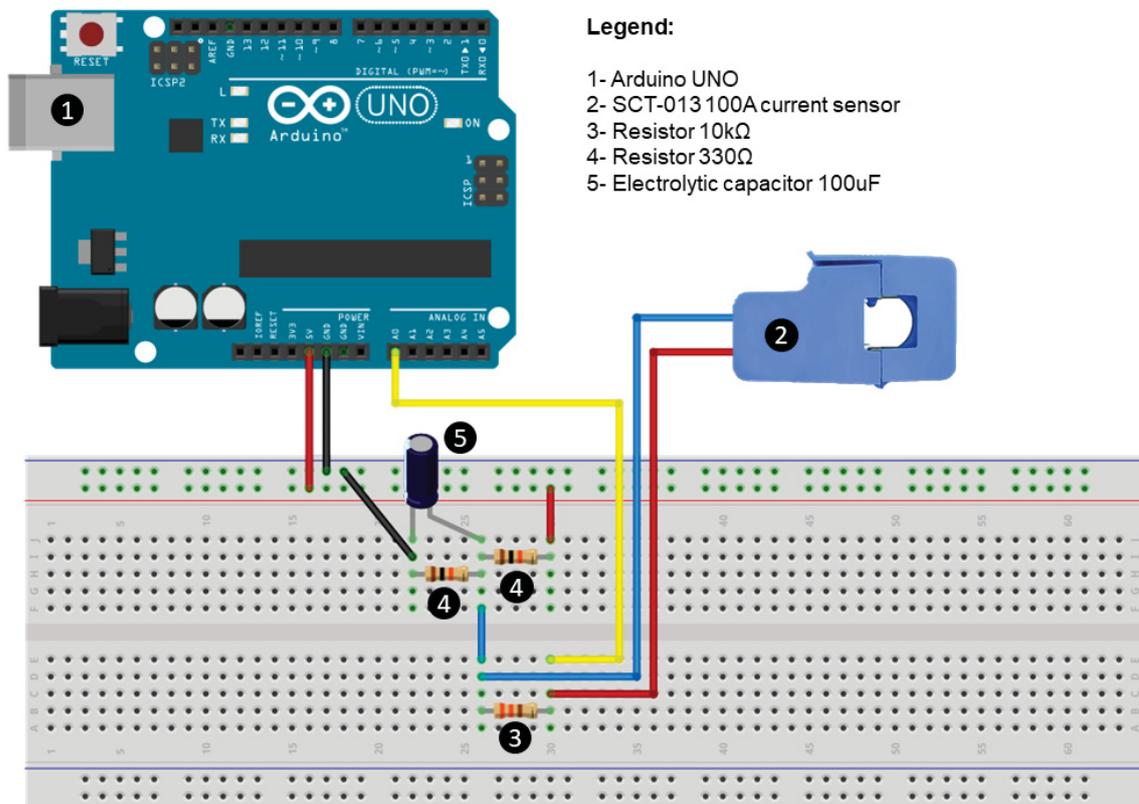


Figura C.1 – Arduino electronic setup with SCT013 sensor.

Tabela C.1 – Código fonte para medição do consumo de energia utilizando o sensor SCT013.

```

1. #include "EmonLib.h"
2. EnergyMonitor SCT013;
3. int pinSCT = A0;
4. int tensao = 127;
5. int potencia;
6.
7. void setup()
8. {
9.   SCT013.current(pinSCT, 6.0606);
10.  Serial.begin(9600);
11. }
12.
13. void loop()
14. {

```

```
15. double Irms = SCT013.calcIrms(1480);
16. potencia = Irms * tensao;
17. Serial.println(potencia);
18. delay(100);
19. }
```

APÊNDICE D – DEDUÇÃO DO CÁLCULO DO LIMITE DE POZOLANA

No ensaio Chappelle modificado determina-se a relação em massa (g/g) do teor de hidróxido de cálcio (portlandita, representada por CH) que um dado material consome durante a reação pozolânica. A partir desta informação é possível determinar o teor máximo da adição mineral ativa (em adição ou substituição ao cimento) necessária para que ocorra o esgotamento teórico desta fase mineral.

Ao se considerar que a adição mineral ativa será adicionada ao cimento Portland, temos que o teor de portlandita remanescente ($CH_{remanescente}$) será o teor de portlandita produzida pelo cimento Portland ao final da hidratação ($CH_{cimento}$), subtraído o consumo teórico gerado pela adição ($CH_{consumido}$):

$$CH_{remanescente} = CH_{cimento} - CH_{consumido}$$

Podemos considerar que:

$$CH_{cimento} = \%CH$$

$$CH_{consumido} = \%AM \text{ adicionada} \cdot \text{Chappelle (g/g)}$$

Assim, para que não exista $CH_{remanescente}$ temos:

$$CH_{remanescente} = CH_{cimento} - CH_{consumido}$$

$$0 = \%CH - (\%AM \text{ adicionada} \cdot \text{Chappelle})$$

Isolando $\%AM \text{ adicionada}$ temos:

$$\%AM \text{ adicionada} = \frac{\%CH}{\text{Chappelle}}$$

Assim, utilizando os dados experimentais obtidos nesse estudo, ao se considerar que o cimento produziu aos 91 dias de hidratação 25,86% portlandita e que a cinza volante apresentou resultado Chappelle modificado de 660,76 mg/g, podemos calcular o teor máximo de cinza que pode ser adicionado ao cimento:

$$\%AM \text{ adicionada} = \frac{\%CH}{Chapelle} = \frac{25,86\%}{0,661} = 39,14\%$$

Neste caso teremos 100% de cimento + 39,14% de cinza volante. De forma semelhante é possível o cálculo do teor máximo de substituição (*%AM substituição*) do cimento por uma adição mineral ativa. Contudo, neste caso, a substituição parcial do cimento irá gerar uma redução proporcional no teor de portlandita produzida pelo cimento, assim temos:

$$CH_{\text{cimento}} = \%CH \cdot (1 - \%subst)$$

$$CH_{\text{consumido}} = \%AM \text{ substituição} \cdot Chapelle$$

Assim, para que não exista $CH_{\text{remanescente}}$ temos:

$$CH_{\text{remanescente}} = CH_{\text{cimento}} - CH_{\text{consumido}}$$

$$0 = [\%CH \cdot (1 - \%AM \text{ substituição})] - (\%AM \text{ substituição} \cdot Chapelle)$$

Isolando $\%substituição$ temos:

$$\%AM \text{ substituição} = \frac{\%CH}{Chapelle + \%CH}$$

$$\%AM \text{ substituição} = \frac{25,86\%}{0,661 + 0,2586} = 28,13\%$$

Neste caso, teremos um traço com 71,87% de cimento e 28,13% de cinza volante.

Neste trabalho foi aplicado ainda um fator de correção (F_c) de 75% sobre os teores calculados, uma vez que na prática a mobilidade da reação em pasta é reduzida e não ocorre o esgotamento da portlandita.

APÊNDICE E – CÁLCULOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO PORTLAND

E.1 DETERMINAÇÃO DO CaO DO CLINQUER

A composição química do cimento Portland, de acordo com os dados do fabricante é apresentada na Tabela E.1.

Tabela E.1 – Outros nomes utilizados para o *two stage concrete*.

Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda ao Fogo	CaO livre	Resíduo Insolúvel	Equivalente Alcalino
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
4,38	19,08	2,97	61,57	3,15	3,08	3,58	0,95	0,77	0,66

FONTE: A autora (2023).

Para a estimativa das fases anidras do cimento, primeiramente é necessário determinar o teor de CaO proveniente do clínquer, uma vez que parte do teor de óxido de cálcio apresentado na tabela é referente à adição de sulfato de cálcio e filer calcário no cimento. Além disso, há presença da cal livre formada após a clínquerização, que não se encontra combinada como fase anidra. Assim, pode-se considerar que:

$$CaO_{clínquer} = CaO_{total} - CaO_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} - CaO_{CaCO_3} - CaO_{livre}$$

Para o cálculo do sulfato de cálcio, assume-se que todo o SO₃ está combinado como gipsita (CaSO₄ · 2H₂O):

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O = \%SO_3 \cdot \frac{MM_{CaSO_4 \cdot 2H_2O}}{MM_{SO_3}} = 3,08\% \cdot \frac{172,14}{80,06} = 6,62\%$$

O teor de CaO combinado como gipsita pode ser determinado por:

$$CaO_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} = \%SO_3 \cdot \frac{MM_{CaO}}{MM_{SO_3}} = 3,08\% \cdot \frac{56,08}{80,06} = 2,16\%$$

Para o cálculo do teor de filer calcário, assume-se que este é composto por calcita ($CaCO_3$). Sua determinação foi feita pelo ensaio de termogravimetria realizada no cimento anidro, na qual a perda de massa entre 600 e 1000°C referente à descarboxilação (perda de CO_2) da calcita.

O cálculo do $CaCO_3$ é feito por:

$$CaCO_3 = \%CO_2 \cdot \frac{MM_{CaCO_3}}{MM_{CO_2}} = 2,42\% \cdot \frac{100,09}{44,01} = 5,50\%$$

O teor de CaO combinado como $CaCO_3$ pode ser determinado por:

$$CaO_{CaCO_3} = \%CO_2 \cdot \frac{MM_{CaO}}{MM_{CO_2}} = 2,42\% \cdot \frac{56,08}{44,01} = 3,08\%$$

Assim, determina-se o teor de CaO do clínquer:

$$\begin{aligned} CaO_{clinker} &= CaO_{total} - CaO_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} - CaO_{CaCO_3} - CaO_{livre} \\ CaO_{clinker} &= 61,57\% - 2,16\% - 3,08\% - 0,95\% = 55,37\% \end{aligned}$$

E.2 DETERMINAÇÃO DAS FASES ANIDRAS POR BOGUE

A determinação das fases anidras do cimento pode ser calculada pelas Equações de Bogue. A aplicação da equação é válida para cimentos com relação óxido de alumínio/ferro superior à 0,64. Assim, primeiramente, faz-se esta verificação:

$$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = \frac{4,38\%}{2,97\%} = 1,47 > 0,64$$

Verificada a condição para aplicação das equações, calcula-se o teor de cada fase anidra, utilizando para este cálculo apenas o teor de CaO do clínquer calculado anteriormente.

$$C_3S = 4,071 \cdot CaO_{clinker} - 7,600 \cdot SiO_2 - 6,718 \cdot Al_2O_3 - 1,430 \cdot Fe_2O_3$$

$$C_3S = 4,071 \cdot (55,37\%) - 7,600 \cdot (19,08\%) - 6,718 \cdot (4,38\%) - 1,430 \cdot (2,97\%) = 46,7\%$$

$$C_2S = 2,687 \cdot SiO_2 - 0,7544 \cdot C_3S$$

$$C_2S = 2,687 \cdot (19,08\%) - 0,7544 \cdot (46,7\%) = 19,50\%$$

$$C_3A = 2,650 \cdot Al_2O_3 - 1,692 \cdot Fe_2O_3$$

$$C_3A = 2,650 \cdot (4,38\%) - 1,692 \cdot (2,97\%) = 6,6\%$$

$$C_4AF = 3,043 \cdot Fe_2O_3$$

$$C_4AF = 3,043 \cdot (2,97\%) = 9,0\%$$

Desta forma, podemos assumir que o cimento é composto por 81,81% de clínquer, conforme exposto na Tabela E.2.

Tabela E.2 – Composição teórica potencial do cimento anidro.

Fase	Teor (%)
C3S	46,70%
C2S	19,50%
C3A	6,60%
C4AF	9,00%
Clínquer (C3S, C2S, C3A e C4AF)	81,81%
Gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	6,62%
Fíler calcário ($CaCO_3$)	5,50%
CaO livre	0,95%
Resíduo insolúvel	0,77%
MgO	3,15%
Na ₂ O eq	0,66%
TOTAL	99,51

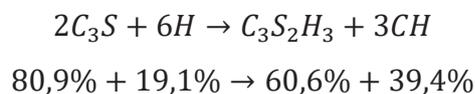
FONTE: A autora (2023).

Pode-se observar na Tabela E.2 que a soma total das fases não totalizou 100%. Isso se deve, possivelmente, devido a: erros na determinação da composição química do cimento anidro, impurezas no clínquer (uma vez que a NBR 16697 (ABNT, 2018a) especifica que o material carbonático utilizado como adição deve ter no mínimo 75% de $CaCO_3$); possível presença de sulfato de cálcio na forma de hemidratado ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$); além de incertezas intrínsecas ao modelo de Bogue (que pode apresentar variações de até 15% nos resultados

quando comparado à determinação feita por DRX e microscopia) (GOBBO, 2003; LE SAOÛT; KOCABA; SCRIVENER, 2011).

E.3 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE PORTLANDITA TEÓRICO

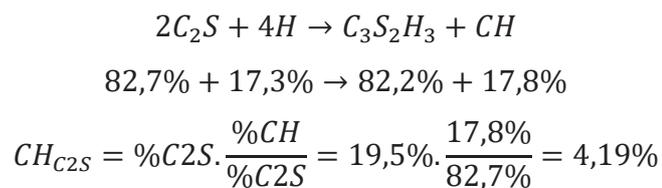
Sabe-se que apenas as fases C_3S e C_2S produzem portlandita (CH) ao final da hidratação. Considerando um grau de hidratação de 100% e o balanço estequiométrico da equação de hidratação do C_3S , temos:



Assim o teor de CH produzido na hidratação do C_3S pode ser calculado por:

$$CH_{C_3S} = \%C_3S \cdot \frac{\%CH}{\%C_3S} = 46,7\% \cdot \frac{39,4\%}{80,9\%} = 22,76\%$$

Para o C_2S , o cálculo é semelhante:



Portanto, o teor de portlandita (CH) teórico formado ao final da hidratação é calculado por:

$$CH = CH_{C_3S} + CH_{C_2S} = 22,76\% + 4,19\% = 26,95\%$$

APÊNDICE F – DADOS DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE À ÁGUA

Tabela F.1 – Dados do ensaio de permeabilidade dos esqueletos granulares à água.

Esqueleto granular	Leitura 1		Leitura 2		Leitura 3		Média	Erro			
	Início (s)	Fim (s)	Permeabilidade (cm/s)	Início (s)	Fim (s)	Permeabilidade (cm/s)			Início (s)	Fim (s)	Permeabilidade (cm/s)
EG01	5,05	15,00	1,76	4,17	14,13	1,75	4,03	14,00	1,75	1,75	0,001
EG02	2,73	13,83	1,57	3,23	14,32	1,57	3,67	13,77	1,73	1,63	0,052
EG03	4,53	14,83	1,70	5,00	15,33	1,69	16,22	26,55	1,69	1,69	0,002
EG04	4,55	14,34	1,78	4,74	14,54	1,78	3,00	12,80	1,78	1,78	0,001
EG05	7,40	16,40	1,94	3,40	12,37	1,95	3,61	12,60	1,94	1,94	0,002

FONTE: A autora (2023).

APÊNDICE G – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Para a análise estatística dos dados, os dados brutos passaram primeiramente pelo teste de normalidade (Shapiro-Wilk, com significância de 0,05), para garantir que os dados se comportam dentro de uma distribuição normal padrão.

Na sequência foi realizada a análise de variância (ANOVA, a 95% de probabilidade) para verificar quais variáveis geram diferenças significativas entre os grupos, juntamente com o teste de comparação múltipla de medias, realizada pelo teste de Tukey (a 95% de probabilidade) para comprovar diferenças significativas entre médias. O Teste de Tukey consiste em comparar todos os possíveis pares de médias e se baseia na diferença mínima significativa (D.M.S.), considerando os percentis do grupo. No cálculo da D.M.S. utiliza-se também a distribuição da amplitude estudentizada, o quadrado médio dos resíduos da ANOVA e o tamanho amostral dos grupos. Os resultados das análises de cada etapa deste estudo são apresentados abaixo.

G.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA ETAPA I: PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E CARACTERIZAÇÃO DOS GRAUTES

- Resistência à compressão das composições CP, CV, MK e SA, aos 28 e 91 dias.

Tabela G.1 – ANOVA – Resistência à compressão das composições CP, CV, MK e AS, aos 28 e 91 dias.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Composição	3	5176,62916	1725,54305	15,24467	<0.0001
Idade	1	881,87869	881,87869	7,79114	0,00991
Interação	3	888,09474	296,03158	2,61535	0,07334
Erro	25	2829,74825	113,18993		
Total	32	10397,80975			

Com 95% de probabilidade, o efeito da Composição é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito da Idade é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação não é significativo

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.2 – TUKEY – Resistência à compressão das composições CP, CV, MK e AS, aos 28 e 91 dias.

Composição	Idade	Grupos	
CV	90d	A	
CV	28d	A	B
SA	90d	A	B
SA	28d	A	B
MK	90d		B C
CP	28d		B C
CP	90d		B C
MK	28d		C

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

G.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA ETAPA II: DESENVOLVIMENTO DO ESQUELETO GRANULAR E AJUSTE DE FLUIDEZ DO GRAUTE

- Resistência à compressão dos grautes GR18, GR21 e GR35, aos 28 e 91 dias.

Tabela G.3 – ANOVA – Resistência à compressão dos grautes GR18, GR21 e GR35, aos 28 e 91 dias.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Graute	2	813,25313	406,62656	122,28008	<0.0001
Idade	1	693,58145	693,58145	208,57268	<0.0001
Interação	2	28,35814	14,17907	4,26391	0,03418
Erro	15	49,88056	3,32537		
Total	20	1541,6869			

Com 95% de probabilidade, o efeito do Graute é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito da Idade é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação é significativo

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.4 – TUKEY – Resistência à compressão dos grautes GR18, GR21 e GR35, aos 28 e 91 dias.

Composição	Idade	Grupos	
G35	91	A	
G21	91		B
G35	28		B
G18	91		C
G21	28		D
G18	28		E

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

- Resistividade elétrica superficial dos grautes GR18, GR21 e GR35, aos 7, 14, 21 e 28 dias.

Tabela G.5 – ANOVA – Resistividade elétrica superficial dos grautes GR18, GR21 e GR35, aos 7, 14, 21 e 28 dias.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Graute	2	1938,15096	969,07548	226,33078	<0.0001
Idade	3	2512,11648	837,37216	195,57103	<0.0001
Interação	6	128,98322	21,4972	5,02074	<0.0001
Erro	249	1066,13778	4,28168		
Total	260	5346,48444			

Com 95% de probabilidade, o efeito do Graute é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito da Idade é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação é significativo

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.6 – TUKEY – Resistividade elétrica superficial dos grautes GR18, GR21 e GR35, aos 7, 14, 21 e 28 dias.

Composição	Idade	Grupos					
G35	28	A					
G35	21		B				
G21	28		B				
G18	28			C			
G35	14		C	D			
G35	7			D	E		
G21	21			E	F		
G18	21			E	F	G	
G21	14				F	G	
G18	14				F	G	H
G21	7					G	H
G18	7						H

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.
 FONTE: A autora (2023).

- Resistência à compressão dos TSC aos 28 dias

Tabela G.7 – ANOVA – Resistência à compressão dos TSC, aos 28 dias.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Esqueleto	2	370,45727	185,22863	5,39796	0,01392
Graute	2	110,81905	55,40953	1,61475	0,22507
Interação	4	164,91197	41,22799	1,20147	0,34255
Erro	19	651,97672	34,31456		
Total	27	1348,62555			

Com 95% de probabilidade, o efeito do Esqueleto é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito do Graute não é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação não é significativo

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.8 – TUKEY – Efeito do esqueleto na resistência à compressão dos TSC, aos 28 dias.

Esqueleto	Grupos
B1	A
BX	A
B0	B

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.9 – TUKEY – Efeito do graute na resistência à compressão dos TSC, aos 28 dias.

Graute	Grupos
GR21	A
GR35	A
GR18	A

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.10 – TUKEY – Resistência à compressão dos TSC, aos 28 dias.

Esqueleto	Graute	Grupos
B1	GR21	A
BX	GR21	A B
BX	GR18	A
B1	GR18	A B
B1	GR35	A B
BX	GR35	A B
B0	GR35	A B
B0	GR21	A B
B0	GR18	B

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

- Resistividade elétrica superficial dos TSC, aos 7, 14, 21 e 28 dias.

Tabela G.11 – ANOVA – Resistividade elétrica superficial dos TSC, aos 7, 14, 21 e 28 dias.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Esqueleto	2	309,41498	154,70749	4,05695E ¹⁶	<0.0001
Graute	2	-4,54747E ⁻¹³	-2,27374E ⁻¹³	-59,625	--
Idade	3	-1,81899E ⁻¹²	-6,0633E ⁻¹³	-159	--
Esqueleto * Graute	4	-4,54747E ⁻¹²	-1,13687E ⁻¹²	-298,125	--
Esqueleto * Idade	6	-1,36424E ⁻¹²	-2,27374E ⁻¹³	-59,625	--
Graute * Idade	6	-1,81899E ⁻¹²	-3,03165E ⁻¹³	-79,5	--
Esqueleto * Graute * Idade	12	-9,09495E ⁻¹³	-7,57912E ⁻¹⁴	-19,875	--
Erro	477	1,81899E ⁻¹²	3,81339E ⁻¹⁵		
Total	512	318,87719			

Com 95% de probabilidade, o efeito do Esqueleto é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito do Graute não é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito da Idade não é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação do Esqueleto com o Graute não é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação do Esqueleto com a Idade não é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação da Idade com o Graute não é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação da Idade com o Graute e o Esqueleto não é significativo

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.12 – TUKEY – Resistividade elétrica superficial dos TSC, aos 7, 14, 21 e 28 dias.

Esqueleto	Graute	Idade	Grupos	
BX	GR35	28	A	
BX	GR35	21	A	
BX	GR35	14	A	
BX	GR35	7	A	
BX	GR21	28	A	B
BX	GR21	21	A	
BX	GR21	14	A	B
BX	GR21	7	A	B
BX	GR18	28		C
BX	GR18	21		C
BX	GR18	14		C
BX	GR18	7	B	C
B1	GR18	7		D
B1	GR18	14		D
B1	GR18	21		D
B1	GR18	28		D
B1	GR21	7		D
B1	GR21	14		D
B1	GR21	21		D
B1	GR21	28		D
B1	GR35	7		D
B1	GR35	14		D
B1	GR35	21		D
B1	GR35	28		D
B0	GR35	28		E F
B0	GR35	21		E F
B0	GR35	14		E
B0	GR35	7		E F
B0	GR21	28		E F
B0	GR21	21		E F
B0	GR21	14		E F
B0	GR21	7		F
B0	GR18	28		E F
B0	GR18	21		E F
B0	GR18	14		E
B0	GR18	7		E F

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

- Absorção por imersão dos TSC, aos 28 dias.

Tabela G.13 – ANOVA – Absorção por imersão dos TSC, aos 28 dias.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Esqueleto	2	2,92046E ⁻⁴	1,46023E ⁻⁴	96,2382	<0.0001
Graute	2	1,40305E ⁻⁴	7,01524E ⁻⁵	46,23479	<0.0001
Interação	4	1,65685E ⁻⁵	4,14212E ⁻⁶	2,72992	0,09711
Erro	9	1,36558E ⁻⁵	1,51731E ⁻⁶		
Total	17	4,62575E ⁻⁴			

Com 95% de probabilidade, o efeito do Esqueleto é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito do Graute é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação não é significativo

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.14 – TUKEY – Efeito do esqueleto na absorção dos TSC, aos 28 dias.

Esqueleto	Grupos
B0	A
BX	B
B1	C

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.15 – TUKEY – Efeito do graute na absorção dos TSC, aos 28 dias.

Graute	Grupos
GR18	A
GR21	B
GR35	C

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.16 – TUKEY – Absorção dos TSC, aos 28 dias.

Esqueleto	Graute	Grupos		
B0	GR18	A		
B0	GR21	A	B	
B0	GR35		B	C
BX	GR21		B	C
BX	GR18		B	C
B1	GR18		C	D
B1	GR21			D E
BX	GR35			D E
B1	GR35			E

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.
 FONTE: A autora (2023).

- Índice de vazios dos TSC, aos 28 dias.

Tabela G.17 – ANOVA – Índice de vazios dos TSC, aos 28 dias.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Esqueleto	2	0,00136	6,79525E ⁻⁴	86,76512	<0.0001
Graute	2	7,34305E ⁻⁴	3,67152E ⁻⁴	46,87983	<0.0001
Interação	4	8,25368E ⁻⁵	2,06342E ⁻⁵	2,63468	0,10471
Erro	9	7,0486E ⁻⁵	7,83178E ⁻⁶		
Total	17	0,00225			

Com 95% de probabilidade, o efeito do Esqueleto é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito do Graute é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação não é significativo

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.18 – TUKEY – Efeito do esqueleto no índice de vazios dos TSC, aos 28 dias.

Esqueleto	Grupos
B0	A
BX	B
B1	C

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.
 FONTE: A autora (2023).

Tabela G.19 – TUKEY – Efeito do graute no índice de vazios dos TSC, aos 28 dias.

Graute	Grupos
GR18	A
GR21	B
GR35	C

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.20 – TUKEY – Índice de vazios dos TSC, aos 28 dias.

Esqueleto	Graute	Grupos
B0	GR18	A
B0	GR21	A B
B0	GR35	B C
BX	GR21	B C
BX	GR18	B C
B1	GR18	C D
B1	GR21	D E
BX	GR35	E
B1	GR35	E

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

- Massa específica dos TSC, aos 28 dias.

Tabela G.21 – ANOVA – Massa específica dos TSC, aos 28 dias.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Esqueleto	2	0,00296	0,00148	54,57858	<0.0001
Graute	2	2,2239E ⁻⁴	1,11195E ⁻⁴	4,09962	0,05424
Interação	4	7,48302E ⁻⁴	1,87076E ⁻⁴	6,89723	0,00798
Erro	9	2,4411E ⁻⁴	2,71233E ⁻⁵		
Total	17	0,00418			

Com 95% de probabilidade, o efeito do Esqueleto é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito do Graute não é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação é significativo

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.22 – TUKEY – Massa específica dos TSC, aos 28 dias.

Esqueleto	Graute	Grupos			
B1	GR18	A			
BX	GR21	A	B		
B1	GR21	A	B		
B1	GR35	A	B	C	
BX	GR35		B	C	
BX	GR18		B	C	
B0	GR21		B	C	D
B0	GR35			C	D
B0	GR18				D

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

G.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA ETAPA III: AVALIAÇÃO DO CONCRETO

- Resistencia à compressão dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.

Tabela G.23 – ANOVA – Resistência à compressão dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Resistência	2	508,86699	254,43349	36,23705	4,46966E ⁻⁴
Erro	6	42,12817	7,02136		
Total	8	550,99516			

Com 95% de probabilidade, as médias das populações são significativamente diferentes.

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.24 – TUKEY – Resistência à compressão dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.

Graute	Grupos
B1GR21	A
CC2	B
CC1	C

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

- Resistividade elétrica superficial dos concretos CC2 e B1GR21, aos 7, 14, 21 e 28 dias.

Tabela G.25 – ANOVA – Resistividade elétrica superficial dos concretos CC2 e B1GR21, aos 7, 14, 21 e 28 dias.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Concreto	1	0,53329	0,53329	0,49062	0,48485
Idade	3	403,51535	134,50512	123,74435	<0.0001
Interação	3	31,3363	10,44543	9,60977	<0.0001
Erro	136	147,82651	1,08696		
Total	143	553,2831			

Com 95% de probabilidade, o efeito do Concreto não é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito da Idade é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação é significativo

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.26 – TUKEY – Resistividade elétrica superficial dos concretos CC2 e B1GR21, aos 7, 14, 21 e 28 dias.

Composição	Idade	Grupos
TSC	28	A
CC2	28	B
TSC	21	B C
CC2	21	C D
CC2	14	D
TSC	14	D
CC2	7	E
TSC	7	F

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

- Massa específica dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.

Tabela G.27 – ANOVA – Massa específica dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Massa	2	0,01653	0,00826	30,3314	7,29127E ⁻⁴
Erro	6	0,00163	2,72482E ⁻⁴		
Total	8	0,01816			

Com 95% de probabilidade, as médias das populações são significativamente diferentes.

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.28 – TUKEY – Massa específica dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.

Graute	Grupos
B1GR21	A
CC1	A
CC2	B

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

- Absorção por imersão dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.

Tabela G.29 – ANOVA – Absorção dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Absorção	2	1,02823E ⁻⁴	5,14116E ⁻⁵	32,70961	5,92937E ⁻⁴
Erro	6	9,43056E ⁻⁶	1,57176E ⁻⁶		
Total	8	1,12254E ⁻⁴			

Com 95% de probabilidade, as médias das populações são significativamente diferentes.

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.30 – TUKEY – Absorção dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.

Graute	Grupos
CC2	A
B1GR21	B
CC1	B

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

- Índice de vazios dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.

Tabela G.31 – ANOVA – Índice de vazios dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Vazios	2	3,74778E ⁻⁴	1,87389E ⁻⁴	20,19061	0,00216
Erro	6	5,5686E ⁻⁵	9,281E ⁻⁶		
Total	8	4,30464E⁻⁴			

Com 95% de probabilidade, as médias das populações são significativamente diferentes.

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

FONTE: A autora (2023).

Tabela G.32 – TUKEY – Índice de vazios dos concretos CC1, CC2 e B1GR21, aos 28 dias.

Graute	Grupos
CC2	A
B1GR21	B
CC1	B

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

FONTE: A autora (2023).

APÊNDICE H – CÁLCULO DO CONSUMO DE PORTLANDITA NOS GRAUTES

A composição química obtida a partir dos resultados de termogravimetria dos grautes (Figura 4.20(a)) é apresentada na Tabela H.1.

Tabela H.1 – Composição química das composições CP, CV, MK e SA.

Composição	Composição química			
	Água comb (%)	Portlandita (%) Eq. 4.1	Calcita (%) Eq. 4.2	Massa residual (%)
CP	6,75	6,37	15,87	84,71
CV	7,73	5,38	3,25	89,53
MK	7,82	4,85	15,66	84,10
SA	9,85	5,06	7,67	85,54

FONTE: A autora (2023).

Para viabilizar a comparação é necessário expressar os resultados na base de não voláteis, calculada conforme equação 3.3 (Pág. 84). Os resultados são apresentados na Tabela H.2.

Tabela H.2 – Composição química das composições CP, CV, MK e SA, na base de não voláteis.

Composição	Composição química		
	Água comb (%)	Portlandita (%)	Calcita (%)
CP	7,97	7,52	18,73
CV	8,63	6,01	3,63
MK	9,30	5,77	18,62
SA	11,52	5,91	8,97

FONTE: A autora (2023).

O cálculo da portlandita teórica disponível é feito considerando que o teor de cimento em cada composição produz 25,86% de portlandita ao final da hidratação aos 91 dias, conforme apresentado na Figura 4.8. Assim, pode-se considerar que:

$$\text{Portlandita inicial} = \text{Teor de cimento} * 25,86\%$$

Sendo a portlandita final aquela na base de não voláteis, apresentada na Tabela H.2, temos que:

$$\text{Portlandita consumida} = \text{Portlandita inicial} - \text{Portlandita final}$$

Os resultados para as composições analisadas são apresentados na Tabela H.3.

Tabela H.3 – Portlandita consumida estimada para as composições CP, CV, MK e SA.

Composição	Teor cimento	Teor portlandita inicial teórico	Teor portlandita final/remanescente	Portlandita consumida estimada
CP	39,69%	10,264%	7,52%	2,744%
CV	43,09%	11,143%	6,01%	5,133%
MK	33,00%	8,534%	5,77%	2,764%
SA	45,79%	11,841%	5,91%	5,931%

FONTE: A autora (2023).

Foi possível então normalizar o teor de portlandita em função do teor de portlandita inicial (Figura 4.20(b)), e os resultados são apresentados na Tabela H.4.

Tabela H.4 – Resultados normalizados de Portlandita consumida estimada para as composições CP, CV, MK e SA.

Composição	Em relação à massa total da composição			Em relação à portlandita inicial		
	Teor portlandita inicial teórico	Teor portlandita final	Portlandita consumida estimada	Teor portlandita inicial teórico	Teor portlandita final	Portlandita consumida estimada
CP	10,264%	7,52%	2,744%	100,00%	73,27%	26,73%
CV	11,143%	6,01%	5,133%	100,00%	53,93%	46,07%
MK	8,534%	5,77%	2,764%	100,00%	67,61%	32,39%
SA	11,841%	5,91%	5,931%	100,00%	49,91%	50,09%

FONTE: A autora (2023).

A partir dos resultados para o teor de portlandita consumida e remanescente, foi possível então calcular a reatividade efetiva das composições que possuem adição. A reatividade efetiva foi determinada por:

$$\text{Reatividade efetiva} = \frac{\% \text{ massa Portlandita consumida}}{\% \text{ massa de adição na composição}}$$

Assim, é possível determinar que:

$$Razão_{reatividade/Chapelle} = \frac{Reatividade}{Chapelle}$$

Desta forma, os resultados de resultados de reatividade efetiva e $Razão_{reatividade/Chapelle}$ das composições podem ser observados na Tabela H.5.

Tabela H.5 – Reatividade efetiva das composições CV, MK e SA.

Composição	Teor adição na composição	Portlandita consumida relação à massa total da composição	Reatividade efetiva	Chapelle modificado da adição (g/g)	Razão Reatividade / Chapelle
CV	12,49%	5,133%	41,10%	0,661	62,20%
MK	5,00%	2,764%	55,28%	1,266	43,67%
SA	6,87%	5,931%	86,34%	1,277	67,62%

FONTE: A autora (2023).