

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LARA BIANCATO RUHNKE

ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR FÍLER CALCÁRIO EM
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM BASE EM MODELOS DE
EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

CURITIBA

2024

LARA BIANCATO RUHNKE

ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR FÍLER CALCÁRIO EM
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM BASE EM MODELOS DE
EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

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

Orientadora: Prof^a Dr^a Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa

CURITIBA

2024

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

Ruhnke, Lara Biancato

Análise da substituição parcial de cimento por fíler calcário em argamassas de revestimento com base em modelos de empacotamento de partículas / Lara Biancato Ruhnke. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

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

Orientador: Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa

1. Calcário. 2. Argamassa. 3. Sustentabilidade. 4. Cimento – Substituição. 5. Partículas - Empacotamento. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Costa, Marienne do Rocio de Mello Maron da. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **LARA BIANCATO RUHNKE** intitulada: **ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR FÍLER CALCÁRIO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM BASE EM MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS**, sob orientação da Profa. Dra. **MARIENNE DO ROCIO DE MELLO MARON DA COSTA**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

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

CURITIBA, 11 de Novembro de 2024.

Assinatura Eletrônica

12/11/2024 13:43:11.0

MARIENNE DO ROCIO DE MELLO MARON DA COSTA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

12/11/2024 15:57:23.0

ELIANE BETÂNIA CARVALHO COSTA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA)

Assinatura Eletrônica

12/11/2024 10:15:45.0

HELOISA FUGANTI CAMPOS

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Nada se faz completamente sozinho, principalmente quando se trata de um trabalho na área acadêmica. Neste momento, que foi sem dúvida um dos mais difíceis e estressantes que já vivi, tive o privilégio de contar com o apoio de pessoas cuja contribuição foi crucial para que eu pudesse concluir esta etapa.

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha orientadora, Professora Doutora Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa. Ela não só foi minha professora na graduação, orientadora no trabalho de conclusão de curso e mestrado, mas também uma fonte constante de inspiração e aprendizado. Agradeço não apenas por seus ensinamentos, mas também por sua paciência e empatia durante os percalços que enfrentei neste processo. As nossas conversas e seus conselhos foram fundamentais para que eu pudesse ultrapassar os obstáculos que surgiram. Sem você, este trabalho não teria nem começado.

Agradeço também à Doutora Eliziane Jubanski Martins pela colaboração, esclarecimento de dúvidas, dicas valiosas, e pelo fornecimento de materiais em parceria com a Votorantim Cimentos.

Agradeço imensamente ao meu grande amigo e companheiro de jornada, Thiago Reichert, cuja presença foi fundamental ao longo deste processo de mestrado. Sua ajuda inestimável na resolução de dúvidas, seu apoio emocional constante e os momentos de desabafo que compartilhamos foram essenciais para minha trajetória. Não teria chegado até aqui sem a sua amizade e apoio.

Um agradecimento especial aos laboratórios e suas equipes, especificamente ao Laboratório de Materiais e Estruturas da UFPR e ao Laboratório de Materiais de Construção da UTFPR. Em particular, gostaria de reconhecer a dedicação e o auxílio das técnicas de laboratório, Viviane e Janaína, durante os ensaios.

Não posso deixar de mencionar meus chefes, Katia e Rafael, cuja ajuda foi inestimável durante todo este processo. Vocês foram e continuam sendo pessoas incríveis, e espero tê-los por perto por muito tempo. A relação que desenvolvemos vai além do esperado, e aprendi muito com ambos. Além disso, meus colegas de trabalho, Alessandra, Janaína, Deborah, Sally, Vinicius, Fablynne, Cleya, Caroline, Lais e Leonardo também se tornaram grandes amigos, aos quais sou imensamente grata e me ajudaram muito a aguentar todo esse processo.

Por fim, meu agradecimento mais sincero vai para as pessoas mais importantes da minha vida, minha família. Em especial, agradeço à minha mãe, Adriana, uma mulher incrível, inteligente e batalhadora, que é um verdadeiro exemplo de mãe. Sem sua ajuda e suporte, eu certamente não estaria onde estou hoje. Inspiro-me em sua trajetória acadêmica, tendo concluído o mestrado e atualmente cursando o doutorado, e sinto muito orgulho de você, mãe. Agradeço também ao meu avô, Gervásio, ao meu irmão, Lennon, à minha cunhada, Natália, à minha tia, Ana Cláudia, à minha prima, Vitória, e à minha melhor amiga, Kerolaine, que considero parte da família. Vocês foram essenciais em todo este processo, cada um à sua maneira, e por isso sou extremamente grata. Não posso esquecer da minha fiel companheira, minha cachorrinha, Berenice, que trouxe alegria nos momentos mais difíceis.

Finalmente, dedico este mestrado à você, Andréia. Mesmo enfrentando um câncer durante essa jornada, você se mostrou uma pessoa e profissional excepcional. Seu apoio foi fundamental, e eu definitivamente não teria conseguido concluir meu trabalho sem saber que você estava melhor. Não sei o que faria sem você, e sou eternamente grata por tê-la em minha vida. Espero que continue ao meu lado por muitos anos e obrigada por tudo.

“Nunca confunda educação com inteligência, você pode fazer um doutorado e ainda ser um idiota.”

Richard Feynman

RESUMO

A crescente demanda por infraestrutura urbana ressalta a necessidade de alternativas sustentáveis no setor da construção civil. A produção de cimento, uma das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa, pode ter seu impacto ambiental reduzido pela substituição parcial do material por fíler calcário, que oferece benefícios técnicos, econômicos e ambientais. Este trabalho teve como objetivo investigar o efeito da substituição parcial do cimento Portland por fíler calcário em argamassas de revestimento, variando os teores de substituição. Foram utilizados cimento CP II F e cal hidratada CH III, areia artificial e fíler calcário como substituto parcial do cimento. Os teores de substituição foram definidos com base em técnicas de empacotamento de partículas utilizando o método experimental de Wong e Kwan e o modelo analítico de De Larrard (CPM). Foram produzidas quatro formulações de argamassa com traço 1:1:6 (em volume) com teores de substituição de 0%, 15%, 20% e 25% a partir dos resultados obtidos pelo CPM, além de outras cinco formulações adicionais com teores de 0%, 4%, 10%, 16% e 20% e mesmo traço, utilizadas exclusivamente para validação desses resultados, tomando-se como base os resultados experimentais das mesmas no estado fresco. O desempenho no ensaio de *squeeze flow* foi empregado como parâmetro para indicar o teor de água mínima das formulações (método de Wong e Kwan para o conjunto granular) para uma adequada trabalhabilidade (argamassas produzidas e ensaiadas). As propriedades foram avaliadas tanto no estado fresco (índice de consistência, densidade de massa e comportamento reológico pelo ensaio de *squeeze flow*) quanto no estado endurecido (resistência à tração na flexão e compressão, densidade de massa, absorção de água e módulo de elasticidade). Os resultados indicaram que a substituição parcial de cimento por fíler calcário pode ser uma alternativa viável para desenvolver argamassas mais sustentáveis. O teor de 20% de fíler calcário demonstrou ser o mais eficaz para esse traço e esses materiais, proporcionando um equilíbrio entre trabalhabilidade e resistência mecânica. Esse teor de substituição do cimento por fíler calcário resultou em uma menor incorporação de ar, maior densidade no estado fresco e desempenho satisfatório quanto à deformabilidade e resistência mecânica. Teores mais elevados de fíler calcário resultaram em menor porosidade e maior flexibilidade, sendo adequados para aplicações que não exigem alta resistência mecânica. No entanto, a redução na resistência à compressão em teores acima de 20% indica a necessidade de cuidado em sua utilização.

Palavras-chave: Fíler calcário. Empacotamento de Partículas. Argamassa de revestimento. Areia artificial. Substituição parcial de cimento. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The growing demand for urban infrastructure highlights the need for sustainable alternatives in the construction industry. Cement production, one of the main sources of greenhouse gas emissions, can reduce its environmental impact through the partial replacement of cement with limestone filler, which offers technical, economic, and environmental benefits. This study aimed to investigate the effects of partially replacing Portland cement with limestone filler in rendering mortars, varying the substitution levels. CP II F cement, CH III hydrated lime, artificial sand, and limestone filler were used as partial substitutes for cement. The substitution levels were determined based on particle packing techniques, employing the experimental method of Wong and Kwan and the analytical CPM model by De Larrard. Four mortar formulations with a 1:1:6 mix ratio (by volume) and substitution levels of 0%, 15%, 20%, and 25% were produced based on CPM results, alongside five additional formulations with substitution levels of 0%, 4%, 10%, 16%, and 20%, exclusively for validating these results using experimental data in the fresh state. Squeeze flow performance was used as a parameter to determine the minimum water content of the formulations (Wong and Kwan's granular assembly method) for adequate workability. Mortar properties were evaluated in both fresh (consistency index, bulk density, and rheological behavior via squeeze flow tests) and hardened states (flexural and compressive strength, bulk density, water absorption, and modulus of elasticity). The results indicated that partially replacing cement with limestone filler is a viable alternative for developing more sustainable mortars. A 20% limestone filler substitution proved the most effective for this mix and these materials, balancing workability and mechanical strength. This substitution level led to lower air incorporation, higher fresh state density, and satisfactory performance in terms of deformability and mechanical resistance. Higher limestone filler contents reduced porosity and increased flexibility, making them suitable for applications that do not require high mechanical strength. However, the reduction in compressive strength for levels above 20% underscores the need for caution in their use.

Keywords: Limestone filler, Particle Packing, Rendering Mortar, Artificial Sand, Partial Cement Replacement, Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - COMPORTAMENTO DAS CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E A RELAÇÃO DE VAZIOS	50
FIGURA 2 - EFEITO DE AFASTAMENTO EM UMA MISTURA.....	52
FIGURA 3 - EFEITO PAREDE EM UMA MISTURA.....	53
FIGURA 4 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	59
FIGURA 5 - AREIA ARTIFICIAL FINA RECEBIDA	67
FIGURA 6 - AREIA ARTIFICIAL MISTURADA.....	68
FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA ARTIFICIAL OBTIDA EM LITERATURA PARA COMPARAÇÃO	71
FIGURA 8 - FLUXOGRAMA DO ESTUDO DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	72
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DO ESTUDO DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	76
FIGURA 10 - PROCEDIMENTO DE MISTURA PARA CÁLCULO DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO	77
FIGURA 11 - ARGAMASSA COM QUANTIDADE DE ÁGUA INFERIOR AO NECESSÁRIO PARA IC (FIGURA a) E ARGAMASSA COM QUANTIDADE DE ÁGUA ADEQUADA PARA IC (FIGURA b).....	79
FIGURA 12 - CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS DESMOLDADOS E IDENTIFICADOS.....	81
FIGURA 13 - GRÁFICO OBTIDO NO ENSAIO DE <i>SQUEEZE FLOW</i>	83
FIGURA 14 - EXEMPLO DE SUBDIVISÃO DOS ESTÁGIOS NA CURVA DE <i>SQUEEZE FLOW</i> DE UMA ARGAMASSA	84
FIGURA 15 - CORPO DE PROVA DE ARGAMASSA ANTES DE SER SUBMETIDO AO ENSAIO DE <i>SQUEEZE FLOW</i> (FIGURA a) E CORPO DE PROVA DE ARGAMASSA APÓS SER SUBMETIDO AO ENSAIO DE <i>SQUEEZE FLOW</i> (FIGURA b).....	85
FIGURA 17 - CICLAGEM DE CARGA DE COMPRESSÃO.....	87
FIGURA 18 - CURVA MÉDIA TENSÃO X DEFORMAÇÃO	87

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - EMISSÃO ESPECÍFICA DE CO ₂ NO BRASIL EM DIFERENTES ANOS	25
GRÁFICO 2 – CUSTO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO POR METRO QUADRADO EM DIFERENTES ANOS NO BRASIL	26
GRÁFICO 3 - GRANULOMETRIA A LASER DO CIMENTO, CAL E FÍLER DE CALCÁRIO	65
GRÁFICO 4 - CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA ARTIFICIAL COM ZONAS ÓTIMAS E UTILIZÁVEIS.....	69
GRÁFICO 5 - PORCENTAGEM EM MASSA DE CADA MATERIAL NAS ARGAMASSAS, INCLUSIVE FÍLER PRESENTE NO CIMENTO E AREIA ARTIFICIAL	82
GRÁFICO 6 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DO CP II F 32	89
GRÁFICO 7 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DA CH III .	90
GRÁFICO 8 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DO FÍLER DE CALCÁRIO	91
GRÁFICO 9 - VALORES DE EMPACOTAMENTOS VIRTUAL E REAL ATRAVÉS DO MODELO CPM PARA DIFERENTES TEORES DE FÍLER DE CALCÁRIO	94
GRÁFICO 10 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DO CONJUNTO GRANULAR COM 0% DE TEOR DE FÍLER	98
GRÁFICO 11 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DO CONJUNTO GRANULAR COM 4% DE TEOR DE FÍLER	99
GRÁFICO 12 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DO CONJUNTO GRANULAR COM 10% DE TEOR DE FÍLER	100
GRÁFICO 13 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DO CONJUNTO GRANULAR COM 16% DE TEOR DE FÍLER	101
GRÁFICO 14 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DO CONJUNTO GRANULAR COM 20% DE TEOR DE FÍLER	102
GRÁFICO 15 - <i>SQUEEZE FLOW</i> PARA AS ARGAMASSAS ESTUDADAS	108
GRÁFICO 16 – <i>SQUEEZE FLOW</i> PARA AS ARGAMASSAS TESTADAS DO CONJUNTO GRANULAR NO MÉTODO EXPERIMENTAL DE WONG E KWAN ..	108
GRÁFICO 17 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO INDIVIDUAL (MPa)	117

GRÁFICO 18 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO INDIVIDUAL (MPA).....	117
GRÁFICO 19 – DENSIDADE DE MASSA APARENTE MÉDIA PARA AS ARGAMASSAS PRODUZIDAS (KG/M ³).....	119
GRÁFICO 20 - DENSIDADE DE MASSA APARENTE INDIVIDUAL (KG/M ³).....	120
GRÁFICO 21 – ABSORÇÃO MÉDIA DE ÁGUA AOS 10 E 90 MINUTOS PARA AS ARGAMASSAS PRODUZIDAS (G/CM ²).....	121
GRÁFICO 22 - ABSORÇÃO DE ÁGUA INDIVIDUAL AOS 10 MINUTOS (G/CM ²).122	
GRÁFICO 23 - ABSORÇÃO DE ÁGUA INDIVIDUAL AOS 90 MINUTOS (G/CM ²).122	
GRÁFICO 24 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO MÉDIO PARA AS ARGAMASSAS PRODUZIDAS (MPA).....	124
GRÁFICO 29 - <i>SQUEEZE-FLOW</i> NA ARGAMASSA COM 0% DE TEOR DE FÍLER DE CALCÁRIO.....	152
GRÁFICO 30 - <i>SQUEEZE-FLOW</i> NA ARGAMASSA COM 15% DE TEOR DE FÍLER DE CALCÁRIO.....	153
GRÁFICO 31 - <i>SQUEEZE-FLOW</i> NA ARGAMASSA COM 20% DE TEOR DE FÍLER DE CALCÁRIO.....	153
GRÁFICO 32 - <i>SQUEEZE-FLOW</i> NA ARGAMASSA COM 25% DE TEOR DE FÍLER DE CALCÁRIO.....	154

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - REQUISITOS CLASSIFICATÓRIOS E INFORMATIVOS	32
TABELA 2 – REQUISITOS INFORMATIVOS NO ESTADO FRESCO	33
TABELA 3 - REQUISITOS CLASSIFICATÓRIOS NO ESTADO ENDURECIDO	33
TABELA 4 - CRITÉRIOS PARA OS REQUISITOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL	33
TABELA 5 - REQUISITOS INFORMATIVOS PARA O ESTADO ENDURECIDO	34
TABELA 6 - TABELA RESUMO DE TIPO DE MATERIAL CIMENTÍCIO, FINOS E SEUS TEORES UTILIZADOS NOS ESTUDOS	43
TABELA 7 - PROPRIEDADES AVALIADAS EM CADA ESTUDO	43
TABELA 8 - VALORES DE K PARA DIFERENTES PROTOCOLOS DE EMPACOTAMENTO	54
TABELA 9 - ENSAIOS E NORMAS UTILIZADAS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	60
TABELA 10 - ENSAIOS REALIZADOS E SEUS RESPECTIVOS LABORATÓRIOS	60
TABELA 11 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO CIMENTO CP II F 32 CONFORME NBR 16697 (ABNT, 2018)	61
TABELA 12 - MASSA UNITÁRIA E MASSA ESPECÍFICA DO CIMENTO	62
TABELA 13 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA CAL CH-III	62
TABELA 14 - MASSA UNITÁRIA E MASSA ESPECÍFICA OBTIDAS DA CAL	63
TABELA 15 - MASSA UNITÁRIA E MASSA ESPECÍFICA OBTIDAS DO FÍLER DE CALCÁRIO	63
TABELA 16 - RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE POZALINICIDADE DO FÍLER DE CALCÁRIO	63
TABELA 17 - D10, D50 E D90 DO CIMENTO, CAL E FÍLER DE CALCÁRIO	65
TABELA 18 - CARACTERIZAÇÃO DA AREIA ARTIFICIAL	69
TABELA 19 - D10, D50 E D90 DA AREIA ARTIFICIAL	70
TABELA 20 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS DA AREIA ENTRE O PRESENTE ESTUDO E LITERATURA	71
TABELA 21 - TRAÇOS E TEORES DE FÍLER PARA FORMULAÇÕES DAS ARGAMASSAS	78
TABELA 22 – FORMULAÇÕES PARA AS ARGAMASSAS PRODUZIDAS PARA OS ENSAIOS	80

TABELA 23 - ENSAIOS REALIZADOS NAS ARGAMASSAS ESTUDADAS.....	80
TABELA 24 – IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA CADA ENSAIO	85
TABELA 25 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL DE WONG E KWAN PARA O CIMENTO.....	88
TABELA 26 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL DE WONG E KWAN PARA A CAL	89
TABELA 27 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL DE WONG E KWAN PARA O FÍLER DE CALCÁRIO.....	90
TABELA 28 - ÍNDICE DE VAZIOS MÍNIMO E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS MÁXIMA PARA OS MATERIAIS INDIVIDUAIS.....	91
TABELA 29 - DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO NA CONDIÇÃO SECA PARA O AGREGADO MIÚDO.....	91
TABELA 30 - VALOR DE K PARA DIFERENTES MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO	93
TABELA 31 - VALORES DE EMPACOTAMENTOS VIRTUAL E REAL ATRAVÉS DO MODELO CPM PARA DIFERENTES TEORES DE FÍLER DE CALCÁRIO	93
TABELA 32 - VALORES DE EMPACOTAMENTOS VIRTUAL E REAL ATRAVÉS DO MODELO CPM PARA OS MATERIAIS INDIVIDUAIS	95
TABELA 33 - VALORES DE EMPACOTAMENTOS VIRTUAL E REAL ATRAVÉS DO MODELO CPM PARA AS DIFERENTES PASTAS.....	95
TABELA 34 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL WONG E KWAN PARA O CONJUNTO GRANULAR COM 0% DE TEOR DE FÍLER.....	97
TABELA 35 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL WONG E KWAN PARA O CONJUNTO GRANULAR COM 4% DE TEOR DE FÍLER.....	98
TABELA 36 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL WONG E KWAN PARA O CONJUNTO GRANULAR COM 10% DE TEOR DE FÍLER.....	99
TABELA 37 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL WONG E KWAN PARA O CONJUNTO GRANULAR COM 16% DE TEOR DE FÍLER.....	100
TABELA 38 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL WONG E KWAN PARA O CONJUNTO GRANULAR COM 20% DE TEOR DE FÍLER.....	101
TABELA 39 - ÍNDICE DE VAZIOS E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS PARA OS CONJUNTOS GRANULARES	102
TABELA 40 – RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE ESTADO FRESCO .	104

TABELA 41 - PONTOS DE MUDANÇA DE ESTÁGIO DAS ARGAMASSAS (DEmÁx)	109
TABELA 42 - PONTOS DE MUDANÇA DE ESTÁGIO DAS ARGAMASSAS (DPmÁx)	109
TABELA 43 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA ARGAMASSAS ESTUDADAS	116
TABELA 44 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA ARGAMASSAS ESTUDADAS	116
TABELA 45 - DENSIDADE DE MASSA APARENTE PARA ARGAMASSAS ESTUDADAS	119
TABELA 46 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE PARA ARGAMASSAS ESTUDADAS	121
TABELA 47 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ARGAMASSAS ESTUDADAS	124
TABELA 48 - RESULTADOS DO MODELO CPM E ENSAIOS NO ESTADO FRESCO PARA AS ARGAMASSAS ESTUDADAS	125
TABELA 49 - RESULTADOS DO MODELO CPM E EMPACOTAMENTO E ESTADO ENDURECIDO PARA AS ARGAMASSAS ESTUDADAS	126
TABELA 50 - RESUMO DE DADOS DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS E COMPARATIVAS COM 0% E 20% DE TEOR DE FÍLER	128
TABELA 51 - DADOS DE ENTRADA PARA A DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DO CIMENTO PORTLAND COM A/FINOS DE 0,10	144
TABELA 52 - DADOS DE ENTRADA PARA A SITUAÇÃO SEM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR FÍLER DE CALCÁRIO	146
TABELA 53 - VALORES PARA O COEFICIENTE AIJ	147
TABELA 54 - VALORES PARA COEFICIENTE BIJ	147
TABELA 55 - DADOS DE ENTRADA PARA A DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DO CONJUNTO GRANULAR COM 10% DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR FÍLER DE CALCÁRIO E A/MS DE 0,15	150
TABELA 56 – DENSIDADE DE MASSA APARENTE PARA ARGAMASSA COM 0% DE FÍLER DE CALCÁRIO	155
TABELA 57 – DENSIDADE DE MASSA APARENTE PARA ARGAMASSA COM 15% DE FÍLER DE CALCÁRIO	155

TABELA 58 – DENSIDADE DE MASSA APARENTE PARA ARGAMASSA COM 20% DE FÍLER DE CALCÁRIO	156
TABELA 59 – DENSIDADE DE MASSA APARENTE PARA ARGAMASSA COM 25% DE FÍLER DE CALCÁRIO	157
TABELA 60 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE PARA ARGAMASSA COM 0% DE FÍLER DE CALCÁRIO	158
TABELA 61 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE PARA ARGAMASSA COM 15% DE FÍLER DE CALCÁRIO	158
TABELA 62 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE PARA ARGAMASSA COM 20% DE FÍLER DE CALCÁRIO	158
TABELA 63 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE PARA ARGAMASSA COM 25% DE FÍLER DE CALCÁRIO	158
TABELA 64 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ARGAMASSA COM 0% DE FÍLER DE CALCÁRIO	159
TABELA 65 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ARGAMASSA COM 15% DE FÍLER DE CALCÁRIO	159
TABELA 66 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ARGAMASSA COM 20% DE FÍLER DE CALCÁRIO	159
TABELA 67 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ARGAMASSA COM 25% DE FÍLER DE CALCÁRIO	159

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

β - Densidade de empacotamento

β_i e β_j - Densidades de empacotamento de cada classe de tamanho de grãos

ρ_a , ρ_b , ρ_c - Densidades dos sólidos a, b e c

ρ_w - Densidade da água

u_w - Relação água/materiais secos em volume

u - Relação de vazios

ϕ - Densidade de empacotamento real

γ - Densidade de empacotamento virtual

γ_i - Densidade de empacotamento virtual quando a classe i é dominante

a/ms - Relação água/materiais secos

AA - Areia Artificial

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

a_{ij} - Efeito de afastamento entre partículas

ARV-I / ARV-II / ARV-III / AET - Argamassa inorgânica de revestimento

b_{ij} - Efeito parede entre partículas

CaCO_3 - Carbonato de cálcio

CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção

CH - Hidróxido de cálcio

CH-I / CH-II / CH-III - Cal Hidratada

CO_2 - Dióxido de carbono

CPM - *Compressible Packing Model*

CP II F - Cimento Portland composto com material carbonático

d_i e d_j - Diâmetros das partículas

GCCA - Associação Global de Cimento e Concreto

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IC - Índice de Consistência

IV - Índice de vazios

K - Índice de compactação

kg CO_2 /t cimento - emissão específica de CO_2 na produção do cimento

M - Massa de argamassa que preenche o molde de ensaio

n - Número de classes da mistura

NBR - Norma Brasileira

NM - Norma Mercosul

Novo CAGED - Cadastro Geral de Empregados e Desempregados

ONU - Organização das Nações Unidas

PAIC - Pesquisa Anual da Indústria da Construção

PIB - Produto Interno Bruto

SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

V - Volume do molde utilizado no ensaio

V_s - Volume de sólidos na argamassa

y_i - Volume relativo da classe i

y_j - Volume de material de cada classe

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO E OBJETIVO.....	22
1.1.1 Problema.....	22
1.1.2 Objetivo.....	23
1.2 JUSTIFICATIVAS AMBIENTAL, SOCIOECONÔMICA E TECNOLÓGICA.....	23
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO E SEUS AGLOMERANTES.....	29
2.1.1 Requisitos de norma.....	31
2.1.2 Materiais finos em argamassas de revestimento.....	34
2.1.3 Fíler calcário.....	37
2.1.3.1 Pesquisas sobre substituição de cimento por fíler em materiais cimentícios.....	40
2.1.4 Areia artificial.....	44
2.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	47
2.2.1 Método experimental de determinação de densidade de empacotamento.....	48
2.2.2 Modelo CPM de De Larrard (1999).....	52
2.2.3 Empacotamento de partículas na dosagem de argamassas.....	54
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	57
3.1 ETAPA I – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	59
3.1.1 Materiais finos.....	61
3.1.1.1 Cimento.....	61
3.1.1.2 Cal hidratada.....	62
3.1.1.3 Fíler de calcário.....	63
3.1.2 Areia artificial.....	66
3.2 ETAPA II – TÉCNICAS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	72
3.2.1 Definição do modelo e método.....	73
3.2.2 Etapas do estudo de empacotamento de partículas.....	74
3.2.3 Procedimentos de mistura.....	76
3.2.4 Determinações de densidade de empacotamento.....	77
3.3 ETAPA III – PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS MISTAS.....	78
3.3.1 Produção das argamassas mistas.....	78

3.3.2 Caracterização das argamassas no estado fresco	82
3.3.2.1 Índice de consistência.....	82
3.3.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado.....	82
3.3.2.3 Squeeze flow	83
3.3.3 Caracterização das argamassas no estado endurecido.....	85
3.3.3.1 Resistência à compressão e à tração na flexão	85
3.3.3.2 Densidade de massa aparente	86
3.3.3.3 Absorção de água e coeficiente de capilaridade	86
3.3.3.4 Módulo de elasticidade estático.....	86
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
4.1 ESTUDO DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	88
4.1.1 Etapa II - Método experimental Wong e Kwan para os materiais.....	88
4.1.2 Etapa II - Modelo analítico CPM (De Larrard) para o conjunto granular.....	93
4.1.3 Etapa adicional - Método experimental Wong e Kwan para o conjunto granular	97
4.2 ETAPA III – RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	104
4.2.1 Índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado	104
4.2.2 Squeeze flow	107
4.3 ETAPA III – RESULTADOS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	115
4.3.1 Resistência à tração na flexão e à compressão	115
4.3.2 Densidade de massa aparente	119
4.3.3 Absorção de água e coeficiente de capilaridade	121
4.3.4 Módulo de elasticidade estático.....	123
4.4 RESULTADOS GERAIS PARA AS ARGAMASSAS	125
5 CONCLUSÕES.....	130
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
REFERÊNCIAS	134
APÊNDICE A – ROTEIRO DE CÁLCULO DO EMPACOTAMENTO EXPERIMENTAL DOS MATERIAIS FINOS INDIVIDUAIS.....	144
APÊNDICE B – ROTEIRO DE CÁLCULO DO MODELO ANALÍTICO (CPM).....	146
APÊNDICE C – ROTEIRO DE CÁLCULO: EMPACOTAMENTO EXPERIMENTAL DO CONJUNTO GRANULAR.....	150

APÊNDICE D – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	
.....	152
APÊNDICE E – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO	
ENDURECIDO.....	155

1 INTRODUÇÃO

O cimento *Portland* é um dos materiais mais consumidos globalmente, com mais de 4,4 bilhões de toneladas produzidas anualmente (MIT *CLIMATE PORTAL*, 2023). No entanto, sua produção é uma das principais fontes de emissões de dióxido de carbono (CO₂), responsável por cerca de 7% a 8% das emissões globais de CO₂, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022). A indústria cimenteira, embora vital para o setor de construção, enfrenta desafios significativos em reduzir seu impacto ambiental. Além de emitir grandes quantidades de CO₂ durante o processo de calcinação e consumo de combustíveis fósseis, consome intensivamente recursos naturais. Além disso, a cadeia produtiva da construção civil utiliza entre 20% e 50% dos recursos naturais do planeta, agravando ainda mais a necessidade de soluções sustentáveis (SANTOS *et al.*, 2011, citado por BRASILEIRO e MATOS, 2015).

A produção global de cimento gerou aproximadamente 2,5 bilhões de toneladas de CO₂ em 2021, mantendo o setor como um dos maiores emissores industriais (*GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION – GCCA*, 2023). Embora estratégias como a substituição parcial do clínquer e o uso de fontes renováveis de energia tenham reduzido as emissões por tonelada de cimento em cerca de 22% desde 1990, o crescimento contínuo da demanda contrabalança essas melhorias (GCCA, 2023). Assim, alternativas como a substituição parcial do cimento por materiais finos, como fíler calcário, emergem como soluções práticas para mitigar o impacto ambiental e, em algumas situações, resultar em custos reduzidos.

Essa abordagem implementa um artifício eficaz para a mitigação das emissões de CO₂, apresentando vantagens tanto do ponto de vista ambiental quanto técnico, sendo, portanto, favorável à indústria (BERTON; MAGRI; COSTA, 2017). Estudos como de Campos (2019) e García (2017) indicam a possibilidade de substituição parcial do cimento por materiais finos em concretos. Pesquisas como de Cardoso, Augusti e Pileggi (2013) analisaram a influência do teor de finos em argamassas, no entanto, são poucos os estudos em que se foi dedicado encontrar um teor ideal de finos em argamassa de revestimento.

O fíler calcário, derivado de rochas calcárias ricas em carbonato de cálcio, é amplamente utilizado em argamassas e concretos como aditivo ou substituto parcial do cimento. Sua incorporação não apenas reduz a necessidade de clínquer, mas também melhora propriedades como trabalhabilidade, densidade e redução de porosidade, o que contribui para uma maior durabilidade e menor emissão de CO₂ (ISAIA; RIZZATTI, 2020).

Nas últimas décadas, o conceito de empacotamento de partículas tem sido amplamente explorado para otimizar a dosagem de materiais particulados em misturas cimentícias. Essa abordagem busca preencher os vazios entre partículas maiores com partículas menores, maximizando a densidade do material e reduzindo a necessidade de água e aglomerantes (DAMINELI, 2013; STROEVEN & STROEVEN, 1999). Aplicado a argamassas de revestimento, o empacotamento de partículas é uma ferramenta eficaz para reduzir a dependência de cimento *Portland*, mantendo a performance técnica.

Diante disso, este estudo investiga a viabilidade da substituição parcial do cimento por fíler calcário em argamassas mistas de revestimento, empregando o empacotamento de partículas como metodologia para definir teores ideais de substituição. O objetivo é oferecer uma solução técnica sustentável que combine menor impacto ambiental com desempenho adequado para aplicações na construção civil.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO E OBJETIVO

1.1.1 Problema

A intensa extração de recursos naturais e as altas emissões de CO₂ na produção do cimento *Portland* representam um desafio significativo para a indústria da construção civil, devido ao seu impacto ambiental (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). Diante dessa problemática, é fundamental buscar alternativas que possam mitigar esses problemas, como a utilização de areia artificial em substituição à areia natural e a substituição parcial do cimento por materiais finos em argamassas de revestimento. No entanto, surge a necessidade de compreender os limites dessas substituições e os possíveis impactos nas propriedades da argamassa. Portanto, a problematização central

desta dissertação consiste em investigar se é viável determinar um teor máximo de substituição de cimento por materiais finos que não comprometa as propriedades da argamassa além de avaliar os efeitos da substituição total da areia natural pela artificial nessas mesmas características.

1.1.2 Objetivo

Analisar as propriedades de uma argamassa mista de revestimento, produzida com a substituição parcial do Cimento *Portland* por fíler calcário e areia artificial, fazendo uso de modelos de empacotamento de partículas a fim de atingir um teor máximo de fíler na mistura. Pretende-se estabelecer uma faixa indicativa adequada para o teor de finos usado como substituição do cimento, a fim de otimizar a mistura, considerando tanto a conformidade com as especificações normativas quanto a utilização sustentável de materiais

1.2 JUSTIFICATIVAS AMBIENTAL, SOCIOECONÔMICA E TECNOLÓGICA

A população do planeta tem aumentado cada vez mais nos últimos anos. A Organização das Nações Unidas (ONU) (Nações Unidas Brasil, 2019) afirma que em 1950 a população mundial era estimada em cerca de 2,6 bilhões de pessoas, e que em 1999 o planeta atingiu a marca de 6 bilhões. Atualmente, 20 anos depois, é estimado que a população global esteja em, aproximadamente, 7,7 bilhões de pessoas, sendo cerca de 210 milhões só no Brasil. Um maior contingente populacional e a concentração em áreas urbanas resultam em um aumento na quantidade de construções, tornando-se necessária uma maior quantidade de materiais de construção. No entanto, a produção desses materiais de construção e obtenção de recursos naturais resulta em impactos ambientais.

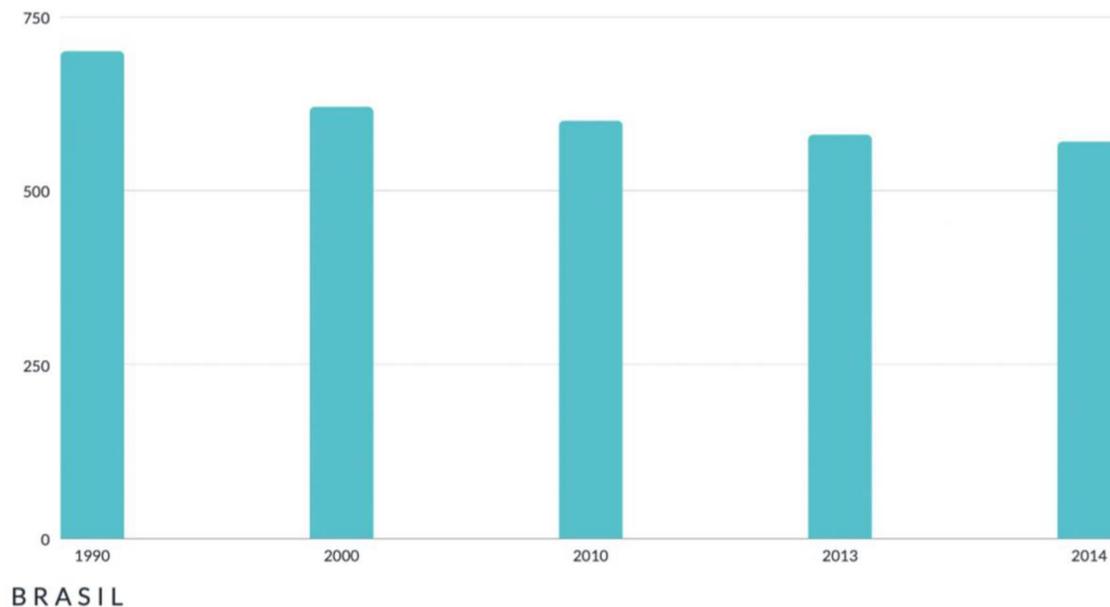
A intensa extração de areia também pode resultar em danos à flora e fauna aquáticas, além de prejudicar os ecossistemas ribeirinhos. A remoção excessiva de areia dos rios pode levar à erosão das margens e à instabilidade dos leitos fluviais, aumentando o risco de inundações durante eventos de precipitação intensa (BARROS, PINTO E BATISTA, 2018). Portanto, é crucial adotar práticas sustentáveis na extração de areia, buscando alternativas como o uso de areia artificial. Essa abordagem reduz a dependência da extração de

recursos naturais, contribui para a preservação dos ecossistemas fluviais e auxilia na prevenção de problemas relacionados a inundações e cheias.

A utilização de areia artificial como agregado em argamassas e concretos oferece vantagens econômicas e ambientais significativas. A redução da extração de recursos naturais escassos contribui para a preservação desses recursos. Além disso, o uso de areia artificial reduz a necessidade de transporte em longas distâncias, o que resulta em menor emissão de gases de efeito estufa associados a essa atividade. Essa abordagem sustentável não só auxilia na redução dos custos de produção, mas também mitiga os impactos ambientais decorrentes da indústria da construção civil.

No procedimento de fabricação de cimento há a extração e moagem de matérias-primas, especialmente o calcário e a argila. Após sua trituração e mistura com outros materiais (minério de ferro ou cinzas) são aquecidas em fornos cilíndricos a uma temperatura de 1.450 °C aproximadamente, onde acontece o processo de calcinação, a qual tem como produtos o óxido de cálcio e CO₂. Como resultado sai desse processamento o clínquer, principal componente do cimento, cuja produção emite a maior quantidade de dióxido de carbono nessa indústria. Ao final de sua produção o cimento ainda é transportado até o seu destino, sendo, portanto, uma etapa emissora de dióxido de carbono adicional ao processo. Juntamente à combustão térmica, 90% das emissões do setor podem ser imputadas à produção de clínquer (BBC, 2018).

A fim de estabelecer uma base para quantificação, o Gráfico 1 apresenta os valores de emissão específica (kg CO₂/t cimento) para o Brasil em diferentes anos. Observa-se que, embora haja uma diminuição nas emissões ao longo dos anos, os valores ainda se mantêm em níveis elevados. É importante ressaltar que esses dados representam apenas um país, enquanto existem diversas outras nações ao redor do mundo que também contribuem para a emissão de dióxido de carbono na atmosfera.

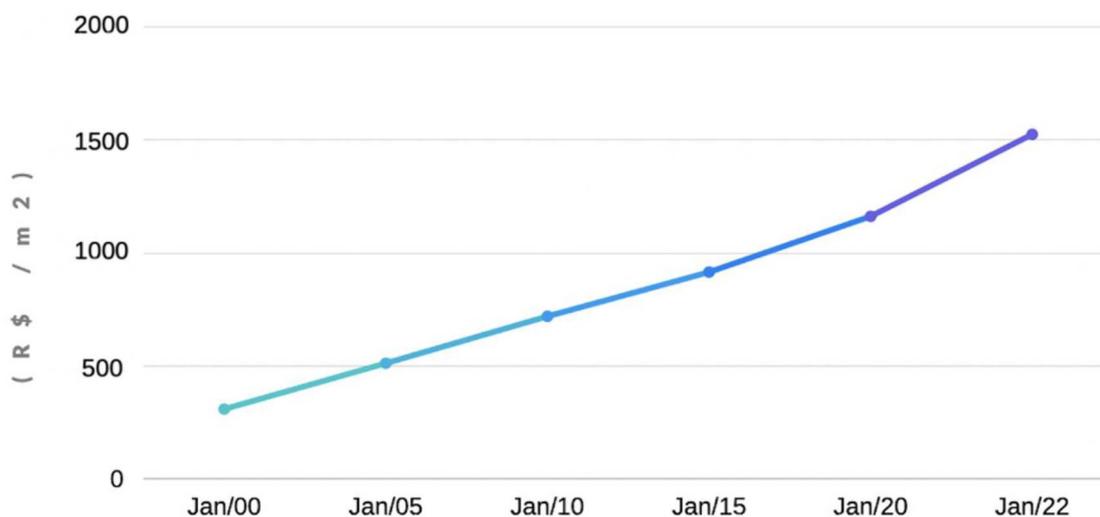
GRÁFICO 1 - EMISSÃO ESPECÍFICA DE CO₂ NO BRASIL EM DIFERENTES ANOS

FONTE: SNIC (2022), adaptado pela autora (2022).

Estudos têm demonstrado que a substituição parcial do cimento por fíler de calcário pode resultar em reduções significativas nas emissões de CO₂. Por exemplo, um estudo realizado por Silva *et al.* (2019) analisou o impacto ambiental da utilização de fíler de calcário em argamassas e concluiu que essa substituição pode levar a uma redução de até 15% nas emissões de CO₂ em comparação com argamassas convencionais.

De acordo com o Índice Nacional da Construção Civil, realizado pelo Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), os custos da construção apresentaram um aumento de 18,65% em 2021, a maior taxa em nove anos. Em dezembro desse mesmo ano o custo nacional da construção por metro quadrado chegou a alcançar R\$ 1.514,52, desses R\$ 604,46 foram relativos à mão de obra e R\$ 910,06 aos materiais (AGÊNCIA IBGE NOTÍCIAS, 2022). Isso reflete o cenário de desafios enfrentados pelo setor, que impactam diretamente nos custos dos materiais e mão de obra envolvidos na construção. No Gráfico 2 estão representados os custos nacionais da construção por metro quadrado em diferentes anos no Brasil.

GRÁFICO 2 – CUSTO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO POR METRO QUADRADO EM DIFERENTES ANOS NO BRASIL



FONTE: IBGE (2022), adaptado pela autora (2022).

A Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC, 2019), divulgada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), revelou que o setor da construção totalizou R\$ 288 bilhões naquele ano, contribuindo para um crescimento de 1,4% no Produto Interno Bruto (PIB) do país. Após períodos de retração em 2017 e 2018, a construção civil voltou a crescer em 2019, alcançando um aumento de 1,5% (AGÊNCIA BRASIL, 2021).

Esse crescimento também se reflete na geração de empregos, com um aumento de 1,7% no número de empresas e 1,9 milhão de pessoas ocupadas no setor em 2019. No entanto, é importante ressaltar que, apesar desses avanços, houve uma redução no número de pessoas ocupadas e no montante de salários, remunerações e retiradas quando comparados aos dados de 2014, de acordo com o IBGE. Em uma comparação decenal, de 2010 para 2019, o porte das empresas decaiu a menos da metade, saindo de uma média de 32 pessoas ocupadas por empresa para 15 e quanto ao salário médio mensal, esse decresceu de 2,6 salários-mínimos para 2,3 no mesmo período (AGÊNCIA BRASIL, 2021). Esses dados evidenciam os desafios enfrentados no setor da construção e a necessidade de buscar alternativas que possam contribuir para a sustentabilidade e eficiência econômica.

A construção civil desempenha um papel fundamental na economia nacional, como destacado pela Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2022), que reportou um crescimento de 9,7% no PIB da construção em

2021, impulsionando também o PIB do Brasil, que teve um aumento de 4,6%. Além disso, conforme dados do Novo CAGED (Cadastro Geral de Empregados e Desempregados), o setor da construção criou 244.755 novas vagas de emprego com carteira assinada em 2021, o melhor resultado desde 2010 (CBIC, 2022). Esses dados ressaltam a importância da construção civil como um motor econômico e gerador de empregos no país.

A produção e utilização de areia artificial demandam mão de obra qualificada em diferentes etapas do processo, desde a fabricação do material até a sua aplicação na construção. Isso contribui para a criação de empregos locais, fortalecendo a economia regional e melhorando as condições socioeconômicas das comunidades envolvidas. Além disso, a substituição da areia natural pela areia artificial reduz a necessidade de extração de recursos naturais, que muitas vezes estão escassos e são de difícil acesso. Isso resulta em uma menor dependência de fontes externas, reduzindo os custos associados ao transporte desses materiais (FERREIRA; FONSECA JUNIOR, 2012). Como resultado, as empresas do setor da construção civil podem obter vantagens financeiras, aumentando sua sustentabilidade e competitividade no mercado.

Nesse contexto, levando em consideração o alto custo envolvido na obtenção de materiais e na construção em âmbito nacional, torna-se necessário buscar alternativas sustentáveis e econômicas. A substituição parcial do cimento por finos e a utilização de areia artificial em substituição à areia natural surgem como opções viáveis para contribuir para a redução desses problemas. Dessa forma, justifica-se o presente trabalho, que visa explorar essas alternativas e suas implicações ambientais e socioeconômicas na indústria da construção civil.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura deste trabalho é composta por cinco capítulos, abordando diferentes aspectos da pesquisa. O primeiro capítulo é uma introdução ao tema, fornecendo uma visão geral do estudo, além de serem apresentadas a problematização, o objetivo a ser alcançado e as justificativas que fundamentam a pesquisa.

O segundo capítulo é dedicado a uma revisão bibliográfica sobre assuntos relevantes para a pesquisa. Para isso, foram abordados estudos anteriores, teorias e conceitos relevantes para embasar o trabalho.

No terceiro capítulo, são descritos o programa experimental proposto e os ensaios a serem realizados. São apresentadas informações sobre a metodologia a ser adotada, os materiais a serem utilizados, a definição das amostras e os procedimentos de testes experimentais.

O quarto capítulo é reservado para a apresentação e discussão dos resultados obtidos. No quinto capítulo está a conclusão do trabalho juntamente com as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO E SEUS AGLOMERANTES

A argamassa mista é aquela preparada com mais de um aglomerante, sendo mais comum a combinação de cimento e cal como aglomerantes. As argamassas mistas de cal e cimento *Portland* passaram a ser amplamente utilizadas devido à cura mais rápida em comparação às argamassas simples de cal, justificando os princípios de produtividade em canteiro (QUARCIONI *et al.*, 2011). As propriedades consideradas essenciais para um bom desempenho das argamassas de revestimento são trabalhabilidade, especialmente a consistência, plasticidade, adesão inicial, retração, aderência, permeabilidade à água, resistência mecânica, principalmente a superficial, e capacidade de absorver deformações (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

A cal é um produto de origem mineral utilizado em diversas aplicações industriais, serviços públicos, construção civil, entre outras. Tradicionalmente, a cal tem sido empregada como um dos componentes das argamassas, no entanto, devido à crescente difusão do uso de aditivos, a cal tem sido abandonada em muitos casos (SILVA, 2006). A norma NBR 13529 (ABNT, 2013, p. 7) define a cal hidratada como "pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio".

A cal desempenha um papel fundamental na fabricação de argamassas, pois atua como um aglomerante, formando uma pasta que promove a união entre os grãos do agregado (PAVÍA & CARO, 2008; PAVÍA & BOLTON, 2021). Além disso, a cal confere às argamassas a propriedade de plasticidade, facilitando o espalhamento homogêneo da mistura no estado fresco, evitando a segregação da água e do material sólido, e contribuindo para evitar fissuração ao permitir maiores deformações no estado endurecido (ADLEY, 2020).

O cimento, por sua vez, desempenha também um papel fundamental na argamassa de revestimento, sendo responsável por proporcionar coesão, resistência mecânica e aderência. Ele atua como aglomerante inorgânico, promovendo a ligação entre os agregados e conferindo estabilidade estrutural à

argamassa. O tipo de cimento utilizado pode influenciar diretamente as propriedades e desempenho da argamassa, sendo comum a utilização de cimentos *Portland*, que apresentam boa resistência e durabilidade. Além disso, o teor de cimento na mistura pode afetar a trabalhabilidade, a resistência e a permeabilidade da argamassa, sendo importante realizar dosagens adequadas para obter um resultado satisfatório (SATO, 2009).

A adição excessiva de cimento na argamassa pode acarretar problemas como fissuração e retração excessiva. Um alto teor de cimento resulta em um aumento na quantidade de água necessária para a hidratação, o que pode levar a um maior encolhimento durante a secagem. Além disso, a elevada quantidade de cimento pode resultar em uma maior geração de calor de hidratação, o que também contribui para o desenvolvimento de tensões internas e possíveis fissuras na argamassa (NEVILLE, 2011).

Por outro lado, a redução do teor de cimento pode comprometer a resistência e a durabilidade do revestimento. O cimento é o principal aglomerante na argamassa e é responsável por fornecer coesão e resistência mecânica ao material. Uma diminuição significativa no teor de cimento pode resultar em uma menor capacidade de ligação entre os agregados, reduzindo a resistência à compressão e à tração da argamassa. Além disso, uma quantidade insuficiente de cimento pode afetar a durabilidade da argamassa, tornando-a mais suscetível à deterioração por ação de agentes agressivos (MEHTA, MONTEIRO, 2014).

Portanto, é fundamental encontrar um equilíbrio na dosagem de cimento na argamassa, considerando as características dos materiais utilizados, as propriedades desejadas no desempenho e as normas técnicas aplicáveis. A escolha do tipo e teor adequados de cimento na argamassa de revestimento é essencial para garantir um desempenho satisfatório do material, atendendo aos requisitos de resistência, durabilidade e estética (SCRIVENER *et al.*, 2018; MEHTA, MONTEIRO, 2014).

A influência dos aglomerantes na durabilidade das argamassas de revestimento é um aspecto crítico que merece destaque. Estudos recentes mostram que a combinação de cimento *Portland* com cal hidratada não apenas melhora a trabalhabilidade, mas também resulta em argamassas com maior resistência a agentes agressivos, como a umidade e a ação química de poluentes (SILVA *et al.*, 2022). Essa resistência é particularmente importante em

aplicações externas, onde as argamassas estão expostas a condições climáticas adversas, enfatizando a necessidade de uma escolha adequada de aglomerantes para garantir a longevidade das estruturas (MANSOUR *et al.*, 2020).

Além disso, a evolução das formulações de argamassa tem promovido o uso de aditivos que potencializam as propriedades dos aglomerantes tradicionais. A incorporação de aditivos como plastificantes e superplastificantes pode otimizar a fluidez e a resistência, permitindo o uso eficiente de menores teores de cimento sem comprometer a integridade estrutural (SCRIVENER *et al.*, 2018). Essa tendência aponta para uma abordagem mais sustentável na construção civil, reduzindo a pegada de carbono associada à produção de cimento e promovendo a utilização de materiais reciclados e alternativos, como o filer de calcário (FARIA *et al.*, 2019).

2.1.1 Requisitos de norma

A norma NBR 13281-1 (ABNT, 2023, p. 2) define argamassa inorgânica como “mistura homogênea de um ou mais ligantes inorgânicos, agregados miúdos [...] e água, que pode conter fibras, adições e/ou aditivos, com características específicas de desempenho adequadas à utilização”. Essa definição de argamassa inorgânica possibilita a estipulação de critérios mínimos de qualidade, garantindo maior durabilidade das edificações.

Os requisitos e critérios de caracterização e de desempenho estabelecidos pela norma são considerados como classificatórios ou informativos. Os requisitos classificatórios, classificam as argamassas em ARV-I, ARV-II, ARV-III ou AET, de acordo com sua utilização a argamassa deve atender aos critérios de cada requisito classificatório. A norma define cada uma dessas argamassas como:

ARV-I: argamassa inorgânica indicada para o revestimento interno de qualquer edificação e externo de edificações com altura total de até 10 m do nível médio da rua da fachada principal; ARV-II: argamassa inorgânica indicada para o revestimento interno de qualquer edificação e externo de edificações com altura total de até 60 m do nível médio da rua da fachada principal; ARV-III: argamassa inorgânica indicada para o revestimento interno de qualquer edificação e externo de edificações com altura superior a 60 m do nível médio da rua da

fachada principal; AET: argamassa inorgânica destinada à utilização como primeira camada do revestimento de edificações, fazendo parte de um revestimento ATD multicamadas (substrato para a última camada – camada aparente) estabelecido na ABNT NBR 16648. (ABNT NBR 13281-1, 2023, p. 2-3)

Os requisitos informativos devem apenas ser informados pelo fabricante ou responsável legal e/ou técnico pela obra, a fim de registrar em qual classe a argamassa se enquadra, considerando as faixas determinadas para cada um dos requisitos e tempo de uso. A Tabela 1 indica os requisitos de caráter classificatórios e informativos.

TABELA 1 - REQUISITOS CLASSIFICATÓRIOS E INFORMATIVOS

Argamassa para revestimento de paredes e tetos ARV-I, ARV-II, ARV-III e AET			
Requisitos classificatórios		Requisitos informativos	
		Estado fresco	Retenção de água
			Densidade de massa no estado fresco
			Teor de ar incorporado
			Tempo de uso
Estado endurecido	Resistência potencial de aderência à tração ao substrato	Estado endurecido	Densidade de massa no estado endurecido
	Resistência potencial à tração superficial		Resistência à tração na flexão
	Módulo de elasticidade dinâmico		Coefficiente de absorção de água por capilaridade
	Variação dimensional (retração ou expansão linear)		Fator de resistência à difusão de vapor de água

FONTE: NBR 13281-1 (ABNT, 2023), adaptado pela autora (2023).

Como é possível observar, somente há requisitos classificatórios para o estado endurecido da argamassa e os requisitos informativos servem para ambos os estados, fresco e endurecido. Para o estado fresco, os critérios para classificação devem atender aos valores de retenção de água e densidade de massa no estado fresco, ambos apresentados na Tabela 2. Vale indicar que a norma cita que o tempo de uso da argamassa para revestimento é definido como o intervalo de tempo máximo decorrido entre sua mistura e sua aplicação, no qual a argamassa mantém suas propriedades no estado fresco inalteradas, garantindo seu desempenho no estado endurecido.

TABELA 2 – REQUISITOS INFORMATIVOS NO ESTADO FRESCO

Retenção de água		Densidade de massa no estado fresco	
Classe	Retenção de água (U) %	Classe	Densidade de massa no estado fresco (DF) kg/m ³
U0	$U < 70$	DF0	$DF < 1\,400$
U1	$70 \leq U < 80$	DF1	$1\,400 \leq DF < 1\,600$
U2	$80 \leq U \leq 90$	DF2	$1\,600 \leq DF < 1\,800$
U3	$U > 90$	DF3	$1\,800 \leq DF < 2\,000$
		DF4	$DF \geq 2\,000$

FONTE: NBR 13281-1 (ABNT, 2023), adaptado pela autora (2023).

Os valores para os requisitos classificatórios no estado endurecido de módulo de elasticidade dinâmico e variação dimensional estão indicados na Tabela 3. Vale destacar que a norma cita que valores de módulo de elasticidade dinâmico maiores que 14 000 MPa estão fora de norma e por isso não são aceitos para argamassas inorgânicas para revestimento. Há também os critérios para os requisitos de módulo de elasticidade dinâmico e de variação dimensional, os quais estão apresentados na Tabela 4.

TABELA 3 - REQUISITOS CLASSIFICATÓRIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Módulo de elasticidade dinâmico		Variação dimensional (retração ou expansão linear)	
Classe	Módulo de elasticidade dinâmico (Ed) MPa	Classe	Variação dimensional (ε_i) mm/m
E1	$12\,000 < E_d \leq 14\,000$	VD1	$-1,10 > \varepsilon_i \geq -1,20$ (retração entre 1,11 e 1,20)
E2	$9\,500 < E_d \leq 12\,000$	VD2	$-0,90 > \varepsilon_i \geq -1,10$ (retração entre 0,91 e 1,10)
E3	$7\,000 < E_d \leq 9\,500$	VD3	$-0,70 > \varepsilon_i \geq -0,90$ (retração entre 0,71 e 0,90)
E4	$E_d \leq 7\,000$	VD4	$0,0 \geq \varepsilon_i \geq -0,70$ (retração entre 0 e 0,70)
		VD5	$\varepsilon_i > 0,00$ (expansão)

FONTE: NBR 13281-1 (ABNT, 2023), adaptado pela autora (2023).

TABELA 4 - CRITÉRIOS PARA OS REQUISITOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL

Requisito	Classe	Critério por tipo de argamassa			
		ARV-I	ARV-II	ARV-III	AET
Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)	E	E1 a E4	E2 a E4	E3 a E4	E4
Variação dimensional mm/m	VD	VD1 a VD4	VD2 a VD4	VD3 a VD4	VD4

FONTE: NBR 13281-1 (ABNT, 2023), adaptado pela autora (2023).

Os requisitos informativos para o estado endurecido devem atender aos valores de densidade de massa no estado endurecido, resistência à tração na flexão e coeficiente de absorção de água por capilaridade, todos estão representados na Tabela 5. Vale ressaltar que a norma cita que o coeficiente de absorção de água é determinado para um tempo específico de ensaio, em horas.

TABELA 5 - REQUISITOS INFORMATIVOS PARA O ESTADO ENDURECIDO

Densidade de massa no estado endurecido		Resistência à tração na flexão		Coeficiente de absorção de água por capilaridade	
Classe	(DE) kg/m ³	Classe	(R _f) MPa	Classe	((W _h) ^a) kg/(m ² . h ^{0,5})
DE0	DE < 1 200	R1	R _f < 0,5	W1	W _h ≥ 8,5
DE1	1 200 ≤ DE < 1 400	R2	0,5 ≤ R _f < 1,5	W2	7,0 ≤ W _h < 8,5
DE2	1 400 ≤ DE < 1 600	R3	1,5 ≤ R _f < 3,0	W3	5,5 ≤ W _h < 7,0
DE3	1 600 ≤ DE < 1 800	R4	R _f > 3,0	W4	4,0 ≤ W _h < 5,5
DE4	DE ≥ 1 800			W5	2,5 ≤ W _h < 4,0
				W6	1,0 ≤ W _h < 2,5
				W7	W _h < 1,0

FONTE: NBR 13281-1 (ABNT, 2023), adaptado pela autora (2023).

Essas mudanças na norma NBR 13281 (ABNT, 2023) contribuem para um maior controle de qualidade das argamassas, assegurando que elas atendam a requisitos mínimos de desempenho e garantam a durabilidade dos sistemas de revestimento utilizados na construção civil.

2.1.2 Materiais finos em argamassas de revestimento

Os finos são materiais granulares passantes na peneira com abertura de malha de 150 µm (ABNT NBR 9935, 2024). Os agregados devem ter uma quantidade adequada de tais materiais para que desenvolvam uma argamassa com coesão e trabalhável, contudo, se presente em quantidades excessivas, os finos podem gerar danos na dosagem das argamassas, causando consequências no seu desempenho, tais como decréscimo na trabalhabilidade, problemas de fissuração e diminuição da aderência (MIRANDA; SELMO, 2006).

Um dos principais benefícios da utilização de materiais finos é a melhoria da trabalhabilidade das argamassas. De modo geral, são adotadas duas teorias relacionadas à influência dos finos na trabalhabilidade e a adição de fíleres pode influenciar a trabalhabilidade das argamassas de maneiras distintas, dependendo da interação entre a teoria das camadas de água e a teoria do empacotamento. A teoria das camadas de água afirma que partículas mais finas

possuem maior superfície específica, o que aumenta a demanda de água para molhá-las e reduz a trabalhabilidade, especialmente em misturas sem aditivos superplastificantes (LI; KWAN, 2013). Além disso, a tendência de aglomeração dessas partículas finas pode dificultar o fluxo, aumentar a viscosidade e gerar vazios internos nos aglomerados (DAMINELI, 2013). Por outro lado, a teoria do empacotamento sugere que partículas finas podem preencher os vazios entre partículas maiores, liberando água e melhorando a coesão e a fluidez da mistura (FENNIS, 2011). A aplicação dessas teorias depende do momento analisado na mistura: inicialmente, o preenchimento dos vazios reduz a demanda de água; porém, em concentrações excessivas de finos, o aumento da área superficial pode gerar maior demanda de água e comprometer a trabalhabilidade. Além disso, os fíleres contribuem para a redução do consumo de cimento, o que pode resultar em uma argamassa mais econômica e com menor impacto ambiental (CORDEIRO *et al.*, 2015).

Diversos materiais finos têm sido investigados em estudos científicos para sua aplicação em argamassas de revestimento. Entre os mais comumente utilizados estão o fíler calcário, a sílica ativa, o metacaulim e as pozolanas naturais e artificiais. Esses materiais, com exceção do fíler calcário que é predominantemente inerte, apresentam propriedades pozolânicas, ou seja, reagem com os compostos presentes no cimento durante o processo de hidratação, promovendo a formação de produtos adicionais que contribuem para o desenvolvimento das propriedades mecânicas e durabilidade das argamassas (PANDEY *et al.*, 2016).

Além disso, a adição de materiais finos também pode afetar a porosidade e permeabilidade das argamassas, influenciando sua resistência à penetração de água e gases. Essa propriedade é particularmente importante em argamassas de revestimento, pois está relacionada à durabilidade e proteção da estrutura contra ação de agentes externos, como a umidade e os sais (BISWAJIT *et al.*, 2018).

Diversas manifestações patológicas observadas em argamassas de revestimento estão relacionadas à distribuição granulométrica e ao teor de finos presentes na mistura. Sabbatini (1986) destaca a importância de buscar uma granulometria contínua e uma quantidade adequada de finos, uma vez que o excesso desses materiais resulta em maior consumo de água de amassamento,

o que, por sua vez, leva ao aumento da retração por secagem do revestimento. Silva e Campiteli (2006) afirmam que a substituição do cimento e/ou cal por finos presentes na areia, em proporções adequadas, pode reduzir os custos de produção de argamassas sem comprometer seu desempenho.

A granulometria da areia, em particular, tem um impacto significativo nas características finais da argamassa. Um estudo de Rojas *et al.* (2021) mostrou que a utilização de areias com uma distribuição granulométrica contínua resulta em argamassas com melhor trabalhabilidade e resistência à compressão, além de reduzir a permeabilidade. A pesquisa destaca que a presença de finos na areia, em proporções controladas, pode preencher os vazios entre as partículas maiores, melhorando a densidade do empacotamento e a coesão da mistura.

Além disso, a utilização de técnicas de empacotamento de partículas, como o modelo de De Larrard, tem se mostrado eficaz na otimização das formulações de argamassas. Segundo um estudo de Camões *et al.* (2022), a aplicação desse modelo permite prever a densidade de empacotamento e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas das argamassas, com ênfase na importância de se considerar a relação água/materiais secos. A pesquisa sugere que o ajuste da granulometria dos agregados e a adição de materiais finos podem influenciar positivamente a resistência e a durabilidade das argamassas, alinhando-se às demandas sustentáveis da construção civil.

De acordo com a revisão da literatura, a adição de finos na produção de argamassas tem demonstrado influência no índice de vazios, módulo de elasticidade e área específica da superfície, além de resultar em melhorias na trabalhabilidade, aumento da resistência mecânica, resistência ao desgaste por abrasão e dureza superficial, e redução da permeabilidade e resistência de aderência à tração. No entanto, também são relatados casos de aumento na ocorrência de fissuras, dependendo da porcentagem e tipo de finos utilizados (ANGELIM *et. al.*, 2003; SILVA *et. al.*, 2011).

Portanto, a utilização de materiais finos em argamassas de revestimento oferece vantagens significativas, como a melhoria da trabalhabilidade, a redução do consumo de cimento e o aumento da durabilidade. É importante ressaltar que a escolha do material fino adequado deve levar em consideração as propriedades desejadas para a argamassa, bem como as características específicas do ambiente em que ela será aplicada.

2.1.3 Fíler calcário

O material carbonático é conhecido no dialeto da indústria como fíler calcário e esse material é produzido a partir da trituração da rocha calcária, podendo ser calcítica ou dolomítica. A obtenção do fíler calcário no processo industrial envolve várias etapas que visam transformar o calcário bruto em partículas finas e uniformes, adequadas para serem utilizadas como adição em materiais de construção (ISAIA; RIZZATTI, 2020).

Inicialmente, ocorre a extração do calcário bruto de jazidas por meio de técnicas de mineração, levando em consideração aspectos como a qualidade e a composição química do material (GONÇALVES *et al.*, 2000). Em seguida, o calcário passa por um processo de britagem, no qual é reduzido em tamanho para fragmentos menores, facilitando a etapa seguinte de moagem (NUNES, 2013).

A moagem é uma etapa essencial no processo de obtenção do fíler calcário, sendo realizada em moinhos específicos, como moinhos de bolas ou moinhos de rolos, visando refinar o calcário e reduzir seu tamanho (NUNES, 2013). Posteriormente, o fíler calcário passa por um processo de classificação, no qual é separado em frações com tamanhos específicos, permitindo obter diferentes granulometrias de fíler calcário, de acordo com as necessidades das aplicações desejadas (GONÇALVES *et al.*, 2000).

Em resumo, o processo industrial de obtenção do fíler calcário envolve etapas como extração, britagem, moagem e classificação, visando transformar o calcário bruto em partículas finas e controladas, que podem ser utilizadas como adição em materiais de construção. A qualidade e eficiência desse processo são fundamentais para garantir a obtenção de fíler calcário de alta qualidade e desempenho, contribuindo para o desenvolvimento de materiais sustentáveis na construção civil.

Segundo Silva *et al.* (2016), o processo de obtenção do fíler calcário geralmente envolve as etapas de britagem e moagem do calcário bruto. A britagem é responsável por reduzir o tamanho das rochas de calcário, enquanto a moagem tem o objetivo de refinar o material, obtendo-se partículas de menor tamanho e distribuição granulométrica adequada para a aplicação desejada. Estudos como o de Lima (2019) têm investigado diferentes técnicas de moagem,

como a moagem de alta energia, visando melhorar a finura e a distribuição granulométrica do fíler calcário.

Além disso, é importante considerar a influência da composição química do calcário na obtenção do fíler calcário de qualidade. Segundo Pereira (2018), a presença de impurezas no calcário, como argila e matéria orgânica, pode afetar as propriedades do fíler, comprometendo seu desempenho nas argamassas e concretos. Portanto, é necessário um controle rigoroso do processo de obtenção, incluindo a seleção adequada do calcário bruto e a aplicação de técnicas de beneficiamento que permitam a remoção eficiente de impurezas.

O fíler calcário trata-se de um pó extremamente fino, amplamente utilizado como material de enchimento em concretos e argamassas, promovendo maior compacidade por meio de uma melhor distribuição granulométrica das partículas (MARANGON, 2006). O fíler é considerado uma adição mineral e a norma NBR 13529 (ABNT, 2013, p. 8) define adições como “materiais inorgânicos naturais ou industriais adicionados às argamassas para modificar as suas propriedades (pó calcário, saibro, materiais pozolânicos, entre outros)”.

Existem diversas adições que podem ser feitas nos cimentos, no entanto, as normatizadas no Brasil são adições de fíler, escória, e materiais pozolânicos. As adições têm como principais características melhorar o desempenho dos cimentos utilizados em argamassas e concretos, contribuir na redução do clínquer produzido e, conseqüentemente, nas emissões de gases efeito estufa. Essa contribuição se estende ainda ao setor econômico por ser feita através de reutilização de resíduos de diversos setores da indústria (ABCP, 2002).

A partir de 2018, todos os tipos de cimento foram reunidos em uma única norma de especificação, a NBR 16697 (ABNT, 2018). A principal característica das mudanças realizadas foi referente ao aumento da utilização de fíler nos cimentos compostos (ABNT NBR 16697, 2018). É relevante salientar que em alguns países as adições de fíler no cimento chegam a passar de 30%. No Brasil, antes da reformulação da NBR 16697, a adição máxima desse material no cimento era de 10%, mas atualmente chega a 24% (ALISSON, 2013).

O cimento composto CP II-F já é produzido há algum tempo e este é um cimento onde há a adição de fíler em sua produção. A adição de fíler calcário aos cimentos *Portland* é justificada pela redução do consumo energético e dos

custos envolvidos. Enquanto o fíler calcário pode ser facilmente moído com baixo gasto energético, o clínquer demanda uma grande quantidade de energia em sua produção, o que resulta em altos custos.

O fíler calcário é um material utilizado na engenharia civil devido às suas propriedades físicas e químicas favoráveis. No âmbito físico, o fíler calcário apresenta uma distribuição granulométrica adequada, com partículas finas que contribuem para o preenchimento dos vazios entre os agregados, resultando em uma mistura mais densa e compacta. Isso promove um melhor empacotamento das partículas, favorecendo a eficiência dos ligantes e contribuindo para a diminuição do teor de água na mistura (TRAVAIN, 2019).

Além disso, o fíler calcário possui propriedades químicas que podem ser benéficas para as argamassas e concretos. Por exemplo, sua natureza alcalina contribui para a redução da reação álcali-agregado, um fenômeno que pode causar danos ao material ao longo do tempo. O fíler calcário é amplamente considerado um material inerte no sistema cimentício, desempenhando principalmente o papel de preenchimento de vazios e melhoria do empacotamento de partículas. No entanto, dependendo da sua composição mineralógica, pode apresentar alguma reatividade química limitada, como a interação com o hidróxido de cálcio (CH) liberado durante a hidratação do cimento Portland. Essa interação pode levar à formação de compostos como carboaluminatos, que podem contribuir para melhorias pontuais na compacidade e durabilidade do material (SILVA et al., 2021).

A adição de fíler calcário nas misturas de argamassas e concretos pode resultar em benefícios, tais como a redução do consumo de cimento, o que contribui para a sustentabilidade ambiental e a diminuição dos custos de produção. Além disso, o fíler calcário pode melhorar a trabalhabilidade, a resistência mecânica, a durabilidade e a impermeabilidade dos materiais (TRAVAIN, 2019; SILVA et al., 2021). Portanto, o fíler calcário apresenta propriedades físicas e químicas que o tornam um componente promissor para aprimorar as características e o desempenho das argamassas e concretos utilizados na engenharia civil.

2.1.3.1 Pesquisas sobre substituição de cimento por fíler em materiais cimentícios

No contexto da substituição de cimento por finos em materiais cimentícios, diversas pesquisas têm sido realizadas para avaliar os efeitos dessa substituição nas propriedades e desempenho dos materiais. Neste sentido, destacam-se alguns estudos relevantes que abordam essa temática de forma específica.

No estudo de García (2017) intitulado "Avaliação do impacto do uso de fíler calcário como substituição ao cimento no comportamento reológico e retração de microconcretos", investigou-se o efeito da substituição parcial do cimento por fíler calcário no comportamento reológico e na retração por secagem de microconcretos. Os resultados indicaram que a substituição de cimento por fíler calcário influenciou significativamente o comportamento reológico dos microconcretos, afetando parâmetros como tensão de escoamento, viscosidade e abatimento. Além disso, observou-se que a substituição de cimento por fíler calcário reduziu a intensidade da retração por secagem, devido às alterações na estrutura porosa dos materiais. No entanto, foi constatado que os modelos de previsão da retração por secagem superestimaram os valores obtidos experimentalmente, indicando a necessidade de calibrá-los considerando a adição de fíler e outras características específicas dos materiais.

No estudo de Pessutto (2020), intitulado "Captura de CO₂ em Produtos Cimentícios – O efeito do teor de fíler", foi investigado o efeito do teor de fíler calcário na captura de dióxido de carbono (CO₂) por argamassas de cimento. O estudo teve como objetivo quantificar a quantidade de CO₂ capturada ao longo do tempo e estimar o potencial de captura de CO₂ dos materiais cimentícios, considerando o efeito do fíler. Os resultados demonstraram que o teor de fíler e a porosidade influenciaram a profundidade de carbonatação, a captura de CO₂ e a cinética de carbonatação das argamassas. Verificou-se que a adição de fíler calcário acelerou a carbonatação das argamassas, resultando em maior captura de CO₂. Além disso, foi observado que a porosidade também contribuiu para o aumento da captura de CO₂. Os métodos de medição da profundidade de carbonatação e da fração de CaO carbonatado apresentaram uma correlação linear, indicando que é possível estimar a captura de CO₂ por meio desses

métodos. No entanto, foi observada uma dispersão significativa entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos de medição. Por fim, foi constatado que a carbonatação influenciou positivamente a resistência à compressão das argamassas devido à redução da porosidade. No entanto, esse efeito diminuiu com o aumento do teor de fíler nas argamassas, devido à redução da disponibilidade de ligantes para reagir com o CO_2 .

No estudo de Scolaro (2020), intitulado "Influência de diferentes fíleres nas propriedades mecânicas e na retração de argamassas autonivelantes", investigou o impacto de diferentes adições minerais finas e tipos de areia nas propriedades mecânicas e na retração por secagem de argamassas autonivelantes. Os resultados indicaram que a incorporação de fino de calcário em até 20% proporcionou maior resistência à compressão, especialmente quando empregado em 20%. Além disso, o uso de fino de calcário e fino quartzoso em 20% resultou em menor retração por secagem em comparação ao fino de britagem basáltico. No entanto, as argamassas com fino de britagem basáltico exigiram maior quantidade de aditivo superplastificante e apresentaram maiores valores de retração por secagem. Em relação aos agregados, as argamassas com areias média e fina mostraram melhor desempenho mecânico e menor retração por secagem em comparação com a areia muito fina. Concluiu-se que os finos de calcário, quartzo e basalto têm potencial para serem utilizados no desenvolvimento de argamassas autonivelantes, sendo recomendado o uso de fino de britagem basáltico em teores de até 10%. As argamassas formuladas com areias média e fina apresentaram melhores propriedades mecânicas e menor retração por secagem, embora tenham exigido maior quantidade de aditivo superplastificante em comparação com as demais.

No estudo de Travain (2019), foi avaliado o potencial da substituição parcial de cimento por fíleres de quartzo em pastas cimentícias e argamassas. Os materiais foram caracterizados e submetidos a ensaios de reologia, resistência à compressão e módulo de elasticidade. Os resultados mostraram que, mesmo com menor consumo de cimento e redução na quantidade de água na mistura, as propriedades mecânicas e o comportamento reológico foram semelhantes aos materiais convencionais. Isso indica que a adição de fíleres de quartzo pode melhorar a eficiência das pastas e argamassas, demonstrando sua aplicabilidade na construção civil (TRAVAIN, 2019).

Há também o estudo de Campos (2019), o qual teve como objetivo principal desenvolver um método de dosagem de concreto sustentável e de alta resistência, otimizado por modelos de empacotamento de partículas, com substituição parcial do cimento Portland por pó de pedra e sílica ativa. O enfoque está na redução das emissões de CO₂ na indústria da construção civil, visto que o cimento Portland é responsável por grande impacto ambiental nesse setor. Para alcançar esse objetivo, o estudo foi dividido em etapas. Inicialmente, foram analisados os materiais finos e os agregados para determinar a composição ideal da pasta em termos de cálculos estequiométricos, empacotamento de partículas e propriedades no estado endurecido. O ponto de saturação do superplastificante (SP) também foi estudado nessa fase.

Na segunda etapa, foi buscado o empacotamento ótimo dos agregados, visando reduzir o índice de vazios. Através de modelos analíticos de empacotamento de partículas, como o CPM (*Compressible Packing Model*), foi definida a proporção ideal de cada agregado. Com base nos resultados das etapas anteriores, o método de dosagem foi proposto, utilizando como parâmetros fixos a composição ideal dos materiais finos, a proporção de agregados definida pelo CPM e o ponto de saturação do SP. Os parâmetros variáveis foram o teor de pasta e a relação água/finos ($a/finos$). Diversos concretos foram produzidos com diferentes teores de pasta e relação $a/finos$ para analisar suas propriedades mecânicas, de durabilidade e de sustentabilidade (CAMPOS, 2019).

Os resultados mostraram que a família mais eficiente de concretos, com 6% de pasta em excesso, apresentou alta resistência à compressão e excelente durabilidade. Além disso, esse método permitiu reduzir significativamente o consumo de cimento e as emissões de CO₂ por MPa de resistência, tornando os concretos produzidos mais sustentáveis em comparação com os métodos convencionais de dosagem para concretos de alta resistência. O estudo demonstrou que a substituição parcial do cimento *Portland* por pó de pedra e sílica ativa, combinada com a otimização do empacotamento de partículas, pode contribuir para a produção de concretos mais sustentáveis, reduzindo o impacto ambiental da construção civil.

Essas pesquisas destacam a importância da substituição de cimento por finos na busca por materiais cimentícios mais sustentáveis e com propriedades

melhoradas. A utilização de finos, como o fíler calcário, pode resultar em benefícios como controle da retração, melhor trabalhabilidade, redução de emissões de CO₂ e melhoria das propriedades mecânicas dos materiais cimentícios. Essas contribuições científicas reforçam a relevância do estudo da substituição de cimento por finos, fornecendo informações importantes para a otimização e desenvolvimento de materiais mais sustentáveis na construção civil. Nas Tabelas 6 e 7, estão apresentadas tabelas resumo de alguns estudos que abordaram a substituição de cimento por finos.

TABELA 6 - TABELA RESUMO DE TIPO DE MATERIAL CIMENTÍCIO, FINOS E SEUS TEORES UTILIZADOS NOS ESTUDOS

Autores	Tipo de material cimentício	Finos utilizados	Teores utilizados
<i>García (2017)</i>	Microconcreto	Fíler calcário	80%, 60% e 20% em relação à massa dos finos totais (cimento + fíler calcário)
<i>Travain (2019)</i>	Pasta cimentícia e argamassa	Fíler de quartzo	40% e 60% em volume de cimento
<i>Campos (2019)</i>	Concreto	Pó de pedra e sílica ativa	64% cimento, 16% sílica ativa e 20% pó de pedra em massa (composição ideal)
<i>Pessutto (2020)</i>	Argamassa	Fíler calcário	30%, 50% e 70% (massa de fíler em relação à massa de cimento)
<i>Scolaro (2020)</i>	Argamassa	Fíler calcário, fíler quartzoso e fino de britagem basáltico	5, 10 e 20% da massa do total de sólidos

FONTE: A autora (2023).

TABELA 7 - PROPRIEDADES AVALIADAS EM CADA ESTUDO

Autores / Ensaios	García (2017)	Travain (2019)	Campos (2019)	Pessutto (2020)	Scolaro (2020)
<i>Densidade de massa no estado fresco</i>	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
<i>Teor de ar incorporado</i>	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
<i>Massa específica</i>	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
<i>Abatimento</i>	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
<i>Espalhamento</i>	NÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM
<i>Habilidade passante</i>	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
<i>Reometria Rotacional</i>	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
<i>Retração por secagem</i>	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
<i>Resistência à compressão</i>	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
<i>Resistência à flexão</i>	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
<i>Módulo de elasticidade</i>	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
<i>Porosimetria</i>	SIM	NÃO	SIM	SIM	NÃO
<i>Velocidade de propagação de onda ultrassônica</i>	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
<i>Resistividade elétrica</i>	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
<i>Absorção de água</i>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
<i>Isotherma de dessorção</i>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM

<i>Densidade de massa aparente</i>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
<i>Carbonatação</i>	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO

FONTE: A autora (2023).

2.1.4 Areia artificial

A areia artificial é um tipo de agregado miúdo amplamente utilizado em argamassas de revestimento na engenharia civil. Seu comportamento na argamassa é influenciado por diversas características, incluindo a granulometria, a forma das partículas e as propriedades físicas e químicas do material. A utilização de areia artificial como agregado miúdo na argamassa de revestimento tem sido objeto de estudos e pesquisas no campo da construção civil. A areia artificial é produzida a partir de processos de britagem, classificação e lavagem de rochas, resultando em partículas com características controladas (SILVA *et. al.*, 2015).

Em relação à granulometria, a areia artificial é produzida com uma distribuição granulométrica controlada, o que permite um melhor ajuste da curva granulométrica da argamassa. Isso pode resultar em uma maior compacidade da mistura, contribuindo para uma distribuição mais homogênea dos materiais constituintes (SILVA *et. al.*, 2018). A forma das partículas de areia artificial também desempenha um papel importante no comportamento da argamassa. Em comparação com a areia natural, a areia artificial pode apresentar uma forma mais angular, o que pode aumentar a aderência entre as partículas e melhorar a resistência mecânica da argamassa (SILVA *et. al.*, 2018; PEREIRA *et al.*, 2020).

Além disso, as propriedades físicas e químicas da areia artificial, como a absorção de água e a presença de impurezas, também podem afetar o desempenho da argamassa. É importante garantir que a areia artificial atenda aos requisitos normativos e seja devidamente analisada quanto à sua qualidade e compatibilidade com os demais componentes da argamassa (SILVA *et. al.*, 2018; PEREIRA *et al.*, 2020).

Uma das principais vantagens da areia artificial é a possibilidade de obter uma distribuição granulométrica mais uniforme em comparação com a areia natural extraída de rios e jazidas. Isso permite melhor controle da dosagem e maior homogeneidade na mistura, contribuindo para a obtenção de argamassas

mais consistentes e com desempenho previsível. Além disso, a utilização da areia artificial pode reduzir a extração de areia natural de fontes naturais, minimizando assim o impacto ambiental associado a essa atividade. A disponibilidade da areia artificial é mais estável e menos dependente de fatores sazonais ou limitações geográficas, o que facilita o seu uso em diferentes regiões (ISHIKAWA, 2009).

Vale ressaltar que o comportamento da areia artificial em argamassas de revestimento pode variar dependendo das características específicas do material e da formulação da argamassa. Portanto, é recomendado realizar estudos e ensaios específicos para avaliar o desempenho da areia artificial em cada aplicação e considerar as normas técnicas vigentes (SILVA *et. al.*, 2018; PEREIRA *et. al.*, 2020).

Estudos como o de Paiva *et al.* (2021) demonstram que argamassas de revestimento com substituição parcial da areia natural por areia artificial podem apresentar características físicas e mecânicas satisfatórias, desde que sejam adequadamente dosadas e misturadas. Os resultados indicam que a incorporação de areia artificial, quando realizada de forma criteriosa, não compromete a qualidade das argamassas, podendo até melhorar certas propriedades, como a resistência mecânica e a durabilidade. No entanto, é importante considerar as características específicas da areia artificial utilizada, como sua forma, textura e granulometria, para garantir a compatibilidade com os demais componentes da argamassa.

Para a produção de uma argamassa de revestimento são utilizados como materiais aglomerantes o cimento *Portland* e/ou cal hidratada e agregados miúdos. No setor da construção civil há o hábito de empregar como agregado miúdo a areia natural, porém, além de as jazidas estarem escassas devido ao grande volume de areia extraída, há também o impasse do custo elevado, o qual, dependendo da região, é resultado da elevada distância de transporte dos grandes centros consumidores. Esse custo constitui em torno de 60% do valor final da areia (ISHIKAWA, 2009). Segundo Gonçalves *et. al.* (2000) a areia artificial é um material considerado como rejeito de pouco valor comercial, além disso, tem difícil emprego no mercado da construção civil em função da falta de conhecimento e poucas pesquisas realizadas na área.

Por esse motivo, Ishikawa (2009) conduziu um estudo em que a areia artificial substituiu a areia de rio na produção de argamassas de revestimento. Diferentes traços de argamassa foram testados, utilizando cimento Portland CP-II E 32, cal hidratada CH-II, areia natural e areia artificial de granito. Foram realizados ensaios para avaliar as propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido, incluindo consistência, resistência à tração e compressão, aderência ao substrato e aspectos visuais. Os resultados mostraram que as argamassas com areia artificial foram trabalháveis, mas um traço em particular apresentou excesso de cal, resultando em fissuras na superfície. As argamassas com areia artificial alcançaram resistências de aderência à tração iguais ou maiores do que as argamassas com areia de rio. As superfícies das argamassas com areia artificial apresentaram uma textura mais rugosa em comparação com as argamassas com areia natural, devido aos grãos mais irregulares e angulosos da areia artificial.

Estudos demonstraram que a substituição da areia natural por areia artificial pode resultar em melhorias significativas nas propriedades físicas da argamassa. Em uma investigação conduzida por Marvila *et al.* (2020), as argamassas feitas com areia artificial apresentaram menor permeabilidade e melhor resistência à compressão em comparação com aquelas feitas de areia natural. Esses resultados sugerem que a areia artificial pode não apenas substituir a areia natural, mas também melhorar o desempenho das argamassas em aplicações estruturais e de revestimento, contribuindo assim para a sustentabilidade na construção civil.

Além disso, a relação entre a granulometria da areia artificial e as propriedades reológicas das argamassas tem sido amplamente discutida na literatura. Bortoluzzi *et al.* (2021) destacam que o controle rigoroso da distribuição granulométrica da areia artificial é crucial para otimizar o empacotamento das partículas e, conseqüentemente, a trabalhabilidade da argamassa. A pesquisa indicou que argamassas com uma distribuição granulométrica bem ajustada resultaram em melhor fluidez e menor necessidade de água para atingir a consistência desejada. Este fenômeno pode ser atribuído ao preenchimento mais eficiente dos vazios entre as partículas, resultando em uma mistura mais coesa e fácil de manusear.

Vale destacar que a utilização de areia artificial em argamassas apresenta desafios específicos relacionados ao conteúdo de finos. Esses materiais possuem uma maior área específica em comparação à areia natural, o que implica em uma maior demanda de água para alcançar a trabalhabilidade necessária. A elevada área superficial dos finos aumenta a quantidade de água necessária para molhá-los adequadamente, reduzindo a espessura do filme de água ao redor das partículas e dificultando a mobilidade da mistura (LI; KWAN, 2013). Esse comportamento pode resultar em maior viscosidade e menor fluidez, impactando negativamente a trabalhabilidade, especialmente em formulações sem a utilização de aditivos plastificantes. Assim, para garantir um desempenho satisfatório, é essencial ajustar a dosagem de água ou incluir aditivos que compensem o impacto causado pelos finos na mistura.

2.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

O empacotamento de partículas refere-se à forma racional de dosar os materiais particulados em uma mistura, buscando preencher os espaços vazios entre as partículas maiores com partículas menores, e assim sucessivamente. O empacotamento envolve a disposição e arranjo das partículas em um determinado espaço, resultando em diferentes graus de compactação e densidade. É um conceito fundamental na otimização da composição de misturas, visando alcançar uma estrutura granular densa e eficiente (OLIVEIRA et al., 2000).

Hipoteticamente, uma maior densidade de empacotamento dos agregados reduz o volume de vazios a serem preenchidos com pasta, permitindo o uso de um volume menor de pasta para integralizar a mistura. Da mesma forma, uma maior densidade de empacotamento dos materiais cimentícios reduz o volume de vazios a serem preenchidos com água, possibilitando a utilização de uma menor relação água/materiais cimentícios para aumentar a resistência e a durabilidade da mistura. Por outro lado, uma maior densidade de empacotamento dos agregados resulta em mais excesso de pasta para envolvê-los, enquanto uma maior densidade de empacotamento dos materiais cimentícios resulta em mais excesso de água para lubrificá-los. Ambos os

excessos, de pasta e de água, contribuem para melhorar a trabalhabilidade da mistura (LI; KWAN, 2013).

Oliveira et al. (2000) destacam alguns fatores que influenciam o empacotamento de um conjunto granular. Em relação ao formato das partículas, quanto menos esféricas forem, menor será a densidade de empacotamento da mistura devido ao atrito entre as superfícies irregulares das partículas. Esse efeito é mais significativo em partículas menores devido à sua maior área superficial específica. A distribuição granulométrica das partículas também desempenha um papel importante, pois afeta a quantidade de vazios entre os grãos. É necessário ter uma variedade de partículas com tamanhos e quantidades adequadas para garantir que os grãos menores preencham de maneira eficiente os espaços existentes entre os grãos maiores. Por fim, a compactação exerce uma grande influência na forma como as partículas se acomodam. A aplicação de energias de compactação adequadas permite a redução dos vazios sem causar segregação.

No contexto da otimização do empacotamento de partículas, um conceito fundamental é o da densidade de empacotamento de um conjunto granular. Essa medida refere-se ao volume ocupado pelos sólidos em relação ao volume total disponível. A densidade de empacotamento depende de fatores como a forma das partículas, a distribuição granulométrica e os métodos de compactação utilizados. Para alcançar uma densidade de empacotamento otimizada, é necessário selecionar cuidadosamente as partículas, de modo a minimizar o volume de vazios e obter uma estrutura granular densa e resistente (DE LARRARD, 1999; KWAN e MORA, 2001; FENNIS, 2011).

2.2.1 Método experimental de determinação de densidade de empacotamento

Para calcular a densidade de empacotamento dos agregados (β), utiliza-se a Equação 1, em que o índice de vazios do conjunto de grãos (IV) é determinado através da massa específica e da massa unitária, seguindo procedimentos descritos pelas normas NBR 16916 (ABNT, 2021), NBR 16917 (ABNT, 2021) e NBR 16972 (ANBT, 2021).

$$\beta = 1 - IV \quad (1)$$

No campo do empacotamento de partículas, Wong e Kwan (2008) desenvolveram métodos específicos para avaliar a densidade de empacotamento, classificando-os como diretos e indiretos. Os métodos diretos envolvem medições baseadas na densidade a seco das partículas, desconsiderando a presença de água na mistura, o que pode omitir os efeitos de aditivos e de aglomerados de partículas finas no empacotamento. Por outro lado, os métodos indiretos utilizam testes de consistência para considerar a influência da água, proporcionando uma análise mais precisa das condições reais da mistura. Essa abordagem é vantajosa, pois reflete de forma mais fiel a interação entre partículas, água e aditivos no estado fresco.

A consideração dos efeitos da água e de outros fatores como aglomerados de partículas finas torna os métodos indiretos especialmente úteis para o desenvolvimento de misturas otimizadas na construção civil. Estudos complementares de Yu et al. (2003) e Li e Kwan (2013) reforçam a importância dessa abordagem, destacando como métodos que levam em conta as condições reais da mistura podem melhorar a eficiência dos materiais. Assim, o avanço nas técnicas de medição do empacotamento de partículas desempenha um papel essencial na formulação de composições mais eficazes e sustentáveis.

O método experimental utilizado para determinar a densidade de empacotamento em materiais finos considera a presença de água, uma vez que essa afeta a carga superficial das partículas e a condição de aglomeração desses materiais. O ensaio consiste em preparar diferentes misturas com diferentes volumes de água e determinar a densidade aparente de cada mistura produzida. A partir da densidade aparente, é possível calcular a relação de vazios e a concentração de sólidos das misturas, utilizando as equações 2, 3 e 4, sendo que a densidade de empacotamento é equivalente à máxima concentração de sólidos encontrada.

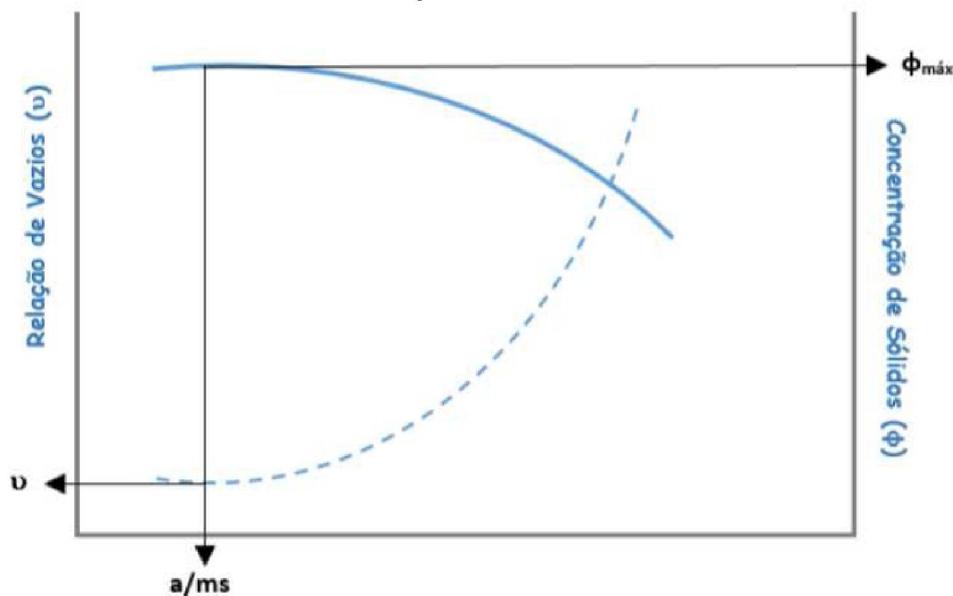
$$V_s = \frac{M}{\rho_w \times u_w + \rho_a \times R_a + \rho_b \times R_b + \rho_c \times R_c} \quad (2)$$

$$v = \frac{(V - V_s)}{V_s} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{V_s}{V} \quad (4)$$

Vale destacar que o método foi desenvolvido considerando pastas, porém para esse estudo o método original foi adaptado para argamassas. Faz parte das equações, o volume de sólidos na argamassa (V_s), a massa de argamassa que preenche o molde do ensaio (M), a densidade da água (ρ_w) e as densidades dos sólidos a, b e c (ρ_a, ρ_b, ρ_c), a relação água/materiais secos em volume (u_w) e as relações volumétricas entre os materiais a, b e c e o total de sólidos (R_a, R_b, R_c). Além disso, o volume do molde utilizado no ensaio (V), a relação de vazios (v) e a concentração de sólidos da mistura (Φ) também são consideradas nos cálculos. A Figura 1 representa um gráfico que mostra as curvas obtidas da concentração de sólidos (Φ) e da relação de vazios (v) relacionadas ao fator a/ms (em volume).

FIGURA 1 - COMPORTAMENTO DAS CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E A RELAÇÃO DE VAZIOS



FONTE: MARTINS (2021) (adaptado de Wong e Kwan (2008)).

Observa-se que o aumento da relação água/materiais secos (a/ms) resulta em um aumento na relação de vazios, devido à adição de água, que

separa as partículas sólidas. Por outro lado, a concentração de sólidos diminui com o aumento da a/ms . À medida que a quantidade de água diminui, as partículas se aproximam, reduzindo a proporção de vazios. Esse processo continua até atingir o ponto crítico, em que a concentração de sólidos é máxima e a relação de vazios é mínima. No entanto, a partir desse momento, se houver uma diminuição adicional na relação a/ms , não haverá água suficiente na mistura para manter as pontes entre as partículas de água, resultando em uma redução na concentração de sólidos e um aumento na relação de vazios (KLEIN, 2012; LI; KWAN, 2014; HERMANN et al., 2016).

Os modelos de empacotamento de partículas se baseiam em equações matemáticas que tem o intuito de antecipar o comportamento de interação de partículas de diferentes tamanhos entre si. Tais modelos podem ser caracterizados em duas classes, o modelo analítico, o qual se fundamenta no cálculo de densidade de empacotamento teórica de uma mistura (fragmentada em classes de tamanhos de partículas) e em curvas granulométricas ideais (FENNIS, 2011).

Dentre os que são fundamentados nos modelos analíticos, de acordo com Fennis (2011), vale ressaltar os modelos de Westman e Hugill (1930), Le Goff (1967), Toufar *et al.* (1976), Stovall *et al.* (1986), De Larrard (1999), entre outros. São relevantes nos modelos baseados em curvas granulométricas ideais os modelos de Füller e Thompson (1907), Andreasen e Andersen (1930) e Funk e Dinger (1994), também conhecido como modelo de Alfred.

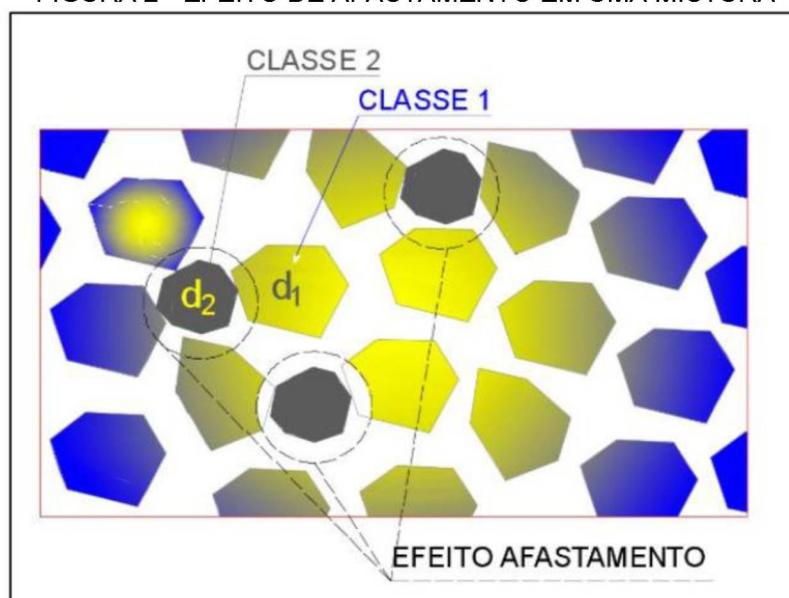
É importante ressaltar a importância do uso do empacotamento de partículas, visto que o seu estudo se resume em dosar os insumos que constituem a mistura de maneira racional, visando preencher os espaços vazios expostos entre as partículas maiores pelas partículas menores, e assim, progressivamente (OLIVEIRA et al., 2000). Dosar argamassas utilizando tal método colabora com que seja utilizado um menor consumo de cimento, reduzindo custos e o impacto ambiental causado pela produção do aglomerante, visto que essa técnica resulta numa matriz mais densa e compacta.

2.2.2 Modelo CPM de De Larrard (1999)

O Modelo CPM (*Compressible Packing Model*), proposto por De Larrard em 1999, é um modelo de densidade de empacotamento que visa combinar grãos de diferentes tamanhos para minimizar a porosidade de um conjunto granular, permitindo assim a utilização de uma menor quantidade de aglomerante em argamassas e concretos. A densidade de empacotamento é influenciada por três principais parâmetros: o tamanho dos grãos, a morfologia das partículas e o método de compactação utilizado.

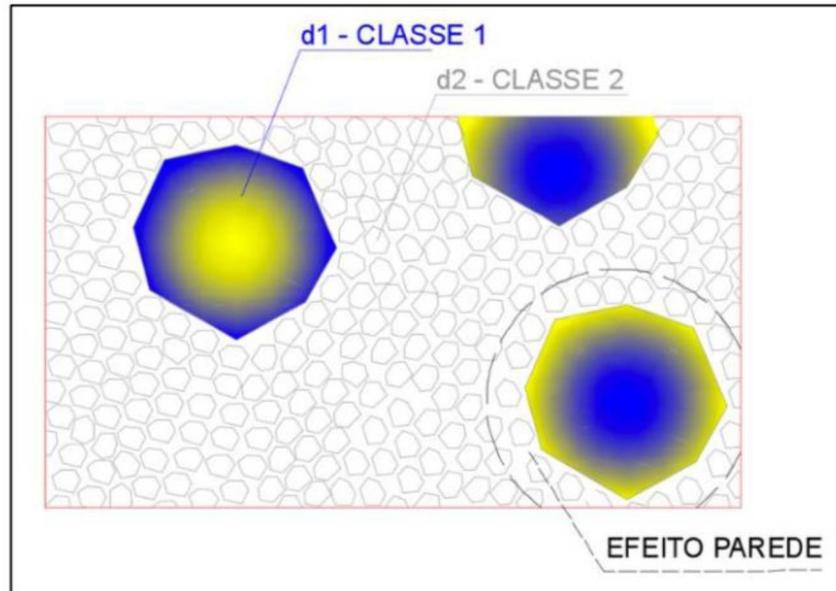
Há dois efeitos que devem ser considerados para os cálculos, o efeito de afastamento e o efeito parede. O efeito de afastamento ocorre quando as partículas menores não têm tamanho suficiente para conseguir se encaixar nos vazios gerados entre as partículas maiores, resultando no afastamento desses grãos maiores. Isso aumenta a porosidade e diminui o empacotamento da mistura. Já o efeito parede é exercido pelos grãos maiores sobre os grãos menores, quando há uma grande diferença nos diâmetros das partículas, causando um aumento na porosidade e diminuindo o empacotamento da mistura (OLIVEIRA et al., 2000). Esse efeito só deixa de ser levado em consideração quando a razão entre os diâmetros dos grãos for superior a 1. Ambos os efeitos são ilustrados nas Figuras 2 e 3.

FIGURA 2 - EFEITO DE AFASTAMENTO EM UMA MISTURA



FONTE: MARTINS (2021) (adaptado de Oliveira et. al. (2000)).

FIGURA 3 - EFEITO PAREDE EM UMA MISTURA



FONTE: MARTINS (2021) (adaptado de Oliveira et. al. (2000)).

O cálculo da densidade de empacotamento virtual (γ), conforme a equação 5, é o primeiro passo do modelo. Essa densidade representa a máxima densidade de empacotamento do conjunto granular quando as partículas são dispostas individualmente no espaço, mantendo sua forma original. Nesses cálculos, são consideradas as densidades de empacotamento de cada classe de tamanho de grãos (β_i e β_j), o volume de material de cada classe (y_j), o efeito de afastamento entre as partículas (a_{ij}) e o efeito parede (b_{ij}), levando em conta os diâmetros das partículas (d_i e d_j) (DE LARRARD, 1999).

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} [1 - \beta_i + b_{ij}(1 - \frac{1}{\beta_j})] y_j - \sum_{j=i+1}^n [1 - \frac{a_{ij} \cdot \beta_i}{\beta_j}] y_j} \quad (5)$$

$$a_{ij} = \sqrt{1 - (1 - \frac{d_j}{d_i})^{1,02}} \quad (6)$$

$$b_{ij} = 1 - (1 - \frac{d_i}{d_j})^{1,50} \quad (7)$$

A densidade de empacotamento real dos conjuntos granulares é calculada considerando o efeito da compactação, representado pelo índice de

compactação (K). Esse índice reflete a energia de compactação aplicada à mistura, que influencia diretamente a disposição dos grãos. A equação 8 relaciona o número de classes da mistura (n), a densidade de empacotamento da classe i (β_i), a densidade de empacotamento virtual quando a classe i é dominante (γ_i), o volume relativo da classe i (y_i) e a densidade de empacotamento real (ϕ). O valor do índice de compactação (K) varia de acordo com o tipo de compactação utilizado no processamento da mistura, como indicado na Tabela 8, sendo esses valores determinados por meio de experimentos (DE LARRARD, 1999).

$$K = \sum_{i=1}^n k_i = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad (8)$$

TABELA 8 - VALORES DE K PARA DIFERENTES PROTOCOLOS DE EMPACOTAMENTO

Tipo de compactação	K
Lançamento simples	4,10
Apiloamento	4,50
Vibração	4,75
Demanda de água	6,70
Vibração e compressão de 10 kPa	9,00
Empacotamento virtual	∞

FONTE: De Larrard (1999)

2.2.3 Empacotamento de partículas na dosagem de argamassas

A trabalhabilidade é uma propriedade essencial para garantir a fácil aplicação, bom acabamento e qualidade adequada da argamassa de revestimento, sendo, portanto, um atributo a ser constantemente aprimorado. Nesse cenário, Martins (2021) realizou uma pesquisa com o título “Diretrizes para dosagem de argamassa de revestimento utilizando técnicas de empacotamento de partículas e comportamento reológico”. O estudo fez uso de conceitos de empacotamento de partículas e do comportamento reológico por meio de ensaio de *squeeze flow*. Inicialmente era necessário alcançar os parâmetros reológicos que correspondessem à trabalhabilidade aplicável, para isso foram examinadas seis argamassas utilizadas em obras e analisadas suas propriedades no estado endurecido. Após esse estágio, para a verificação de

qual dosagem teve mais impacto na densidade de empacotamento de partículas, foram elaboradas dez formulações de argamassas de revestimento, seguindo bibliografia e dosagens tradicionais utilizadas em obras, e empregando três tipos de agregados (dois naturais e um artificial). O teor de água foi ajustado de maneira que atingisse a mínima quantidade necessária, e então, para o ensaio do *squeeze flow*, aos poucos eram acrescentadas quantidades de água até se alcançar uma trabalhabilidade apropriada. Finalizando o estudo, a pesquisadora conseguiu elaborar as diretrizes a serem utilizadas na dosagem de argamassas de laboratório, também determinaram que a relação água/aglomerantes obteve bons coeficientes de determinação associada a resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade (MARTINS, 2021).

Outro estudo que vale destacar nesse tema é a pesquisa de Kwan e Fung (2009) com o título "*Packing density measurement and modelling of fine aggregate and mortar*". A pesquisa aborda a aplicação de um novo método de empacotamento úmido desenvolvido para medir as densidades de empacotamento de agregados finos misturados e argamassas sob a condição úmida, com ou sem superplastificante adicionado, e com ou sem compactação aplicada. O estudo visa investigar a relação entre as propriedades físicas dos materiais e a sua capacidade de empacotamento. Os pesquisadores utilizaram técnicas experimentais para medir a densidade de empacotamento de agregados miúdos, como areia, e da argamassa produzida a partir desses agregados. Foram consideradas variáveis como a granulometria, a distribuição de tamanhos de partículas e a presença de aditivos. Além disso, os autores desenvolveram modelos matemáticos para descrever o empacotamento dos materiais estudados. Esses modelos levam em consideração fatores como a forma das partículas, a interação entre elas e as forças de coesão. Os resultados mostraram que a densidade de empacotamento dos agregados finos e da argamassa é influenciada por diversos fatores, incluindo a distribuição granulométrica e a presença de finos. Além disso, os modelos propostos pelos pesquisadores apresentaram uma boa capacidade de prever a densidade de empacotamento dos materiais estudados.

Essas pesquisas contribuem para o entendimento do comportamento do empacotamento de partículas em argamassas, fornecendo informações importantes para a dosagem e controle de qualidade desses materiais. Os

resultados e modelos propostos podem ser aplicados no projeto de misturas de argamassas, visando otimizar a densidade de empacotamento e, conseqüentemente, melhorar as propriedades mecânicas e durabilidade dos materiais.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi concebido de forma a possibilitar a avaliação do desempenho de argamassas mistas de revestimento com traço 1:1:6 (em volume) e com a substituição parcial do cimento por fíler calcário, com base em técnicas de empacotamento de partículas. Vale destacar que para esse trabalho, foram desenvolvidos dois grupos de argamassas. O primeiro grupo, denominado de argamassas estudadas, foi utilizado tanto na aplicação do método experimental quanto do modelo CPM com o objetivo de definir a quantidade de fíler a ser utilizada nas formulações. Após essa definição, essas argamassas foram avaliadas quanto ao desempenho em estado fresco e endurecido. As argamassas estudadas foram formuladas com teores de 0%, 15%, 20% e 25% de fíler, sendo que esses teores foram definidos após o estudo de empacotamento de partículas. O segundo grupo, denominado de argamassas comparativas, foi utilizado apenas como base para comparar os dados de empacotamento de partículas obtidos com as argamassas estudadas. As argamassas comparativas foram empregadas exclusivamente no método experimental do conjunto granular, com teores de 0%, 4%, 10%, 16% e 20%. Esses teores foram definidos de forma a estarem dentro do intervalo estabelecido para as argamassas estudadas, porém com uma menor variação entre eles. As argamassas comparativas foram caracterizadas pela caracterização do comportamento reológico pelo ensaio *squeeze-flow*, para permitir a comparação com a trabalhabilidade das argamassas estudadas.

Para o estudo de empacotamento de partículas foram utilizados o método experimental de Wong e Kwan e o modelo analítico de De Larrard (CPM). Inicialmente, foi realizado o método experimental para cada insumo a ser utilizado na argamassa, pois o resultado obtido nessa etapa fornece o valor da densidade de empacotamento dos materiais individuais, que juntamente com o valor de D50 obtido pela granulometria a laser de cada material, são variáveis necessárias para a aplicação do modelo CPM. O D50 é utilizado nas equações do modelo CPM devido à sua capacidade de representar de forma simples e eficaz a distribuição granulométrica das partículas, facilitando a modelagem matemática e a otimização do empacotamento de partículas.

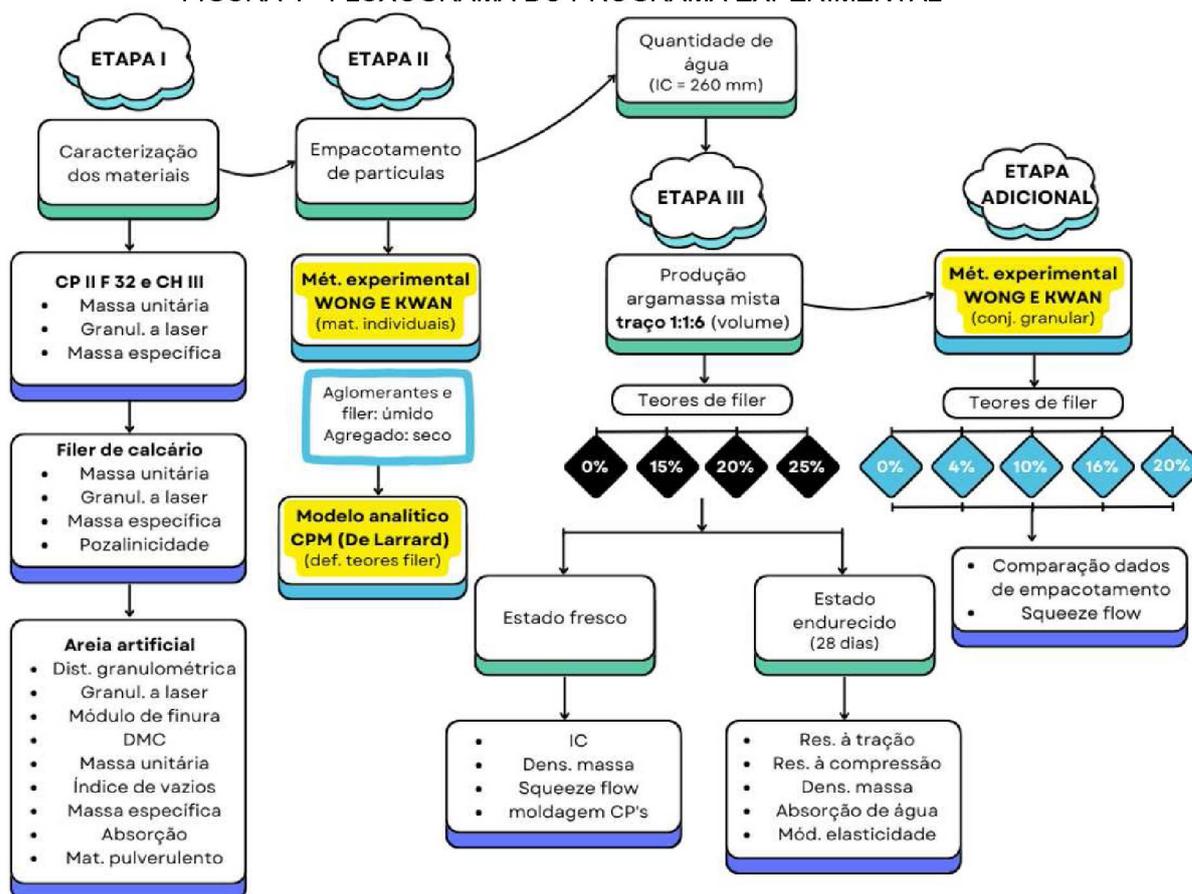
Em seguida, foi aplicado o modelo CPM, utilizado para prever a densidade de empacotamento máxima do conjunto granular. Esse modelo é uma abordagem matemática que considera as interações entre diferentes partículas para otimizar a densidade. Após essa etapa, foram definidos os teores de substituição do cimento por fíler e então produzidas as argamassas do estudo (denominadas argamassas estudadas), posteriormente avaliadas quanto ao seu desempenho em estado fresco e endurecido. Além disso, o método experimental foi reaplicado, desta vez para um conjunto granular em argamassas com teores pré-selecionados de fíler de calcário (denominadas argamassas comparativas) próximos aos definidos pelo estudo de empacotamento, apenas com o objetivo de comparar os resultados obtidos com as previsões do modelo CPM, conforme citado anteriormente.

A escolha dos teores de 15%, 20% e 25% de fíler de calcário para substituir parcialmente o cimento nas argamassas estudadas foi fundamentada em uma análise baseada em estudos anteriores como em Fortunato *et al.* (2018), Isaia e Rizzatti (2020) e Fennis (2011) e na busca por uma substituição progressiva do cimento *Portland* na formulação de argamassas de revestimento. Inicialmente, foi realizado um estudo de empacotamento de partículas utilizando o método experimental e o modelo CPM para determinar a densidade máxima de empacotamento dos materiais utilizados. Com base nesses resultados, constatou-se que a densidade de empacotamento máxima alcançada foi superior ao previsto. Portanto, optou-se por adotar o limite máximo de 20% de substituição do cimento por fíler, conforme sugerido pela literatura. Adicionalmente, foram incluídos teores de 15% e 25% para explorar os efeitos da substituição abaixo e acima do limite recomendado, avaliando o comportamento das argamassas em diferentes cenários. Paralelamente, a partir do modelo CPM, também foram analisadas argamassas “fictícias” com teores de substituição variando de 0% a 22%, em incrementos de 2%, a fim de investigar o impacto da substituição em níveis progressivos, incluindo condições extremas, como misturas contendo 100% de cada material individualmente e composições mistas de pastas com metade de cimento, cal ou fíler variando as misturas.

Na Figura 4 está apresentado um fluxograma geral do programa experimental adotado na pesquisa. Para melhor compreensão do método empregado, apresenta-se o mesmo em três etapas principais e uma adicional:

- Etapa I – Caracterização dos materiais;
- Etapa II – Aplicação das técnicas de empacotamento de partículas para os materiais: Experimental (Wong e Kwan) e Analítico CPM (De Larrard);
- Etapa III – Produção das argamassas mistas e caracterizações no estado fresco e endurecido;
- Etapa Adicional – Aplicação do Método experimental Wong e Kwan para o conjunto granular.

FIGURA 4 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL



FONTE: A autora (2023).

3.1 ETAPA I – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os ensaios realizados na etapa de caracterização dos materiais e as normas consultadas estão listados na Tabela 9. As características físicas e

químicas do cimento e da cal, as quais não foram possíveis de se obter em laboratório, foram obtidas com os respectivos fabricantes.

TABELA 9 - ENSAIOS E NORMAS UTILIZADAS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Insumo	Ensaio	Norma consultada	Laboratório
CP II F 32, CH III e Fíler de calcário	Granulometria a laser	ISO 13320	Lab. de Materiais de Construção (UTFPR)
CP II F 32 e CH III	Massa unitária	ABNT NBR 16972	LAME (UFPR)
	Massa específica	ABNT NBR 16605	
Fíler de calcário	Massa unitária	ABNT NBR 16972	
	Massa específica	ABNT NBR 16605	
	Pozalinicidade	ABNT NBR 5751 ABNT NBR 5752	
Areia artificial	Distribuição granulométrica	ABNT NBR 17054	
	Módulo de finura		
	DMC		
	Massa unitária	ABNT NBR 16972	
	Índice de vazios		
	Massa específica	ABNT NBR 16916	
	Absorção		
	Teor de material pulverulento	ABNT NBR 16973	
Granulometria a laser	ISO 13320	Lab. de Materiais de Construção (UTFPR)	

FONTE: Autora (2023).

Foram selecionados o cimento CP II F 32 e cal hidratada CH III, como aglomerantes, areia artificial como agregado miúdo e fíler de calcário como substituição do cimento. Os ensaios realizados e os laboratórios utilizados nesse estudo estão indicados na Tabela 10. As especificações dos insumos estão descritas nos itens a seguir.

TABELA 10 - ENSAIOS REALIZADOS E SEUS RESPECTIVOS LABORATÓRIOS

Ensaio		Laboratório
Empacotamento de partículas	Método experimental – Wong e Kwan	LAME (UFPR)
Produção de argamassas		LAME (UFPR)
Estado fresco	IC	LAME (UFPR)
	Densidade de massa	
	<i>Squeeze-flow</i>	
Estado endurecido	Res. à tração e à compressão	LAME (UFPR)
	Densidade de massa	
	Absorção de água	
	Módulo de elasticidade	

FONTE: A autora (2023).

3.1.1 Materiais finos

3.1.1.1 Cimento

A escolha do cimento CP II F é justificada por ser usualmente utilizado em obras na região (estado do Paraná). A norma brasileira que especifica os requisitos para o cimento *Portland* é a ABNT NBR 16697 (2018) e essa mesma define que no cimento *Portland* composto pode ser adicionado, durante a moagem, materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos, sendo que essas adições têm teores especificados. Conforme a norma vigente, o cimento *Portland* CP II-F 32 deve conter entre 11% e 25%, em porcentagem de massa, de adição de material carbonático (fíler calcário). No presente estudo, foi utilizado um cimento que contém 25% de material carbonático, conforme informado pelo fabricante.

As especificações físicas e químicas do cimento utilizado na pesquisa estão indicadas na Tabela 11.

TABELA 11 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO CIMENTO CP II F 32 CONFORME NBR 16697 (ABNT, 2018)

Características físicas e mecânicas	CP II F-32	Exigência NBR 16697 (2018)
#200 (%)	0,8	≤ 12,0
#325 (%)	7,8	-
Blaine (cm ² /g)	4172	-
Tempo de pega início (min)	363	≥ 60
Tempo de pega fim (min)	400	≤ 600
Resistência à compressão (MPa) – R1	9,3	-
Resistência à compressão (MPa) – R3	25,4	≥ 10
Resistência à compressão (MPa) – R7	30,6	≥ 20
Resistência à compressão (MPa) – R28	35,8	≥ 32
Características químicas	CP II F-32	Exigência NBR 16697 (2018)
Perda ao fogo (%)	11,3	≤ 12,5
SO ₃ (%)	3,3	≤ 4,5
Resíduo Insolúvel (%)	-	-

FONTE: Fabricante (2023).

Foram realizados ensaios de caracterização física do cimento como massa unitária (ABNT NBR 16972 (ABNT, 2021)), massa específica (ABNT NBR 16605 (ABNT, 2017)) e granulometria a laser. O valor de D50 obtido para o cimento, que foi de 19,46 µm, é um parâmetro importante na aplicação do modelo analítico de empacotamento de partículas (CPM). O D50 representa o diâmetro em que 50% das partículas são menores e 50% são maiores,

fornecendo uma medida da faixa granulométrica média das partículas. Nos cálculos do modelo CPM, o D50 é utilizado para considerar o tamanho dos grãos. Isso ocorre porque o modelo CPM se baseia na distribuição granulométrica das partículas para calcular a eficiência do empacotamento e a quantidade de vazios na mistura.

Vale ressaltar que a análise da massa unitária em materiais secos destaca uma considerável sensibilidade devido a diversos fatores, tais como o método de compactação e a agregação das partículas. Dado que este ensaio é conduzido em condições de ausência de umidade, a presença desses fatores pode exercer uma influência substancial sobre o coeficiente final do estudo, conforme discutido por YU *et al.* (2003) e LI; KWAN (2013). Por esse motivo é importante lembrar que esse valor pode não ser tão próximo ao real.

TABELA 12 - MASSA UNITÁRIA E MASSA ESPECÍFICA DO CIMENTO

Massa unitária (kg/m ³)	1122,29
Massa específica (kg/m ³)	3120,00

FONTE: Autora (2023).

3.1.1.2 Cal hidratada

O fato de ser uma argamassa mista também é justificado por ser comum o seu uso nas obras, além de se ter a intenção de usufruir das propriedades que a cal pode proporcionar à mistura. A cal utilizada é a CH-III e tal insumo deve seguir as exigências químicas e físicas da norma brasileira NBR 7175 (ABNT, 2003), a qual apresenta os requisitos da cal hidratada para argamassas.

A caracterização física da cal utilizada na pesquisa, informada pelo fabricante, está indicada na Tabela 13. Assim como o cimento, a cal passou por ensaios de caracterização como massa unitária (ABNT NBR 16972 (ABNT, 2021)), massa específica (ABNT NBR 16605 (ABNT, 2017)) e granulometria a laser. O D50 obtido na curva granulométrica foi de 6,084 µm e os valores de massa unitária e massa específica estão indicados na Tabela 14.

TABELA 13 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA CAL CH-III

Características físicas	CH-III
Massa específica (g/cm ³)	2,5
Massa unitária (g/cm ³)	0,7
#70 (%)	≤ 5
#140 (%)	≤ 15

Resíduo insolúvel (%)	≥ 35
-----------------------	------

FONTE: Fabricante (2023).

TABELA 14 - MASSA UNITÁRIA E MASSA ESPECÍFICA OBTIDAS DA CAL

Massa unitária (kg/m ³)	777,27
Massa específica (kg/m ³)	2390,00

FONTE: Autora (2023).

3.1.1.3 Fíler de calcário

A seleção do fíler de calcário para ser utilizado como material fino na substituição do cimento ocorreu pelo fato de ser um material disponível na região de Curitiba/PR, além de ser um subproduto da indústria de extração e beneficiamento de calcário, o que confere um aproveitamento mais eficiente dos recursos disponíveis e reduz a necessidade de seu descarte.

O fíler utilizado tem origem de uma rocha dolomítica (calcário dolomítico) com 95% passante na peneira #100 e, assim como o cimento e a cal, foi submetido aos ensaios de massa unitária (ABNT NBR 16972 (ABNT, 2021)), massa específica (ABNT NBR 16605 (ABNT, 2017)) e granulometria a laser. No entanto, além desses ensaios o fíler também foi avaliado quanto à sua atividade pozolânica com cal aos sete dias e com cimento *Portland* aos 28 dias, para determinar sua capacidade reativa, conforme normas pertinentes (ABNT NBR 5751 (ABNT, 2015))(ABNT NBR 5752 (ABNT, 2014)). O D50 obtido na curva granulométrica foi de 14,48 µm e os resultados dos ensaios estão indicados na Tabela 15. A Tabela 16 demonstra os valores obtidos no ensaio de pozzalinidade.

TABELA 15 - MASSA UNITÁRIA E MASSA ESPECÍFICA OBTIDAS DO FÍLER DE CALCÁRIO

Massa unitária (kg/m ³)	1109,54
Massa específica (kg/m ³)	2720,00

FONTE: Autora (2023).

TABELA 16 - RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE POZALINIDADE DO FÍLER DE CALCÁRIO

Aglomerante	Rc média (MPa)
CH III	0,57
CP II F 32 (arg. A)	8,90
CP II F 32 (arg. B)	4,45

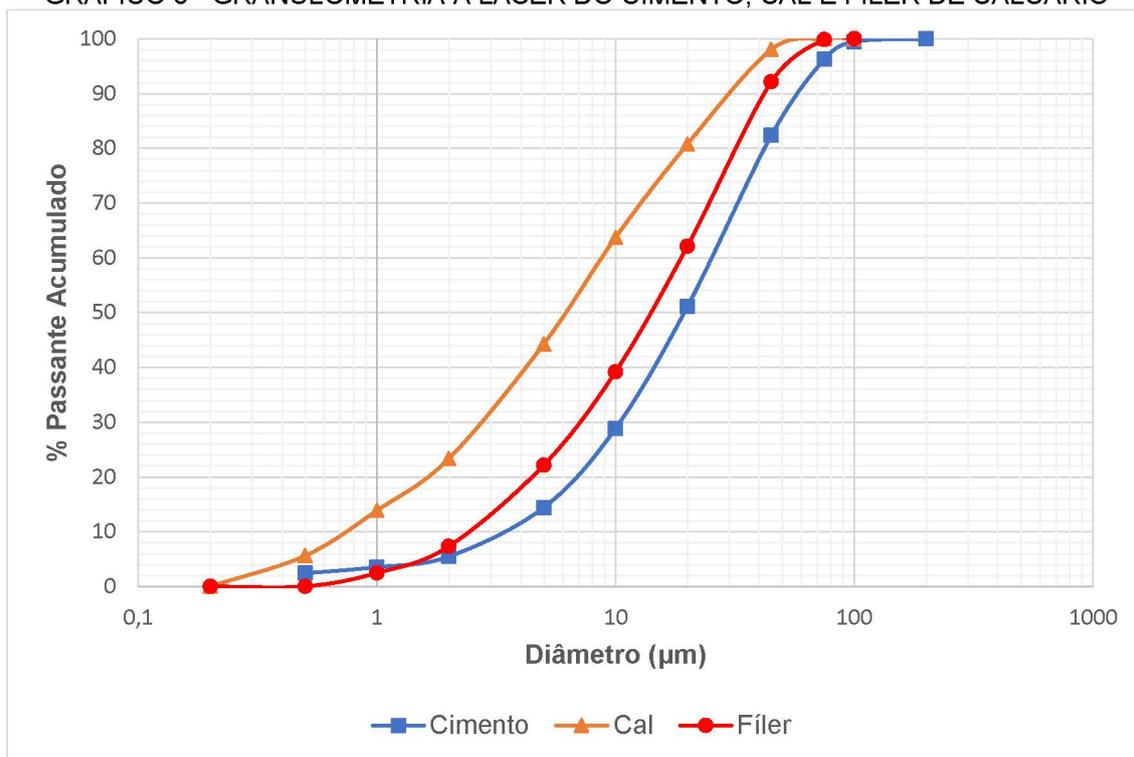
FONTE: Autora (2023).

A norma ABNT NBR 5751 (2015) estabelece o procedimento para determinar a atividade pozolânica de materiais cimentícios com cal hidratada, onde a argamassa deve conter uma fração em massa de cal e duas frações de material pozolânico, como o fíler de calcário, em volume. A norma ABNT NBR 5752 (2014) define a produção de duas argamassas de cimento: a argamassa A, utilizada como referência sem adição, e a argamassa B, que incorpora 25% de material pozolânico em substituição parcial ao cimento, avaliando a reatividade e a contribuição da adição nas propriedades da mistura. No ensaio com cal, para que seja evidenciada a pozolanicidade do material é necessário que a argamassa produzida alcance resistência à compressão superior a 6 MPa, conforme preconiza a NBR 12653 (ABNT, 2012). Já no ensaio com cimento *Portland*, para se constatar a pozolanicidade do material, a argamassa com substituição de cimento pelo fíler de calcário, deve ter resistência à compressão maior ou igual a 75% da resistência à compressão da argamassa de referência (sem substituição), conforme orientação da NBR 12653 (ABNT, 2012).

Para a argamassa de cal, a média resultou inferior ao valor de 6 MPa que a norma preconiza, portanto pode-se considerar que o fíler é um material inerte. Durante os ensaios de resistência à compressão para as argamassas de cimento, um dos resultados foi desconsiderado nos cálculos da resistência média. Esse valor foi identificado como um *outlier* devido à sua grande diferença em relação aos demais resultados em ambas as argamassas testadas. A exclusão desse valor anômalo foi necessária para garantir a precisão e a representatividade dos resultados médios obtidos. Para constatar a pozolanicidade, os 75% da resistência da argamassa A seriam 6,675 MPa, como a média da argamassa B foi de 4,45 MPa, ou seja, menor que esse valor, pode ser considerado que o fíler é um material inerte.

O Gráfico 3 apresenta as curvas granulométricas obtidas a partir do ensaio de granulometria a laser para os três materiais finos empregados na composição da argamassa, nomeadamente o cimento, a cal e o fíler de calcário, com a finalidade de permitir uma comparação entre eles. Paralelamente, na Tabela 17 são discriminados os diâmetros correspondentes aos percentis 10, 50 e 90, denominados D10, D50 e D90, para os referidos materiais, fornecendo uma análise mais detalhada da distribuição granulométrica dos componentes da argamassa em estudo.

GRÁFICO 3 - GRANULOMETRIA A LASER DO CIMENTO, CAL E FÍLER DE CALCÁRIO



FORNTE: Autora (2023).

TABELA 17 - D10, D50 E D90 DO CIMENTO, CAL E FÍLER DE CALCÁRIO

Granulometria a laser	CP II F 32	CH-III	Fíler de calcário
D10 (µm)	3,619	0,728	2,534
D50 (µm)	19,46	6,084	14,48
D90 (µm)	57,20	28,10	41,74

FORNTE: Autora (2023).

A análise dos resultados obtidos da granulometria a laser para o cimento CP II F 32, cal hidratada CH III e fíler de calcário revela diferenças nas distribuições granulométricas desses materiais. Os valores obtidos para o cimento CP II F 32 apresentam uma ampla gama de tamanhos de partículas na distribuição granulométrica. Observa-se uma progressão gradual de partículas menores para maiores, com uma concentração significativa em diâmetros menores que 20 µm, que representam 51,06% do total. As partículas maiores (até 200 µm) constituem a totalidade passante acumulada, indicando uma distribuição que se estende por uma ampla faixa granulométrica.

Já a cal hidratada CH III mostra uma distribuição granulométrica concentrada em partículas menores. Notavelmente, 63,7% das partículas têm diâmetro até 10 µm. A presença de partículas de até 100 µm atinge 100%, mas

a maior parte está concentrada em tamanhos menores, indicando uma granulometria mais uniforme em comparação com o cimento.

Por fim, o fíler de calcário possui a distribuição granulométrica semelhante à da cal, mas com uma concentração ainda maior de partículas menores. Partículas de até 10 μm representam 39,2% do total. A maior parte das partículas está abaixo de 45 μm , que representa 92,12% do total, mostrando uma distribuição mais fina. O fíler apresenta valores intermediários entre o cimento e a cal hidratada, indicando uma distribuição granulométrica que está entre os dois materiais em termos de tamanho de partícula. Isso sugere uma contribuição para a argamassa tanto em termos de preenchimento de vazios, ou seja, uma possível melhora no empacotamento de partículas da mistura, o qual será discutido posteriormente no item 2.1, quanto de melhoria das propriedades mecânicas, como resultado de sua distribuição granulométrica.

3.1.2 Areia artificial

Tanto o fíler quanto a areia utilizados nesta pesquisa são derivados da mesma rocha calcária. Esta rocha foi submetida a processos de britagem, moagem e peneiramento para separar as frações desejadas. Esses materiais são agregados artificiais, especificamente produzidos para atender às especificações necessárias, e não são resíduos de britagem.

A escolha de utilizar apenas areia artificial como agregado miúdo na pesquisa se baseia na intenção de mitigar os impactos ambientais causados pelo setor da construção.

Foram realizados ensaios de caracterização da areia artificial para poder ter os dados necessários para realizar o estudo de empacotamento de partículas e para poder ter um embasamento no momento de analisar o desempenho da argamassa.

A areia artificial foi recebida em sacos distintos, esses separando o material em frações de areia artificial fina e média. Com o intuito de otimizar a utilização do agregado miúdo, procedeu-se à pesagem do conjunto das frações fina e média, após a pesagem de todos os sacos foi possível constatar que em relação ao peso total de material a proporção era de 70% de material com partículas finas e 30% de material com partículas médias. Em virtude dessa

distribuição proporcional, antes da realização de qualquer ensaio ou procedimento experimental, procedeu-se à homogeneização completa das frações de areia, garantindo, assim, uma composição uniforme e a proporção desejada de 70/30 em toda a sua massa, a ser empregada na confecção das argamassas em estudo. A Figura 5 demonstra ao lado esquerdo da imagem um dos sacos recebidos com a areia artificial separada pela granulometria fina e ao lado direito demonstra o aspecto da areia artificial. A Figura 6 apresenta ao lado esquerdo da imagem um dos sacos com a areia artificial já misturada com a proporção de 70% fina e 30% média e ao lado direito apresenta o aspecto da areia misturada.

FIGURA 5 - AREIA ARTIFICIAL FINA RECEBIDA



FONTE: Autora (2023).

FIGURA 6 - AREIA ARTIFICIAL MISTURADA



FONTE: Autora (2023).

Todos os ensaios de caracterização de todos os materiais utilizados no estudo foram repetidos três vezes para se obter a média como resultado, com exceção do ensaio de massa específica do cimento, cal e fíler, os quais foram feitos apenas uma vez. Na Tabela 18 estão apresentados os ensaios de caracterização realizados com a areia artificial, as normas consultadas e os resultados obtidos.

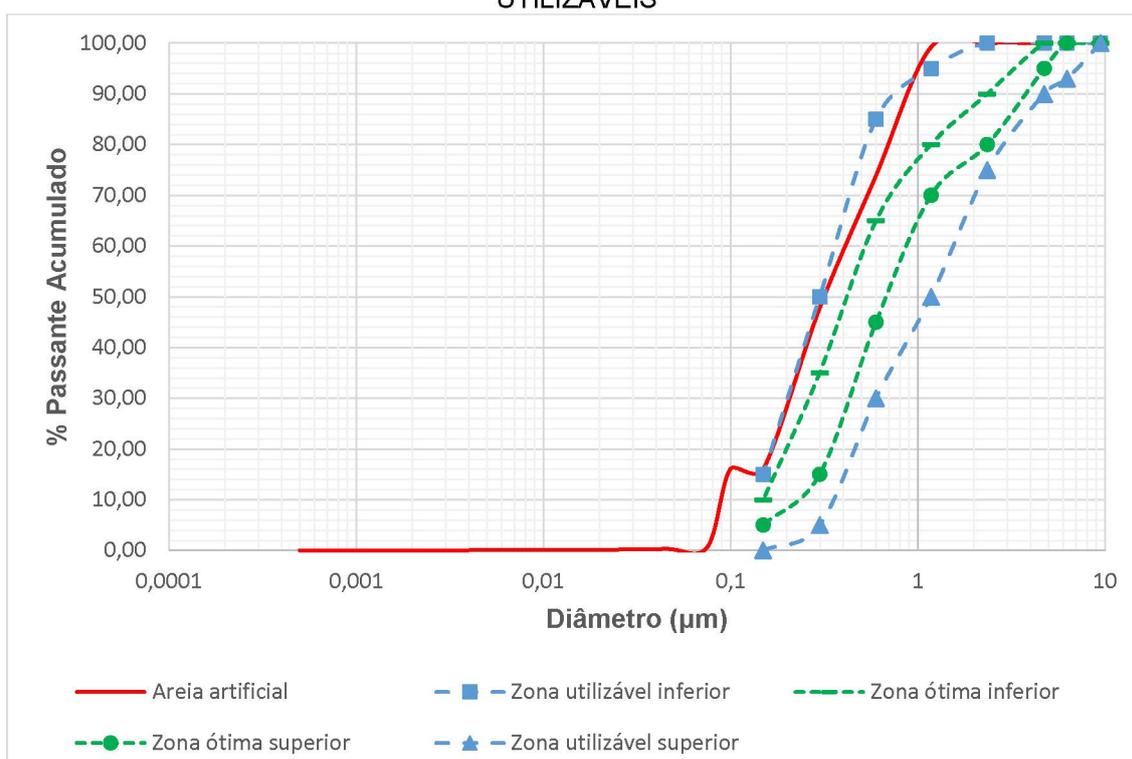
As curvas completas dos ensaios de granulometria, juntamente com as zonas utilizáveis e ótimas conforme prescrito pela norma ABNT NBR 7211 (ABNT, 2022), estão apresentadas no Gráfico 4. Embora a ABNT NBR 7211 seja destinada a agregados para concreto, ela foi empregada neste estudo devido à ausência de uma norma específica para agregados em argamassas. Adicionalmente, a norma ABNT NBR 13281-1 (ABNT, 2023), que trata dos requisitos e métodos de ensaio para argamassas inorgânicas (Parte 1), referencia a ABNT NBR 7211, indicando que o agregado miúdo deve seguir suas diretrizes. Na Tabela 19 estão indicados os resultados de granulometria a laser da areia.

TABELA 18 - CARACTERIZAÇÃO DA AREIA ARTIFICIAL

Propriedades	Norma	Resultados médios
Massa unitária (kg/m ³)	NBR 16972 (ABNT, 2021)	1493,32
Dimensão máxima característica (mm)	NBR 17054 (ABNT, 2022)	1,18
Módulo de finura (-)		1,63
Absorção (%)	NBR 16916 (ABNT, 2021)	1,69
Material pulverulento (%)	NBR 16973 (ABNT, 2021)	4,85
Massa específica aparente (g/cm ³)	NBR 16916 (ABNT, 2021)	3,07
Massa específica SSS (g/cm ³)		3,12
Massa específica (g/cm ³)		3,24
Índice de vazios (%)	NBR 16972 (ABNT, 2021)	51,33

FONTE: Autora (2023).

GRÁFICO 4 - CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA ARTIFICIAL COM ZONAS ÓTIMAS E UTILIZÁVEIS



FONTE: Autora (2023).

Considerando a análise da distribuição granulométrica da areia empregada no presente estudo, é perceptível que a maior parte da curva granulométrica se encontra posicionada entre a região correspondente à zona ótima inferior e à zona utilizável inferior. É importante ressaltar essas zonas são definidas seguindo norma ABNT NBR 7211 (ABNT, 2022) que trata de agregados para concreto, por esse motivo há limitações nas análises para argamassas. Tal distribuição pode ser atribuída à natureza do processo de produção da areia artificial, o qual pode resultar em uma seleção granulométrica que tende a favorecer partículas com dimensões que se concentram nesses

intervalos. Essa característica da curva sugere uma adequação da areia utilizada para aplicação em argamassas, uma vez que a presença de partículas com tamanhos predominantes nesses intervalos pode contribuir para a obtenção de propriedades desejáveis, como trabalhabilidade e resistência mecânica.

É importante ressaltar que o total de finos nas argamassas a serem produzidas será o utilizado como substituição do cimento juntamente com o material pulverulento da areia artificial (4,85%).

TABELA 19 - D10, D50 E D90 DA AREIA ARTIFICIAL

Granulometria a laser	Areia artificial
D10 (μm)	14,62
D50 (μm)	58,37
D90 (μm)	92,78

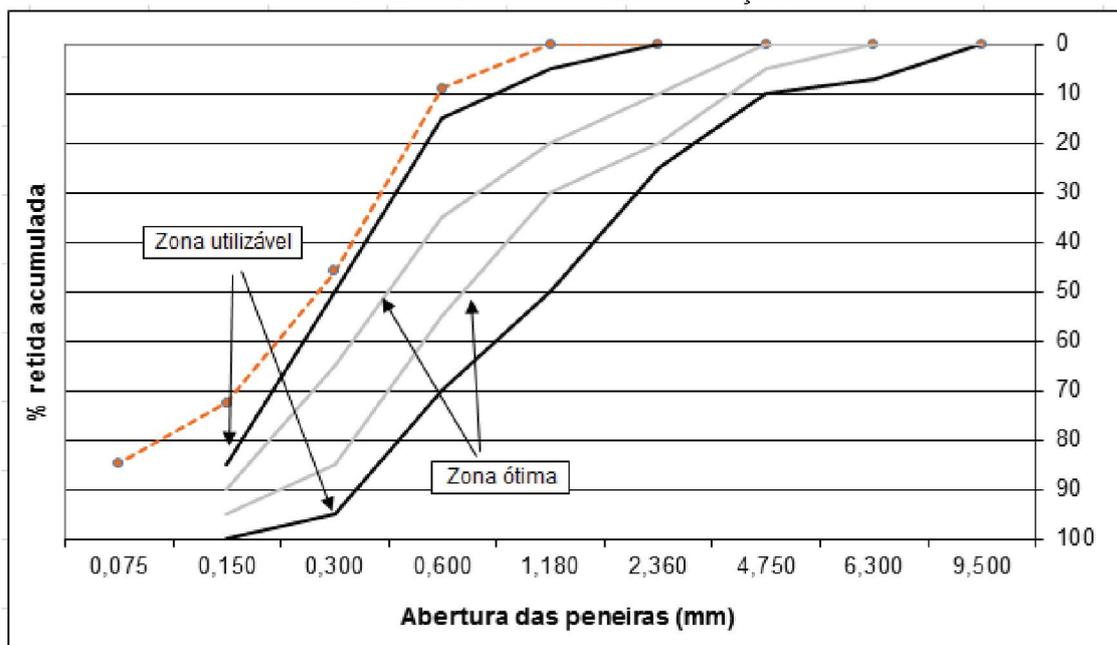
FONTE: Autora (2023).

Os valores de D10, D50 e D90 são úteis para caracterizar a distribuição de tamanhos de partículas em um material granular. O D10 representa o diâmetro no qual 10% das partículas são menores, indicando a presença de uma fração de partículas finas na areia. O D50, por sua vez, representa o diâmetro médio das partículas, onde 50% das partículas são menores e 50% são maiores. Já o D90 indica o diâmetro no qual 90% das partículas são menores, sugerindo a presença de uma fração de partículas de maior tamanho.

A observação dos valores obtidos revela que a areia artificial apresenta uma distribuição granulométrica relativamente uniforme, com uma proporção equilibrada de partículas finas, médias e grossas. O D50, que representa o diâmetro médio das partículas, indica que a areia possui um tamanho predominantemente médio. A presença de partículas finas, evidenciada pelo valor de D10, pode contribuir para a melhoria da trabalhabilidade da argamassa, enquanto a presença de partículas maiores, sugerida pelo valor de D90, pode conferir resistência mecânica e estabilidade à mistura.

Na Figura 7 está apresentada uma curva granulométrica de uma areia artificial obtida em literatura para comparação com a curva obtida nesse estudo e na Tabela 20 estão apresentados os resultados obtidos no presente estudo em comparação aos obtidos no estudo da literatura.

FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA ARTIFICIAL OBTIDA EM LITERATURA PARA COMPARAÇÃO



FONTE: MENDES e BAUER (2015).

TABELA 20 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS DA AREIA ENTRE O PRESENTE ESTUDO E LITERATURA

Ensaio	Autora (2023)	Mendes e Bauer (2015)
Massa específica (g/cm ³)	3,24	2,70
DMC (mm)	1,18	1,18
Módulo de Finura (-)	1,63	1,27
Teor de finos (%)	4,85	15,00

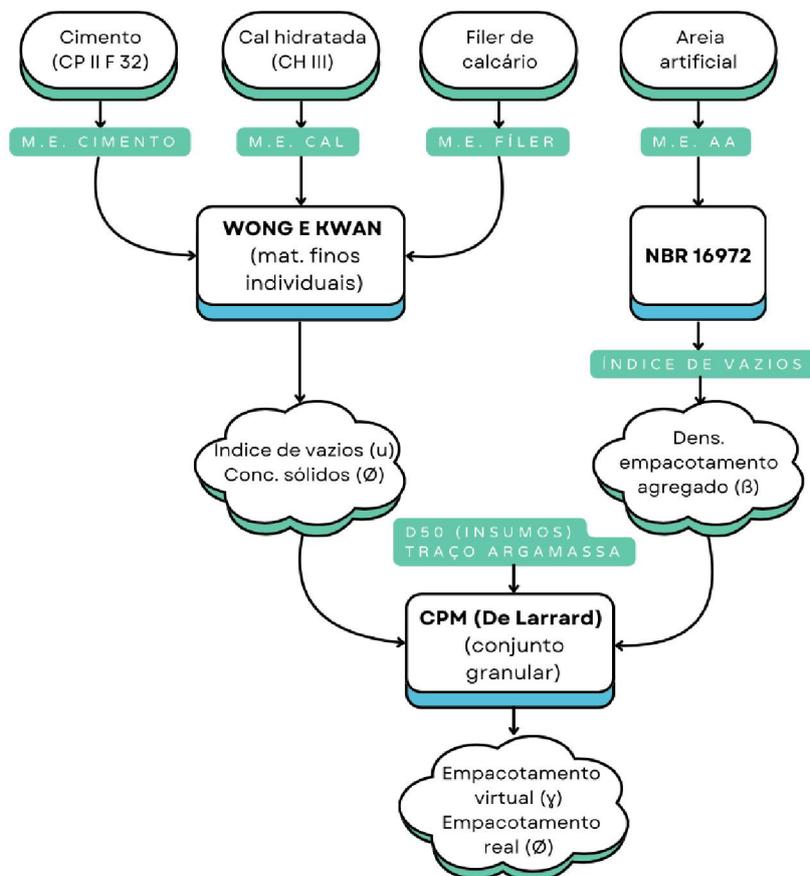
FONTE: Autora (2023).

Para realizar uma análise comparativa dos dados e da curva de distribuição granulométrica, foi selecionado o artigo de MENDES e BAUER (2015) que aborda uma areia artificial calcária. A massa específica da areia desse estudo é significativamente maior, indicando uma densidade superior. Ambas as areias possuem a mesma dimensão máxima característica e o módulo de finura da areia deste estudo é relativamente maior, evidenciando que a areia analisada é mais grossa. A quantidade de finos na areia do artigo é evidentemente superior a quantidade de finos da areia estudada, demonstrando uma menor presença de partículas finas na areia utilizada nesse estudo. Na análise da distribuição granulométrica, a areia do artigo não se enquadra na zona utilizável, mas está próxima ao limite superior desta zona. Em contraste, a maior parte da curva granulométrica da areia estudada encontra-se na região correspondente à zona ótima inferior e à zona utilizável inferior.

3.2 ETAPA II – TÉCNICAS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Na Figura 8 está apresentado um fluxograma mostrando a sequência do estudo de empacotamento de partículas empregado nessa pesquisa para os materiais e para o conjunto granular.

FIGURA 8 - FLUXOGRAMA DO ESTUDO DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS



FONTE: A autora (2023).

Na segunda etapa do trabalho foi feito um estudo do empacotamento de partículas para determinar o teor máximo de fíler possível de ser utilizado na argamassa em substituição parcial ao teor de cimento, sendo para isso aplicado um método experimental e um modelo analítico. O método experimental foi aplicado individualmente para o cimento, cal e fíler, para a areia artificial foi executado o ensaio de determinação da massa unitária e índice de vazios seguindo a norma NBR 16972 (ABNT, 2021) e após essas definições foi aplicado o modelo analítico para o conjunto granular.

3.2.1 Definição do modelo e método

Para o modelo analítico foi seguido o modelo de empacotamento compressível (CPM) desenvolvido por De Larrard (1999), e para o método experimental aquele proposto por Wong e Kwan (2008).

O modelo CPM foi escolhido por ser um modelo amplamente reconhecido na literatura científica, baseado em princípios sólidos de mecânica de partículas e teoria do empacotamento. Este modelo permite prever a densidade de empacotamento máxima em misturas de partículas com diferentes tamanhos, considerando as interações entre elas. Além disso, o CPM é aplicável a uma variedade de materiais granulares, proporcionando uma abordagem matemática robusta que é útil para diferentes composições de misturas, assim como pastas e argamassas.

Por outro lado, o método experimental proposto por Wong e Kwan (2008) foi escolhido por se basear em técnicas práticas que avaliam diretamente o empacotamento de partículas através de medições diretas das características físicas da mistura. Este método envolve a realização de experimentos específicos para determinar a densidade de empacotamento, a distribuição granulométrica e a interação entre diferentes tamanhos de partículas, fornecendo uma validação prática e detalhada dos resultados teóricos obtidos com o modelo CPM. Ao medir a densidade real do empacotamento e observar o comportamento das partículas na prática, o método experimental permite verificar a precisão das previsões teóricas e ajustar os parâmetros do modelo CPM de acordo com as condições reais do material. Assim, ele oferece uma abordagem complementar que confirma e refina as estimativas teóricas, garantindo que os resultados do modelo analítico sejam aplicáveis e representativos para as condições experimentais observadas.

Por ser um método experimental, ele reflete mais diretamente as condições reais encontradas na prática de formulação de argamassas.

A combinação do modelo CPM com o método experimental de Wong e Kwan permite uma abordagem híbrida que integra a precisão teórica com a validação empírica. O modelo CPM fornece uma base teórica sólida para a previsão do empacotamento de partículas, enquanto o método experimental oferece uma validação prática e empírica desses resultados teóricos. Essa

combinação permite uma caracterização mais completa e confiável dos dados de empacotamento, uma vez que os dados empíricos do método experimental confirmam e ajustam as previsões teóricas. Esse processo é essencial para otimizar a formulação e o desempenho das argamassas, garantindo que os resultados obtidos sejam representativos das condições reais e aplicáveis na prática.

Além disso, esse modelo e método foram escolhidos para seguir a mesma linha adotada por Martins (2021), visto que a autora estudou diretrizes para dosagem de argamassas de revestimento utilizando técnicas de empacotamento de partículas e obteve resultados satisfatórios.

Todos os modelos de empacotamento de partículas utilizados no desenvolvimento do método de dosagem de argamassas de revestimento demonstraram uma coerência significativa entre eles. Todavia, o método CPM e o experimental se mostraram muito próximos para todos os agregados do estudo na maioria das formulações adotadas (MARTINS, 2021, p. 172).

3.2.2 Etapas do estudo de empacotamento de partículas

O estudo de empacotamento de partículas foi conduzido em quatro etapas distintas. Inicialmente, os insumos utilizados na pesquisa, nomeadamente cimento CP II F 32, cal hidratada CH III, fíler de calcário e areia artificial, foram submetidos a ensaios de caracterização para obtenção de dados fundamentais, tais como massa específica de cada material e massa unitária e índice de vazios da areia artificial. Essas informações são essenciais para o desenvolvimento do método e modelo de empacotamento selecionados.

Em seguida, o cimento, a cal e o fíler foram submetidos ao método experimental proposto por Wong e Kwan (2008) para determinar os valores de índice de vazios (v) e concentração de sólidos (ϕ) de cada insumo. Posteriormente, o modelo analítico conhecido como CPM foi aplicado, possibilitando a obtenção da densidade de empacotamento para diferentes proporções de materiais.

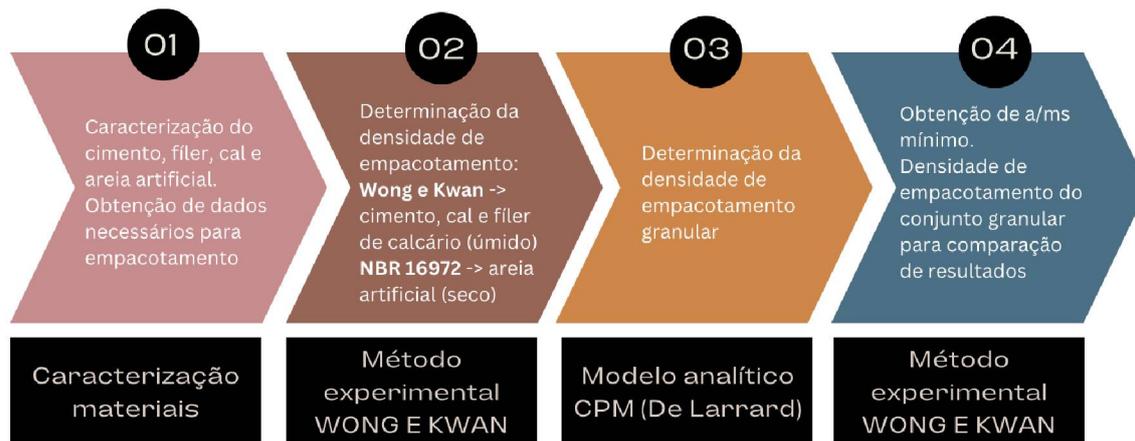
Durante esta fase de análise pelo modelo CPM, foi analisada uma variedade de cenários com argamassas fictícias, abrangendo desde 0% até 22% de substituição do cimento pelo fíler, em incrementos de 2%. Além disso, foram

consideradas situações com 100% de substituição do cimento pelo fíler, bem como análises isoladas utilizando apenas areia artificial, cimento, fíler ou cal. Outras combinações foram investigadas, incluindo pastas fictícias compostas por 50% de cimento e 50% de cal, 50% de fíler e 50% de cal, e 50% de cimento e 50% de fíler. Esses estudos foram conduzidos com o objetivo de compreender o comportamento de cada material dentro da mistura, contribuindo para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, ou seja, todos esses casos foram apenas aplicados em cálculos do modelo CPM e não foram moldados, por esse motivo foram chamadas de fictícias.

Após a definição da densidade de empacotamento máxima, para poder moldar as argamassas estudadas foi determinada a quantidade de água na mistura, a qual foi ajustada para alcançar um índice de consistência de 260 ± 5 mm, conforme o item 3.1 demonstra. Por último, após as argamassas estudadas serem moldadas, o método experimental foi aplicado novamente, desta vez utilizando o conjunto granular. Nesta fase, foram confeccionadas argamassas com o mesmo traço empregado na pesquisa, mas com variação na substituição do fíler de calcário em diferentes proporções (0%, 4%, 10%, 16% e 20%). Esses valores foram escolhidos para abranger um espectro entre os teores utilizados nas argamassas estudadas, garantindo uma distribuição representativa dos dados. É importante destacar que esta etapa de empacotamento granular foi realizada unicamente para fins comparativos e com o objetivo de determinar a relação água/materiais secos mínima para cada formulação.

A Figura 9 apresenta o fluxograma detalhando as etapas do estudo de empacotamento de partículas adotado nesta pesquisa.

FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DO ESTUDO DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

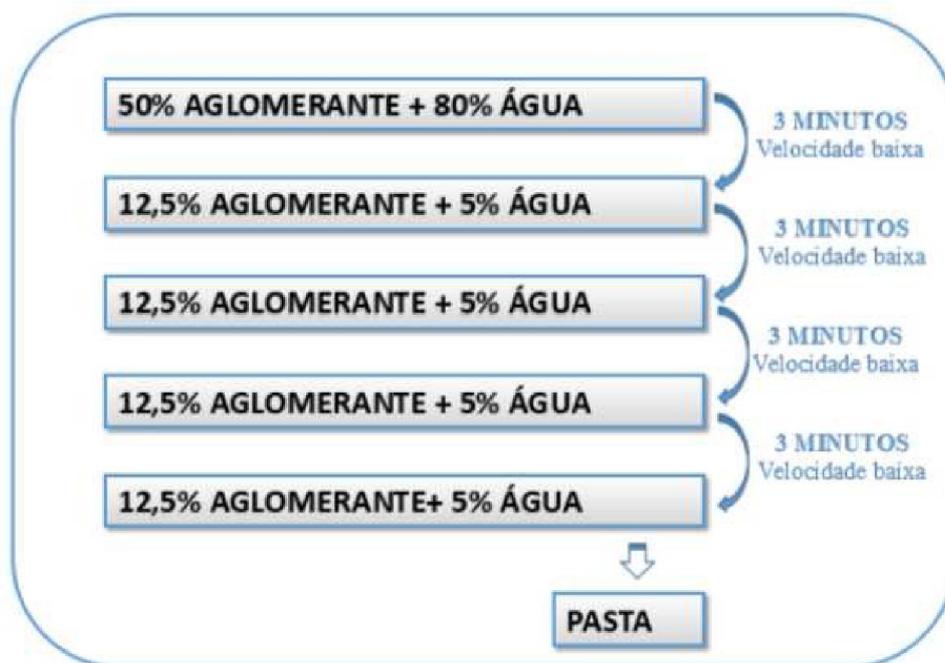


FONTE: A autora (2023).

3.2.3 Procedimentos de mistura

O procedimento de mistura proposto por Wong e Kwan (2008) se dá por adicionar toda a água e metade do aglomerante, misturar por três minutos, adicionar mais 1/8 do aglomerante, misturar por três minutos e assim sucessivamente, até que ao final essa mistura é pesada. No entanto, nessa dissertação, será seguido o mesmo procedimento adotado por Martins (2021), em que o procedimento para cálculo da densidade de empacotamento dos materiais individuais seguiu o que está indicado na Figura 10, o qual segue a inclusão parcial da água em etapas junto ao aglomerante, visando facilitar a homogeneização dos materiais e evitar possíveis aglomerações.

FIGURA 10 - PROCEDIMENTO DE MISTURA PARA CÁLCULO DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO



FONTE: Martins (2021).

Para a etapa de aplicação do método experimental para o conjunto granular foram misturados todos os materiais secos (cimento, cal, fíler e areia artificial) antes da adição da água. No método original a mistura dos secos se dá sem a presença de agregados por ter sido desenvolvido para pastas, no entanto, nesse estudo foi feita essa adaptação pensando na produção de argamassas, sendo assim a areia artificial foi misturada em conjunto com os materiais finos.

3.2.4 Determinações de densidade de empacotamento

A densidade de empacotamento (β) dos agregados foi calculada com base no índice de vazios (IV), conforme estabelecido pela norma NBR 16972 (ABNT, 2021), seguindo a Equação 9. Esse procedimento é justificado devido ao tamanho das partículas dos agregados, que são grandes o suficiente para que as forças gravitacionais sejam predominantes em relação às forças entre as partículas, o que é observado em grãos com dimensões superiores a 100 μm (LEE et al., 2003).

$$\beta_{agregado} = 1 - IV(\%) \quad (9)$$

Como complementação do método experimental, foi aplicado para o conjunto granular o modelo CPM, proposto por De Larrard (1999), o qual está detalhado no item 2.2.2 e no apêndice B desse trabalho.

Além do procedimento de empacotamento para os materiais individuais no presente estudo, foi decidido realizar a determinação da densidade de empacotamento do conjunto granular através do método experimental, com o objetivo de complementar a pesquisa e permitir a comparação com os resultados obtidos no modelo CPM, além de ser possível determinar a relação a/ms mínima para cada formulação.

3.3 ETAPA III – PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS MISTAS

3.3.1 Produção das argamassas mistas

O traço escolhido foi o 1:1:6 (em volume), uma vez que é comumente empregado para argamassas de revestimento. Na Tabela 21 estão indicados os traços tanto em volume quanto em massa e o teor de fíler em cada formulação. O valor X apresentado na tabela indica o valor que seria definido através do estudo de empacotamento de partículas para definir o teor de fíler a ser utilizado como substituição do cimento.

TABELA 21 - TRAÇOS E TEORES DE FÍLER PARA FORMULAÇÕES DAS ARGAMASSAS

Traço (volume)	Traço (massa)	Teor fíler (em massa)
1:1:6	1:0,69:7,98	0%
1:1:6	1:0,69:7,98	X-5%
1:1:6	1:0,69:7,98	X%
1:1:6	1:0,69:7,98	X+5%

FONTE: A autora (2023).

A quantidade de água utilizada para cada formulação foi definida com base no índice de consistência de 260 ± 5 mm indicado na norma ABNT NBR 16541 (ABNT, 2016). Portanto, a quantidade total de água foi ajustada para alcançar um índice de consistência de 260 ± 5 mm. Conforme esperado devido a teoria das camadas de água (LI; KWAN, 2013), observou-se que as

formulações com maiores teores de fíler exigiram quantidades de água superiores, em virtude da presença de uma maior proporção de materiais finos na mistura. Este fenômeno pode ser atribuído à maior área superficial específica dos materiais finos, que demanda uma maior quantidade de água para umedecê-los adequadamente. As Figuras 11a e 11b demonstram a argamassa após ensaio de índice de consistência para a definição da relação a/ms da mistura, a primeira com a quantidade de água inferior ($a/ms = 0,10$) e a segunda com a quantidade de água adequada para IC de 260 ± 5 mm ($a/ms = 0,20$).

FIGURA 11 - ARGAMASSA COM QUANTIDADE DE ÁGUA INFERIOR AO NECESSÁRIO PARA IC (FIGURA a) E ARGAMASSA COM QUANTIDADE DE ÁGUA ADEQUADA PARA IC (FIGURA b)



FONTE: A autora (2023).

O procedimento adotado para o preparo das argamassas seguiu as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 16541 (ABNT, 2016). Dessa forma, após realizar o estudo de empacotamento de partículas e definir a quantidade de água em cada formulação, a Tabela 21 citada anteriormente foi complementada com esses dados e resultou na Tabela 22. Foi acrescentada também nessa tabela a informação de porcentagem de finos total nos materiais secos da argamassa (em massa), o qual considera os 25% de fíler calcário presente no cimento utilizado, a porcentagem de substituição de cimento por fíler calcário e os finos presentes na areia artificial (4,85% de material pulverulento, conforme citado na Tabela 18).

TABELA 22 – FORMULAÇÕES PARA AS ARGAMASSAS PRODUZIDAS PARA OS ENSAIOS

Argamassa	Traço (volume)	Traço (massa)	Teor de fíler (em massa)	Teor fíler cimento (em massa)	Teor de fíler total (em massa)	a/ms
REF	1:1:6	1:0,69:7,98	0%	25%	6,59%	0,20
ARG15	1:1:6	1:0,69:7,98	15%	25%	7,75%	0,20
ARG20	1:1:6	1:0,69:7,98	20%	25%	8,14%	0,21
ARG25	1:1:6	1:0,69:7,98	25%	25%	8,52%	0,21

FONTE: A autora (2023).

Os teores de 0% e 20% de fíler foram utilizados tanto nas argamassas ensaiadas quanto nas preparadas apenas para comparação dos valores de empacotamento, permitindo a comparação das relações água/materiais secos (a/ms). No método experimental do conjunto granular, as argamassas de comparação apresentaram relações a/ms de 0,17 para 0% e 0,15 para 20%, correspondendo à quantidade mínima de água necessária para molhar os grãos. Nas argamassas ensaiadas, focadas no índice de consistência, as relações foram de 0,20 para 0% e 0,21 para 20%, indicando que o acréscimo de água visava melhorar a trabalhabilidade. Comparando esses teores, observa-se que, para 0% de fíler, foi adicionada 17,65% mais água, e para 20%, 40% a mais, devido ao aumento da quantidade de finos na mistura e sua maior área superficial. Após a produção, parte das argamassas foi submetida a ensaios no estado fresco e outra parte moldada em corpos de prova prismáticos. Os ensaios, normas e quantidade de corpos de prova utilizados em cada ensaio estão indicados na Tabela 23.

TABELA 23 - ENSAIOS REALIZADOS NAS ARGAMASSAS ESTUDADAS

Ensaio	Normas	Traço (volume)	Quantidade de formulações	CP's por formulação	Total de CP's
Índice de consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)	1:1:6	4 (0%, 15%, 20% e 25%)	3	12
Densidade de massa e teor de ar incorporado	NBR 13278 (ABNT, 2005)	1:1:6	4 (0%, 15%, 20% e 25%)	3	12
Caracterização reológica pelo método <i>squeeze-flow</i>	NBR 15839 (ABNT, 2010)	1:1:6	4 (0%, 15%, 20% e 25%)	3	12
Resistência à compressão e à tração na flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	1:1:6	4 (0%, 15%, 20% e 25%)	6	24
Densidade de massa aparente	NBR 13280 (ABNT, 2005)	1:1:6	4 (0%, 15%, 20% e 25%)	18	72

Absorção de água e coeficiente de capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005)	1:1:6	4 (0%, 15%, 20% e 25%)	6	24
Módulo de elasticidade estático	Método proposto por Marques <i>et. al</i> (2020)	1:1:6	4 (0%, 15%, 20% e 25%)	6	24

FONTE: A autora (2023).

Após 48 horas, os corpos de prova prismáticos foram retirados das fôrmas, identificados e armazenados em condições controladas de laboratório, até atingirem a idade de ruptura de 28 dias.

FIGURA 12 - CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS DESMOLDADOS E IDENTIFICADOS

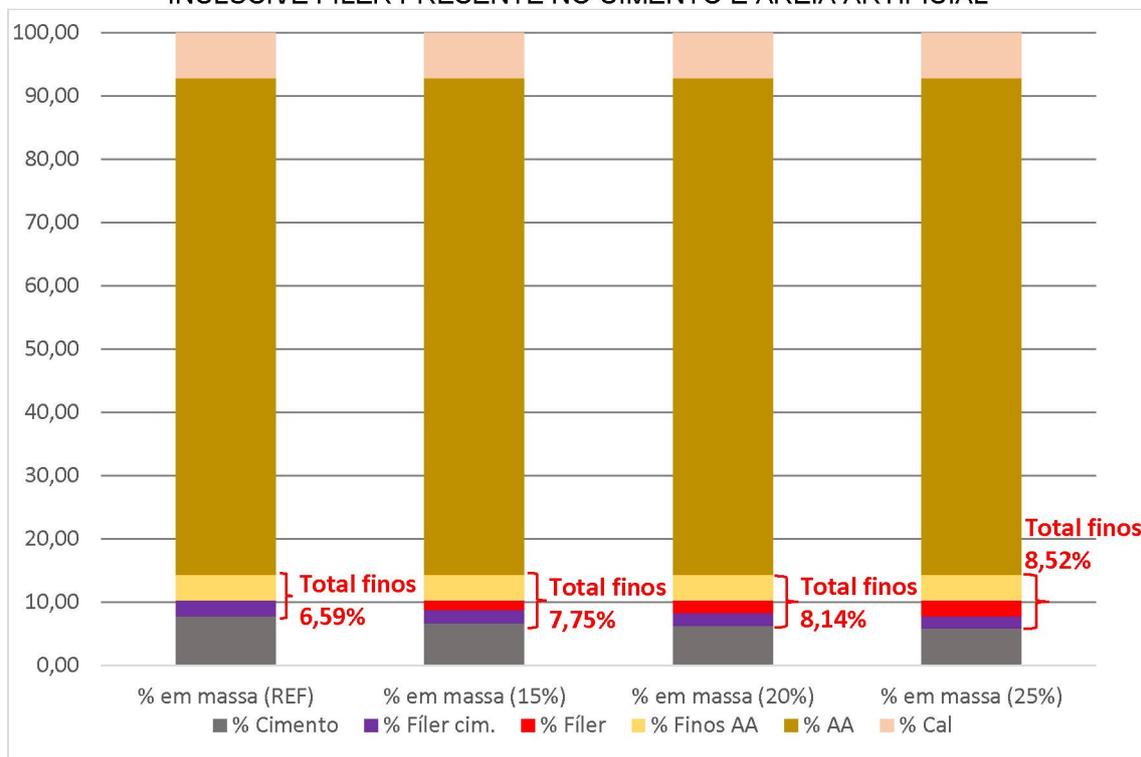


FONTE: A autora (2023).

Conforme mencionado anteriormente, o cimento utilizado nas argamassas contém fíler de calcário. No estudo, considerou-se a substituição parcial do cimento por fíler de calcário, o que resulta em uma porcentagem total de fíler na argamassa diferente daquela presente apenas na substituição do cimento. Isso ocorre porque é necessário somar a porcentagem de fíler presente no cimento e na areia artificial àquela adicionada na mistura. É importante lembrar que as características físicas e químicas do fíler presente no cimento não são necessariamente iguais ao fíler utilizado para substituição parcial do cimento. O Gráfico 5 apresenta as porcentagens em massa de cada material na

mistura de materiais secos da argamassa, incluindo o fíler constante no cimento, o adicionado na mistura e o material pulverulento da areia artificial.

GRÁFICO 5 - PORCENTAGEM EM MASSA DE CADA MATERIAL NAS ARGAMASSAS, INCLUSIVE FÍLER PRESENTE NO CIMENTO E AREIA ARTIFICIAL



FONTE: A autora (2023).

3.3.2 Caracterização das argamassas no estado fresco

3.3.2.1 Índice de consistência

O ensaio do índice de consistência, conhecido também como *Flowtable*, foi executado conforme as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 13276 (ABNT, 2016), utilizando-se a mesa de fluidez. O objetivo deste ensaio foi determinar a quantidade de água necessária para alcançar uma consistência específica de 260 ± 5 mm.

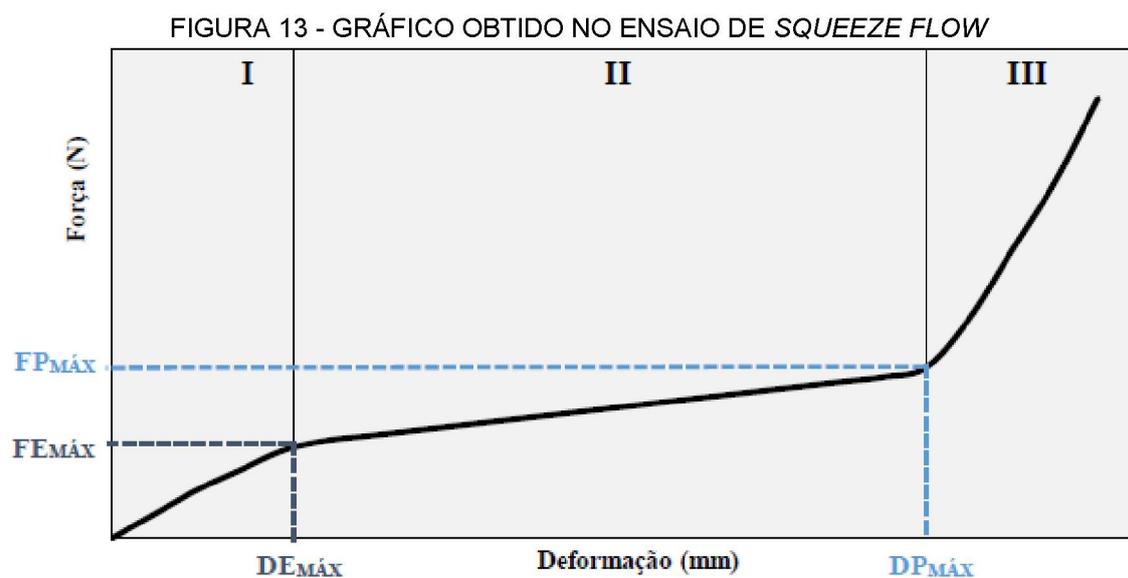
3.3.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

O ensaio de determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado foi executado de acordo com a norma NBR 13278 (ABNT, 2005).

3.3.2.3 Squeeze flow

Para a avaliação da trabalhabilidade das argamassas, foi adotado o método *squeeze flow*, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 15839 (2010). Por meio do método *squeeze flow*, é possível traçar um perfil detalhado da resposta da argamassa no estado fresco frente aos esforços aplicados, segmentando as deformações em estágios. Esses estágios simulam as condições reais de manuseio e aplicação da argamassa, considerando que a extensão e a intensidade das deformações podem variar de acordo com a composição dos materiais envolvidos (CARDOSO *et al.*, 2005).

Os resultados obtidos nos ensaios de *squeeze flow* permitem identificar os pontos de transição entre os diferentes estágios do comportamento do material. Isso inclui a transição do estágio elástico para o plástico, caracterizada pela carga máxima elástica (FE_{max}) e deformação máxima elástica (DE_{max}), bem como a mudança do estágio plástico para o estágio de embricamento, identificada pela carga máxima plástica (FP_{max}) e deformação máxima plástica (DP_{max}), conforme ilustrado na Figura 13.



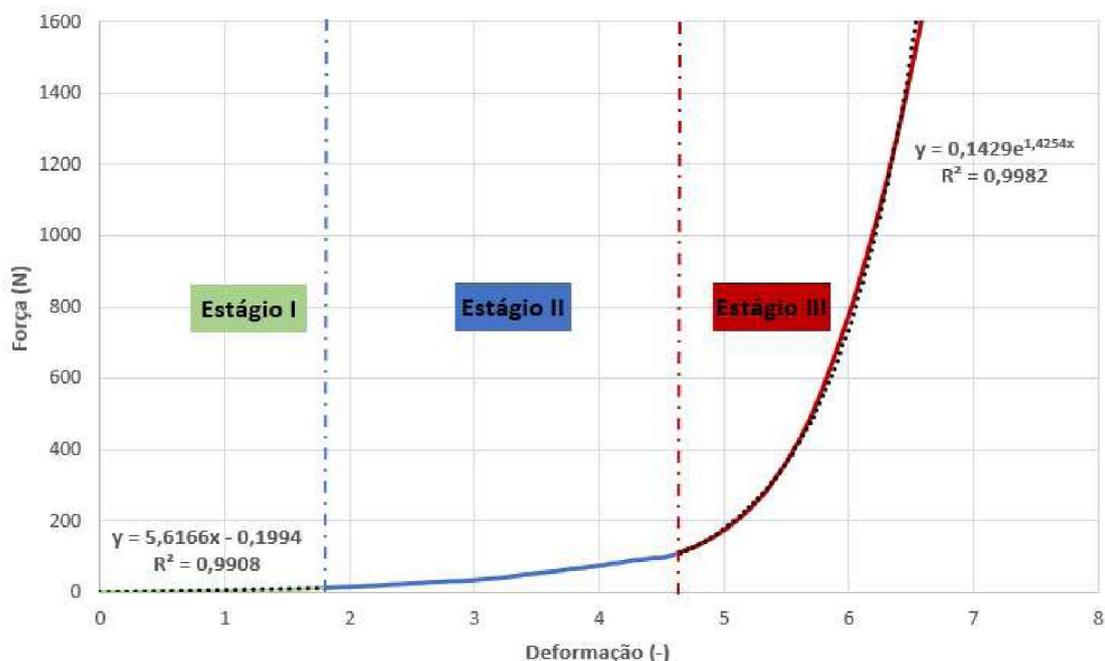
FONTE: MARTINS (2021) (Adaptado de CARDOSO *et al.* (2005)).

O limite de escoamento (DE_{max}), também conhecido como tensão de limite elástico ou tensão de escoamento, representa a tensão máxima que o material pode suportar, enquanto ainda está no regime elástico de deformação.

Quando essa tensão é excedida, o material deixa de seguir a lei de Hooke e passa a sofrer deformação plástica permanente. Para o presente estudo, o valor de DE_{max} foi determinado matematicamente utilizando o *software* Excel, traçando uma reta a partir do ponto de origem até o ponto de mudança de comportamento, buscando o melhor ajuste possível, conforme indicado pelo coeficiente de determinação R^2 mais próximo de 1.

Para definir o ponto de transição do regime plástico para o embricamento (DP_{max}), foi seguido o procedimento descrito por Cardoso (2009). Neste terceiro estágio, observa-se um aumento significativo na carga necessária para alcançar deformações adicionais, caracterizado por uma curva exponencial. A determinação do DP_{max} foi realizada através da definição da curva com melhor ajuste matemático, novamente utilizando o Excel para encontrar o R^2 mais próximo de 1. Assim, uma curva exponencial foi traçada a partir do último ponto da curva obtida (estágio III) até atingir o valor máximo de R^2 , identificando o ponto que marca o início do estágio de embricamento, o DP_{max} . Na Figura 14 é apresentada uma curva obtida pelo ensaio de *Squeeze flow* para uma argamassa utilizada como exemplo.

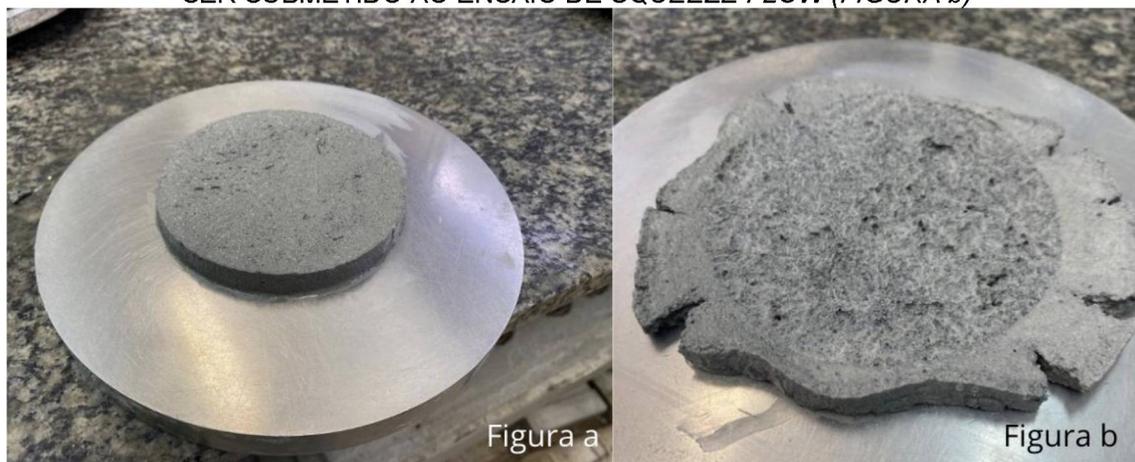
FIGURA 14 - EXEMPLO DE SUBDIVISÃO DOS ESTÁGIOS NA CURVA DE SQUEEZE FLOW DE UMA ARGAMASSA



FONTE: A autora (2023).

O ensaio de *Squeeze flow* foi conduzido utilizando uma prensa EMIC equipada com uma célula de carga de 30 kN, e a velocidade de deslocamento foi mantida em 1 mm/s, conforme especificado na norma NBR 15839 (ABNT, 2010). A Figura 15a mostra um dos corpos de prova antes ser ensaiado e a Figura 15b após ser ensaiado.

FIGURA 15 - CORPO DE PROVA DE ARGAMASSA ANTES DE SER SUBMETIDO AO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW* (FIGURA a) E CORPO DE PROVA DE ARGAMASSA APÓS SER SUBMETIDO AO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW* (FIGURA b)



FONTE: A autora (2023).

3.3.3 Caracterização das argamassas no estado endurecido

Dos corpos de prova moldados para cada argamassa foram divididos seis para cada ensaio no estado endurecido, a divisão foi feita conforme Tabela 24 indica. Além disso, vale ressaltar que os dezoito corpos de prova foram submetidos ao ensaio de densidade de massa aparente.

TABELA 24 – IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA CADA ENSAIO

Corpos de prova	Ensaio
CP's 01 a 06	Res. à tração e compressão
CP's 07 a 12	Módulo de elasticidade
CP's 13 a 18	Absorção

FONTE: A autora (2023).

3.3.3.1 Resistência à compressão e à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão para argamassas é descrito pela norma NBR 13279 (ABNT, 2005). A ruptura dos corpos de prova prismáticos para cada formulação ocorreu aos 28 dias de idade.

Inicialmente, os corpos de prova foram rompidos para determinar a resistência à tração na flexão. A Figura 16 demonstra o corpo de prova prismático no momento do ensaio de resistência à tração na flexão em uma prensa EMIC.

3.3.3.2 Densidade de massa aparente

O ensaio para determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas segue as diretrizes da norma NBR 13280 (ABNT, 2005).

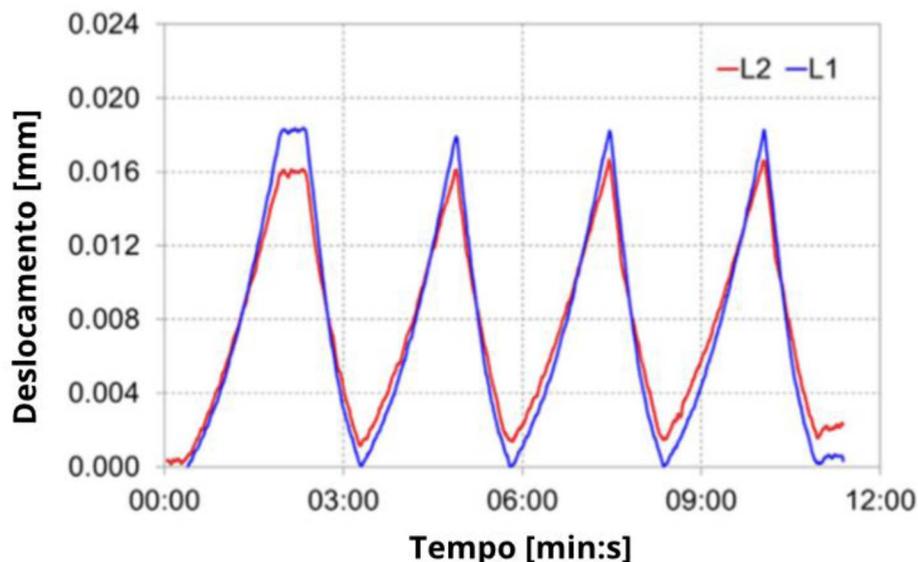
3.3.3.3 Absorção de água e coeficiente de capilaridade

O ensaio para determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade seguiu as diretrizes estabelecidas na norma NBR 15259 (ABNT, 2005). Os corpos de prova foram lixados antes da realização do ensaio e suas massas foram determinadas nos tempos de 10 minutos e 90 minutos após o início do ensaio.

3.3.3.4 Módulo de elasticidade estático

O método empregado para avaliação do módulo de elasticidade estático das argamassas em estudo foi proposto por Marques et al. (2020). O ensaio foi conduzido utilizando a mesma prensa utilizada para a determinação do comportamento mecânico, empregando corpos de prova prismáticos com dimensões de 4 x 4 x 16 cm. O procedimento, conforme descrito pelos autores, consiste na aplicação de três ciclos de carga de compressão, conforme ilustrado na Figura 17, com uma taxa de velocidade de 0,375 mm/min. Após esse processo, é calculada a curva média de carregamento, excluindo-se os dados próximos ao momento de inversão entre cada ciclo.

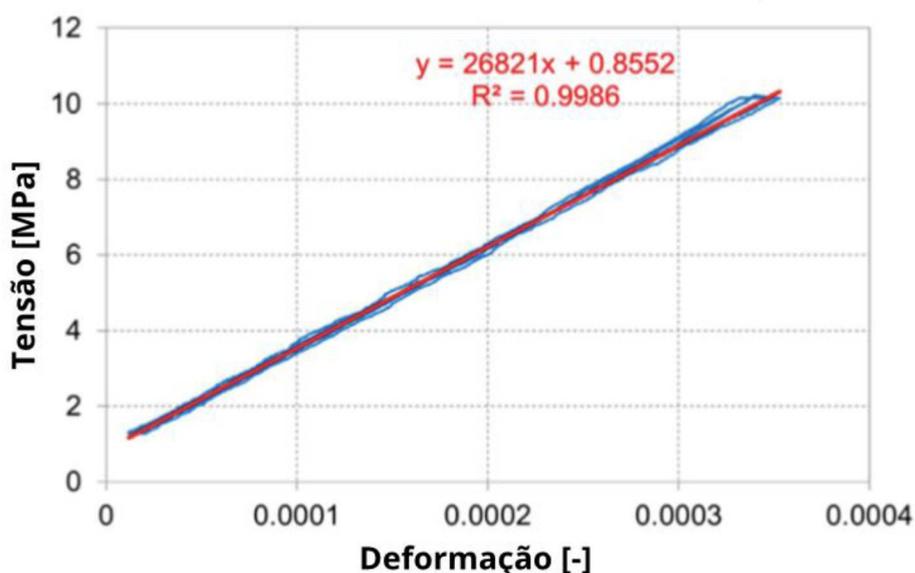
FIGURA 16 - CICLAGEM DE CARGA DE COMPRESSÃO



FONTE: MARQUES *et al.* (2020).

Conforme indicado pelos autores, esses dados costumam representar uma variação de aproximadamente 5% da carga aplicada. Posteriormente, por meio de uma regressão linear dos dados calculados, é obtida a reta que representa a curva tensão x deformação, conforme ilustrado na Figura 18. De acordo com os princípios da Lei de *Hooke*, a inclinação dessa reta de tensão x deformação corresponderá ao valor do módulo estático. Neste estudo, esse valor foi determinado para os seis corpos de prova destinados a esse ensaio em cada formulação analisada.

FIGURA 17 - CURVA MÉDIA TENSÃO X DEFORMAÇÃO



FONTE: MARQUES *et al.* (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios detalhados no programa experimental estão apresentados a seguir.

4.1 ESTUDO DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

4.1.1 Etapa II - Método experimental Wong e Kwan para os materiais

O método experimental de Wong e Kwan foi seguido conforme descrito no item 2.2.1 e apêndice A desse trabalho. As Tabelas 25, 26 e 27 e Gráficos 6, 7 e 8 apresentam os valores obtidos nesse método para o cimento, cal e fíler, respectivamente. A Tabela 28 apresenta os resultados de índice de vazios mínimo e da concentração de sólidos máxima dos três materiais. Para melhor entendimento dos dados fornecidos das Tabelas, u_w se refere à relação a/finos em volume, R_{cimento} ao volume do cimento em relação ao volume total de sólidos, V_c é volume de sólidos dos materiais finos presentes na pasta e V_w é o volume da água dos materiais em pasta.

TABELA 25 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL DE WONG E KWAN PARA O CIMENTO

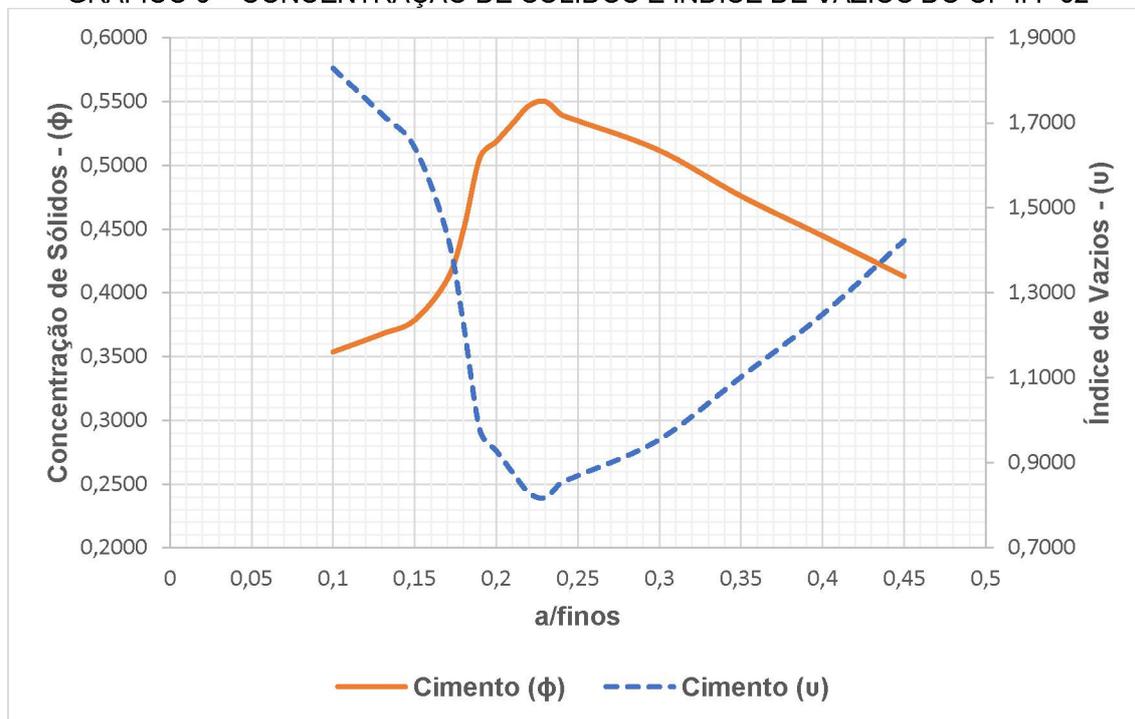
a/finos (massa)	u_w	R_{cimento}	Massa da pasta (kg)	V_c (m ³)	V_w (m ³)	Índice de Vazios - (u)	Concentração de Sólidos - (ϕ)
0,10	0,31	1	0,482	0,000140	0,000044	1,828	0,354
0,13	0,41	1	0,514	0,000146	0,000059	1,720	0,368
0,15	0,47	1	0,539	0,000150	0,000070	1,642	0,378
0,17	0,53	1	0,595	0,000163	0,000086	1,436	0,410
0,18	0,56	1	0,657	0,000179	0,000100	1,226	0,449
0,19	0,59	1	0,745	0,000201	0,000119	0,977	0,506
0,20	0,62	1	0,770	0,000206	0,000128	0,929	0,518
0,21	0,65	1	0,798	0,000212	0,000139	0,877	0,533
0,22	0,69	1	0,826	0,000217	0,000149	0,830	0,546
0,23	0,72	1	0,838	0,000219	0,000157	0,818	0,550
0,24	0,75	1	0,829	0,000214	0,000160	0,853	0,540
0,25	0,78	1	0,828	0,000213	0,000166	0,869	0,535
0,30	0,93	1	0,824	0,000203	0,000190	0,954	0,512
0,35	1,09	1	0,796	0,000189	0,000206	1,101	0,476

0,40	1,25	1	0,771	0,000177	0,000220	1,249	0,445
0,45	1,40	1	0,741	0,000164	0,000230	1,423	0,413

FONTE: A autora (2023).

NOTA: os valores destacados estão relacionados à densidade de empacotamento máxima

GRÁFICO 6 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DO CP II F 32



FONTE: A autora (2023).

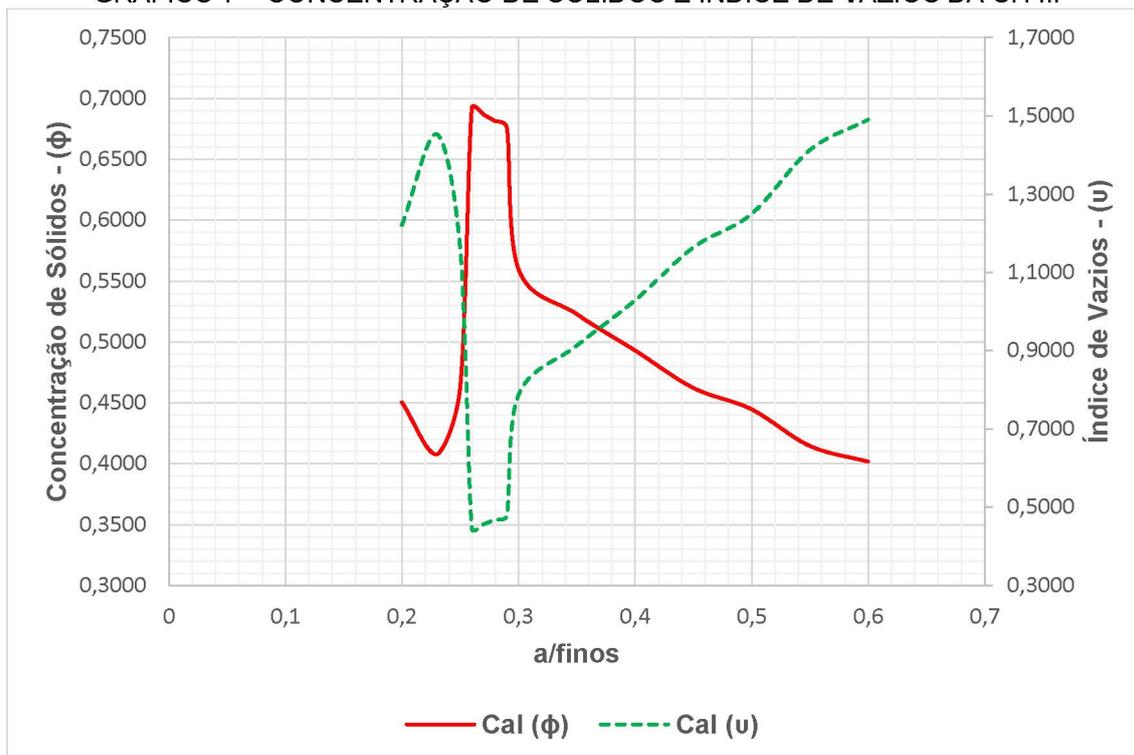
TABELA 26 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL DE WONG E KWAN PARA A CAL

a/finos (massa)	u_w	R_{cimento}	Massa da pasta (kg)	V_c (m ³)	V_w (m ³)	Índice de Vazios - (u)	Concentração de Sólidos - (φ)
0,20	0,48	1	0,513	0,000179	0,000086	1,220	0,450
0,23	0,55	1	0,476	0,000162	0,000089	1,453	0,408
0,25	0,60	1	0,549	0,000184	0,000110	1,161	0,463
0,26	0,62	1	0,828	0,000275	0,000171	0,445	0,692
0,27	0,65	1	0,828	0,000273	0,000176	0,456	0,687
0,28	0,67	1	0,828	0,000271	0,000181	0,468	0,681
0,29	0,69	1	0,828	0,000269	0,000186	0,479	0,676
0,30	0,72	1	0,691	0,000222	0,000159	0,786	0,560
0,35	0,84	1	0,670	0,000208	0,000174	0,913	0,523
0,40	0,96	1	0,655	0,000196	0,000187	1,028	0,493
0,45	1,08	1	0,636	0,000184	0,000198	1,163	0,462
0,50	1,19	1	0,633	0,000177	0,000211	1,249	0,445
0,55	1,31	1	0,610	0,000165	0,000216	1,412	0,414
0,60	1,43	1	0,610	0,000160	0,000229	1,490	0,402

FONTE: A autora (2023).

NOTA: os valores destacados estão relacionados à densidade de empacotamento máxima

GRÁFICO 7 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DA CH III



FONTE: A autora (2023).

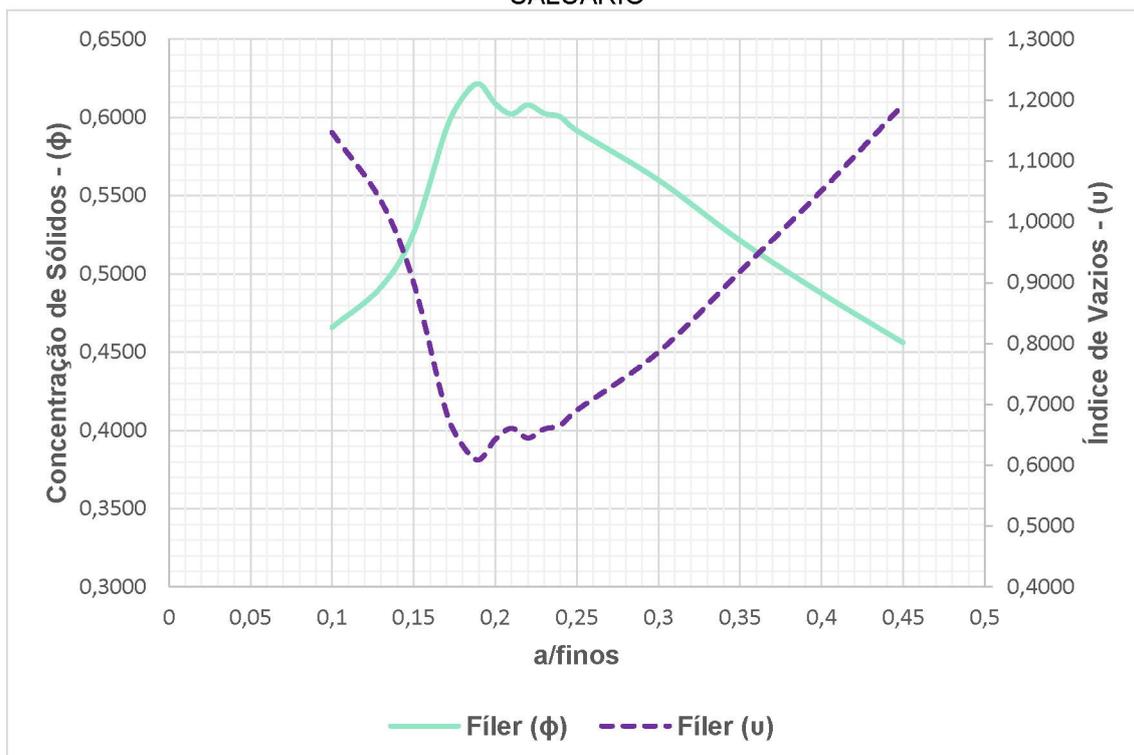
TABELA 27 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL DE WONG E KWAN PARA O FÍLER DE CALCÁRIO

a/finos (massa)	u_w	R_{cimento}	Massa da pasta (kg)	V_c (m ³)	V_w (m ³)	Índice de Vazios - (u)	Concentração de Sólidos - (ϕ)
0,10	0,27	1	0,553	0,000185	0,000050	1,147	0,466
0,13	0,35	1	0,599	0,000195	0,000069	1,034	0,492
0,15	0,41	1	0,653	0,000209	0,000085	0,900	0,526
0,17	0,46	1	0,748	0,000235	0,000109	0,688	0,592
0,18	0,49	1	0,780	0,000243	0,000119	0,633	0,612
0,19	0,52	1	0,798	0,000247	0,000127	0,609	0,621
0,20	0,54	1	0,788	0,000242	0,000131	0,642	0,609
0,21	0,57	1	0,786	0,000239	0,000136	0,660	0,602
0,22	0,60	1	0,800	0,000242	0,000144	0,645	0,608
0,23	0,62	1	0,800	0,000239	0,000150	0,659	0,603
0,24	0,65	1	0,803	0,000239	0,000155	0,666	0,600
0,25	0,68	1	0,798	0,000235	0,000160	0,690	0,592
0,30	0,81	1	0,786	0,000223	0,000181	0,786	0,560
0,35	0,95	1	0,759	0,000207	0,000197	0,918	0,521
0,40	1,09	1	0,737	0,000194	0,000210	1,051	0,4877
0,45	1,22	1	0,714	0,000181	0,000221	1,193	0,456

FONTE: A autora (2023).

NOTA: os valores destacados estão relacionados à densidade de empacotamento máxima

GRÁFICO 8 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DO FÍLER DE CALCÁRIO



FONTE: A autora (2023).

TABELA 28 - ÍNDICE DE VAZIOS MÍNIMO E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS MÁXIMA PARA OS MATERIAIS INDIVIDUAIS

Material	a/finos (massa)	Índice de Vazios - (u)	Concentração de Sólidos - (φ)
CP II F 32	0,23	0,818	0,550
CH III	0,26	0,445	0,692
Fíler de calcário	0,19	0,609	0,621

FONTE: A autora (2023).

A densidade de empacotamento individual do agregado miúdo foi determinada em condições secas, conforme descrito anteriormente, seguindo o procedimento estabelecido na norma NBR 16972 (ABNT, 2021). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 29.

TABELA 29 - DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO NA CONDIÇÃO SECA PARA O AGREGADO MIÚDO

Agregado miúdo	M.E. (kg/m³)	M.U. (kg/m³)	D50 (µm)	Índice de Vazios (-)	Densidade de empacotamento (-)
Areia artificial	3237	1493,32	58,37	0,513	0,487

FONTE: A autora (2023).

Após a análise dos dados apresentados no Gráfico 6 e na Tabela 25, constatou-se que a concentração máxima de sólidos para o cimento CP II F 32

foi de 0,5501, correspondendo a um índice de vazios mínimo de 0,8180. Essa concentração máxima de sólidos e o correspondente índice de vazios mínimo refletem a densidade de empacotamento do cimento em sua condição úmida. Para alcançar essa densidade de empacotamento, foi necessária uma relação água/materiais finos de 0,23 (em massa). Quanto à cal hidratada, observou-se que o ponto crítico, caracterizado pelo índice de vazios mínimo de 0,4446 e pela concentração de sólidos máxima de 0,6922, corresponde a uma relação a /finos de 0,26. Para o fíler de calcário, os dados indicam que o ponto crítico é definido pelos valores de 0,6090 para o índice de vazios e 0,6215 para a concentração de sólidos, os quais estão associados a uma relação a /finos de 0,19.

A discrepância na densidade de empacotamento entre a cal, o cimento e o fíler de calcário pode ser atribuída às suas distintas características físicas. A cal hidratada, caracterizada por sua granulometria mais uniforme conforme a curva granulométrica apresentada, favorece um empacotamento mais eficiente das partículas devido à sua distribuição granulométrica homogênea. Sua natureza química hidrofílica facilita a interação com a água, promovendo a formação de uma estrutura compacta e coesa. Em contraste, o cimento *Portland*, com partículas de tamanho intermediário e uma distribuição granulométrica mais heterogênea conforme evidenciado pela curva granulométrica, apresenta uma menor densidade de empacotamento devido à sua dificuldade em compactar eficientemente as partículas. No ensaio, o cimento é compactado pelo processo de aplicação de pressão mecânica, o que busca reduzir os espaços vazios entre as partículas.

Já o fíler de calcário, que apresentou concentração máxima de sólidos com a menor relação a /finos em comparação aos outros materiais, possui características específicas que favorecem o empacotamento eficiente das partículas. Composto por partículas finas e distribuição granulométrica uniforme, o fíler de calcário resulta em uma estrutura compacta. Além disso, sua capacidade de retenção de água contribui para a formação de uma estrutura coesa, mesmo com uma menor quantidade de água em relação aos materiais finos.

4.1.2 Etapa II - Modelo analítico CPM (De Larrard) para o conjunto granular

Após a determinação da densidade de empacotamento para os materiais individuais, o modelo CPM foi aplicado utilizando-se os resultados obtidos no método experimental de Wong e Kwan, seguindo procedimento descrito no item 2.2.2 e no apêndice B desse trabalho. O valor de K (índice de compactação), o qual depende do método de compactação aplicado, foi adotado conforme Fennis (2011) e definido como 12 (compactação molhada). Esse valor depende do método de compactação, conforme Tabela 30 indica.

TABELA 30 - VALOR DE K PARA DIFERENTES MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO

COMPACTAÇÃO SECA				COMPACTAÇÃO MOLHADA	
Sem vibração	Vibração com haste	Vibração	Vibração + compressão de 10 kPa	Demanda de água	Proctor teste*
4,1	4,5	4,75	9	6,7	12

*Valor proposto por Fennis (2011) para a adaptacao do metodo de Wong e Kwan (2008)
 FONTE: Adaptado de DE LARRAD (1999) e FENNIS (2011).

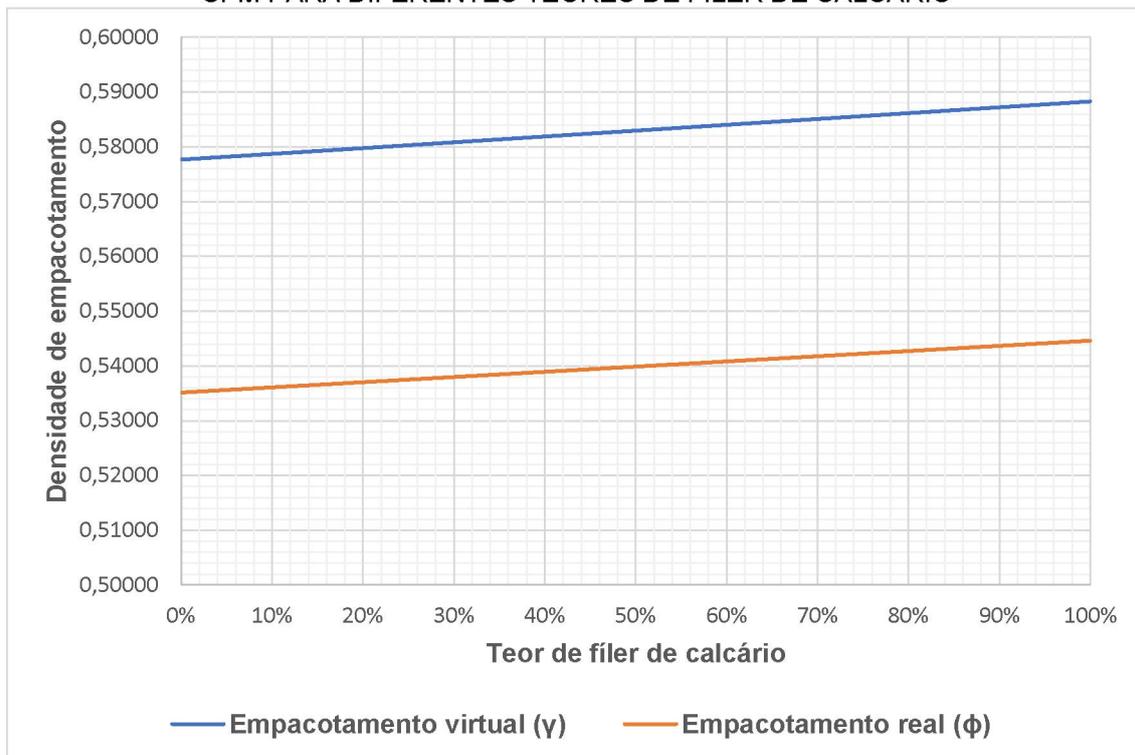
Os valores para empacotamento virtual e real obtidos pelo modelo CPM estão indicados na Tabela 31. O Gráfico 10 demonstra como os valores se comportam, de forma a facilitar o entendimento da tendência dos valores de densidade de empacotamento.

TABELA 31 - VALORES DE EMPACOTAMENTOS VIRTUAL E REAL ATRAVÉS DO MODELO CPM PARA DIFERENTES TEORES DE FÍLER DE CALCÁRIO

Teor de fíler	Empacotamento virtual (γ)	Empacotamento real (ϕ)
0%	0,57765	0,53512
2%	0,57786	0,53531
4%	0,57807	0,53550
6%	0,57828	0,53569
8%	0,57849	0,53588
10%	0,57869	0,53607
12%	0,57890	0,53625
14%	0,57911	0,53644
16%	0,57932	0,53663
18%	0,57953	0,53682
20%	0,57974	0,53701
22%	0,57995	0,53720
100%	0,58826	0,54460

FONTE: A autora (2023).

GRÁFICO 9 - VALORES DE EMPACOTAMENTOS VIRTUAL E REAL ATRAVÉS DO MODELO CPM PARA DIFERENTES TEORES DE FÍLER DE CALCÁRIO



FONTE: A autora (2023).

Ao analisar os dados obtidos, observa-se uma tendência de aumento na densidade de empacotamento com o incremento nos teores de substituição do cimento pelo fíler de calcário. Isso sugere que as características físicas do fíler, como a forma das partículas, a distribuição granulométrica, e a textura da superfície, contribuem significativamente para a compactação eficiente da argamassa. Com os resultados de empacotamento virtual e real pelo modelo CPM observa-se que a tendência é de que o maior valor de empacotamento seja com 100% de substituição do cimento pelo fíler de calcário, demonstrando que a substituição completa do cimento pelo fíler pode ser mais eficaz para o empacotamento de partículas da mistura, do que manter uma porcentagem de cimento na composição.

Conforme citado no item 3.2, foram calculados os empacotamentos para diversos cenários, como por exemplo para os materiais individuais (100% de areia, 100% de cimento, 100% fíler e 100% de cal) e para pastas fictícias (50% de cimento com 50% de cal, 50% de fíler com 50% de cal e 50% de cimento com 50% de fíler). Os valores obtidos nos cálculos de empacotamentos virtual e real

para os materiais individuais e pastas fictícias estão indicados nas Tabelas 32 e 33.

TABELA 32 - VALORES DE EMPACOTAMENTOS VIRTUAL E REAL ATRAVÉS DO MODELO CPM PARA OS MATERIAIS INDIVIDUAIS

Material	Empacotamento virtual (γ)	Empacotamento real (ϕ)
100% AA	0,487	0,449
100% CP II F 32	0,550	0,508
100% FÍLER	0,621	0,574
100% CH III	0,692	0,639

FONTE: A autora (2023).

TABELA 33 - VALORES DE EMPACOTAMENTOS VIRTUAL E REAL ATRAVÉS DO MODELO CPM PARA AS DIFERENTES PASTAS

Pasta	Empacotamento virtual (γ)	Empacotamento real (ϕ)
Cimento/Cal	0,715	0,666
Fíler/Cal	0,718	0,675
Cimento/Fíler	0,602	0,562

FONTE: A autora (2023).

Quanto aos empacotamentos virtual e real dos materiais individuais, os resultados corroboram com as observações experimentais anteriores, indicando que os materiais com maiores densidades de empacotamento são, em ordem decrescente: cal, fíler, cimento e areia artificial. A menor densidade de empacotamento da areia artificial é atribuída ao tamanho dos grãos, que são maiores, resultando em uma menor capacidade de preencher eficientemente os vazios.

A Tabela 32 mostra que o empacotamento real do cimento Portland (CP II F 32) é de 0,508, enquanto o do fíler de calcário é de 0,574 e o da cal (CH III) é de 0,639. Isso significa que a cal tem a maior densidade de empacotamento real entre os materiais analisados, seguida pelo fíler e, por último, o cimento. Os valores do empacotamento experimental são muito próximos aos calculados pelo modelo CPM, com variações mínimas que indicam a precisão do modelo. Para o cimento a concentração de sólidos experimental (0,550) e o valor do modelo CPM (0,508) mostram uma leve diferença, sugerindo que as condições experimentais permitem um empacotamento ligeiramente mais denso. Para o fíler, tanto o valor experimental (0,621) quanto o calculado (0,574) confirmam a eficiência do fíler em empacotar eficientemente. Por fim, para a cal os valores

são quase idênticos, com o experimental (0,692) e o modelo (0,639), indicando que a cal, por sua distribuição granulométrica, proporciona um empacotamento denso conforme previsto pelo modelo. A densidade de empacotamento mais alta da cal está associada à sua granulometria e forma de partículas que favorecem um ajuste mais compacto. A ligeira discrepância entre os valores experimentais e analíticos pode ser atribuída a variáveis práticas, como o processo de compactação utilizado no ensaio.

Analisando as pastas fictícias, as pastas contendo cal apresentam um empacotamento real significativamente superior, como visto na pasta Cimento/Cal (0,666) e Fíler/Cal (0,675), em comparação com a pasta Cimento/Fíler (0,562). Isso reforça a ideia de que a presença de cal melhora o empacotamento devido à sua capacidade de preencher vazios de maneira mais eficiente, atribuída às suas propriedades físicas. A adição de cal resulta em melhores condições de empacotamento, reforçando sua função como agente que melhora a coesão na matriz de partículas finas. Comparando as pastas, observa-se que o cimento, quando combinado com fíler, apresenta uma menor capacidade de empacotamento, o que pode estar relacionada à interação entre as partículas do cimento e do fíler, como aglomerações ou incompatibilidades granulométricas.

Comparando os valores obtidos para as argamassas fictícias em que há a substituição parcial e total do cimento pelo fíler de calcário é possível observar que os valores de empacotamento virtual e real aumentam progressivamente com o aumento do teor de fíler, passando de 0,535 (0%) para 0,545 (100%). A tendência indica que a adição de fíler melhora o empacotamento global da argamassa, maximizando a densidade do material. O incremento do teor de fíler eleva a densidade de empacotamento, uma vez que partículas menores ocupam vazios entre as partículas maiores do cimento. A observação sugere que, do ponto de vista físico, o fíler pode substituir eficientemente o cimento em termos de densidade e compacidade da matriz. No entanto, é importante destacar que essa substituição deve ser equilibrada, pois, na prática, uma redução excessiva de cimento pode comprometer a hidratação adequada e, conseqüentemente, o desenvolvimento das propriedades mecânicas do material.

Comparando os resultados entre o modelo CPM e o método experimental de Wong e Kwan, o modelo CPM demonstra uma boa correlação

com os valores experimentais, mas com pequenas variações que destacam a influência de fatores práticos, como a compactação e a reatividade dos materiais, no empacotamento experimental. A proximidade dos resultados destaca a precisão do modelo CPM em prever a densidade de empacotamento de materiais com diferentes características físicas e químicas.

Em relação aos materiais, o filer de calcário desempenha um papel importante na melhoria do empacotamento em misturas cimentícias, enquanto a cal, com sua granulometria e propriedades reativas, também aumenta significativamente a densidade de empacotamento. Embora o cimento tenha a menor densidade de empacotamento, sua função como aglomerante não pode ser negligenciada em aplicações onde a resistência final é crítica. A combinação estratégica de materiais, considerando suas propriedades físicas e químicas, pode otimizar o desempenho da mistura em termos de compacidade e resistência.

4.1.3 Etapa adicional - Método experimental Wong e Kwan para o conjunto granular

Para finalizar o estudo de empacotamento de partículas foi efetuado o método experimental do conjunto granular nas argamassas com teores de 0%, 4%, 10%, 16% e 20% e os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 34, 35, 36, 37 e 38 e nos Gráficos 10, 11, 12, 13 e 14. A Tabela 39 apresenta um resumo com os dados de índice de vazios e concentração de sólidos dos cinco conjuntos granulares. Esses teores foram escolhidos para que houvesse intervalos entre os teores definidos para as argamassas estudadas (15%, 20% e 25%) e assim fosse possível analisar teores próximos e com pequenos incrementos.

TABELA 34 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL WONG E KWAN PARA O CONJUNTO GRANULAR COM 0% DE TEOR DE FÍLER

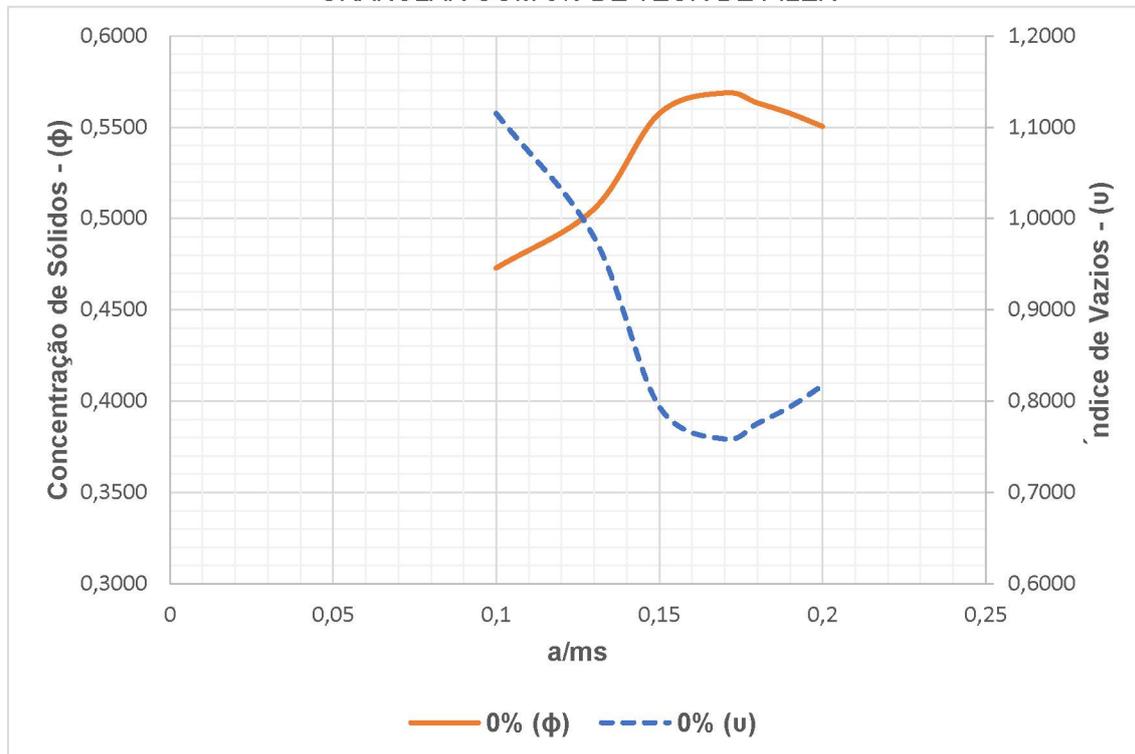
a/ms (massa)	Massa da pasta (kg)	Vc (m ³)	Vw (m ³)	Índice de Vazios - (u)	Concentração de Sólidos - (ϕ)
0,10	0,654	0,000188	0,000059	1,115	0,473
0,13	0,717	0,000201	0,000082	0,979	0,505
0,15	0,805	0,000221	0,000104	0,794	0,557
0,17	0,836	0,000226	0,000121	0,758	0,569
0,18	0,835	0,000224	0,000127	0,775	0,563
0,19	0,833	0,000222	0,000132	0,793	0,558

0,20	0,830	0,000219	0,000138	0,817	0,550
------	-------	----------	----------	-------	-------

FONTE: A autora (2023).

NOTA: os valores destacados estão relacionados à densidade de empacotamento máxima

GRÁFICO 10 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DO CONJUNTO GRANULAR COM 0% DE TEOR DE FÍLER



FONTE: A autora (2023).

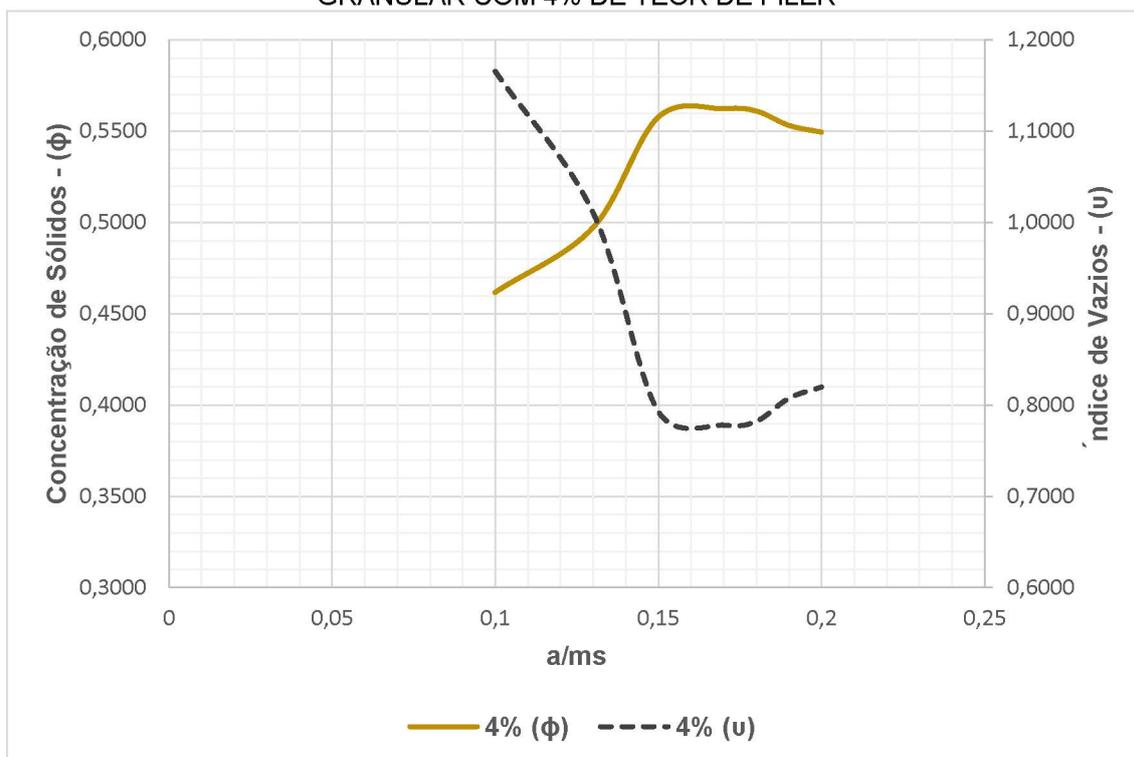
TABELA 35 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL WONG E KWAN PARA O CONJUNTO GRANULAR COM 4% DE TEOR DE FÍLER

a/ms (massa)	Massa da pasta (kg)	Vc (m³)	Vw (m³)	Índice de Vazios - (u)	Concentração de Sólidos - (φ)
0,1	0,638	0,000183	0,000058	1,166	0,462
0,13	0,706	0,000198	0,000081	1,011	0,497
0,15	0,805	0,000222	0,000104	0,793	0,558
0,17	0,826	0,000223	0,000119	0,778	0,562
0,18	0,831	0,000223	0,000126	0,782	0,561
0,19	0,827	0,000220	0,000131	0,807	0,553
0,2	0,828	0,000218	0,000137	0,820	0,549

FONTE: A autora (2023).

NOTA: os valores destacados estão relacionados à densidade de empacotamento máxima

GRÁFICO 11 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DO CONJUNTO GRANULAR COM 4% DE TEOR DE FÍLER



FONTE: A autora (2023).

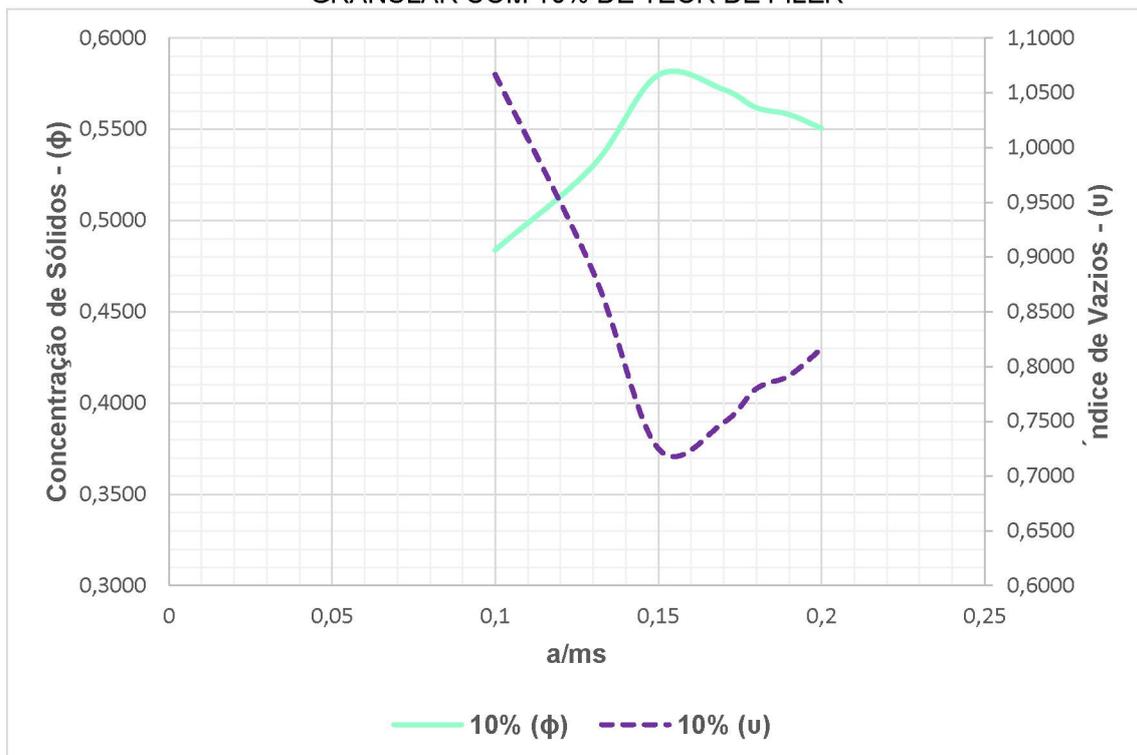
TABELA 36 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL WONG E KWAN PARA O CONJUNTO GRANULAR COM 10% DE TEOR DE FÍLER

a/ms (massa)	Massa da pasta (kg)	Vc (m³)	Vw (m³)	Índice de Vazios - (u)	Concentração de Sólidos - (φ)
0,1	0,668	0,000192	0,000060	1,067	0,484
0,13	0,752	0,000211	0,000086	0,887	0,530
0,15	0,836	0,000230	0,000108	0,725	0,580
0,17	0,839	0,000227	0,000121	0,749	0,572
0,18	0,832	0,000223	0,000126	0,780	0,562
0,19	0,833	0,000222	0,000132	0,792	0,558
0,2	0,829	0,000219	0,000137	0,816	0,551

FONTE: A autora (2023).

NOTA: os valores destacados estão relacionados à densidade de empacotamento máxima

GRÁFICO 12 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DO CONJUNTO GRANULAR COM 10% DE TEOR DE FÍLER



FONTE: A autora (2023).

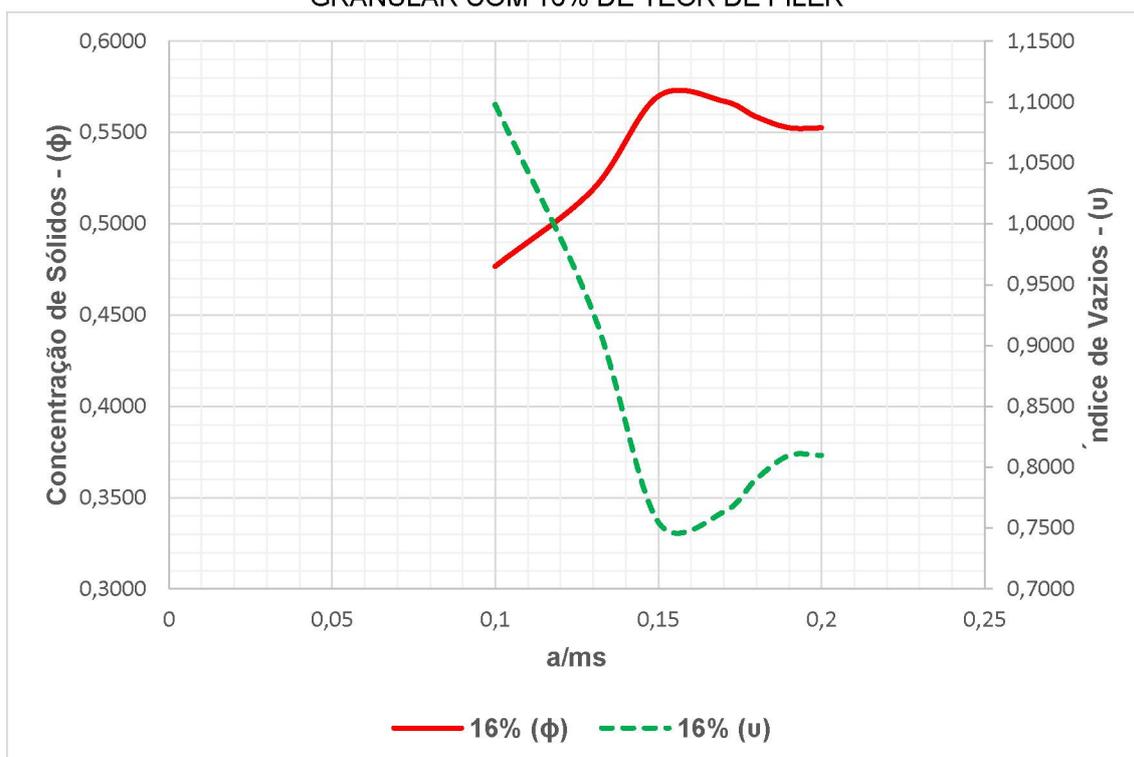
TABELA 37 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL WONG E KWAN PARA O CONJUNTO GRANULAR COM 16% DE TEOR DE FÍLER

a/ms (massa)	Massa da pasta (kg)	Vc (m³)	Vw (m³)	Índice de Vazios - (u)	Concentração de Sólidos - (φ)
0,1	0,657	0,000189	0,000059	1,098	0,477
0,13	0,735	0,000206	0,000084	0,927	0,519
0,15	0,822	0,000226	0,000107	0,755	0,570
0,17	0,832	0,000225	0,000120	0,763	0,567
0,18	0,826	0,000222	0,000125	0,790	0,559
0,19	0,824	0,000220	0,000131	0,809	0,553
0,2	0,831	0,000220	0,000138	0,810	0,552

FONTE: A autora (2023).

NOTA: os valores destacados estão relacionados à densidade de empacotamento máxima

GRÁFICO 13 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DO CONJUNTO GRANULAR COM 16% DE TEOR DE FÍLER



FONTE: A autora (2023).

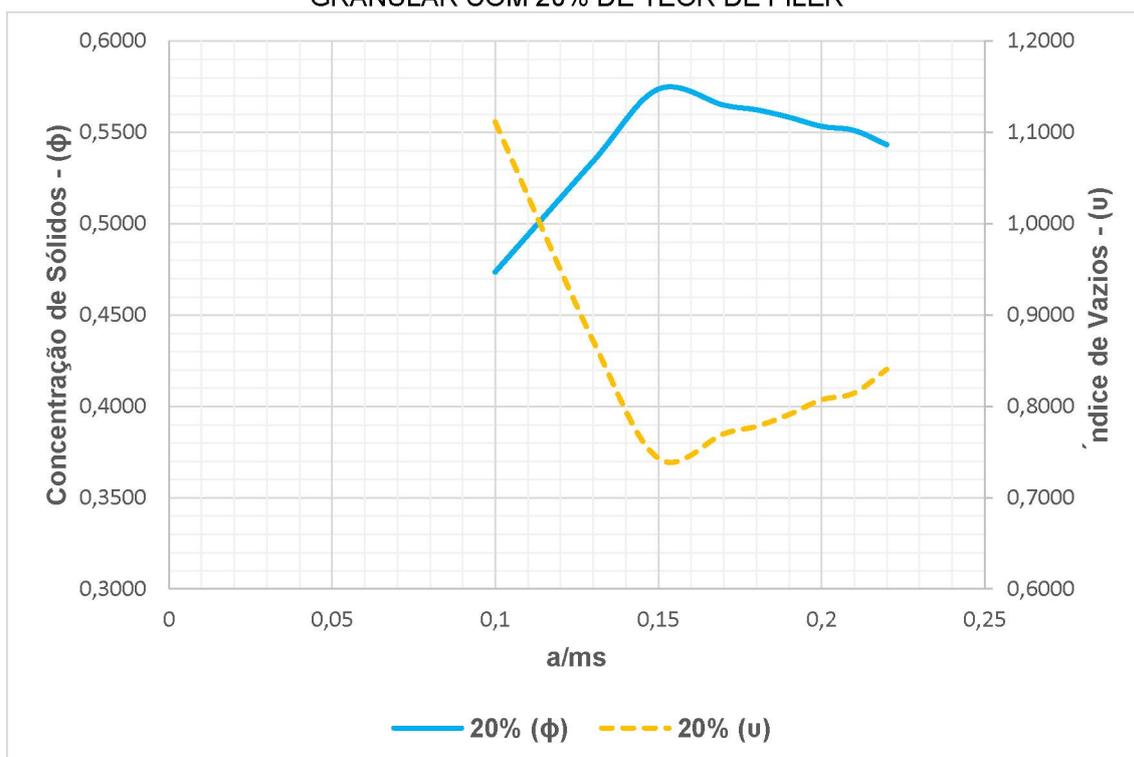
TABELA 38 - VALORES OBTIDOS NO MÉTODO EXPERIMENTAL WONG E KWAN PARA O CONJUNTO GRANULAR COM 20% DE TEOR DE FÍLER

a/ms (massa)	Massa da pasta (kg)	V _c (m ³)	V _w (m ³)	Índice de Vazios - (u)	Concentração de Sólidos - (φ)
0,1	0,653	0,000188	0,000059	1,111	0,474
0,13	0,756	0,000212	0,000087	0,872	0,534
0,15	0,827	0,000228	0,000107	0,743	0,574
0,17	0,828	0,000224	0,000120	0,770	0,565
0,18	0,831	0,000223	0,000126	0,778	0,562
0,19	0,832	0,000222	0,000132	0,791	0,558
0,2	0,832	0,000220	0,000138	0,807	0,553
0,21	0,835	0,000219	0,000144	0,814	0,551
0,22	0,830	0,000216	0,000149	0,840	0,543

FONTE: A autora (2023).

NOTA: os valores destacados estão relacionados à densidade de empacotamento máxima

GRÁFICO 14 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ÍNDICE DE VAZIOS DO CONJUNTO GRANULAR COM 20% DE TEOR DE FÍLER



FONTE: A autora (2023).

TABELA 39 - ÍNDICE DE VAZIOS E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS PARA OS CONJUNTOS GRANULARES

Argamassa	a/ms (massa)	Índice de Vazios - (u)	Concentração de Sólidos - (φ)
0%	0,17	0,758	0,569
4%	0,17	0,778	0,562
10%	0,15	0,725	0,580
16%	0,15	0,755	0,570
20%	0,15	0,743	0,574

FONTE: A autora (2023).

Ao examinar os resultados, observa-se uma proximidade entre os valores de empacotamento obtidos experimentalmente e aqueles calculados pelo modelo CPM, com uma pequena discrepância a favor dos valores experimentais. As argamassas ensaiadas no método experimental exibiram densidades de empacotamento mais elevadas na seguinte ordem decrescente: 10%, 20%, 16%, 0% e 4%. Notavelmente, as formulações com as menores concentrações de sólidos coincidiram com as argamassas que apresentaram uma relação água/materiais secos mais elevada. Isso pode ser atribuído à predominância de partículas de cimento nessas composições, cuja granulometria menos eficiente no empacotamento aumentou a demanda de água para preencher os vazios entre as partículas.

Por outro lado, as formulações com maiores proporções de fíler, um material inerte com capacidade de retenção de água, possibilitaram a formação de uma estrutura coesa mesmo com uma quantidade reduzida de água. Esse fato também pode ter contribuído para o empacotamento, pois uma quantidade menor de água foi suficiente para umedecer as partículas e conferir coesão, enquanto uma quantidade maior de água resultou em espaçamento entre as partículas, aumentando o índice de vazios.

Além disso, é importante ressaltar que os resultados, por não terem seguido uma tendência linear de aumento da densidade de empacotamento à medida que o teor de fíler aumenta, diferentemente do previsto pelo modelo CPM, se deve principalmente pelo modelo CPM ter sido desenvolvido para agregados. Além disso, os resultados podem ter sido influenciados por fatores externos. Essa influência pode ser atribuída a compactação no momento do ensaio, a qual foi aplicada através de quedas na mesa de consistência, a variações nas características específicas dos materiais utilizados, como a forma das partículas, a distribuição granulométrica e a interação entre os componentes da argamassa. Esses fatores podem ter contribuído para variações nas propriedades físicas da mistura, resultando em diferenças nos resultados entre o método experimental e o modelo CPM.

Os resultados experimentais apresentaram, em geral, maiores densidades de empacotamento. Esta diferença pode ser atribuída à influência de fatores não considerados pelo modelo CPM, como a forma das partículas e a distribuição granulométrica específica dos materiais. Observou-se que a introdução de fíler de calcário, mesmo em proporções menores, favoreceu um empacotamento mais eficiente. As misturas com 10% e 20% de substituição demonstraram as maiores densidades de empacotamento, sugerindo que há um teor ótimo de substituição que maximiza a eficiência do empacotamento, enquanto proporções mais elevadas podem não ser tão eficazes.

As misturas com uma relação água/materiais secos mais elevada apresentaram menores concentrações de sólidos. Isso reforça a hipótese de que a água, quando em excesso, pode aumentar o índice de vazios, resultando em empacotamento menos denso devido ao espaçamento entre as partículas.

A densidade de empacotamento não seguiu uma tendência linear com o aumento do teor de fíler, diferentemente do que se esperava pelo modelo CPM.

Isso indica que a interação complexa entre os componentes da argamassa pode resultar em comportamentos não lineares, reforçando a importância de considerar variáveis experimentais, como condições de compactação e propriedades específicas dos materiais.

Esses resultados sugerem que, ao buscar a otimização das propriedades da argamassa, deve-se considerar a formulação de misturas com proporções específicas de fíler e água, a fim de maximizar a densidade de empacotamento e, conseqüentemente, a resistência e durabilidade do material.

4.2 ETAPA III – RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

4.2.1 Índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado

Os valores obtidos nos ensaios de índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado estão apresentados na Tabela 40.

TABELA 40 – RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE ESTADO FRESCO

Argamassa	Traço (volume)	Teor de fíler	a/ms	IC (mm)	Densidade (kg/m ³)	Teor de ar incorporado (%)
REF	1:1:6	0%	0,20	257,72	2014,50	13,05
ARG15	1:1:6	15%	0,20	259,73	2069,47	10,55
ARG20	1:1:6	20%	0,21	259,68	2081,24	9,02
ARG25	1:1:6	25%	0,21	264,56	2078,14	9,11

FONTE: A autora (2023).

Para as misturas REF e ARG15, a relação água/materiais secos (a/ms) é de 0,20, enquanto para ARG20 e ARG25, é de 0,21. Esse ligeiro aumento na relação a/ms nas misturas com maior teor de fíler (20% e 25%) sugere que a argamassa requer um pouco mais de água para manter a consistência desejada. Isso ocorre porque a presença de maior quantidade de fíler, que é um material mais fino, pode exigir mais água para garantir a trabalhabilidade, visto que sua superfície específica é maior (LI; KWAN, 2013). Apesar do aumento na relação a/ms, o índice de consistência não apresenta uma variação significativa, sugerindo que a argamassa atinge um equilíbrio entre trabalhabilidade e retenção de água com a adição de fíler até 25%.

Para o índice de consistência, todas as argamassas apresentaram valores dentro do intervalo de 260 ± 5 mm, que foi estabelecido como padrão

para definir a quantidade de água. O índice de consistência (IC) é uma medida da trabalhabilidade da argamassa, representando a facilidade com que a argamassa pode ser espalhada e manipulada. Os resultados mostram que, à medida que o teor de fíler aumenta de 0% (REF) para 25% (ARG25), o índice de consistência também aumenta ligeiramente de 257,72 mm para 264,56 mm. No entanto, observou-se que as argamassas contendo fíler demonstraram um índice de consistência ligeiramente maior em comparação com a argamassa de referência. A tendência observada sugere que a adição de fíler de calcário contribui para o aumento da fluidez e da trabalhabilidade da argamassa, o que pode ter acontecido pelos finos terem preenchido os vazios e dessa forma terem liberado água na mistura (FORTUNATO *et al.*, 2018).

No entanto, é importante destacar que, apesar da variação na relação água/materiais secos (a/ms) entre as argamassas com 20% e 25% de substituição de cimento por fíler, o aumento de água foi relativamente pequeno, passando de 0,20 para 0,21. Esse incremento é insuficiente para provocar mudanças significativas nas propriedades reológicas ou na consistência da argamassa (FENNIS, 2011). Dessa forma, o leve aumento na quantidade de água não altera de forma substancial o comportamento global da mistura, sendo a trabalhabilidade predominantemente influenciada pela incorporação dos finos de calcário, que melhora o empacotamento e, conseqüentemente, a mobilidade da mistura fresca através da criação de mais pasta. Embora o fíler de calcário seja um material inerte e não participe diretamente das reações químicas de hidratação, sua adição altera a distribuição granulométrica da mistura, o que afeta positivamente a trabalhabilidade. Ao preencher os espaços vazios entre as partículas maiores, o fíler melhora o empacotamento, o que reduz o atrito interno e facilita o movimento das partículas na matriz da argamassa. Isso ocorre especialmente em teores de até 20%, onde a trabalhabilidade é aprimorada. O fíler também age como um lubrificante interno, melhorando a mobilidade das partículas na matriz da argamassa. Essa melhoria na mobilidade se reflete nos valores de IC para a argamassa REF (257,72 mm) e ARG15 (259,73 mm), pois ambas as misturas têm a mesma relação a/ms, porém há um incremento no IC, indicando que com o aumento de teor de fíler as partículas se acomodam mais facilmente durante a aplicação.

Uma possível explicação para o aumento da densidade conforme a quantidade de fíler de calcário aumenta na mistura está na sua capacidade de preencher os espaços vazios entre as partículas maiores, resultando em um empacotamento mais eficiente (FENNIS, 2011). No estado fresco, o aumento do teor de fíler não necessariamente melhora a trabalhabilidade de forma direta, mas facilita o empacotamento das partículas, reduzindo o volume de vazios e, conseqüentemente, aumentando a densidade da argamassa. O fíler contribui para uma melhor coesão interna e, ao distribuir-se uniformemente na matriz, permite uma compactação mais eficaz, o que resulta em uma argamassa mais densa (FORTUNATO *et al.*, 2018). No entanto, vale ressaltar que a densidade não é o principal fator que determina a trabalhabilidade, que está mais relacionada à quantidade de água e à mobilidade da mistura durante o manuseio (LI; KWAN, 2013).

O fíler pode ter preenchido os vazios entre as partículas, resultado do empacotamento das partículas, o qual foi demonstrado no item 4.1.2, aumentando a coesão da mistura e resultando em uma maior densidade. Por estar no estado fresco a água está retida e faz parte do peso da argamassa, porém quando essa água evaporar no estado endurecido isso pode influenciar na densidade de massa aparente. Com $D_{10} = 2,534 \mu\text{m}$, $D_{50} = 14,48 \mu\text{m}$ e $D_{90} = 41,74 \mu\text{m}$, o fíler apresenta uma granulometria intermediária que melhora o empacotamento devido ao preenchimento de vazios entre as partículas de cimento. Essa característica é visível nas amostras ARG15, ARG20 e ARG25, onde a densidade aumenta progressivamente (de $2069,47 \text{ kg/m}^3$ a $2081,24 \text{ kg/m}^3$) e o teor de ar incorporado diminui (de 10,55% para 9,02%), indicando melhor compactação e redução de espaços vazios. A massa específica de $2,716 \text{ g/cm}^3$ é inferior à do cimento, mas o fíler atua como um material inerte que melhora o empacotamento, proporcionando maior densidade na mistura.

O aumento no teor de fíler de 15% a 25% resultou em um aumento na densidade da argamassa fresca, de $2069,47 \text{ kg/m}^3$ (ARG15) a $2081,24 \text{ kg/m}^3$ (ARG20), e um subseqüente leve decréscimo para $2078,14 \text{ kg/m}^3$ (ARG25). Este comportamento sugere que a substituição do cimento por fíler promoveu uma melhor compactação até certo ponto (20%), após o qual o aumento do teor de fíler começou a impactar negativamente a densidade devido a uma possível saturação do efeito de empacotamento ou maior retenção de água. Estudos

como os de Gonçalves *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2019) indicam que a adição de fíler de calcário até 20% pode melhorar as propriedades da argamassa, o que é corroborado pelos resultados obtidos, onde ARG20 apresentou a melhor combinação de densidade e menor teor de ar incorporado.

A incorporação de fíler na argamassa tende a aumentar a consistência e reduzir o teor de ar. O menor teor de ar incorporado em ARG20 (9,02%) em comparação com a argamassa de referência (REF) (13,05%) sugere que o fíler, atuando como microenchimento, melhora a coesão e a compactação da mistura, o que leva a um menor aprisionamento de ar na matriz. No entanto, é importante destacar que essa redução no teor de ar pode implicar em menor plasticidade, o que pode afetar a trabalhabilidade em certas condições. Para compreender melhor o impacto do fíler na trabalhabilidade, é essencial analisar os resultados do ensaio de squeeze flow, que fornecerão uma avaliação mais precisa sobre a mobilidade e a deformabilidade da argamassa no estado fresco.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o uso de fíler de calcário como substituto parcial do cimento até 20% pode ser benéfico para o empacotamento e a redução do teor de ar. O comportamento não-linear observado com a adição de mais de 20% de fíler sugere a necessidade de otimização para garantir que a eficiência do empacotamento não seja comprometida. A granulometria e as características físicas dos componentes são críticas para o desempenho da argamassa e devem ser cuidadosamente consideradas na formulação para atender aos requisitos de trabalhabilidade e durabilidade.

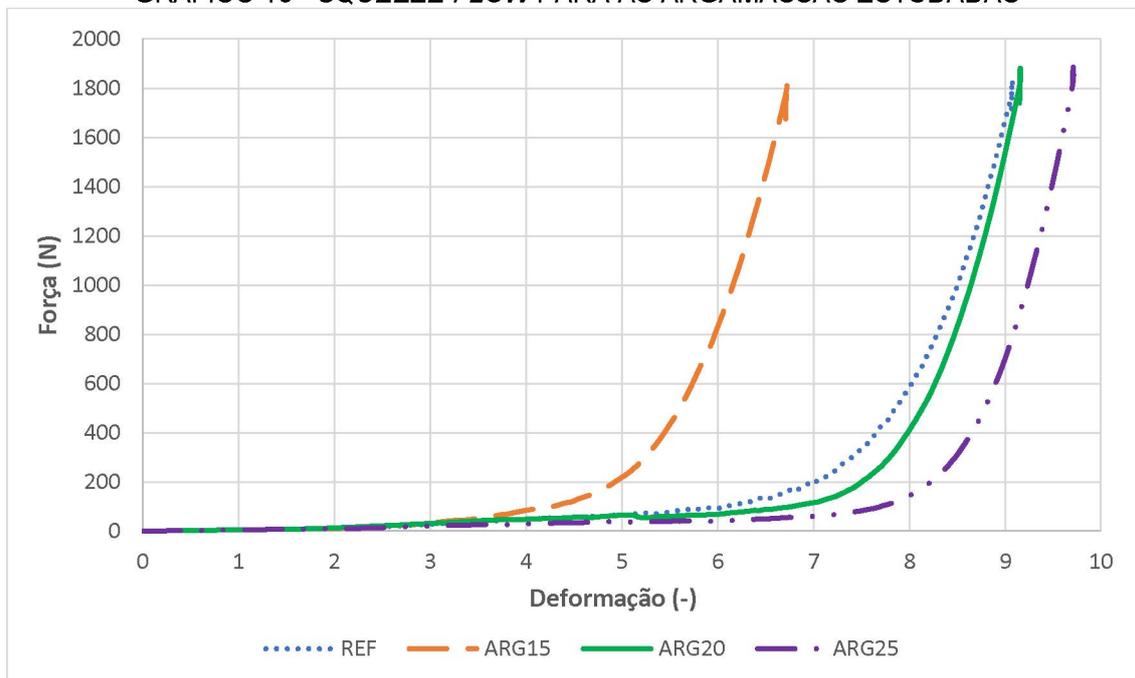
Em relação a densidade de massa no estado fresco, a norma NBR 13281-1 (ABNT, 2023) classifica todas essas argamassas como classe DF4, pois suas densidades resultaram maiores que 2000 kg/m³.

4.2.2 Squeeze flow

Os gráficos de *squeeze flow* para as argamassas estudadas estão apresentados individualmente no apêndice D. O Gráfico 15 apresenta as quatro argamassas estudadas reunidas a fim de comparação entre si. No Gráfico 16 estão indicados os resultados do *squeeze flow* para as argamassas testadas do conjunto granular no método experimental de Wong e Kwan, para comparação

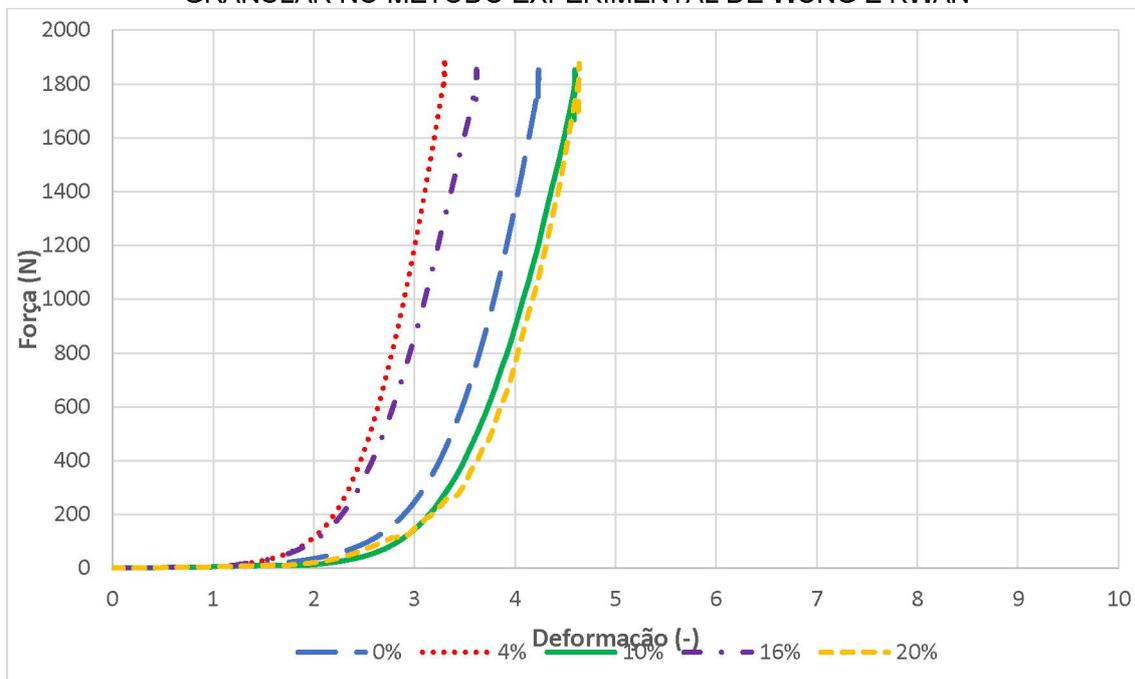
com os resultados obtidos para as argamassas estudadas. Vale ressaltar que o foco nesse ensaio foi analisar a trabalhabilidade a partir do teor de água mínima (argamassas comparativas) até o suficiente para proporcionar uma argamassa trabalhável (argamassas estudadas).

GRÁFICO 15 - SQUEEZE FLOW PARA AS ARGAMASSAS ESTUDADAS



FONTE: A autora (2023).

GRÁFICO 16 – SQUEEZE FLOW PARA AS ARGAMASSAS TESTADAS DO CONJUNTO GRANULAR NO MÉTODO EXPERIMENTAL DE WONG E KWAN



FONTE: A autora (2023).

Com os dados obtidos das curvas de *Squeeze flow*, foi possível identificar a deformação experimentada pela argamassa sob a aplicação de uma força (N) nos pontos de transição entre os estágios elástico e plástico. Isso permitiu determinar a deformação elástica máxima ($DE_{m\acute{a}x}$) e a força elástica máxima ($FE_{m\acute{a}x}$). Além disso, foram identificados os pontos de transição do estágio plástico para o de embricamento, definindo a deformação plástica máxima ($DP_{m\acute{a}x}$) e a força plástica máxima ($FP_{m\acute{a}x}$). As variações na deformação (Δ_{def}) e na força (ΔF) foram calculadas de acordo com as equações 10 e 11, respectivamente. As Tabelas 41 e 42 apresentam os valores obtidos e calculados dos pontos de mudança de estágio das argamassas que foram avaliadas pelo *squeeze flow*.

$$\Delta_{def} = DP_{m\acute{a}x} - DE_{m\acute{a}x} \quad (10)$$

$$\Delta F = FP_{m\acute{a}x} - FE_{m\acute{a}x} \quad (11)$$

TABELA 41 - PONTOS DE MUDANÇA DE ESTÁGIO DAS ARGAMASSAS ($DE_{m\acute{a}x}$)

ARGAMASSAS		$DE_{m\acute{a}x}$		Equação linear de tendência	R^2
		Deformação (-)	Força (N)		
ESTUDADAS	REF	2,17	12,7	$y = 5,6146x - 0,3731$	0,984
	ARG15	2,21	13,8	$y = 5,9946x - 0,644$	0,9708
	ARG20	2,25	17,3	$y = 7,6496x - 2,0347$	0,911
	ARG25	2,65	16,5	$y = 6,0852x - 1,6834$	0,9269
COMPARATIVAS	0%	1,55	14,7	$y = 9,3713x - 1,6978$	0,917
	4%	1,38	19,78	$y = 13,934x - 3,3659$	0,7771
	10%	1,95	11,79	$y = 6,012x - 0,2355$	0,9788
	16%	1,20	10	$y = 7,4111x - 0,6324$	0,8893
	20%	1,95	18,4	$y = 8,6526x - 2,0923$	0,8741

FONTE: A autora (2023).

TABELA 42 - PONTOS DE MUDANÇA DE ESTÁGIO DAS ARGAMASSAS ($DP_{m\acute{a}x}$)

ARGAMASSAS		$DP_{m\acute{a}x}$		Equação exponencial de tendência	R^2	Δ_{def} (-)	ΔF (N)
		Deformação (-)	Força (N)				
ESTUDADAS	REF	6,34	120	$y = 0,1452e^{1,0371x}$	0,9977	4,17	107,3
	ARG15	4,35	107,4	$y = 0,475e^{1,2341x}$	0,9975	2,14	93,6
	ARG20	6,98	114,3	$y = 0,0088e^{1,3415x}$	0,9983	4,73	97

	ARG25	7,47	80,9	$y = 0,0011e^{1,4823x}$	0,9978	4,82	64,4
COMPARATIVAS	0%	2,59	108,4	$y = 1,5539e^{1,6887x}$	0,9936	1,04	93,7
	4%	2,15	169	$y = 3,0098e^{1,9717x}$	0,9866	0,77	149,22
	10%	2,72	73,6	$y = 1,2534e^{1,6115x}$	0,9821	0,77	61,81
	16%	2,10	129,5	$y = 5,4273e^{1,6392x}$	0,9774	0,9	119,5
	20%	3,31	254,1	$y = 1,6513e^{1,518x}$	0,9935	1,36	235,7

FONTE: A autora (2023).

Ao analisar os resultados do ensaio de *squeeze flow* para as argamassas estudadas e comparativas, observam-se diferenças significativas no comportamento reológico, principalmente quando se comparam os teores de 0% e 20% de substituição de cimento por fíler calcário, comuns a ambos os métodos.

Começando com as argamassas estudadas, que tiveram a relação a/ms definida para atingir um índice de consistência i de 260 ± 5 mm, a argamassa REF (0% de fíler para a argamassa estudada) apresentou um valor de Δ_{def} igual a 4,17 e uma força máxima de 120 N, enquanto a argamassa comparativa com 0% de fíler, que foi ajustada para a maior densidade de empacotamento (água suficiente apenas para umedecer os grãos), obteve Δ_{def} de 1,04 e força máxima de 108,4 N. Isso indica que a argamassa estudada com 0% de teor de fíler alcançou um Δ_{def} aproximadamente 301% maior do que a argamassa comparativa, evidenciando uma maior trabalhabilidade. Essa diferença é decorrente da maior quantidade de água utilizada na argamassa estudada, resultando em uma mistura mais fluida e, portanto, mais fácil de espalhar durante o ensaio de *squeeze flow*.

Para o teor de 20% de fíler, a argamassa estudada mostrou um Δ_{def} de 4,73 e uma força máxima de 114,3 N. Em comparação, a argamassa comparativa com o mesmo teor apresentou um Δ_{def} significativamente menor, de 1,36, e uma força máxima muito maior, de 254,1 N. Isso indica que a argamassa estudada com 20% de fíler teve um Δ_{def} 248% maior do que a argamassa comparativa, refletindo novamente a maior trabalhabilidade devido à maior quantidade de água empregada na mistura. O aumento da força máxima na argamassa comparativa sugere uma maior resistência à compressão no início

do ensaio, provavelmente devido ao empacotamento mais eficiente das partículas, que resultou em uma estrutura mais compactada.

Comparando ainda os resultados para os teores de 0% e 20% nas argamassas estudadas, nota-se que o Δ_{def} aumentou de 4,17 para 4,73, representando um incremento de aproximadamente 13%. Por outro lado, ao comparar as argamassas comparativas nos mesmos teores, o Δ_{def} aumentou de 1,04 para 1,36, o que equivale a um aumento de cerca de 31%.

Esses dados sugerem que, mesmo com o incremento do teor de fíler, as argamassas estudadas mantêm uma maior trabalhabilidade devido à maior relação a/ms, que proporciona uma maior quantidade de água na mistura, facilitando o movimento das partículas e resultando em uma maior Δ_{def} (deformação). Por outro lado, as argamassas comparativas, com uma menor relação a/ms, têm uma quantidade de água apenas suficiente para umedecer os grãos, o que limita a fluidez da mistura e aumenta a coesão entre as partículas. Como resultado, essas argamassas apresentam maior resistência à força, pois a menor quantidade de água reduz o volume de poros, criando uma estrutura mais densa e compacta, mas com uma trabalhabilidade limitada. Portanto, o incremento do teor de água nas argamassas estudadas favorece a mobilidade das partículas, enquanto nas argamassas comparativas, a baixa quantidade de água prioriza a resistência mecânica.

Com base nos dados obtidos, analisando as argamassas estudadas (REF, ARG15, ARG20 e ARG25) é possível notar que as argamassas ARG25 e ARG20 demonstraram os maiores valores de Δ_{def} , com 4,82 e 4,73, respectivamente. Isso sugere que essas formulações possuem um estágio plástico mais prolongado, o que é indicativo de um desempenho superior em termos de aplicação. A menor variação de Δ_{def} observada na argamassa ARG15, com um valor de 2,14, indica que essa formulação apresentou uma menor extensão do estágio plástico, o que sugere uma dificuldade maior em se deformar. Isso pode ser explicado pelo fato de que, apesar de possuir um teor de fíler menor que a ARG20 e ARG25, a quantidade de fíler presente pode não ter sido suficiente para promover um efeito de "microenchimento" eficiente, necessário para melhorar a mobilidade interna das partículas. Além disso, com uma relação a/ms semelhante às demais, a ARG15 não apresenta um volume de água suficiente para lubrificar as partículas de forma a compensar o efeito de

menor coesão da mistura, resultando em uma trabalhabilidade reduzida. Portanto, a combinação de menor teor de fíler e limitada lubrificação pode justificar sua menor plasticidade.

Quanto à transição para o comportamento plástico, a argamassa ARG25 novamente se destacou com um $DP_{m\acute{a}x}$ de 7,47, indicando uma maior capacidade de deformação plástica antes de atingir o embricamento. Contudo, a força máxima registrada para ARG25 foi de 80,9 N, inferior a outras amostras, o que pode indicar uma menor resistência final ao carregamento.

No caso das argamassas comparativas, a mistura com 20% de substituição de cimento por fíler apresentou o maior valor de Δ_{def} , indicando um desempenho superior em termos de trabalhabilidade comparado às outras misturas experimentais. Isso pode estar relacionado ao fato de que o fíler, quando usado em maior quantidade, pode estar contribuindo para a formação de uma matriz mais coesa e flexível, permitindo um tempo de manuseio mais longo sem comprometer a integridade estrutural da argamassa. Vale ressaltar que as relações a/ms foram de 0,17 para 0% e 4% e de 0,15 para 10%, 16% e 20%. Essa menor relação a/ms implica em uma quantidade mínima de água, suficiente apenas para umedecer os grãos, o que tende a limitar a trabalhabilidade, mas, no caso de 20%, a maior quantidade de fíler parece ter compensado essa limitação, aumentando a deformabilidade da mistura. Por outro lado, as argamassas com 4% e 10% de substituição apresentaram os menores valores de Δ_{def} (0,77), o que pode ser atribuído à menor quantidade de fíler, não sendo suficiente para gerar uma matriz suficientemente plástica, especialmente considerando a menor relação a/ms . Isso indica que, mesmo com um menor teor de água, a trabalhabilidade dessas misturas foi prejudicada, resultando em uma mistura que requer mais esforço para aplicação.

As argamassas comparativas (0%, 4%, 10%, 16% e 20%) também mostraram variações significativas no comportamento mecânico. A composição com 20% de fíler de calcário apresentou um comportamento peculiar, com um $DE_{m\acute{a}x}$ de 1,95 e uma força associada de 18,4 N. No entanto, o $DP_{m\acute{a}x}$ foi consideravelmente alto, com 3,31 e uma força de 254,1 N, sugerindo que esta argamassa tem uma capacidade considerável de resistir à deformação antes do embricamento, mas precisa de maior força para se deformar inicialmente, o que pode indicar uma composição mais rígida e resistente.

É importante destacar que as argamassas comparativas foram desenvolvidas utilizando o método experimental Wong e Kwan, que foca na maximização da densidade de empacotamento. Este método leva a um uso minimizado de água, com a quantidade apenas suficiente para umedecer os grãos. Como consequência, a plasticidade da argamassa é reduzida, resultando em valores menores de Δ_{def} . Isso ocorre porque a água, em menor quantidade, não consegue criar uma matriz suficientemente fluida, o que reduz a trabalhabilidade das argamassas.

Esse enfoque na densidade de empacotamento é vantajoso para o desempenho mecânico da argamassa em termos de resistência, mas pode sacrificar a trabalhabilidade e o tempo disponível para a aplicação. Portanto, as argamassas que seguem essa metodologia tendem a apresentar um comportamento reológico menos favorável em comparação com aquelas que possuem uma maior plasticidade, como as formulações ARG25 e ARG20. Essa abordagem revela a importância de balancear densidade e trabalhabilidade na formulação de argamassas, dependendo das exigências específicas da aplicação desejada.

Dessa forma, comparando as argamassas estudadas com as comparativas, nota-se que as argamassas estudadas geralmente exibem maiores valores de Δ_{def} , o que sugere que têm um estágio plástico mais extenso, devido à maior quantidade de água na mistura, conforme mencionado anteriormente. Essa característica pode ser vantajosa para aplicações onde é desejável que a argamassa mantenha sua forma após a aplicação, mas ainda seja maleável o suficiente para ser trabalhada. Por outro lado, a argamassa comparativa de 20% mostrou a maior força plástica ($FP_{m\acute{a}x}$) com 254,1 N, indicando uma composição mais robusta que pode ser benéfica em contextos que exigem alta resistência mecânica.

As argamassas com diferentes composições apresentam comportamentos distintos no ensaio de *squeeze flow*, refletidos nas suas capacidades de deformação e resistência sob carga. As composições com teor de fíler de calcário tendem a mostrar maior resistência mecânica, mas menos maleabilidade, enquanto as argamassas estudadas possuem maior deformabilidade, o que pode ser benéfico para aplicações onde a facilidade de aplicação e trabalhabilidade são mais importantes.

A análise das curvas obtidas nos gráficos revela que, para um aumento significativo no estágio II, correspondente ao estágio plástico, à medida que o teor de fíler de calcário foi incrementado na mistura de argamassa. No entanto, é importante considerar que esse aumento na extensão do estágio plástico pode estar diretamente relacionado à quantidade de água presente na mistura. Embora o fíler de calcário contribua para o aumento da coesão e compactação, o incremento de finos, por si só, não costuma aumentar a plasticidade de forma significativa sem a adição de mais água. De fato, nas argamassas estudadas, houve um pequeno aumento na relação água/materiais secos (a/ms) de 0,20 para 0,21 nos teores de 20% e 25%, o que, embora sutil, pode ter influenciado positivamente a plasticidade da argamassa. Esse aumento de água, mesmo que pequeno, tende a favorecer a deformabilidade da mistura ao fornecer a lubrificação necessária para melhorar a mobilidade das partículas, contribuindo assim para o maior Δ_{def} , observado no *squeeze flow*. Portanto, o incremento da plasticidade não se deve exclusivamente ao teor de fíler, mas sim à interação entre o aumento de fíler e o leve aumento da quantidade de água, que juntos resultam em uma argamassa mais deformável no estágio plástico.

Esse fenômeno denota uma maior deformação experimentada pela argamassa sob uma carga reduzida, indicando uma modificação na sua capacidade de resistência à deformação plástica com a adição progressiva do fíler de calcário. Esse aumento no estágio plástico indica uma maior capacidade de deformação do material antes de atingir o estágio de embricamento, sugerindo uma melhoria na trabalhabilidade da argamassa com a adição de fíler de calcário. Essa maior deformabilidade pode ser atribuída à presença de partículas finas do fíler, que atuam como lubrificantes, facilitando o deslizamento entre as partículas e reduzindo a resistência ao fluxo. Além disso, a presença do fíler pode promover uma distribuição mais homogênea dos grãos na matriz, resultando em uma microestrutura mais compacta e coesa, o que contribui para uma maior deformação plástica. Esses resultados sugerem que a incorporação de fíler de calcário pode melhorar significativamente a trabalhabilidade das argamassas.

Os resultados do ensaio *squeeze-flow* para as argamassas não seguiram uma tendência linear nos valores de delta deformação (Δ_{def}), o que pode ser explicado por uma combinação de fatores relacionados à composição

e comportamento reológico das misturas. É importante considerar que as argamassas possuem complexas interações entre seus componentes, como partículas de cimento, adições, e água, que influenciam na formação de suas propriedades mecânicas e reológicas. A falta de uma tendência clara pode ser justificada pela variabilidade intrínseca, complexidade reológica e ajustes experimentais.

As propriedades reológicas das argamassas são altamente dependentes de pequenas variações na composição, como a qualidade dos materiais, diferenças nos lotes de produção, e condições ambientais durante os testes. O comportamento reológico das argamassas é complexo devido à interação multifatorial entre os componentes que impactam o fluxo e a deformação. Mesmo pequenas mudanças em um componente podem levar a significativas diferenças de comportamento.

Em resumo, a escolha das relações a/ms nas argamassas estudadas, visando atingir um abatimento de 260 ± 5 mm, resultou em uma trabalhabilidade superior quando comparada às argamassas comparativas, o que era esperado, pois as relações a/ms foram ajustadas para alcançar o empacotamento ótimo. A maior quantidade de água nas argamassas estudadas proporcionou uma maior deformação e menor resistência à força, enquanto as argamassas comparativas, com menor quantidade de água, mostraram maior força e menor deformação, indicando uma mistura mais compacta e rígida.

4.3 ETAPA III – RESULTADOS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Resistência à tração na flexão e à compressão

Na Tabela 43 estão indicados os valores obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão para as argamassas estudadas e na Tabela 44 estão apresentados os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão dessas argamassas. O Gráfico 17 apresenta os valores individuais de cada corpo de prova ensaiado nos ensaios de resistência à tração na flexão e o Gráfico 18 para resistência à compressão para cada teor.

TABELA 43 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA ARGAMASSAS ESTUDADAS

Argamassa	CP	Rf (MPa)	Rf média (MPa)
REF	01	1,06	1,06
	02	1,05	
	03	1,03	
	04	1,06	
	05	1,04	
	06	1,12	
ARG15	01	0,74	0,82
	02	0,82	
	03	0,83	
	04	0,79	
	05	0,87	
	06	0,87	
ARG20	01	0,63	0,68
	02	0,65	
	03	0,74	
	04	0,74	
	05	0,63	
	06	0,67	
ARG25	01	0,59	0,59
	02	0,49	
	03	0,58	
	04	0,5	
	05	0,76	
	06	0,64	

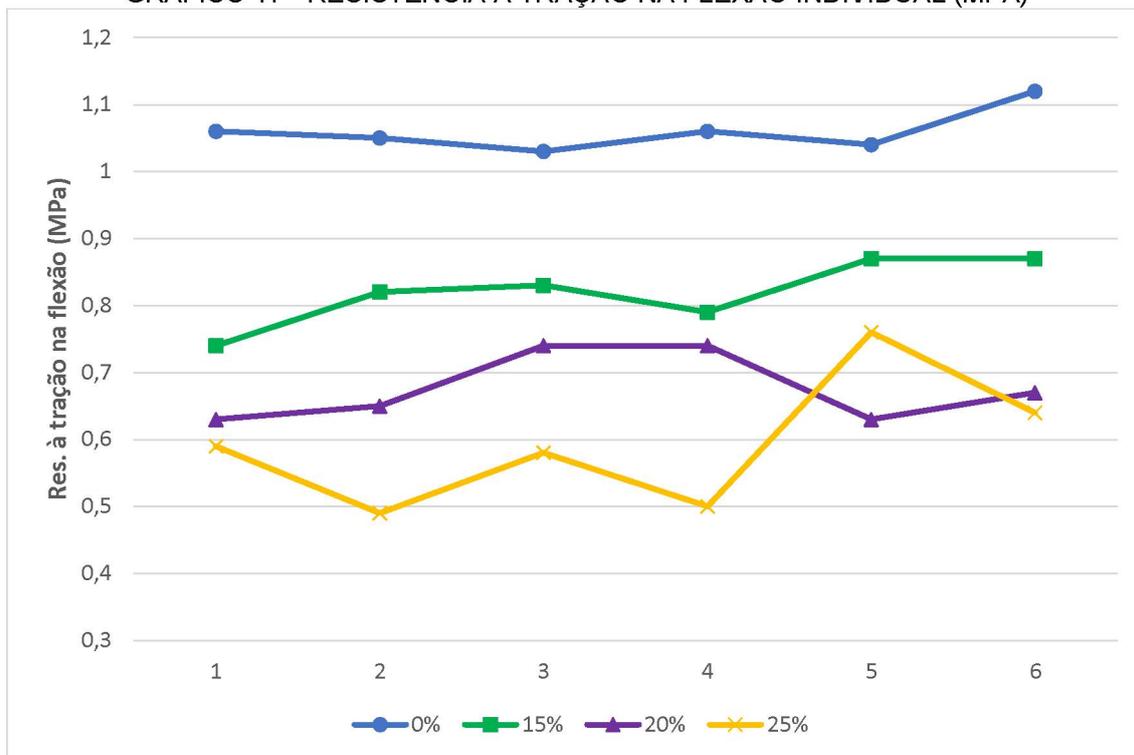
FONTE: A autora (2023).

TABELA 44 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA ARGAMASSAS ESTUDADAS

Argamassa	CP	Rc (MPa)	Rc média individual (MPa)	Rc média total (MPa)
REF	01	2,54 e 2,61	2,58	2,69
	02	2,84 e 2,49	2,67	
	03	2,69 e 2,83	2,76	
	04	2,66 e 2,63	2,65	
	05	2,69 e 2,77	2,73	
	06	2,88 e 2,62	2,75	
ARG15	01	1,88 e 1,90	1,89	2,00
	02	2,00 e 2,03	2,02	
	03	2,06 e 2,13	2,10	
	04	2,06 e 1,97	2,02	
	05	1,91 e 1,85	1,88	
	06	2,04 e 2,11	2,08	
ARG20	01	1,61 e 1,53	1,57	1,71
	02	1,55 e 1,76	1,66	
	03	1,88 e 1,97	1,93	
	04	1,80 e 1,77	1,79	
	05	1,70 e 1,76	1,73	
	06	1,62 e 1,57	1,60	
ARG25	01	1,42 e 1,40	1,41	1,47
	02	1,55 e 1,46	1,51	
	03	1,43 e 1,43	1,43	
	04	1,19 e 1,21	1,20	
	05	1,56 e 1,57	1,57	
	06	1,71 e 1,69	1,70	

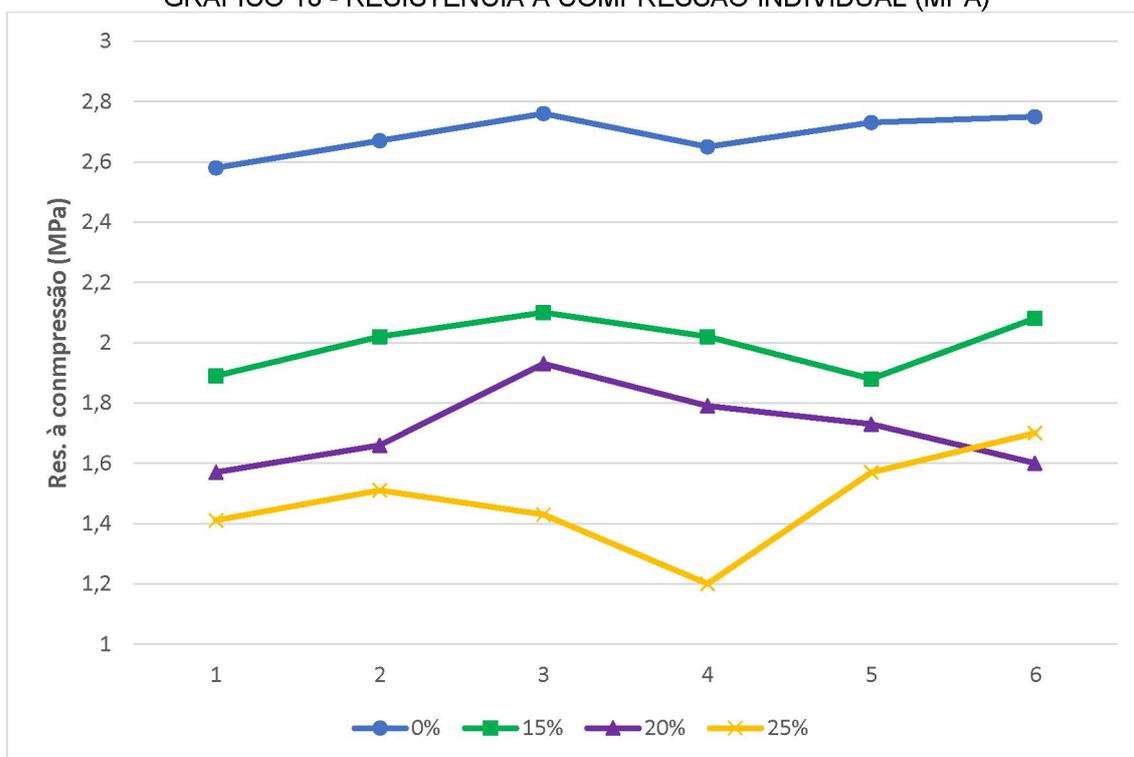
FONTE: A autora (2023).

GRÁFICO 17 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO INDIVIDUAL (MPa)



FONTE: A autora (2023).

GRÁFICO 18 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO INDIVIDUAL (MPa)



FONTE: A autora (2023).

As resistências mecânicas das argamassas estudadas apresentaram uma redução à medida que o teor de fíler foi aumentado na mistura. Este

comportamento pode ser atribuído principalmente à diminuição da quantidade de cimento na composição. A hidratação do cimento, responsável por formar produtos de hidratação que conferem resistência e coesão à argamassa, mostrou-se mais influente na resistência mecânica do que o empacotamento de partículas. Dessa forma, a substituição parcial do cimento por fíler de calcário na faixa de teores entre 15% e 25%, embora tenha promovido um empacotamento eficiente, não compensou a redução das propriedades mecânicas devido à menor hidratação do cimento disponível na mistura.

Comparativamente à argamassa de referência, observa-se que o teor de 15% de fíler reduziu em 22,6% a resistência à tração na flexão e em 25,65% a resistência à compressão. O teor de 20% resultou em uma diminuição de 35,85% na resistência à tração e de 36,43% na resistência à compressão, enquanto o teor de 25% reduziu em 44,34% a resistência à tração e em 45,35% a resistência à compressão.

De acordo com a norma NBR 13281-1 (ABNT, 2023), todas as argamassas se enquadram na classe R2 em relação à resistência à tração na flexão, uma vez que suas resistências estão entre 0,5 e 1,5 MPa. Essa tendência pode ser explicada pela substituição do cimento por fíler de calcário, que, embora tenha contribuído para o empacotamento das partículas e melhorado a trabalhabilidade, reduziu a quantidade de cimento disponível para a hidratação, que é crucial para o desenvolvimento da resistência mecânica. O empacotamento de partículas, embora benéfico para a densidade e coesão da mistura, não compensou totalmente a perda de cimento, resultando em menores resistências finais.

O estudo de empacotamento de partículas realizado anteriormente revelou que a densidade de empacotamento aumenta com a adição de fíler, até um certo limite, contribuindo para a melhoria da trabalhabilidade e compactação da argamassa no estado fresco. No entanto, essa melhoria física não se traduz diretamente em um ganho significativo de resistência mecânica no estado endurecido, onde o papel do cimento e sua hidratação foram predominantes.

Em estudos semelhantes, como os de Wong e Kwan (2008) e De Larrard (1999), foi observado que a otimização do empacotamento de partículas pode melhorar certas propriedades da mistura, como a redução de vazios e a melhora da coesão. Entretanto, esses estudos também ressaltam que a presença de

partículas finas, como o fíler, deve ser equilibrada com a quantidade de aglomerante para garantir um desempenho mecânico adequado.

4.3.2 Densidade de massa aparente

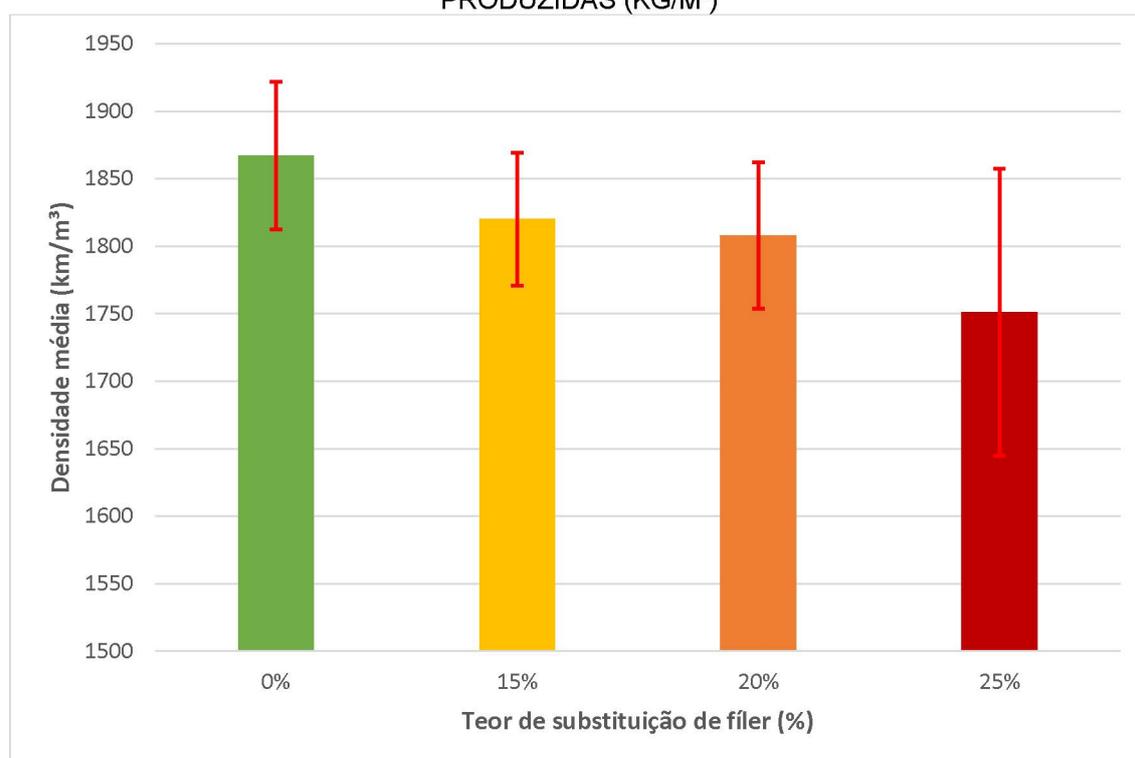
A Tabela 45 e o Gráfico 19 demonstram as densidades médias das argamassas produzidas, com indicação do desvio padrão no gráfico. O Gráfico 20 apresenta os valores individuais de cada corpo de prova ensaiado no ensaio de densidade de massa aparente.

TABELA 45 - DENSIDADE DE MASSA APARENTE PARA ARGAMASSAS ESTUDADAS

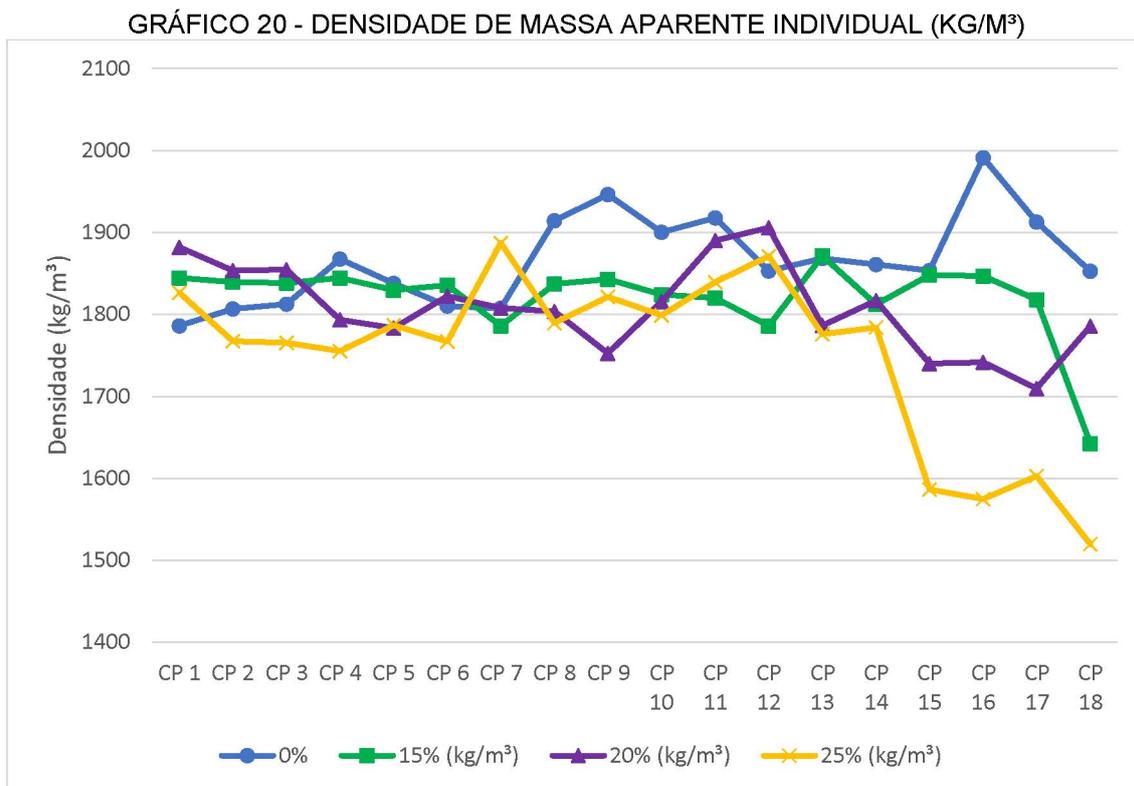
Argamassa	Densidade média (kg/m ³)
REF	1867
ARG15	1820
ARG20	1808
ARG25	1751

FONTE: A autora (2023).

GRÁFICO 19 – DENSIDADE DE MASSA APARENTE MÉDIA PARA AS ARGAMASSAS PRODUZIDAS (KG/M³)



FONTE: A autora (2023).



É evidente que, à medida que o teor de fíler de calcário foi aumentando na mistura, a densidade de massa aparente diminuiu. Essa observação é coerente, uma vez que a massa específica do fíler de calcário é inferior à do cimento, e, conseqüentemente, a redução na quantidade de cimento na argamassa resultou em uma diminuição na densidade global da argamassa.

A redução na densidade das argamassas pode ser analisada sob a perspectiva do empacotamento de partículas. O empacotamento de partículas refere-se à maneira como os grãos constituintes se organizam e ocupam espaço dentro de um volume específico. No caso do fíler de calcário utilizado nesse estudo, que possui partículas predominantemente finas com um D₅₀ de 19,46 µm, ele pode, em certas proporções, preencher os vazios entre as partículas maiores do cimento e dos agregados, melhorando a compactação e coesão da mistura. No entanto, quando em excesso, podem resultar em um aumento da porosidade devido à falta de partículas cimentícias suficientes para preencher o espaço restante, resultando em menor densidade.

De acordo com a norma NBR 13281-1 (ABNT, 2023), as argamassas REF, ARG15 e ARG20 são classificadas como classe DE4, pois suas densidades resultaram em valores superiores a 1800 kg/m³, enquanto a

argamassa ARG25 é classificada como DE3, uma vez que sua densidade está situada entre 1600 e 1800 kg/m³.

4.3.3 Absorção de água e coeficiente de capilaridade

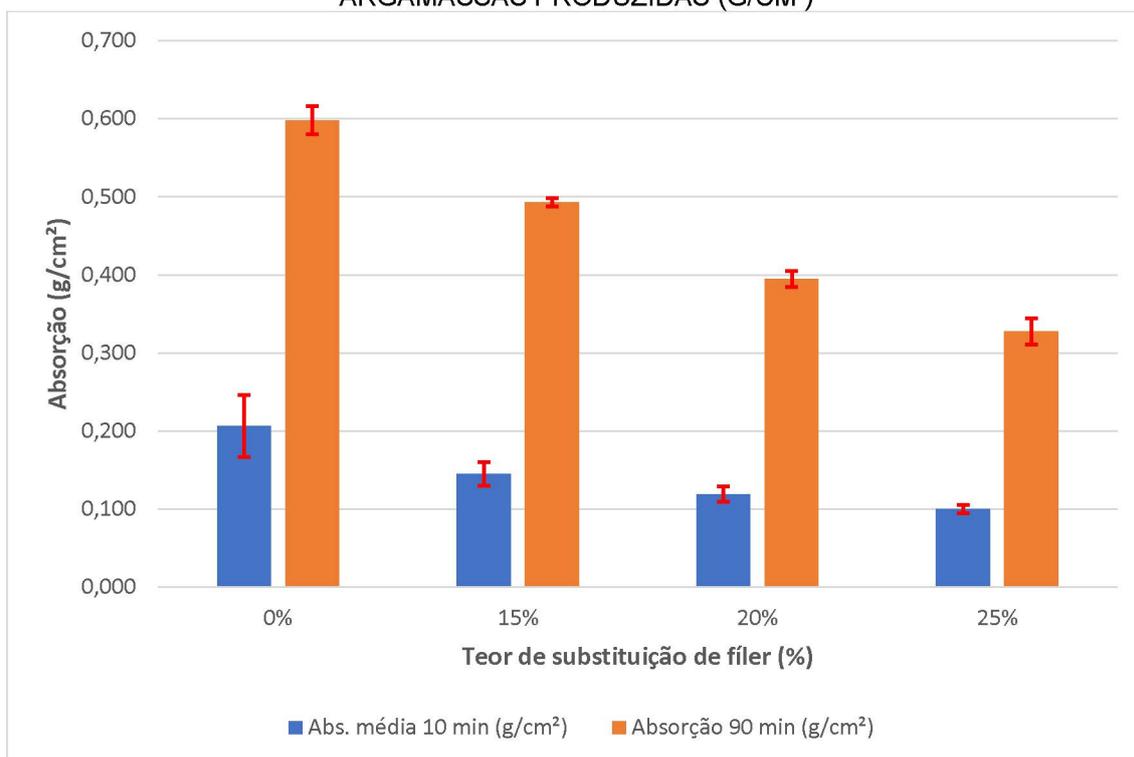
Na Tabela 46 e no Gráfico 21 estão indicados os valores médios obtidos no ensaio de absorção de água e coeficiente de capilaridade, com indicação do desvio padrão no gráfico. O Gráfico 22 apresenta os valores individuais de cada corpo de prova ensaiado no ensaio absorção de água aos 10 minutos e o Gráfico 23 indica os valores para 90 minutos.

TABELA 46 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE PARA ARGAMASSAS ESTUDADAS

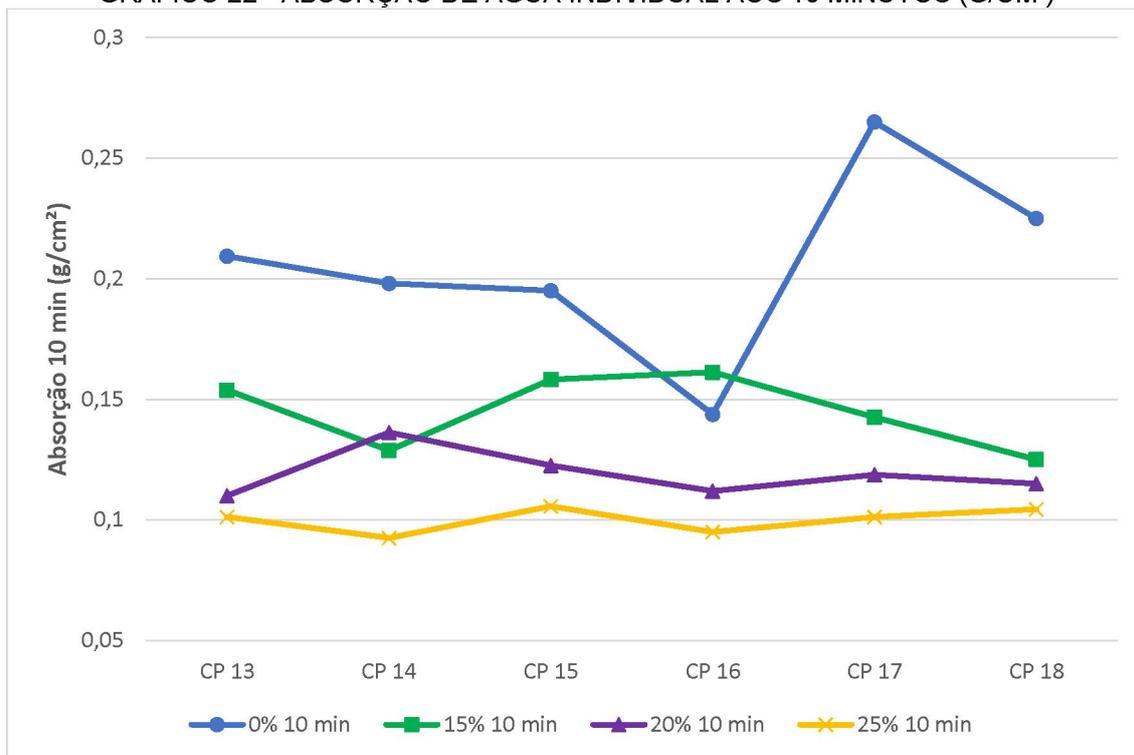
Argamassa	C (g/dm ² .min ^{1/2})	Absorção 10 min (g/cm ²)	Absorção 90 min (g/cm ²)
REF	6,27	0,206	0,598
ARG15	5,57	0,145	0,493
ARG20	4,41	0,119	0,395
ARG25	3,64	0,100	0,327

FONTE: A autora (2023).

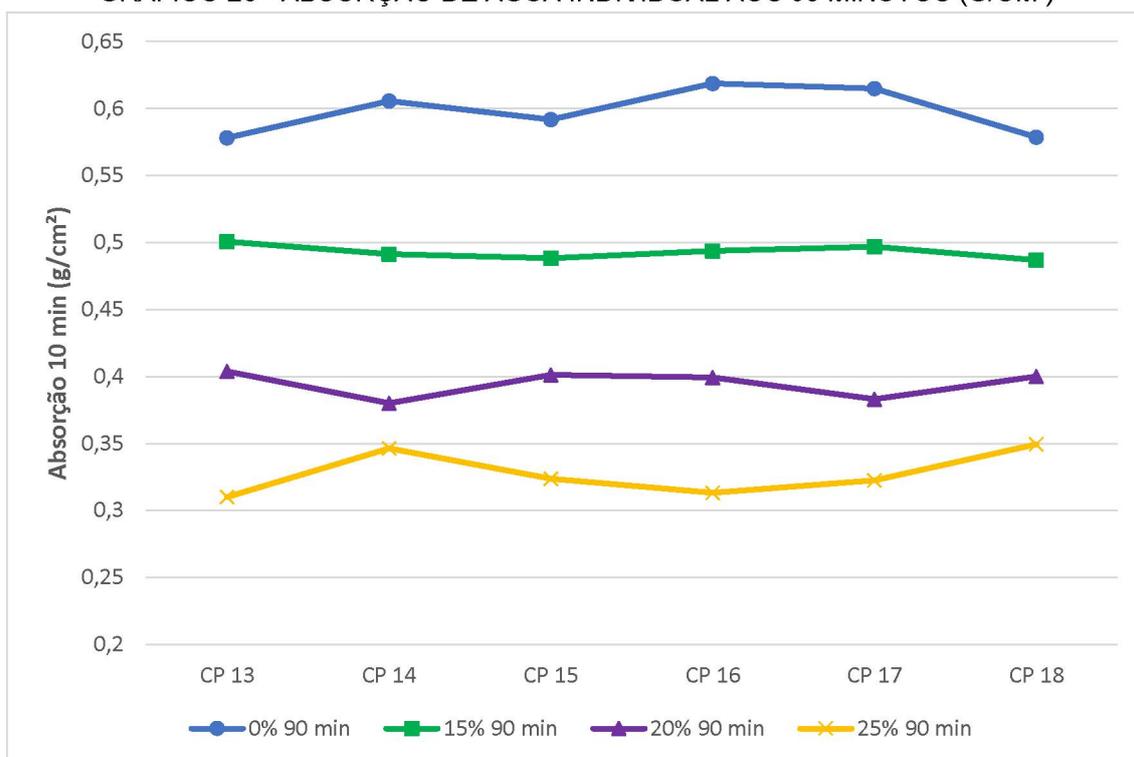
GRÁFICO 21 – ABSORÇÃO MÉDIA DE ÁGUA AOS 10 E 90 MINUTOS PARA AS ARGAMASSAS PRODUZIDAS (G/CM²)



FONTE: A autora (2023).

GRÁFICO 22 - ABSORÇÃO DE ÁGUA INDIVIDUAL AOS 10 MINUTOS (G/CM²)

FONTE: A autora (2023).

GRÁFICO 23 - ABSORÇÃO DE ÁGUA INDIVIDUAL AOS 90 MINUTOS (G/CM²)

FONTE: A autora (2023).

À medida que o teor de fíler de calcário foi incrementado na mistura, constatou-se uma redução na absorção de água e no coeficiente de capilaridade.

Essa observação sugere que o empacotamento de partículas desempenhou um papel significativo nesse fenômeno. É plausível argumentar que o fíler de calcário contribuiu para preencher os vazios de maneira eficaz, resultando em uma argamassa menos porosa. Conseqüentemente, a redução da porosidade contribuiu para uma menor capacidade de absorção e permeabilidade de água no material. Tal comportamento pode ser atribuído à capacidade do fíler de otimizar a compactação das partículas, promovendo uma estrutura mais densa e coesa, que por sua vez diminui a disponibilidade de espaços vazios para a infiltração de água (SEQUEIRA E GHISLENI, 2020).

O fíler de calcário, devido ao seu tamanho de partícula, pode preencher eficientemente os espaços entre as partículas maiores, reduzindo a porosidade. Menor porosidade leva a menor absorção de água, como demonstrado pela diminuição dos valores de absorção em 10 e 90 minutos com o aumento do teor de fíler. A redução do coeficiente de capilaridade com o aumento do teor de fíler indica uma menor tendência da argamassa em transportar água através da capilaridade, contribuindo para uma maior durabilidade do material em ambientes úmidos.

A análise dos resultados de absorção de água e coeficiente de capilaridade demonstra que o empacotamento de partículas é importante para reduzir a porosidade da argamassa. A adição de fíler de calcário, ao preencher os vazios e promover uma mistura mais densa, resulta em uma menor permeabilidade e absorção de água. Esse comportamento confirma a eficácia do empacotamento de partículas em melhorar as propriedades físicas da argamassa, tornando-a mais resistente à penetração de água e aumentando sua durabilidade.

4.3.4 Módulo de elasticidade estático

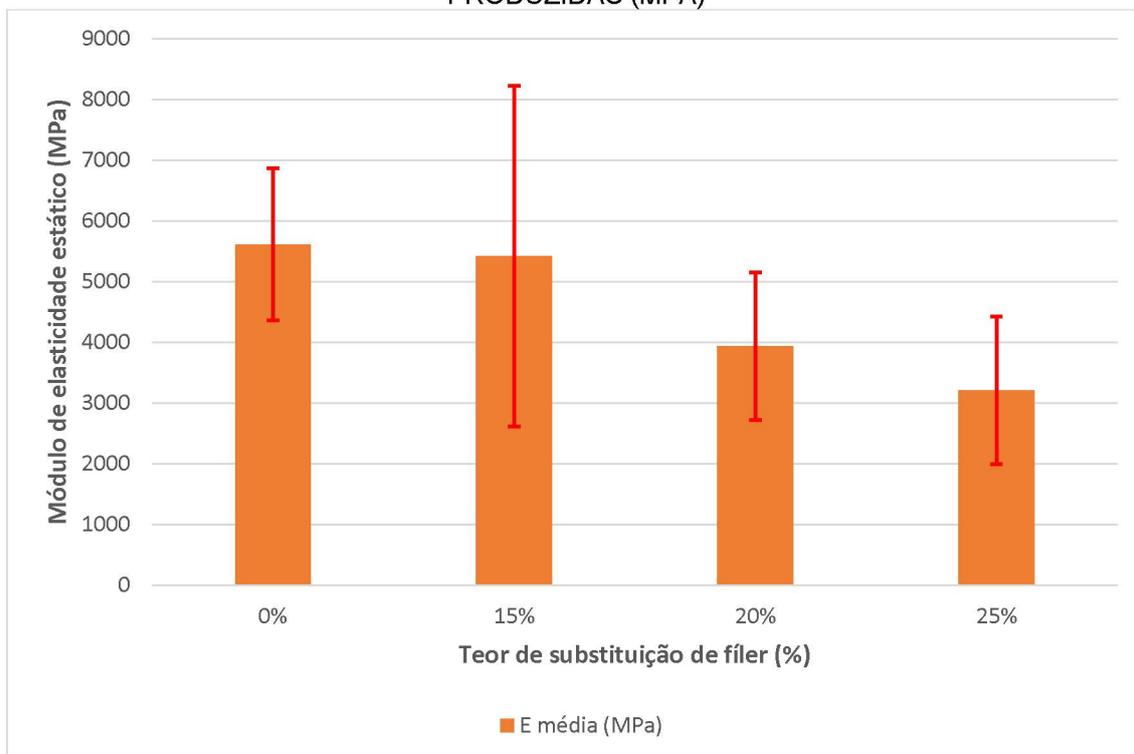
A Tabela 47 e o Gráfico 24 apresentam os valores médios obtidos no ensaio do módulo de elasticidade estático para as argamassas estudadas, com indicação do desvio padrão no gráfico.

TABELA 47 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ARGAMASSAS ESTUDADAS

Argamassa	E médio (MPa)
REF	5610,15
ARG15	5419,83
ARG20	3932,17
ARG25	3209,22

FONTE: A autora (2023).

GRÁFICO 24 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO MÉDIO PARA AS ARGAMASSAS PRODUZIDAS (MPa)



FONTE: A autora (2023).

Durante o cálculo da média do módulo de elasticidade estático para a argamassa com 15% de fíler de calcário, dois valores (CP8 e CP12) foram excluídos devido à sua significativa disparidade em relação aos demais. A análise dos valores e do gráfico revela uma tendência de decréscimo no módulo de elasticidade estático à medida que o teor de fíler de calcário aumenta na mistura.

Uma possível justificativa para essa redução no módulo de elasticidade estático conforme o teor de fíler de calcário foi adicionado às argamassas pode ser atribuída às partículas finas de fíler de calcário possuírem uma área de superfície maior em comparação às partículas de cimento *Portland*, o que promoveu um empacotamento mais eficiente das partículas na mistura. Esse empacotamento mais eficiente pode levar a uma maior interação entre as

partículas de fíler de calcário e os grãos de areia, resultando em uma estrutura menos coesa e mais propensa à deformação sob carga.

A redução no módulo de elasticidade estático também está relacionada à diminuição das resistências mecânicas conforme o teor de fíler é aumentado na mistura. Isso ocorre porque o fíler de calcário, embora possa contribuir para um empacotamento mais eficiente das partículas, não possui propriedades aglomerantes comparáveis ao cimento *Portland*. Como resultado, a substituição parcial do cimento pelo fíler de calcário pode comprometer a coesão e a adesão entre as partículas na matriz da argamassa, resultando em uma estrutura mais frágil e menos resistente à deformação. Assim, a redução no módulo de elasticidade estático está intrinsecamente ligada à redução das resistências mecânicas da argamassa, ambas consequências diretas da substituição parcial do cimento pelo fíler de calcário na mistura.

Em geral, um módulo de elasticidade mais baixo indica uma argamassa mais flexível e menos suscetível a fissuras e trincas, devido à sua capacidade de absorver melhor as deformações. Isso pode ser vantajoso em aplicações onde há movimentações estruturais ou variações térmicas significativas.

4.4 RESULTADOS GERAIS PARA AS ARGAMASSAS

Estão indicados nas Tabelas 48 e 49 os resultados dos ensaios aplicados nas argamassas estudadas tanto no estado fresco quanto no endurecido. Também estão apresentados os valores obtidos no modelo CPM para cada argamassa a fim de correlacionar esses dados.

TABELA 48 - RESULTADOS DO MODELO CPM E ENSAIOS NO ESTADO FRESCO PARA AS ARGAMASSAS ESTUDADAS

Argamassa	CPM		ESTADO FRESCO			
	Empac. virtual (γ)	Empac. real (ϕ)	IC (mm)	Densidade (kg/m^3)	Teor de ar incorporado (%)	Squeeze flow - Δdef (-)
0%	0,57765	0,53512	257,72	2014,5	13,05	4,17
15%	0,57922	0,53654	259,73	2069,47	10,55	2,14
20%	0,57974	0,53701	259,68	2081,24	9,02	4,73
25%	0,58027	0,53749	264,56	2078,14	9,11	4,82

FONTE: A autora (2023).

TABELA 49 - RESULTADOS DO MODELO CPM E EMPACOTAMENTO E ESTADO ENDURECIDO PARA AS ARGAMASSAS ESTUDADAS

Argamassa	CPM		ESTADO ENDURECIDO					
	Empac. virtual (γ)	Empac. real (Φ)	Res. à tração (MPa)	Res. à compressão (Mpa)	Dens. média (kg/m ³)	Absorção 10 min (g/cm ²)	Absorção 90 min (g/cm ²)	E médio (MPa)
0%	0,57765	0,53512	1,06	2,69	1867	0,206	0,598	5610,15
15%	0,57922	0,53654	0,82	2,00	1820	0,145	0,493	5419,83
20%	0,57974	0,53701	0,68	1,71	1808	0,119	0,395	3932,17
25%	0,58027	0,53749	0,59	1,47	1751	0,100	0,327	3209,22

FONTE: A autora (2023).

Conforme evidenciado nas Tabelas 48 e 49, observou-se que o incremento do fíler calcário na mistura resultou em um aumento da densidade da argamassa fresca, concomitantemente à redução do teor de ar incorporado. Este comportamento pode ser explicado pelo efeito de preenchimento proporcionado pelo fíler, que otimiza o empacotamento das partículas, diminuindo os vazios interparticulares e, conseqüentemente, a quantidade de ar retido na mistura. Entretanto, a argamassa com 25% de substituição de cimento por fíler calcário foi uma exceção a essa tendência geral. Nela, observou-se uma leve redução na densidade acompanhada por um pequeno aumento no teor de ar incorporado em relação à ARG20 (20% de substituição). Este fenômeno pode ser atribuído à ocorrência de um ponto de saturação do empacotamento de partículas, onde o excesso de fíler começa a atuar como lubrificante entre as partículas sólidas, promovendo a formação de aglomerados que aprisionam bolsas de ar, além de comprometer o contato interparticular eficiente, o que leva a um empacotamento subótimo.

No estado fresco, a argamassa ARG20 (20% de teor de fíler) destacou-se por apresentar o menor teor de ar incorporado (9,02%) e a maior densidade (2081,24 kg/m³). Em contraste, a argamassa de referência (REF) apresentou o maior teor de ar incorporado (13,05%) e a menor densidade (2014,5 kg/m³), sugerindo que o empacotamento de partículas influenciou nesses resultados.

Os resultados do ensaio de *squeeze flow* evidenciaram que a ARG25 apresentou o maior Δ_{def} (4,82), indicando um estágio plástico mais prolongado e, portanto, uma melhor trabalhabilidade. Em contrapartida, a ARG15 apresentou o menor Δ_{def} (2,14), o que sugere uma trabalhabilidade inferior devido a menor deformabilidade. A análise dos resultados do *squeeze flow* e das equações de tendência (Tabelas 40 e 41) mostrou que as argamassas com

maior teor de fíler (ARG25) apresentaram valores maiores de deformação na transição entre o estágio II para o estágio III, evidenciado pelo aumento de Δdef para 4,82. Isso indica que o empacotamento de partículas foi otimizado até certo ponto, permitindo uma maior deformabilidade e, conseqüentemente, uma melhor trabalhabilidade da argamassa no estado fresco. No entanto, é importante destacar que as argamassas estudadas, apesar de mostrarem um bom desempenho em termos de trabalhabilidade, apresentaram uma resistência inferior às argamassas comparativas em termos de força aplicada.

As argamassas comparativas que seguiram o método experimental de Wong e Kwan revelaram um comportamento distinto. Os valores de Δdef foram geralmente mais baixos, refletindo um empacotamento eficiente, mas com menor plasticidade devido à composição ajustada para máxima densidade, onde o teor de água era apenas suficiente para molhar as partículas. A comparação desses dados com as argamassas estudadas demonstra que, enquanto o empacotamento otimizado favorece a trabalhabilidade, a resistência mecânica ainda depende significativamente da proporção de cimento na mistura.

No estado endurecido, a argamassa REF demonstrou os melhores resultados de resistência à compressão (2,69 MPa) e à tração (1,06 MPa), enquanto a ARG25 apresentou os menores valores (1,47 MPa e 0,59 MPa, respectivamente). A diminuição das propriedades mecânicas com o aumento do teor de fíler pode ser atribuída à menor capacidade de ligação do fíler calcário em comparação ao cimento *Portland*, que se refere à sua eficiência inferior em promover a adesão e a formação de uma matriz coesa durante o processo de hidratação, resultando em uma matriz cimentícia menos robusta. Além disso, a densidade das argamassas no estado endurecido seguiu um padrão similar, com a REF apresentando a maior densidade (1867 kg/m³) e a ARG25 a menor densidade (1751 kg/m³). Esta tendência também foi observada nos ensaios de absorção e módulo de elasticidade estático, onde a REF apresentou maior absorção (0,21 g/cm² em 10 minutos e 0,60 g/cm² em 90 minutos) e módulo de elasticidade estático (5610,15 MPa). Por outro lado, a ARG25 demonstrou menor absorção (0,1 g/cm² em 10 minutos e 0,33 g/cm² em 90 minutos) e módulo de elasticidade (3209,22 MPa), o que sugere uma argamassa mais flexível, com maior capacidade de absorver deformações, implicando em uma potencial maior durabilidade.

Analisando os dados das Tabelas 48 e 49, observa-se que à medida que a densidade de empacotamento aumenta, há uma redução nos valores de resistência à tração na flexão e à compressão, bem como na densidade aparente da argamassa. Simultaneamente, ocorre uma diminuição na absorção de água e no módulo de elasticidade. Esse comportamento indica que, com o incremento do teor de fíler calcário na mistura, há um impacto negativo nas resistências mecânicas. No entanto, a redução na densidade aparente, graças a menor massa específica do fíler de calcário, juntamente com a diminuição na absorção, devido ao preenchimento de vazios com o empacotamento de partículas, e no módulo de elasticidade, sugere uma melhoria nas propriedades relacionadas à porosidade, tornando a argamassa mais flexível e menos suscetível à fissuração.

Na Tabela 50 está um resumo das argamassas estudadas e comparativas em relação aos teores de 0% e 20%, visto que ambos foram submetidos ao estudo de empacotamento pelo CPM e Wong e Kwan do conjunto granular. Foram escolhidos os dados com os mesmos valores de a/ms para poder comparar.

TABELA 50 - RESUMO DE DADOS DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS E COMPARATIVAS COM 0% E 20% DE TEOR DE FÍLER

Argamassa		Traço (volume)	Teor de fíler	a/ms	Wong e Kwan		CPM	
					Índice de Vazios - (u)	Concentração de Sólidos - (ϕ)	Empac. virtual (γ)	Empac. real (ϕ)
Estudada	REF	1:1:6	0%	0,20	-	-	0,57765	0,53512
	ARG20	1:1:6	20%	0,21	-	-	0,57974	0,53701
Comparativa	0%	1:1:6	0%	0,20	0,817	0,550	-	-
	20%	1:1:6	20%	0,21	0,814	0,551	-	-

FONTE: A autora (2023).

Os resultados apresentados na tabela consideram as argamassas estudadas e comparativas com 0% e 20% de fíler calcário, e os valores de a/ms foram selecionados com o mesmo valor para permitir uma comparação mais direta entre as misturas. Esta escolha foi feita para nivelar a influência da quantidade de água na mistura e, assim, focar nas variações provocadas pelo teor de fíler calcário e o comportamento das partículas durante o

empacotamento. No entanto, vale ressaltar que, no método experimental de Wong e Kwan, a densidade de empacotamento mais elevada foi obtida com relações a/ms mais baixas (0,17 para 0% e 0,15 para 20%), o que influencia diretamente a eficiência do empacotamento das partículas.

Os resultados do empacotamento mostram que, com a mesma relação a/ms de 0,20 para 0% e 0,21 para 20%, houve um pequeno aumento no empacotamento virtual e real das argamassas com a adição de fíler. O empacotamento virtual subiu de 0,57765 (REF) para 0,57974 (ARG20), e o empacotamento real aumentou de 0,53512 para 0,53701. Essa pequena variação sugere que, com a mesma quantidade relativa de água, a adição de fíler calcário possibilita um ligeiro ganho em empacotamento, pois suas partículas finas auxiliam no preenchimento dos vazios da mistura. No entanto, a mudança é modesta, indicando que o empacotamento já estava próximo do seu limite máximo de otimização com os valores escolhidos de a/ms .

No método de Wong e Kwan, o empacotamento mais eficiente foi obtido com uma relação a/ms mais baixa. Isso reflete a natureza do método, que busca encontrar o ponto em que a quantidade de água é suficiente apenas para molhar as partículas e proporcionar a melhor compactação possível. No entanto, é importante destacar que, sob as condições do método de Wong e Kwan, o teor de água necessário para otimizar a densidade de empacotamento foi menor. Isso sugere que a presença do fíler calcário permite a otimização da densidade de empacotamento com menos água.

Optou-se por utilizar os mesmos valores de a/ms para as comparações porque o teor de água é uma variável crítica que pode influenciar significativamente o comportamento reológico e o empacotamento das partículas. Com valores iguais de a/ms , é possível observar com mais clareza o efeito direto da adição de fíler calcário nas propriedades da mistura.

O método de Wong e Kwan sugere que a densidade de empacotamento mais alta foi obtida com menos água, indicando que um dos principais benefícios da inclusão do fíler calcário é a possibilidade de reduzir a quantidade de água na mistura sem comprometer a compactação.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo analisar as propriedades de uma argamassa mista de revestimento, produzida com a substituição parcial do Cimento *Portland* por fíler calcário e areia artificial. Este processo foi conduzido com o intuito de otimizar o empacotamento de partículas na mistura, a fim de identificar uma faixa ideal de teor de finos que possibilite uma melhoria nas propriedades mecânicas e no comportamento reológico das argamassas, além de contribuir para uma abordagem mais sustentável na construção civil.

Após o estudo de empacotamento de partículas e caracterização das argamassas ensaiadas foi concluído que para os materiais utilizados nesse estudo e para o traço utilizado de 1:1:6 (em volume):

- O empacotamento de partículas demonstrou que a tendência é de a argamassa obter a maior densidade de empacotamento quando há 100% de substituição do cimento pelo fíler de calcário utilizado, por esse motivo foi definido seguir o recomendado pela bibliografia e limitar em 20% o teor de fíler na mistura com um intervalo de 5% a mais e a menos para explorar os efeitos da substituição abaixo e acima do limite recomendado.

- A deformação máxima (DE_{max}) aumentou gradualmente com o aumento do teor de fíler, indicando maior flexibilidade e trabalhabilidade nas argamassas modificadas. A ARG25 apresentou a maior deformação (2,65) e a ARG15 a menor (2,21).

- O teste de *squeeze flow* mostrou que a ARG25 teve o maior Δdef (4,82), seguido pela ARG20 (4,73), enquanto a ARG15 apresentou o menor valor (2,14). Isso demonstra que teores mais elevados de fíler, entre a faixa de 20% e 25%, contribuem para uma melhor acomodação das partículas, favorecendo a trabalhabilidade.

- Em relação à resistência à compressão, houve uma diminuição com o aumento do teor de fíler: a argamassa REF obteve a maior resistência (2,69 MPa) e a ARG25 apresentou a menor (1,47 MPa). Esse comportamento indica que a maior substituição do cimento por fíler compromete a capacidade de ligação na matriz cimentícia, reduzindo as propriedades mecânicas da argamassa.

- A resistência à tração na flexão também diminuiu com o aumento do teor de fíler. A REF alcançou 1,06 MPa, enquanto a ARG25 apresentou 0,59 MPa. A redução da resistência sugere que, embora o fíler melhore a trabalhabilidade e a densidade da mistura, sua natureza inerte resulta em menor capacidade de ligação entre as partículas.
- O coeficiente de capilaridade e a absorção de água apresentaram uma tendência de redução com o aumento do teor de fíler. A absorção após 10 minutos foi de 0,206 g/cm² na REF e caiu para 0,100 g/cm² na ARG25. Essa redução indica uma menor porosidade nas argamassas com maior teor de fíler, favorecendo a durabilidade.
- A absorção após 90 minutos também seguiu essa tendência, reduzindo de 0,598 g/cm² (REF) para 0,327 g/cm² (ARG25), sugerindo uma menor permeabilidade e, conseqüentemente, maior potencial de resistência aos agentes externos.
- Houve uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento do teor de fíler, na faixa de 15% a 25%. A argamassa REF apresentou o maior valor (5610,15 MPa), enquanto a ARG25 registrou o menor (3209,22 MPa). Essa redução indica que a argamassa se torna mais flexível com o incremento de fíler, o que pode ser vantajoso em aplicações que requerem maior acomodação de movimentações sem fissurar.
- As argamassas com teores mais elevados de fíler (como ARG20 e ARG25) mostraram melhorias significativas em termos de absorção de água e flexibilidade, características desejáveis para aplicações que não exigem alta resistência mecânica.
- A argamassa com 20% de substituição de cimento por fíler calcário (ARG20) destacou-se como a mais eficiente entre as formulações testadas, pois apresentou um equilíbrio adequado entre as características no estado fresco e endurecido. Esse resultado corrobora com as recomendações da literatura, que apontam este valor como o teor máximo de fíler na mistura de argamassa.
- A ARG20 demonstrou a menor incorporação de ar e a maior densidade no estado fresco, além de uma boa trabalhabilidade evidenciada pelo ensaio de *squeeze flow*.

- Comparando os resultados com as normas vigentes, como a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), que estabelece requisitos para argamassas de revestimento e assentamento, a ARG20 atendeu aos critérios mínimos de desempenho em termos de trabalhabilidade e resistência mecânica, mostrando-se apta para aplicações convencionais onde as exigências de resistência não são extremas.

- A implementação de fíler calcário em substituição parcial do cimento contribui significativamente para a sustentabilidade na construção civil, ao reduzir o consumo de cimento *Portland* e, por conseguinte, as emissões de CO₂ associadas à sua produção. No entanto, a redução nas propriedades mecânicas indica a necessidade de um balanço cuidadoso entre sustentabilidade e desempenho técnico.

- Para argamassas de revestimento como revestimentos de paredes internas e externas, é possível explorar teores de fíler calcário acima de 20%. Isso é possível devido a esse material não demandar altas resistências mecânicas, sendo mais relevantes as propriedades relacionadas à trabalhabilidade no estado fresco e a absorção e flexibilidade no estado endurecido.

- Argamassas com teores mais elevados mostraram melhoras na trabalhabilidade, menor absorção de água e maior flexibilidade.

Com base nos resultados obtidos, sugere-se um intervalo de substituição de cimento por fíler calcário entre 20% e 25% para aplicações em argamassas de revestimento com o traço de 1:1:6 (em volume), mantendo-se dentro dos limites de trabalhabilidade e absorção permitidos pelas normas de desempenho.

O estudo demonstra que, embora a incorporação de fíler calcário ofereça vantagens em termos de empacotamento de partículas e trabalhabilidade, é essencial determinar o limite ideal de substituição que não comprometa a resistência mecânica das argamassas. Este equilíbrio é importante para garantir a viabilidade técnica e econômica do uso de argamassas modificadas em aplicações de revestimento na construção civil.

Os resultados apresentados fornecem uma base para futuras pesquisas e desenvolvimento de misturas de argamassa mais sustentáveis e eficientes,

contribuindo para o avanço de práticas de construção civil mais responsáveis e inovadoras.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora este estudo tenha proporcionado uma compreensão significativa dos efeitos do fíler de calcário em argamassas, algumas áreas permanecem abertas para exploração futura:

1. **Análise de Durabilidade:** Investigar o impacto de longo prazo da adição de fíler de calcário na durabilidade das argamassas, especialmente em condições de exposição agressivas, como ambientes marinhos ou industriais.

2. **Estudos de Microestrutura:** Utilizar técnicas avançadas de caracterização, como microscopia eletrônica de varredura (MEV), para estudar as alterações microestruturais induzidas pela adição de fíler e correlacioná-las com o comportamento mecânico observado.

3. **Otimização do Teor de Fíler:** Explorar diferentes teores de substituição e suas combinações com aditivos químicos para otimizar as propriedades desejadas das argamassas, ajustando o equilíbrio entre densidade, resistência e trabalhabilidade.

4. **Avaliação de Sustentabilidade:** Realizar uma análise de ciclo de vida (ACV) para quantificar os benefícios ambientais da substituição de cimento por fíler de calcário, considerando todo o ciclo de vida das argamassas produzidas.

5. **Diferentes tipos de fíler:** Analisar o comportamento de diferentes tipos de fíler na argamassa, visto que sua composição química e sua distribuição granulométrica impactam nos resultados.

6. **Diferentes tipos de aglomerantes:** Analisar a diferença nos resultados de empacotamento e no desempenho das argamassas utilizando diferentes tipos de cimento, diferentes tipos de cal e/ou fazer uma argamassa sem utilizar cal;

7. **Análise econômica:** Avaliar o impacto econômico da utilização de fíler como substituto parcial do cimento.

REFERÊNCIAS

ALISSON, E. **Pesquisadores da USP desenvolvem cimento ecoeficiente**. 2013. Disponível em: <http://agencia.fapesp.br/pesquisadores-da-usp-desenvolvem-cimento-ecoeficiente/17215/>>. Acesso em: 06 jul. 2023.

ANGELIM, R. R.; ANGELIM, S. C. M.; CARASEK, H. **Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos nas propriedades das argamassas e dos revestimentos**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5., 2003, São Paulo. Goiânia, 2003. 16 p.

A ONU e a população mundial. **Nações Unidas Brasil**, [2019?]. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acao/populacao-mundial/>>. Acesso em: 17 de mar. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Manual de utilização de adições em argamassas e concretos**. São Paulo: ABCP, 2002.

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

_____. **ABNT NBR 13276**: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **ABNT NBR 13278**: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. **ABNT NBR 13280**: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 13281-1**: Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaios parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2023.

_____. **ABNT NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **ABNT NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 15839**: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **ABNT NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **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, 2018.

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

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

_____. **ABNT NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

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

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

_____. **ABNT NBR 5751**: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

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

_____. **ABNT NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **ABNT NBR 9935**: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2024.

ADLEY, P. Lime-based mortars: History, application, and restoration. **Heritage Science**, 8 (1), 45, 2020.

BARROS, A. Custos da construção sobem 18,65% em 2021, maior taxa em nove anos. **Agência IBGE notícias**, 2022. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de->

noticias/noticias/32719-custos-da-construcao-sobem-18-65-em-2021-maior-taxa-em-nove-anos>. Acesso em: 16 mar. 2022.

BARROS, J. A. A.; PINTO, M. P.; BATISTA, R. O. Environmental impacts of sand exploitation and alternative materials in concrete production. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 297-307, 2018.

BERTON, R.; MAGRI, C. H. R.; COSTA, E. B. C. **Avaliação do uso de finos em substituição ao cimento no desempenho mecânico de argamassas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 12., 2017, São Paulo. Anais [...]. Curitiba, 2017. p. 1-13.

BISWAJIT, R.; DIPENDU, B.; SUMANTA, K. S. Influence of fine materials on properties of mortar: A review. **Construction and Building Materials**, 178, p. 444-459, 2018.

BORTOLUZZI, L. S.; BARELLI, R. F.; MESSIAS, A. R. Granulometric Control of Artificial Sand for Enhancing Mortar Performance. **Journal of Building Engineering**, vol. 44, 2021.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil**. Cerâmica, [s.l.], v. 61, n. 358, p. 178-189, jun. 2015. Fap UNIFESP (SciELO).

CAMÕES, A.; COELHO, R.; COSTA, L. Particle Packing Models for Mortar Optimization: A Review. **Journal of Building Engineering**, 45. 2022.

CAMPOS, H. F. **Dosagem de concreto sustentável e de alta resistência, otimizada por modelos de empacotamento de partículas, com substituição parcial do cimento Portland por pó de pedra e sílica ativa**. Orientador: José Marques Filho. 2019. 290 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. Tese (Doutorado em Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo), São Paulo, 2009.

CARDOSO, F. A.; AUGUSTI, A. C.; PILEGGI, R. G. **Influência do tipo de finos e do teor de aditivo retentor de água no comportamento reológico de argamassas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 10., 2013, Fortaleza. Anais [...]. São Paulo, 2013. p. 1-12.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Caracterização reológica de argamassas pelo método de *squeeze flow***. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Florianópolis, SC. 2005.

CATÁLOGO. **IBGE**, 2022. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=7242>>. Acesso em: 17 de mar. 2022.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Evaluation of the effects of limestone filler on the properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, 82, p. 140-147, 2015.

CHATHAM HOUSE INSTITUTE (Londres) (org.). **Why Cement is a Major Contributor to Climate Change**. 2018. Disponível em: <<https://www.chathamhouse.org/2018/06/why-cement-major-contributor-climate-change>>. Acesso em: 16 de mar. 2022.

DAMINELI, B. **Conceitos para Formulação de Concretos com Baixo Consumo de Ligantes: Controle Reológico, Empacotamento e Dispersão de Partículas**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning a scientific approach**. Modern Concrete Technology Series, vol. 9, 421 p., London: E&FN SPON, 1999.

FARIA, P.; MARTINS, A.; SILVA, V. The role of lime in high-performance construction materials. **Journal of Building Engineering**, v. 25, 2019.

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

FERREIRA, G. E.; FONSECA JUNIOR, C. A. F. **Mercado de agregados no Brasil**. Manual de agregados para a construção civil. 2.ed, p. 7-33. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. 432p.

FORTUNATO, M.; MARTINS, B. R.; CASALI, J. M.; COLLODETTI, G.; BETIOLI, A. M. Estudo da substituição de cimento Portland pelo fino de britagem em argamassa auto-adensável. In: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 17., 2018. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 145–153. DOI: 10.46421/entac.v17i1.1333. Disponível em: <<https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1333>>. Acesso em: 21 dez. 2024.

GARCÍA, C. M. V. **Avaliação do impacto do uso de filer calcário como substituição ao cimento no comportamento reológico e retração de microconcretos**. Orientador: Antonio Domingues de Figueiredo. 2017. 210 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION (GCCA). **2020 GNR**. Reino Unido, 2023. Disponível em <<https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>>. Acesso em: 05 jul. 2023.

GONÇALVES, J. L. M; FALESCHINI, M. T.; BEUREN, F. H. **Produção de areia de brita com qualidade**. Areia & Brita, n. 10, p. 20-25, 2000.

GONÇALVES, T. M.; SILVA, A. X.; FIGUEIREDO, V. N. **Estudo da substituição parcial do cimento por filer calcário em argamassas**. In: 7º Congresso Brasileiro de Argamassas Industrializadas, p. 146-154. 2016.

HERMANN, A.; LANGARO, E. A.; LOPES DA SILVA, S. H.; KLEIN, N. S. **Particle packing of cement and silica fume in pastes using an analytical model**. Revista IBRACON, v.9, n.1 (p. 48 – 65), 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Cement Technology Roadmap 2022: Towards a Sustainable Industry**. Disponível em <<https://www.iea.org>> Acesso em: 12 dez. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 13320: Particle size analysis – Laser diffraction methods. 2. ed. Geneva: ISO, 2009.

ISAIA, G. A.; RIZZATTI, E. **O filer calcário no concreto: Uma revisão**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 12, Vol. 15, p. 132-172. 2020.

ISHIKAWA, P. H. **Argamassa para revestimento de alvenaria com areia artificial**. Boletim Técnico da FATEC-SP – BT/26, São Paulo, p. 22-27, maio 2009.

ISHIKAWA, M. R. Estudo da substituição de areia de rio por areia artificial em argamassas para revestimento de alvenaria. In: **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 11., 2009, São Paulo. Anais... São Paulo: ANTAC, 2009.

KLEIN N. S. **El rol físico del água em mesclas de cemento Portland**, Tese de doutorado, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.

KWAN, A. K. H.; FUNG, T. C. **Packing density measurement and modelling of fine aggregate and mortar**. Cement and Concrete Composites, 31(9), p. 633-641, 2009.

KWAN, A. K. H.; MORA, R. L. **Packing density of fine aggregate**. ACI Materials Journal, 98(1), p. 24-32, 2001.

LEE S. H.; KIM H. J.; SAKAI, E.; DAIMON, M. **Effect of particle size distribution of fly ash-cement system on the fluidity of cement pastes**. Cement and Concrete Research. V. 33(5), p. 763–768, 2003.

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

LI, L. G.; KWAN, A. K. H. **Packing density of concrete mix under dry and wet conditions**. Powder Technology, v.253, p.514-521, 2014.

LIMA, T. M.; SOUZA, V. F.; ANDRADE, P. A.; GOMES, M. R. Estudo da influência da moagem de alta energia nas características do filer calcário para argamassa. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2019.

MANSOUR, M., HADDAD, R., MOHAMMED, T. Investigating the influence of admixtures in mortar formulations. **Materials Today Communications**, 25. 2020.

MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos autoadensáveis reforçados com fibra de aço**. 2006. Dissertação – Programa de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

MARQUES, A. I.; MORAIS, J.; MORAIS, P.; VEIGA, M. R.; SANTOS, C.; CANDEIAS, P.; FERREIRA, J. G. Modulus of elasticity of mortars: Static and dynamic analyses. **Construction and Building Materials**, v. 232, 117216, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117216>.

MARTINS, E. J. **Diretrizes para dosagem de argamassas de revestimento utilizando métodos de empacotamento de partículas e comportamento reológico**. Orientadora: Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa. 2021. 210 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

MARVILA, I.; ABREU, L. S.; COUTO, D. M.; VASCONCELOS, F. L.; VARGAS, L. A. Properties of Mortars Made with Artificial Sand. **Construction and Building Materials**, vol. 256, 2020.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, properties, and materials** (4th ed.), 2014. McGraw-Hill Education.

MIRANDA, L; SELMO, S. CDW recycled aggregate renderings: Part II Analysis of the effect of materials finer than 75 μm under accelerated aging performance. **Construction & Building Materials**, v. 20, p. 625-633, 2006.

MIT Climate Portal. **Concrete**. Disponível em: <https://climate.mit.edu/>. Acesso em: 22 set. 2023.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **SNIC**, [201?]. Disponível em: <http://snic.org.br/sustentabilidade-mudanca-climatica.php>. Acesso em: 17 de mar. 2022.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. Pearson Education Limited. 2011.

NITAHARA, A. IBGE: Construção voltou a crescer em 2019, após dois anos de queda. **Agência Brasil**, 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-06/ibge-construcao-voltou-crescer-em-2019-apos-dois-anos-de-queda>. Acesso em: 03 de maio de 2022.

NUNES, S. F.; GONÇALVES, J. P.; COSTA, M. A.; OLIVEIRA, R. F.; ALMEIDA, L. C. Characterization of limestone by multivariate analysis applied to granulometric composition. **Cerâmica**, v. 59, n. 350, p. 259-265, 2013.

OLIVEIRA, D. E.; MATOS, J. P.; LOURENÇO, P. B. Performance as for watertightness of rendering mortars using admixtures. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 6, n. 1, p. 1-10, 2021.

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

PAIVA, F. F. G.; TAMASHIRO, J. R.; SILVA, L. H. P.; ALMEIDA, M. P. B.; KINOSHITA, A. **Caracterização mecânica de argamassas constituídas pela substituição de areia natural por areia descartada de fundição com resina fenólica**. In: Anais do II CIAS - Congresso Internacional de Ambiente e Sustentabilidade. Fortaleza (CE) online, 2021. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/cias2021/389177-caracterizacao-mecanica-de-argamassas-constituídas-pela-substituicao-de-areia-natural-por-areia-descartada-de-fun/>>. Acesso em: 15 dez. 2024.

PANDEY, P.; AGRAWAL, S.; SUMAN, R. Effect of metakaolin on mechanical and durability properties of cement mortar: A review. **Construction and Building Materials**, 124, p. 1136-1149, 2016.

PAPADAKIS, V. G. Effect of fly ash on Portland cement systems: Part I. Low-calcium fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 11, p. 1727-1736, 1999.

PAVÍA, S., BOLTON, J. Lime mortar and its applications in conservation. **International Journal of Architectural Heritage**, 15 (2), 129-146. 2021.

PAVÍA, S., CARO, S. An investigation into the durability of lime mortars and renderings. **Materials and Structures**, 41 (8), 1315-1323. 2008.

PEREIRA, A. D.; COSTA, J. F.; OLIVEIRA, M. R.; ALMEIDA, P. L. Influência das impurezas presentes no calcário na obtenção de filer calcário de qualidade. In: **Congresso Brasileiro de Cerâmica**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2018.

PEREIRA, R. R.; SANTOS, H. F.; MARTINS, L. A.; BARBOSA, C. S. Characterization of Artificial Sand as an Alternative Mortar Ingredient. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 2, 2020.

PESSUTTO, D. L. T. **Captura de CO₂ em produtos cimentícios – O efeito do teor de filer**. Orientador: Vanderley Moacyr John. 2020. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

PIB DA CONSTRUÇÃO FECHA O ANO COM CRESCIMENTO DE 9,7%, A MAIOR ALTA EM 11 ANOS. **CBIC**, 2022. Disponível em: <<https://cbic.org.br/pib-da-construcao-fecha-o-ano-com-crescimento-de-97-a-maior-alta-em-11-anos/>>. Acesso em: 03 de maio de 2022.

QUARCIONI, V. A.; LOPES, F. J.; ROCHA, M. A.; SILVA, N. L. Caracterização microestrutural de argamassas selecionadas de cimento e cales hidratadas cálcica e dolomítica por microscopia óptica. In: IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Belo Horizonte, 2011.

RODGERS, L. Aquecimento global: a gigantesca fonte de CO₂ que está por toda parte, mas você talvez não saiba. **BBC News**, 2018. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753>. Acesso em: 17 de mar. 2022.

ROJAS, J. A., BEZERRA, J. R., & DE ALMEIDA, F. S. Influence of Sand Gradation on the Mechanical Properties of Mortars. **Construction and Building Materials**, 305. 2021.

SABBATINI, F. H. **Patologia das argamassas de revestimentos – aspectos físicos**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA CONSTRUÇÃO, 3. 1986, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1986, p. 69-76.

SATO, C. A. L.; SILVA, R. M.; MARTINS, A. G.; PEREIRA, J. F. Influência do tipo de cimento e teor de argamassa no comportamento de argamassas de revestimento. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, p. 308-324, 2009.

SCOLARO, T. P. **Influência de diferentes fileres nas propriedades mecânicas e na retração de argamassas autonivelantes**. Orientadora: Janaíde Cavalcante Rocha. 2020. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

SCRIVENER, K. L., JOHN, V. M., GARTNER, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, 114, 2-26.

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

SILVA, C. T.; VIEIRA, F. F.; CAVALCANTI, F. L. Influência do fíler calcário na reologia e desempenho de argamassas. **Revista Matéria**, 24(3), e12363. 2019.

SILVA, E. M.; SOUZA, L. M.; ALMEIDA, R. F.; FERREIRA, P. A. Produção de argamassas com fíler calcário. In: **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Natal, RN, Brasil. 2016.

SILVA, F. C.; CARVALHO, J. M.; GOMES, A. F.; LIMA, P. R. L. Avaliação do desempenho de argamassas de revestimento com diferentes tipos de cimento. **Revista da Construção Civil**, v. 4, n. 2, p. 16-27, 2015.

SILVA, L. D.; MENDES, A. B.; PEREIRA, C. E.; RIBEIRO, D. R. Evaluation of the influence of the shape and texture of fine aggregates on the properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 15-24, 2018.

SILVA, M. R., VIEIRA, A., & COSTA, R. Mortar modifications using alternative additives: A review. **Journal of Cleaner Production**, 338. 2022.

SILVA, M. S.; ALVES, L. M. S.; ANDRADE, T. T.; FAIRBAIRN, E. M. R. Environmental performance of limestone filler in mortars: A life cycle assessment approach. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 134-143, 2019.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Orientador: Vicente Coney Campiteli. 2006. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. **Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11. 2006, Florianópolis. Anais [...] Florianópolis: ANTAC, 2006. p. 4343-4358.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C.; GLEIZE, P. J. P. **A influência dos finos de areia de britagem de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento**. 11 p. 2011.

SILVA, R. B.; BETIOLI, A. M.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M.; ROMANO, R. C. O. Influence of Limestone Filler on the Performance of Self-Compacting Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 7, 2021.

STROEVEN, P.; STROEVEN, M. S. **System for simulation of aggregated matter application to cement hydration**. Cement and Concrete Research, v. 29, n. 8, p. 1299-1304, 1999.

TRAVAIN, M. D. **Potencial de substituição de cimento por finos de quartzo em materiais cimentícios**. Orientador: Bruno Luis Damineli. 2019. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

TRAVAIN, D. M. S. **Avaliação da utilização de fíler calcário como substituição parcial do cimento em argamassas**. 2019. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

VILHENA, A. L. F.; PILEGGI, R. G. O efeito do fíler calcário na hidratação do cimento Portland. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 3, n. 5, p. 1-12, 2010.

WONG, H. H. C.; KWAN, A. K. H. **Packing density of cementitious materials: part 1 - measurement using a wet packing method.** Materials and Structures 41 - p. 689–701, 2008.

YU, A. B.; FENG, C. L.; ZOU, R. P.; YANG, R. Y. **On the relationship between porosity and interparticle forces.** Powder Technology, v. 130, n.1-3, p. 70-76, 2003.

APÊNDICE A – ROTEIRO DE CÁLCULO DO EMPACOTAMENTO EXPERIMENTAL DOS MATERIAIS FINOS INDIVIDUAIS

Este apêndice apresenta o roteiro de cálculo utilizado para definir as densidades de empacotamento experimental, conforme o método de Wong e Kwan (2008), para cada material individual. Para ilustrar, foram utilizados os dados do cálculo da densidade de empacotamento experimental do cimento *Portland* com a relação *a/finos* de 0,10, conforme Tabela 51.

TABELA 51 - DADOS DE ENTRADA PARA A DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DO CIMENTO PORTLAND COM A/FINOS DE 0,10

<i>a/finos</i> (massa)	0,10
ρ_w (kg/m ³)	1000
ρ_{cimento} (kg/m ³)	3117
u_w	0,31
R_{cimento}	1
Massa da pasta (kg)	0,482

FONTE: A autora (2023).

Após obter o valor da máxima densidade medida em laboratório, fazendo uso da Equação 12 e Equação 13, é possível obter o volume de sólidos (V_c) e o volume de água (V_w).

$$V_c = \frac{M}{\rho_w \times u_w + \rho_a \times R_a + \rho_b \times R_b + \rho_c \times R_c} \quad (12)$$

$$V_w = u_w \times V_c \quad (13)$$

Esses sendo:

M a densidade aparente medida no laboratório

ρ_w a densidade da água

ρ_a , ρ_b e ρ_c as densidades dos sólidos

a , b e c ; R_a , R_b e R_c as relações volumétricas entra a , b e c par o total de materiais cimentícios.

Fazendo a substituição das variáveis nas equações apresentadas anteriormente pelos valores da Tabela 56, tem-se as Equações 14 e 15.

$$V_c = \frac{0,482}{1000 \times 0,31 + 3117 \times 1} = 0,000140 \text{ m}^3 \quad (14)$$

$$V_w = 0,31 \times 0,000140 = 0,000044 \text{ m}^3 \quad (15)$$

Em seguida é possível determinar a relação de vazios (u) e a concentração de sólidos (\emptyset) através da Equação 16 e a Equação 17, respectivamente.

$$u = \frac{(V - V_c)}{V_c} \quad (16)$$

$$\emptyset = \frac{V_c}{V} \quad (17)$$

Sendo V o volume do recipiente. Substituindo os valores da Tabela 56 nessas equações, tem-se a Equação 18 e a Equação 19 a seguir.

$$u = \frac{(0,00039733 - 0,000140)}{0,000140} = 1,8284 \quad (18)$$

$$\emptyset = \frac{0,000140}{0,00039733} = 0,3536 \quad (19)$$

O mesmo procedimento foi aplicado a todas as relações *al* finos estabelecidas, assim como para cada densidade aparente medida em laboratório para os materiais individuais (cimento *Portland*, pó de pedra e sílica ativa). Os resultados completos estão detalhados no item 4.1.1.

APÊNDICE B – ROTEIRO DE CÁLCULO DO MODELO ANALÍTICO (CPM)

Este apêndice apresenta o roteiro de cálculo utilizado para o modelo analítico (CPM). Para a realização deste modelo, é essencial possuir previamente os valores de densidade de empacotamento de cada material (β), o D50 dos materiais, e o volume relativo de cada componente na mistura.

A densidade de empacotamento foi determinada pelo método experimental de Wong e Kwan (2008), já descrito anteriormente. O D50 de cada material foi obtido por granulometria a laser, conforme indicado na caracterização de cada insumo. O volume relativo de cada material é previamente definido, representando as variações do teor de cada componente na mistura.

Para ilustrar os cálculos, os dados de entrada para a primeira aplicação do CPM neste estudo são apresentados na Tabela 52, considerando uma situação sem a substituição do cimento por fíler de calcário.

TABELA 52 - DADOS DE ENTRADA PARA A SITUAÇÃO SEM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR FÍLER DE CALCÁRIO

Classe	Material	Dens. empac. individual (β_i)	D50 (mm)	Proporção em volume (y_i)
1	Areia	0,487	0,05837	0,75
2	Cimento	0,5501	0,01946	0,125
3	Fíler	0,6215	0,01448	0
4	Cal	0,6922	0,00608	0,125

FONTE: A autora (2023).

Inicialmente determina-se os coeficientes referentes a interação entre as partículas, ambos os coeficientes dependem dos diâmetros das classes. Os efeitos de interação entre partículas são o efeito de afastamento (a_{ij}), definido pela Equação 20, e o efeito parede (b_{ij}), definido pela Equação 21, os quais já foram citados e detalhados no item 2.2.2.

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1,02}} \quad (20)$$

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1,50} \quad (21)$$

O cálculo dos coeficientes de interação entre as partículas deve ser realizado para todas as combinações possíveis entre classes de grãos, seguindo os princípios estabelecidos nas Equações 20 e 21. Os resultados dessas interações, para a situação descrita na Tabela 58, são apresentados nas Tabelas 53 e 54, que correspondem ao efeito de afastamento e ao efeito de parede, respectivamente.

TABELA 53 - VALORES PARA O COEFICIENTE AIJ

a _{ij}		j			
		1	2	3	4
i	1	1	0,582044	0,502343	0,325885658
	2	∅R	1	0,866586	0,563716102
	3	∅R	∅R	1	0,653032746
	4	∅R	∅R	∅R	1

FONTE: A autora (2023).

TABELA 54 - VALORES PARA COEFICIENTE BIJ

b _{ij}		j			
		1	2	3	4
i	1	1	∅R	∅R	∅R
	2	0,455738886	1	∅R	∅R
	3	0,347975625	0,870542	1	∅R
	4	0,152199657	0,430131	0,558474	1

FONTE: A autora (2023).

É importante notar que os resultados encontrados para algumas combinações de classes de grãos não pertencem ao conjunto dos números reais. Para o coeficiente do efeito de afastamento, isso ocorre quando $d_i < d_j$, o que é coerente visto que esse efeito é resultado da ação de partículas de menor tamanho sobre partículas maiores. Para o coeficiente do efeito parede ocorre o contrário ($d_i > d_j$), pois esse efeito é resultado da ação de partículas de maior tamanho sobre partículas menores. Além disso, grãos de mesmo tamanho não provocam efeito de afastamento ou efeito parede entre si, resultando em coeficientes iguais a um quando combinados.

Após calcular os efeitos de interação para todas as combinações, é determinado o valor do empacotamento virtual (γ). Este valor é obtido utilizando

as Equações 22, 23 e 24, que são fundamentais para a realização do cálculo do empacotamento virtual.

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{\beta_1}{1 - \sum_{j=1}^{1-1=0} \left[1 - \beta_1 + b_{1j}\beta_1 \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=1+1=2}^3 \left[1 - \frac{a_{1j}\beta_1}{\beta_j} \right] y_j} \\ &= \frac{\beta_1}{1 - \left\{ \left[1 - \frac{a_{12}\beta_1}{\beta_2} \right] y_2 + \left[1 - \frac{a_{13}\beta_1}{\beta_3} \right] y_3 \right\}} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= \frac{\beta_2}{1 - \sum_{j=1}^{2-1=1} \left[1 - \beta_2 + b_{2j}\beta_2 \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=1+2=3}^3 \left[1 - \frac{a_{2j}\beta_2}{\beta_j} \right] y_j} \\ &= \frac{\beta_2}{1 - \left\{ \left[1 - \beta_2 + b_{21}\beta_2 \left(1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right] y_1 + \left[1 - \frac{a_{23}\beta_2}{\beta_3} \right] y_3 \right\}} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \gamma_3 &= \frac{\beta_3}{1 - \sum_{j=1}^{3-1=2} \left[1 - \beta_3 + b_{3j}\beta_3 \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=1+3=4}^3 \left[1 - \frac{a_{3j}\beta_3}{\beta_j} \right] y_j} \\ &= \frac{\beta_3}{1 - \left\{ \left[1 - \beta_3 + b_{31}\beta_3 \left(1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right] y_1 + \left[1 - \beta_3 + b_{32}\beta_3 \left(1 - \frac{1}{\beta_2} \right) \right] y_2 \right\}} \end{aligned} \quad (24)$$

O valor da densidade virtual do conjunto será o menor valor obtido entre essas equações, seguindo conforme a Equação 25 indica.

$$\gamma = \text{MIN} (\gamma_i) \quad (25)$$

Finalmente, a densidade de empacotamento real é calculada, considerando a influência da energia de compactação (K). O valor de K foi fixado em 12, conforme sugerido por Fennis (2011), pois este valor corresponde à energia de compactação que mais se aproxima da metodologia proposta por Wong e Kwan (2008). Dessa maneira, a densidade de empacotamento real do conjunto é determinada conforme a Equação 26.

$$12 = \frac{\frac{y_1}{\beta_1}}{\frac{1}{\emptyset} - 1} + \frac{\frac{y_2}{\beta_2}}{\frac{1}{\emptyset} - 1} + \frac{\frac{y_3}{\beta_3}}{\frac{1}{\emptyset} - 1} \quad (26)$$
$$\frac{\gamma_1}{\gamma_1} \quad \frac{\gamma_2}{\gamma_2} \quad \frac{\gamma_3}{\gamma_3}$$

A densidade de empacotamento real (\emptyset) é determinada pela raiz de menor valor. Este procedimento foi aplicado a todas as combinações avaliadas neste estudo.

APÊNDICE C – ROTEIRO DE CÁLCULO: EMPACOTAMENTO EXPERIMENTAL DO CONJUNTO GRANULAR

Este roteiro de cálculo ilustra como foram determinados os valores das densidades de empacotamento experimental utilizando o método de Wong e Kwan (2008) para o conjunto granular. As equações utilizadas são as mesmas apresentadas no Apêndice A, englobando a relação volumétrica e os dados de todos os materiais. Como exemplo, estão apresentados os dados de entrada na Tabela 55 para a aplicação do método na situação com 10% de substituição do cimento por fíler de calcário e relação a/ms (massa) de 0,15.

TABELA 55 - DADOS DE ENTRADA PARA A DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DO CONJUNTO GRANULAR COM 10% DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR FÍLER DE CALCÁRIO E A/MS DE 0,15

a/ms (massa)	0,15
ρ_w (kg/m ³)	1000
ρ_{cimento} (kg/m ³)	3117
ρ_{cal} (kg/m ³)	2390
$\rho_{\text{fíler}}$ (kg/m ³)	2716
ρ_{AA} (kg/m ³)	3237
u_w	0,47
R_{cimento}	0,0930228
R_{cal}	0,07158365
$R_{\text{fíler}}$	0,0102184
R_{AA}	0,8251751
Massa pasta (kg)	0,836

FONTE: A autora (2023).

Substituindo as variáveis das Equações 12 e 13 do apêndice A com os valores da Tabela 60 tem-se a Equação 27 e Equação 28.

$$V_c = \frac{0,836}{1000 \times 0,47 + 3117 \times 0,0930228 + 2390 \times 0,07158365 + 2716 \times 0,0102184 + 3237 \times 0,8251751} \quad (27)$$

$$= 0,000230$$

$$V_w = 0,47 \times 0,000230 = 0,000108 \quad (28)$$

Para definir o índice de vazios (u) e a concentração de sólidos (ϕ) faz-se uso das Equações 16 e 17 do apêndice A, respectivamente.

$$u = \frac{(0,00039733 - 0,000230)}{0,000230} = 0,7251 \quad (29)$$

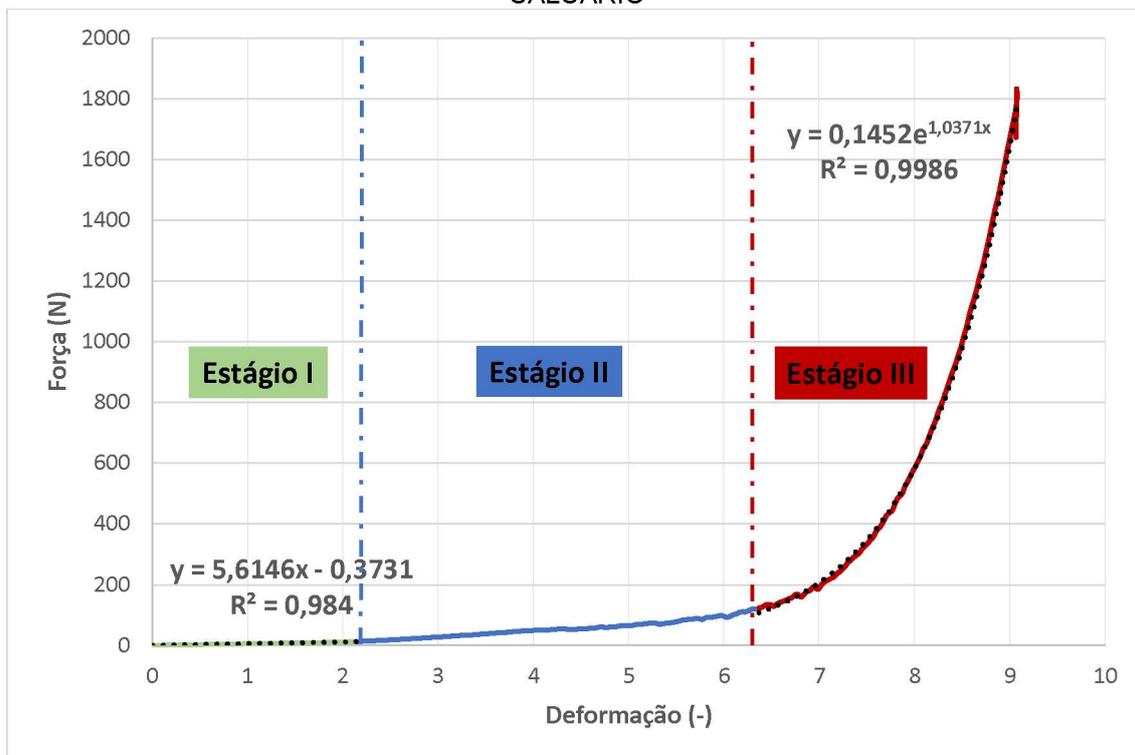
$$\phi = \frac{0,000230}{0,00039733} = 0,5797 \quad (30)$$

Esse procedimento foi realizado em todas as relações definidas de a/ms para cada argamassa (0%, 4%, 10%, 16% e 20% de teor de fíler de calcário).

APÊNDICE D – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

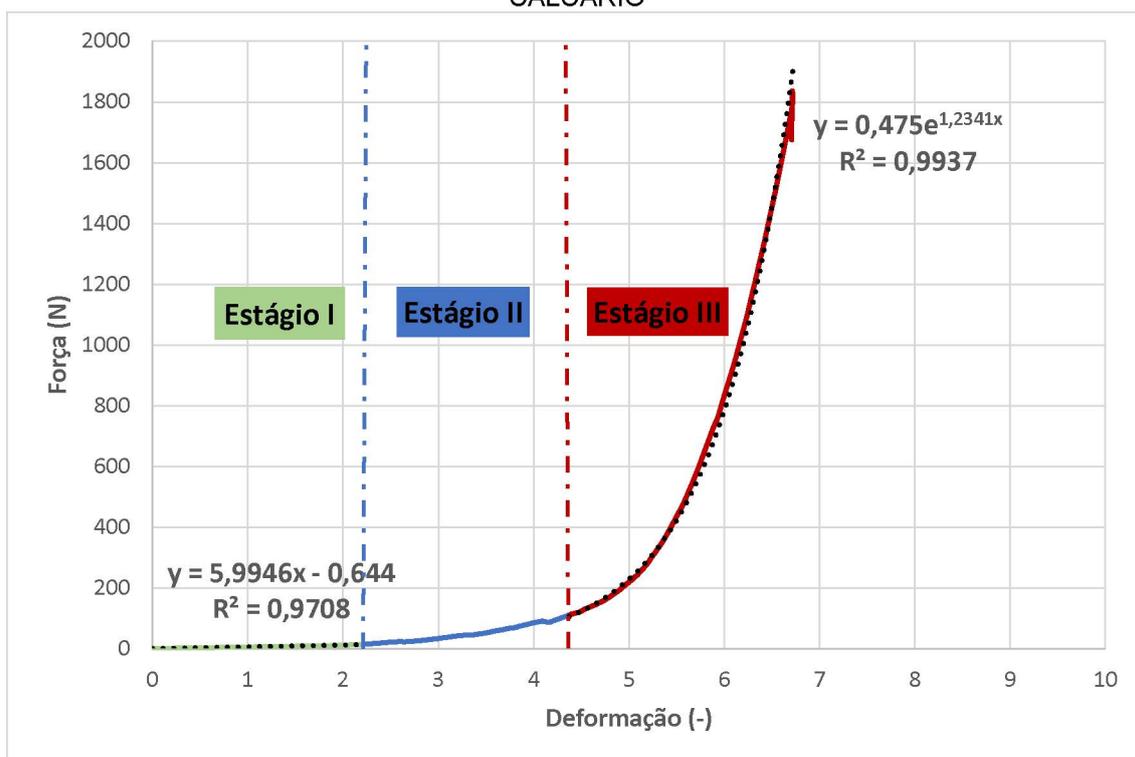
Abaixo estão apresentados gráficos com os resultados obtidos no ensaio de *Squeeze-flow* das argamassas estudadas.

GRÁFICO 25 - SQUEEZE-FLOW NA ARGAMASSA COM 0% DE TEOR DE FÍLER DE CALCÁRIO



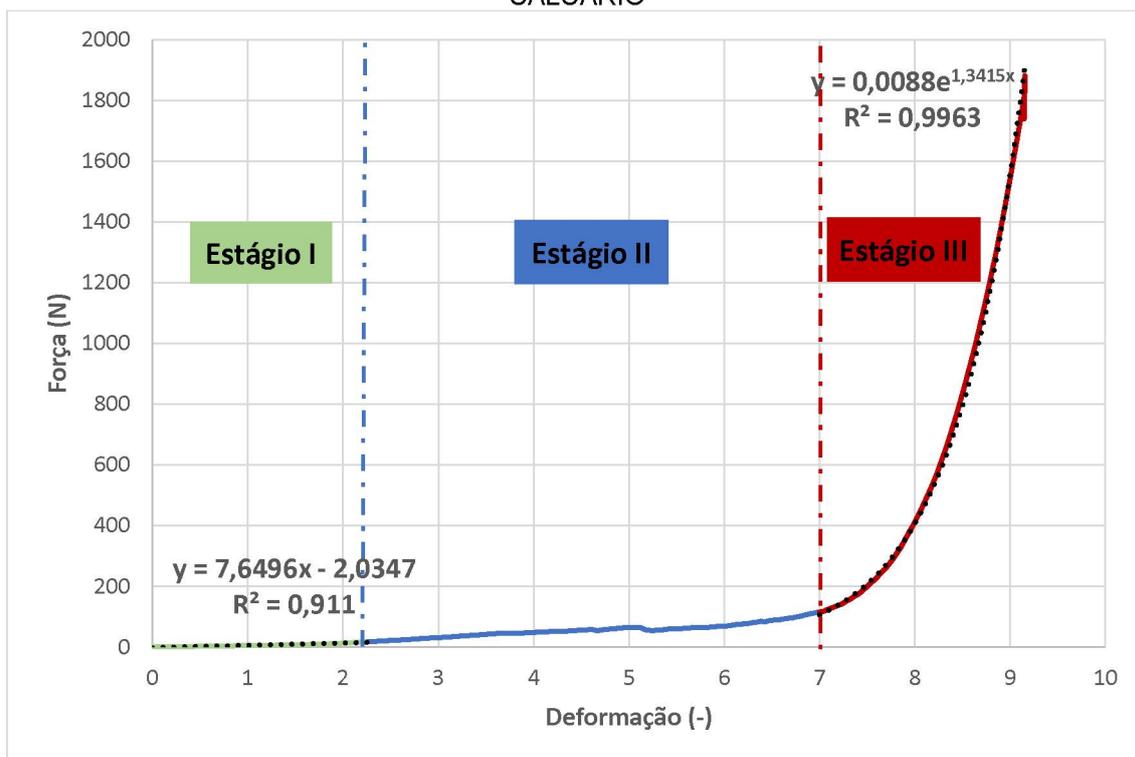
FONTE: A autora (2023).

GRÁFICO 26 - SQUEEZE-FLOW NA ARGAMASSA COM 15% DE TEOR DE FÍLER DE CALCÁRIO



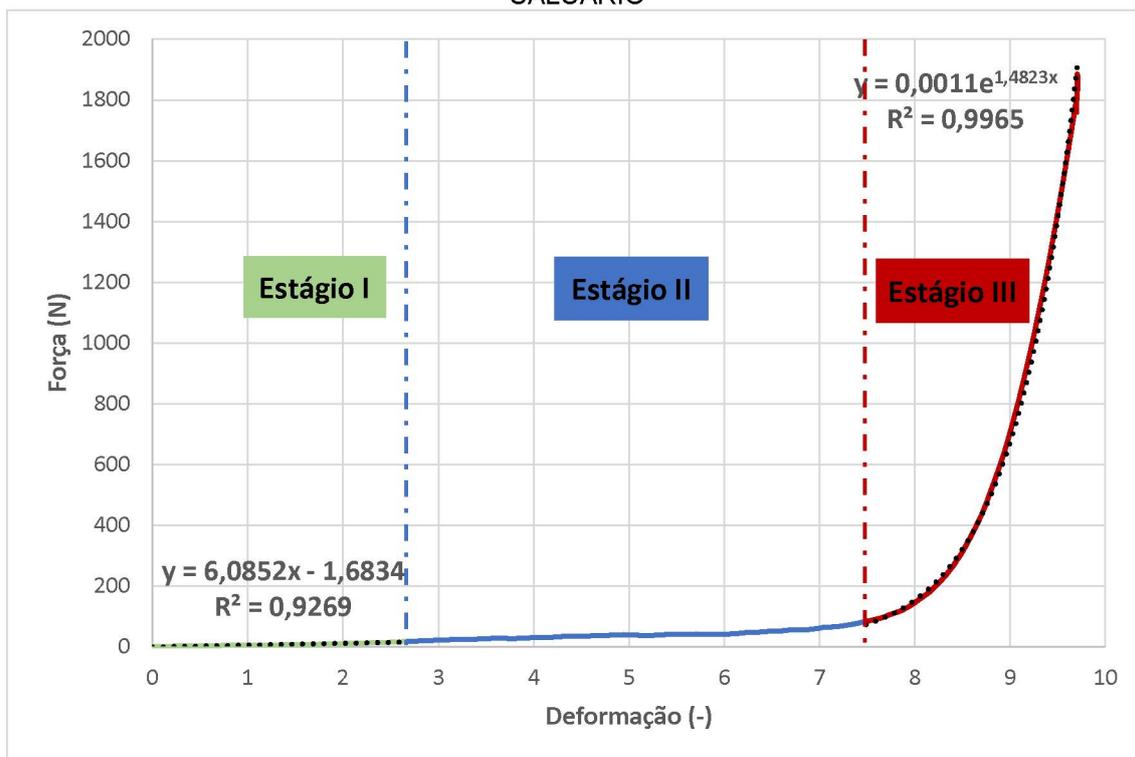
FONTE: A autora (2023).

GRÁFICO 27 - SQUEEZE-FLOW NA ARGAMASSA COM 20% DE TEOR DE FÍLER DE CALCÁRIO



FONTE: A autora (2023).

GRÁFICO 28 - SQUEEZE-FLOW NA ARGAMASSA COM 25% DE TEOR DE FÍLER DE CALCÁRIO



FONTE: A autora (2023).

APÊNDICE E – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Abaixo estão apresentadas tabelas com os resultados obtidos nos ensaios no estado endurecido das argamassas estudadas.

TABELA 56 – DENSIDADE DE MASSA APARENTE PARA ARGAMASSA COM 0% DE FÍLER DE CALCÁRIO

REF	Peso inicial (g)	Dimensões (cm)	Volume (cm ³)	Densidade (kg/m ³)	Densidade média (kg/m ³)
CP 1	475,76	16,16 x 4,05 x 4,07	266,37	1786	1867
CP 2	478,26	16,14 x 4,05 x 4,04	264,74	1807	
CP 3	480,77	16,25 x 4,03 x 4,05	265,22	1813	
CP 4	477,45	16,06 x 3,95 x 4,05	255,65	1868	
CP 5	477,31	16,03 x 4,02 x 4,03	259,70	1838	
CP 6	473,65	16,03 x 4,05 x 4,03	261,63	1810	
CP 7	473,48	16,05 x 4,06 x 4,02	261,96	1807	
CP 8	496,11	16,28 x 3,95 x 4,03	259,15	1914	
CP 9	507	16,2 x 3,98 x 4,04	260,48	1946	
CP 10	499,91	16,04 x 4,07 x 4,03	263,09	1900	
CP 11	497,4	16,17 x 4 x 4,01	259,37	1918	
CP 12	485,76	16,06 x 4,04 x 4,04	262,12	1853	
CP 13	469,55	16,03 x 3,9 x 4,02	251,32	1868	
CP 14	495,33	16,11 x 4,11 x 4,02	266,17	1861	
CP 15	500,93	16,08 x 4,16 x 4,04	270,25	1854	
CP 16	508,9	16,14 x 3,9 x 4,06	255,56	1991	
CP 17	499,16	16,03 x 4,05 x 4,02	260,98	1913	
CP 18	497,44	16,17 x 4,08 x 4,07	268,51	1853	

FONTE: A autora (2023).

TABELA 57 – DENSIDADE DE MASSA APARENTE PARA ARGAMASSA COM 15% DE FÍLER DE CALCÁRIO

ARG15	Peso inicial (g)	Dimensões (cm)	Volume (cm ³)	Densidade (kg/m ³)	Densidade média (kg/m ³)
CP 1	472,07	16,12 x 3,93 x 4,04	255,94	1844	1820

CP 2	477,99	16,2 x 4,02 x 3,99	259,84	1840
CP 3	484,56	16,19 x 4,03 x 4,04	263,59	1838
CP 4	478,65	16,22 x 3,98 x 4,02	259,51	1844
CP 5	482,85	16,29 x 4,03 x 4,02	263,91	1830
CP 6	484,76	16,26 x 4,01 x 4,05	264,07	1836
CP 7	479,55	16,33 x 4,06 x 4,05	268,51	1786
CP 8	477,94	16,26 x 4 x 4	260,16	1837
CP 9	481,2	16,36 x 3,99 x 4	261,11	1843
CP 10	474,85	16,35 x 3,98 x 4	260,29	1824
CP 11	484,13	16,3 x 4,08 x 4	266,02	1820
CP 12	479,75	16,14 x 4,13 x 4,03	268,63	1786
CP 13	490,84	16,19 x 4,04 x 4,01	262,28	1871
CP 14	493,74	16,29 x 4,03 x 4,15	272,44	1812
CP 15	497,97	16,27 x 4,02 x 4,12	269,47	1848
CP 16	493,98	16,27 x 4,11 x 4	267,48	1847
CP 17	490,28	16,32 x 4,08 x 4,05	269,67	1818
CP 18	492,88	16,27 x 4,29 x 4,3	300,13	1642

FONTE: A autora (2023).

TABELA 58 – DENSIDADE DE MASSA APARENTE PARA ARGAMASSA COM 20% DE FÍLER DE CALCÁRIO

ARG20	Peso inicial (g)	Dimensões (cm)	Volume (cm ³)	Densidade (kg/m ³)	Densidade média (kg/m ³)
CP 1	494,8	16,15 x 4,07 x 4	262,92	1882	1808
CP 2	501	16,28 x 4,13 x 4,02	270,29	1854	
CP 3	466,94	16,06 x 4,04 x 3,88	251,74	1855	
CP 4	467,49	16,05 x 4,05 x 4,01	260,66	1793	
CP 5	468,85	16,03 x 4,06 x 4,04	262,93	1783	
CP 6	461,43	16,07 x 3,90 x 4,04	253,20	1822	
CP 7	486,94	16,26 x 4,05 x 4,09	269,34	1808	
CP 8	465,79	16,02 x 4,04 x 3,99	258,24	1804	
CP 9	460,52	16,06 x 4,03 x 4,06	262,77	1753	

CP 10	463,96	16,05 x 4 x 3,98	255,52	1816
CP 11	487,51	16,12 x 4,03 x 3,97	257,91	1890
CP 12	501,07	16,31 x 4,03 x 4	262,92	1906
CP 13	457,54	16,17 x 3,96 x 4	256,13	1786
CP 14	461,45	16,12 x 3,91 x 4,03	254,01	1817
CP 15	483,36	16,29 x 4,2 x 4,06	277,78	1740
CP 16	473,61	16,22 x 4,16 x 4,03	271,93	1742
CP 17	482,75	16,25 x 4,28 x 4,06	282,37	1710
CP 18	463,7	16,15 x 4,04 x 3,98	259,68	1786

FONTE: A autora (2023).

TABELA 59 – DENSIDADE DE MASSA APARENTE PARA ARGAMASSA COM 25% DE FÍLER DE CALCÁRIO

ARG25	Peso inicial (g)	Dimensões (cm)	Volume (cm ³)	Densidade (kg/m ³)	Densidade média (kg/m ³)
CP 1	476,66	16,23 x 3,98 x 4,04	260,97	1827	1751
CP 2	474,28	16,4 x 4,04 x 4,05	268,34	1767	
CP 3	486,79	16,29 x 4,18 x 4,05	275,77	1765	
CP 4	473,07	16,31 x 4,08 x 4,05	269,51	1755	
CP 5	464,15	16,36 x 4,03 x 3,94	259,77	1787	
CP 6	464,27	16,26 x 3,98 x 4,06	262,74	1767	
CP 7	472,88	16,19 x 4,02 x 3,85	250,57	1887	
CP 8	466,4	16,33 x 3,99 x 4	260,63	1790	
CP 9	467,08	16,23 x 3,96 x 3,99	256,44	1821	
CP 10	475,68	16,24 x 4,04 x 4,03	264,41	1799	
CP 11	482,41	16,19 x 4,01 x 4,04	262,28	1839	
CP 12	482,05	16,27 x 3,90 x 4,06	257,62	1871	
CP 13	476,24	16,27 x 4,07 x 4,05	268,19	1776	
CP 14	471,71	16,2 x 4,03 x 4,05	264,41	1784	
CP 15	470,82	16,24 x 4,25 x 4,3	296,79	1586	
CP 16	478,14	16,5 x 4,29 x 4,29	303,67	1575	
CP 17	485,9	16,55 x 4,28 x 4,28	303,17	1603	

CP 18	463,53	16,9 x 4,14 x 4,36	305,05	1520
-------	--------	-----------------------	--------	------

FONTE: A autora (2023).

TABELA 60 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE PARA ARGAMASSA COM 0% DE FÍLER DE CALCÁRIO

REF	Peso inicial (g)	M10 (g)	M90 (g)	C (g/dm ² .min ^{1/2})	Absorção 10 min (g/cm ²)	Absorção 90 min (g/cm ²)
CP 13	469,55	472,9	478,8	5,9	0,209375	0,578125
CP 14	495,33	498,5	505,02	6,52	0,198125	0,605625
CP 15	500,93	504,05	510,4	6,35	0,195	0,591875
CP 16	508,9	511,2	518,8	7,6	0,14375	0,61875
CP 17	499,16	503,4	509	5,6	0,265	0,615
CP 18	497,44	501,04	506,7	5,66	0,225	0,57875
Média				6,27	0,2060417	0,5980208

FONTE: A autora (2023).

TABELA 61 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE PARA ARGAMASSA COM 15% DE FÍLER DE CALCÁRIO

ARG15	Peso inicial (g)	M10 (g)	M90 (g)	C (g/dm ² .min ^{1/2})	Absorção 10 min (g/cm ²)	Absorção 90 min (g/cm ²)
CP 13	490,84	493,3	498,85	5,55	0,15375	0,500625
CP 14	493,74	495,8	501,6	5,8	0,12875	0,49125
CP 15	497,97	500,5	505,78	5,28	0,158125	0,488125
CP 16	493,98	496,56	501,88	5,32	0,16125	0,49375
CP 17	490,28	492,56	498,23	5,67	0,1425	0,496875
CP 18	492,88	494,88	500,67	5,79	0,125	0,486875
Média				5,57	0,1448958	0,4929167

FONTE: A autora (2023).

TABELA 62 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE PARA ARGAMASSA COM 20% DE FÍLER DE CALCÁRIO

ARG20	Peso inicial (g)	M10 (g)	M90 (g)	C (g/dm ² .min ^{1/2})	Absorção 10 min (g/cm ²)	Absorção 90 min (g/cm ²)
CP 13	457,54	459,3	464	4,7	0,11	0,40375
CP 14	461,45	463,63	467,53	3,9	0,13625	0,38
CP 15	483,36	485,32	489,78	4,46	0,1225	0,40125
CP 16	473,61	475,4	480	4,6	0,111875	0,399375
CP 17	482,75	484,65	488,88	4,23	0,11875	0,383125
CP 18	463,7	465,54	470,1	4,56	0,115	0,4
Média				4,41	0,1190625	0,3945833

FONTE: A autora (2023).

TABELA 63 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE PARA ARGAMASSA COM 25% DE FÍLER DE CALCÁRIO

ARG25	Peso inicial (g)	M10 (g)	M90 (g)	C (g/dm ² .min ^{1/2})	Absorção 10 min (g/cm ²)	Absorção 90 min (g/cm ²)
CP 13	476,24	477,86	481,2	3,34	0,10125	0,31
CP 14	471,71	473,19	477,25	4,06	0,0925	0,34625
CP 15	470,82	472,51	476	3,49	0,105625	0,32375
CP 16	478,14	479,66	483,15	3,49	0,095	0,313125
CP 17	485,9	487,52	491,06	3,54	0,10125	0,3225
CP 18	463,53	465,2	469,12	3,92	0,104375	0,349375
Média				3,64	0,1	0,3275

FONTE: A autora (2023).

TABELA 64 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ARGAMASSA COM 0% DE FÍLER DE CALCÁRIO

REF	E individual (MPa)	E médio (MPa)
CP7	7086,00	5610,15
CP8	5191,40	
CP9	4639,00	
CP10	4375,80	
C11	7279,40	
C12	5089,30	

FONTE: A autora (2023).

TABELA 65 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ARGAMASSA COM 15% DE FÍLER DE CALCÁRIO

ARG15	E individual (MPa)	E médio (MPa)
CP7	5222,50	5419,83
CP8	10888,00*	
CP9	5152,10	
CP10	5773,80	
C11	5530,90	
C12	27752,00*	

FONTE: A autora (2023).

TABELA 66 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ARGAMASSA COM 20% DE FÍLER DE CALCÁRIO

ARG20	E individual (MPa)	E médio (MPa)
CP7	5226,80	3932,17
CP8	5219,30	
CP9	4303,60	
CP10	3558,90	
C11	3105,80	
C12	2178,60	

FONTE: A autora (2023).

TABELA 67 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ARGAMASSA COM 25% DE FÍLER DE CALCÁRIO

ARG25	E individual (MPa)	E médio (MPa)
CP7	2802,80	3209,22
CP8	4048,30	
CP9	5098,60	
CP10	2586,50	
C11	1600,80	
C12	3118,30	

FONTE: A autora (2023).