



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

THIAGO MENDONÇA MUNIZ DE ALBUQUERQUE

**EFEITOS FÍSICO-QUÍMICOS E MICROESTRUTURAIS DE
PARTICULADOS NA REOLOGIA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS.**

**João Pessoa – Paraíba
2025**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

THIAGO MENDONÇA MUNIZ DE ALBUQUERQUE

**FEFEITOS FÍSICO-QUÍMICOS E MICROESTRUTURAIS DE
PARTICULADOS NA REOLOGIA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, na área de Processos de Fabricação, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para obtenção do título Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Marden Torres

**João Pessoa – Paraíba
2025**

**Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação**

A345e Albuquerque, Thiago Mendonca Muniz de.
Efeitos físico-químicos e microestruturais de
particulados na reologia e propriedades mecânicas de
compósitos cimentícios / Thiago Mendonca Muniz de
Albuquerque. - João Pessoa, 2025.
214 f. : il.

Orientação: Sandro Marden Torres.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Argamassa mista. 2. Agregados -
Microcaracterização. 3. Engenharia forense. 4.
Densidade de empacotamento. I. Torres, Sandro Marden.
II. Título.

UFPB/BC

CDU 691.53 (043)

**FEFEITOS FÍSICO-QUÍMICOS E MICROESTRUTURAIS DE
PARTICULADOS NA REOLOGIA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS.**

por

THIAGO MENDONÇA MUNIZ DE ALBUQUERQUE

Tese aprovada em 18 de agosto de 2025

Banca examinadora:

[REDACTED]

Prof. Dr. Sandro Marden Torres

Orientador – UFPB

[REDACTED]

Profa. Dra. Kelly Cristiane Gomes da Silva

Examinadora Interna – UFPB

[REDACTED]

Prof. Dr. Lucídio dos Anjos Formiga Cabral

Examinador Interno – UFPB

[REDACTED]

Prof. Dr. Marçal Rosas Florentino Lima Filho

Examinador Externo – UFPB

[REDACTED]

Prof. Dr. José Alysson Dehon Moraes Medeiros

Examinador Externo – PF

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por me conceder a força e a oportunidade de trilhar e concluir esta jornada.

À minha amada esposa, Karol, e às minhas queridas filhas, Maria Luiza e Camila, por todo o apoio, compreensão e paciência nos momentos de ausência. O amor de vocês foi a minha maior motivação. Aos meus pais, Geraldo e Adriana, minha eterna gratidão pelas orações e pelo apoio incondicional. E à minha irmã, Carolina, pelo constante incentivo.

Agradeço também a meus sogros, Emanuel e Dodora, pelo apoio moral e logístico, essenciais para que eu pudesse me dedicar ao estudo.

Aos meus grandes amigos, Alysson e Sídney, que me acompanharam de perto e me deram palavras de incentivo nos momentos de angústia. O companheirismo de vocês foi fundamental. Aos demais colegas do SETEC/SR/PF/PB agradeço as constantes palavras de apoio.

Às chefias do SETEC/SR/PF/PB, em especial a José Alysson e Gustavo Vilar, pela compreensão e pelo apoio institucional.

Aos meus colegas de batalha, Jennef, Ana Natália, Rochanna, Glauco, Wesley e Elson, pela parceria e por compartilharem as angústias e as vitórias desta jornada.

Meus sinceros agradecimentos a Ricardo, Anselmo, Isaque e Sebastião pela inestimável ajuda na realização dos ensaios no LABEME/UFPB. A Ricardo, do laboratório do UNIPÊ, e a Julyerica, Coordenadora do curso de Engenharia Civil do UNIPÊ, pelo enorme apoio e por disponibilizarem o uso do laboratório. Um agradecimento especial ao meu colega Aldo, que nunca mediou esforços para me auxiliar nos ensaios realizados no laboratório do SETEC/SR/PF/PB.

Aos professores Marçal, Antônio Leal, Lucídio e Alexsandro, pela constante contribuição para a pesquisa e pelos bons momentos de confraternização.

Ao meu professor e amigo, Sandro Marden, uma mente brilhante e à frente do seu tempo, grande entusiasta e incentivador da Ciência. Sua sábia orientação foi decisiva para a concretização deste trabalho.

Meus agradecimentos a Alan Lopes, em sua gestão frente a Criminalística da Polícia Federal, e aos chefes do Serviço de Perícias de Engenharia do Instituto Nacional de Criminalística (INC), PCF Raimundo e PCF Magro. O apoio e o incentivo desses profissionais foram essenciais para a concretização do Programa de Cooperação Acadêmica -PROCAD entre a Polícia Federal e as Universidades Federais da Paraíba (UFPB) e Fluminense (UFF), um passo crucial que me permitiu ingressar no Doutorado

A todos que, sem serem nomeados, contribuíram para esta jornada, deixo aqui a minha profunda gratidão.

“Não devemos confiar nos sentidos, pois eles nos mostram apenas sombras; a verdadeira compreensão exige ver as coisas como realmente são.”

(Platão, A República, Livro VII)

RESUMO

O serviço de execução de argamassas mistas de revestimento em obras públicas, frequentemente periciadas pela Polícia Federal, apresenta um custo expressivo no contexto dos contratos analisados. Considerando o cenário recorrente de fraudes e irregularidades na execução desses serviços destaca-se a necessidade de metodologias mais robustas e cientificamente fundamentadas que possam subsidiar a atuação pericial. Neste sentido, o presente trabalho propõe avaliar os principais parâmetros estruturais e microestruturais das argamassas de revestimento e suas vinculações com a quantificação de agregados e aglomerantes presentes nas misturas aplicadas netas obras. Esta avaliação é realizada a partir de ensaios laboratoriais avançados de macro e microcaracterização, incluindo técnicas como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), análise por Multi-analysis Zonning Expert (MAZE) e Difração de Raios X (DRX). A partir da definição de parâmetros característicos para um universo representativo de argamassas mistas de revestimento com traço em volume 1:2:8 (cimento:cal:areia), com especial atenção à variação da granulometria dos agregados, foi possível estabelecer critérios de identificação desses materiais. Durante a formação desse universo representativo, foram conduzidas análises detalhadas do empacotamento dos agregados utilizados, bem como da influência das diferentes curvas de distribuição granulométrica no comportamento das argamassas, destacando-se que a correta escolha do agregado pode ensejar em menor consumo de cimento no compósito, gerando um ganho financeiro e ecológico. Foi avaliado que a referência legal de custos para orçamento de argamassas em obra públicas, SINAPI, cumpre efetivamente seu papel. No trabalho foi proposta uma metodologia baseada em parâmetros físico-químicos que auxilia nas análises de superfaturamento por deficiência de qualidade da execução de argamassas mistas, por meio da reconstituição de seu traço.

Palavras-chave: Engenharia Forense, Microcaracterização, Argamassa mista, Agregados, Densidade de empacotamento.

ABSTRACT

The execution of rendering lime mortars services in public works, frequently subject to forensic analysis by the Federal Police, represents a significant cost in the context of the contracts examined. Given the recurrent scenario of fraud and irregularities in the execution of these services, there is a clear need for more robust and scientifically grounded methodologies to support forensic activities. In this context, this study aims to evaluate the main structural and microstructural parameters of rendering mortars and their correlation with the quantification of aggregates and binders present in the applied mixtures. This evaluation is carried out using advanced laboratory macro and microcharacterization tests, including techniques such as Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), Multi-analysis Zonning Expert (MAZE) analysis, and X-Ray Diffraction (XRD). By defining characteristic parameters for a representative universe of rendering lime mortars with a volume ratio of 1:2:8 (cement:lime:sand), with special attention to the variation in aggregate granulometry, it was possible to establish criteria for identifying these materials. During the formation of this representative universe, detailed analyses of the packing of the aggregates used were conducted, as well as the influence of different particle size distribution curves on the behavior of the mortars. It was highlighted that the correct choice of aggregate can lead to lower cement consumption in the composite, generating both financial and ecological gains. It was also assessed that the legal cost reference for budgeting mortars in public works, SINAPI, effectively fulfills its role. The study proposes a methodology based on physicochemical parameters that assists in the analysis of overbilling due to poor quality execution of lime mortars, through the reconstitution of their mix design.

Keywords: Forensic Engineering, Microcharacterization, Lime-cement Mortar, Aggregates, Density Packing

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Tipologia de obras periciadas pela Polícia Federal no Estado da Paraíba.....	17
Figura 2- Gráfico contendo a relevância no custo global dos serviços de argamassa de revestimento e concreto para estruturas das principais obras de edificação objeto de perícia.	20
Figura 3- Diagrama indicando diversos ramos científicos contribuintes para as Ciências Forenses.....	27
Figura 4- Desenho esquemático das fases da licitação.....	36
Figura 5- Desenho esquemático com apresentação dos prazos mínimos para apresentação de propostas e lances de acordo com a Lei nº 14.133/2021.....	38
Figura 6- Tabela com a classificação normatizada das argamassas	53
Figura 7- Camadas de revestimento	56
Figura 8- Ciclo da Cal	60
Figura 9- Retração plástica de argamassas com diferentes agregados para traço 1:2:9	71
Figura 10- Mecanismo de intertravamento mecânico da matriz nos poros e rugosidade do substrato. a) aderência adequada, com penetração da matriz nos poros. b) aderência inadequada em função da baixa porosidade do substrato	72
Figura 11- Exemplo de imagem extraída do MEV de uma das amostras pesquisadas com magnificação de 500x	83
Figura 12- Exemplo de resultado de análise de uma das amostras pelo EDS	84
Figura 13- Exemplo de extração de resultado do MAZE para amostras da argamassa, considerando 02 fases.....	85
Figura 14- Difração de raios-X por um cristal.	87
Figura 15- Imagem dos grãos com ampliação de 25x obtido usado equipamento Regula 4307: a)0.075mm, b) 0.15mm, c) 0.30mm, d) 0.6mm, e) 1.20mm, f) 2.36mm	89
Figura 16- Desenho esquemático da ocupação dos materiais aplicado em uma argamassa	91
Figura 17- Gráfico ilustrativos das ocupações dos traços teóricos encontrados	95
Figura 18- Correlação entre fator A/C e Resistência à Compressão de argamassas obtidas na literatura.....	97
Figura 19- Trecho da composição 87292 extraída do caderno de composições do SINAPI ...	98
Figura 20- Corpos de prova após 28 dias.	101
Figura 21- Medida de espalhamento da argamassa na mesa de consistência após aplicação dos golpes.....	103
Figura 22- Imagem de um dos corpos de prova com argamassa utilizado nos ensaios.	104

Figura 23- Corpo de prova na prensa vertical para ensaio de compressão axial.....	104
Figura 24- Equipamento utilizado para ensaio a tração por flexão.....	105
Figura 25- Imagem do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo método ultrassônico.....	106
Figura 26- Determinação da massa do corpo de prova para determinação da densidade de massa.....	106
Figura 27- Ensaio de absorção de água por capilaridade.	107
Figura 28- Seccionamento dos corpos de prova para análise microestrutural.	108
Figura 29- Imagem das amostras preparadas com resina e após metalização da superfície com ouro.....	109
Figura 30- Desenho esquemático da metodologia adotada no uso do MEV.....	111
Figura 31- Equipamento da Marca Bruker modelo D8 Advance utilizado na análise de Difração de Raios-X.....	114
Figura 32- (a) distribuição do pó no porta amostra. (b) nivelamento com placa de vidro. (c) posicionamento do porta amostra no DRX.	114
Figura 33- Roteiro dos ensaios realizados.....	115
Figura 34- Ternário normatizado com variação da resistência à compressão para as argamassas obtidas no estudo.	117
Figura 35- Ternário normatizado com variação da porosidade para as argamassas obtidas no estudo.....	117
Figura 36- Ternário normatizado com variação da massa específica para as argamassas obtidas no estudo.....	118
Figura 37- Ternário normatizado com variação da porosidade para as argamassas obtidas no estudo.....	118
Figura 38- Distribuição Granulométrica (a, c, e, g) e Curva Granulométrica (b, d, f, h) dos arranjos utilizados no estudo	120
Figura 39- Densidade de empacotamento virtual (γ) dos conjuntos granulares calculados utilizando método CPM.....	121
Figura 40- Correlação entre densidade de empacotamento virtual e coeficiente de uniformidade	123
Figura 41- Densidade de Empacotamento Real (ϕ) dos conjuntos granulares calculados por meio do método CPM.....	124
Figura 42- Correlação entre densidade de empacotamento real e seus respectivos coeficientes de uniformidade.....	126
Figura 43- Densidade de empacotamento real modificado (ϕ mod.) dos conjuntos granulares, obtidos utilizando equação 20.	128

Figura 44- Relação entre coeficiente de uniformidade e densidade de empacotamento virtual, real e real modificado dos conjuntos granulares.	129
Figura 45- Validação experimental dos resultados teóricos obtidos pelo método CPM e pelo modelo proposto.	131
Figura 46- Relação entre os coeficientes de uniformidade e as densidades de empacotamento.	132
Figura 47- Módulo de Finura versus Erro normatizado entre os valores experimentais e os obtidos por modelos teóricos: (Preto): modelo CPM e (Vermelho): Modelo real modificado	134
Figura 48- Relação entre a densidade de empacotamento do agregado e a massa específica no estado fresco da argamassa.....	136
Figura 49- Relação entre a densidade de empacotamento do agregado e o fator aglomerante/agregado das argamassas.	137
Figura 50- Relação entre a densidade de empacotamento do agregado e o teor de ar incorporado.	138
Figura 51- Relação entre o módulo de finura do agregado e o consumo de água para atingir consistência de 260mm no ensaio <i>flow table</i>	139
Figura 52- Relação entre o módulo de finura do agregado e o consumo de água para atingir consistência de 260mm no ensaio <i>flow table</i> em relação ao consumo de cimento e de sólidos.	140
Figura 53- Ocupação dos materiais e vazios nas argamassas produzidas.	141
Figura 54- Resultados dos ensaios de resistência à compressão a 28 dias e de tração à flexão das argamassas.....	143
Figura 55- Relação entre resistência à compressão das argamassas aos 28 dias e o módulo de finura das areias utilizadas.....	144
Figura 56- Relação entre resistência à compressão e à tração na flexão.	145
Figura 57- Relação entre resistência à compressão das argamassas aos 28 dias e o fator água cimento destas.	146
Figura 58- Relação entre módulo de finura das areias utilizadas nas argamassas e seus respectivos módulos de elasticidade.....	147
Figura 59- Correlação da densidade de empacotamento das areias utilizadas nas argamassas e suas respectivas massas específica.	148
Figura 60- Correlação do módulo de finura das areias utilizadas nas argamassas e suas respectivas massas específica.	149
Figura 61- Relação entre densidade de empacotamento dos agregados e coeficiente de absorção por capilaridade das argamassas.....	150

Figura 62- O gráfico radar apresenta o efeito da variação do coeficiente de uniformidade dos agregados sobre as propriedades estudadas. (roxo): Argamassa com agregado com 5 classes e granulometria média; (Vermelho): Argamassa com agregado com 4 classes e granulometria média; (Verde): Argamassa com agregado com 4 classes granulometria mais grosseira; (Preto): Argamassa com agregado com 4 classes e granulometria mais fina.....	151
Figura 63- O gráfico radar apresenta o efeito da variação do módulo de finura dos agregados sobre as propriedades estudadas. (roxo): Argamassa com agregado com 5 classes e granulometria média; (Vermelho): Argamassa com agregado com 4 classes e granulometria média; (Verde): Argamassa com agregado com 4 classes granulometria mais grosseira; (Preto): Argamassa com agregado com 4 classes e granulometria mais fina.....	152
Figura 64- Gráfico radar apresentando o efeito nas propriedades da argamassa da variação do volume de agregado (M4-10 x M4). (Preto): Argamassa com agregado com 4 classes e granulometria média e traço 1:2:8; (Cian): Argamassa com agregado com 4 classes e granulometria média e traço 1:2:10.....	153
Figura 65- Ilustração de uma das amostras de cada argamassa analisada pelo MAZE. (a) Argamassa moldada com areia fina com 04 classes e traço 1:2:8; (b) Argamassa moldada com areia média com 04 classes e traço 1:2:8; (c) Argamassa moldada com areia grossa com 04 classes e traço 1:2:8; (d) Argamassa moldada com areia média com 05 classes e traço 1:2:8; (e) Argamassa moldada com areia média com 04 classes e traço 1:2:10; (f) Argamassa moldada com areia natural e traço 1:2:12; (g) Argamassa industrializada;	155
Figura 66- Imagem do EDS da argamassa F4	156
Figura 67- Imagem extraída do MEV com magnificação 250x de uma das argamassas confeccionadas, com sua composição de Ca e Si extraídas do EDS, observando a partícula formada de finos compostos Ca, bem como a formação de portlandita no entorno dos agregados (coloração mais clara).....	158
Figura 68- Imagem extraída do MEV com magnificação 250x de uma das argamassas confeccionadas, com sua composição de Ca e Si extraídas do EDS, observando a partícula formada de finos compostos Ca, bem como a formação de portlandita no entorno dos agregados (coloração mais clara).....	158
Figura 69- Ilustração de uma das amostras de cada argamassa analisada pelo MAZE. (a) Argamassa moldada com areia fina com 04 classes e traço 1:2:8; (b) Argamassa moldada com areia média com 04 classes e traço 1:2:8; (c) Argamassa moldada com areia grossa com 04 classes e traço 1:2:8; (d) Argamassa moldada com areia média com 05 classes e traço 1:2:8; (e) Argamassa moldada com areia média com 04 classes e traço 1:2:10; (f) Argamassa moldada com areia natural e traço 1:2:12; (g) Argamassa industrializada;	161
Figura 70- Relação dos teores de Cálcio nas argamassas analisadas.	163
Figura 71- Relação dos teores de Sílica nas argamassas analisadas.....	164
Figura 72- Distribuição dos teores de Ca, Si e demais elementos das argamassas.	164
Figura 73- Relação entre o teor de cálcio e de sílica das argamassas moldadas com traço 1:2:8 e 1:2:10.	165

Figura 74- Relação entre o teor de cálcio + outros e de sílica das argamassas moldadas	166
Figura 75- Correlação entre o coeficiente de uniformidade dos agregados utilizados nas argamassas moldadas com traço 1:2:8 e teor de pasta nas amostras (Ca)	167
Figura 76- Correlação entre o teor de sílica e a relação entre aglomerante e agregado no peso	168
Figura 77- Correlação entre o teor de sílica das argamassas moldadas com traço 1:2:8 e a massa específica no estado fresco.	169
Figura 78- Correlação entre o teor de sílica das argamassas moldadas com traço 1:2:8 e o coeficiente de absorção de água por capilaridade.	170
Figura 79- Difratômetro da Argamassa F4.....	171
Figura 80- Relação entre teor de agregado por pasta de cimento teórica e obtida por meio do DRX.....	172
Figura 81- Gráfico com a correlação entre o teor de agregado/pasta teórico ajustado e o teor obtido por meio de ensaio com DRX	174
Figura 82- Imagem do EDS da argamassa M4.....	202
Figura 83- Imagem do EDS da argamassa G4.	203
Figura 84- Imagem do EDS da argamassa M5.....	204
Figura 85- Imagem do EDS da argamassa M4-10.	205
Figura 86- Imagem do EDS da argamassa 1:2:12	206
Figura 87- Imagem do EDS da argamassa Industrializada.....	207
Figura 88- Difratograma da argamassa M4.....	208
Figura 89- Difratograma da argamassa G4.....	208
Figura 90- Difratograma da argamassa M5.....	209
Figura 91- Difratograma da argamassa M4-10.....	209
Figura 92- Difratograma da argamassa 1:2:12	210
Figura 93- Difratograma da argamassa industrializada.....	210
Figura 94- Desenho esquemático da análise físico-química em argamassas de revestimento objeto de perícia.....	212
Figura 95- Desenho esquemático da análise mineralógica de argamassas de revestimento objeto de perícia.....	213
Figura 96- Desenho esquemático da metodologia proposta.....	213

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Definições de Superfaturamento ao longo do tempo	45
Tabela 2- Classificação das argamassas (CARASEK,2010).....	54
Tabela 3- Classificação quanto a sua função (CARASEK,2010)	55
Tabela 4- Tipos de cimento de acordo com NBR16.697/2018.	58
Tabela 5- Influência das características granulométricas das areias nas propriedades das argamassas de assentamento.....	64
Tabela 6- Principais etapas a serem seguidas para confecção de argamassas	65
Tabela 7- Resumo das principais propriedades das argamassas.....	66
Tabela 8- Valores do índice de compactação K por De Larrard.	80
Tabela 9- Massa unitária e densidade de empacotamento de cada classe de grão.	90
Tabela 10- Distribuição granulométrica dos conjuntos granulares com número de classes de grãos variando entre 4 e 7	99
Tabela 11- Dosagem das argamassas confeccionadas.....	100
Tabela 12- Relação de ensaios de macrocaracterização das argamassas produzidas.....	102
Tabela 13- Valores teóricos de propriedades obtidos para os 100 traços gerados.	116
Tabela 14- Comparação dos custos obtidos por m ² de reboco.	116
Tabela 15- Caracterização dos conjuntos granulares reproduzidos.....	130
Tabela 16- Resumo dos resultados dos ensaios das argamassas estudadas no estado fresco. 135	
Tabela 17- Resumo dos resultados dos ensaios das argamassas estudadas no estado endurecido.	142
Tabela 18- Resumo dos teores de Cálcio e Sílica obtidos através do MAZE.	162
Tabela 19- Tabela com parâmetros das fases cristalinas obtidas por meio de DRX.....	171
Tabela 20- Valores de proporção entre pasta cimentícia e agregados obtidos por meio da quantificação das fases cristalinas das amostras.....	172
Tabela 21- Tabela com fatores agregado/pasta cimentícia ajustados pelo seu empacotamento	173

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo Geral.....	22
1.2 Objetivos específicos:	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Ciências Forenses e a Engenharia Forense	23
2.1.1 Ciências Forenses.....	23
2.1.2 Engenharia Legal ou Engenharia Forense.....	27
2.2 Argamassas para construção civil	52
2.2.1 Contextualização da argamassa.....	52
2.2.2 Componentes das argamassas simples e mista.....	56
2.2.3 Influência das condições de produção da argamassa	65
2.2.4 Propriedades das argamassas	66
2.3 Empacotamento de Partículas e sua influência.....	76
2.3.1 Aspectos teóricos de modelos de empacotamento	78
2.4 Microcaracterização das argamassas	81
2.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	81
2.4.2 Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS)	83
2.4.3 Multi-analysis Zonning Expert (MAZE).....	84
2.4.4 Difração de Raios X	85
3. MATERIAIS E MÉTODOS	88
3.1 Materiais	88
3.2 Metodologia	90
3.2.1 Elaboração de traços teóricos diversos de argamassas de revestimento mantendo-se a proporção 1:2:8 (cimento, cal e areia).....	90
3.2.2 Determinação de propriedades e custos das argamassas.....	95
3.2.3 Metodologia de estudo dos agregados	98
3.2.4 Metodologia de produção das argamassas	100
3.3 Ensaios realizado nas argamassas	102
3.3.1 Ensaios de macrocaracterização.....	102
3.3.2 Ensaios de microcaracterização	107
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	116
4.1 Resultado do estudo teórico do comportamento de argamassas com traço 1:2:8 a partir da variação da massa unitária de seus componentes	116
4.2 Resultado do estudo da densidade de empacotamento dos agregados utilizados na produção de argamassas.....	119

4.1.2 Validação experimental dos resultados	130
4.3 Resultados dos ensaios realizados nas argamassas no estado fresco.....	134
4.4 Resultados dos ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido	142
4.5 Resultados da microcaracterização das argamassas estudadas.....	153
4.5.1 Microscópio Eletrônico de Varredura	153
4.5.2 Espectroscopia de energia Dispersiva.....	156
4.5.3 Multi-Analysis Zonning Expert (MAZE)	159
4.5.4 Difração de Raios X	170
5. CONCLUSÕES.....	174
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	177
ANEXOS	202
Anexo 01- Resultado do Ensaio MEV/EDS.....	202
Anexo 02- Resultados do Ensaio DRX- Difratogramas.....	208
Anexo 03- Metodologia Proposta para Caracterização de Argamassas de Revestimento no Âmbito da Engenharia Forense.	211

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, por se tratar país em desenvolvimento e marcado por profundas desigualdades sociais, tem recebido, nas últimas décadas, um grande volume de investimentos em infraestrutura. Esses investimentos abrangem tanto a construção de grandes obras quanto projetos menores, de alto impacto social, voltados para a melhoria da qualidade de vida da população.

Dessa forma, o governo financia não apenas empreendimentos de grande porte, mas também iniciativas menores que, apesar de sua escala reduzida, exercem influência direta no cotidiano dos cidadãos. Para se ter uma ideia da magnitude dos investimentos realizados, apenas no âmbito do Sistema de Transferências Voluntárias da União (SICONV) — que engloba programas como PAC¹ ou AVANÇAR², entre os anos de 2000 e abril de 2023 (BRASIL, 2024), foram destinados cerca de R\$ 1,05 trilhão para a execução de 236.055 obras distribuídas por todo o território nacional.

É importante destacar que esse montante não inclui os investimentos realizados por meio de empresas públicas, como a Petrobras, nem os recursos provenientes de Parcerias Público-Privadas, privatizações e concessões. Caso esses valores fossem considerados, o total investido em infraestrutura no Brasil seria significativamente maior.

Como estas obras movimentam grandes quantias em dinheiro, infelizmente é comum a prática de corrupção e a tentativa de fraude em suas execuções por diversas maneiras, sendo a indústria da construção civil, em geral, considerada a mais corrupta no mundo (KENNY, 2007). A corrupção pode ser definida de várias maneiras (MIRANDA L.F., 2018), mas a concepção mais popular refere-se ao ato de corromper, ou seja, oferecer algo em troca de vantagens em uma negociação, na qual uma das partes é favorecida em detrimento da outra. Segundo Moro (2021), quanto maior o nível de corrupção, menor o crescimento econômico, maiores as desigualdades e pior a qualidade na oferta de bens públicos. Na realidade, é extremamente difícil estimar, tanto em termos financeiros quanto sociais, os prejuízos causados pela corrupção (LOPES, 2022).

A corrupção não é uma exclusividade do nosso país (MARTINS A.F *et al.*, 2022; SHAN. *et al.*, 2015) porém nele há relatos desta prática desde o início da colonização

¹ PAC é a sigla para Programa de Aceleração do Crescimento, lançado no ano de 2007, que se tratou de um plano governo federal que visou estimular o crescimento da economia brasileira, através do investimento em obras de infraestrutura (portos, rodovias, aeroportos, redes de esgoto, geração de energia, hidrovias, ferrovias, etc.).

² AVANÇAR: Programa lançado em 2018 que visa alavancar a infraestrutura e promover o desenvolvimento através de investimentos em obras estruturantes nas áreas de saúde, educação, transporte, saneamento, esporte, cultura, defesa, comunicações, energia e habitação.

portuguesa, em especial na execução de obras públicas, conforme mencionado por Bueno (2006) e Vilhena (2018).

No Brasil, o desvio de verbas em obras públicas ocorre, infelizmente, de forma recorrente. De acordo com processos administrativos de órgãos de controle federal, estima-se que, anualmente, bilhões de reais sejam desviados por meio de contratos governamentais de serviços de engenharia e construção (LOPES *et al.*, 2021). Conforme pode-se atestar em consulta à página da transparência internacional³, o Brasil ocupa apenas a 104^a posição dentre os 180 países pesquisados no Índice de Percepção de Corrupção, ranking este, que apresenta como primeiros colocados, onde há baixa percepção de corrupção lugares, os países nórdicos.

Devido à recorrente prática de corrupção e às tentativas de fraude na execução de obras públicas financiadas com recursos da União — espalhadas por todo o território nacional — surgiu a necessidade de implantar uma rede de controle da gestão pública para combater essas irregularidades.

Como destacado por Neu *et al.* (2015), a participação das autoridades públicas é essencial no combate à corrupção na indústria da construção, uma vez que os próprios governantes são os principais clientes desse setor. Inicialmente, a rede operava de forma informal, mas, em 2009 (BRASIL, 2009), foi estruturado um centro decisório interorganizacional de atuação nacional, com o objetivo de aprimorar o controle do Estado sobre a gestão pública.

Essa rede é composta por diversos órgãos reguladores e fiscalizadores, como a Controladoria-Geral da União (CGU), o Tribunal de Contas da União (TCU), as Controladorias-Gerais dos Estados (CGEs), os Tribunais de Contas dos Estados (TCEs) e a Polícia Federal. Cada entidade atua dentro de sua área de competência e conforme seus limites legais, contribuindo para a fiscalização e transparência na aplicação dos recursos públicos.

A Polícia Federal, como parte fundamental dessa rede, desempenha um papel estratégico, conduzindo investigações de diversas formas e buscando produzir provas que auxiliem na persecução penal (LOPES, 2024). Seu objetivo é comprovar a ocorrência do crime, bem como identificar sua autoria, sempre de maneira coordenada, conforme exigido em casos de corrupção (MARTINS *et al.*, 2022). Dentre os setores do órgão que atuam neste contexto, encontra-se a Diretoria Técnico-Científica da Polícia Federal-DITEC/PF, na qual se insere a perícia criminal de Engenharia Legal.

³ Disponível em: www.transparency.org.

Na investigação de fraudes em obras públicas na esfera penal, especialistas em Engenharia Legal ou Engenharia Forense atuam na identificação e comprovação técnica de eventuais ilícitos na execução desses projetos (LOPES, 2024). A comprovação dessas fraudes, seja na fase de contratação ou na execução das obras, não é um processo simples. Isso ocorre, principalmente, porque, assim como em outros crimes, há uma constante evolução das metodologias empregadas para causar prejuízos ao erário (LOPES *et al.*, 2021).

Devido à distribuição geográfica desse tipo de crime, a Engenharia Forense no âmbito da Polícia Federal possui alcance nacional, com uma demanda constante por perícias em obras públicas. No estado da Paraíba, o Grupo de Perícias em Engenharia Legal (GPEL), vinculado administrativamente ao Setor Técnico-Científico (SETEC) da Superintendência Regional da Polícia Federal na Paraíba (SR/PF/PB) e tecnicamente à Diretoria Técnico-Científica da Polícia Federal (DITEC/PF), atua desde janeiro de 2007.

Apesar do porte da unidade da Federação, o grupo concentra uma demanda considerável em comparação com outras unidades. Essa situação ocorre, entre outros fatores, porque a Paraíba possui o maior número de municípios por área geográfica do país, além de figurar entre as 11 unidades da Federação que mais firmaram convênios com a União (CGU, 2023). Esse cenário, caracterizado pelo grande número de obras públicas contratadas com recursos da União na Paraíba, aliado à presença de muitas prefeituras de pequeno porte sem qualquer estrutura administrativa para controle e fiscalização dessas obras, cria a chamada "tempestade perfeita" para a ocorrência de ilícitos na execução dos contratos.

Para se ter uma dimensão do cenário atual, entre 2007 e 2024, a Polícia Federal realizou 691 perícias em obras públicas no estado da Paraíba, analisando um montante total de R\$ 5.927.680.527. De acordo com as conclusões dos laudos periciais, foram desviados R\$ 586.494.154, o que representa 8,78% do total analisado. Para se ter uma noção da magnitude desse valor desviado, ele seria suficiente para construir aproximadamente 230 creches-padrão do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), o que permitiria a implantação de pelo menos uma unidade em cada município do estado da Paraíba.

Conforme demonstrado por Batista (2022), no estado da Paraíba, a maioria das obras públicas objeto de perícia são de edificações e de obras para abastecimento de água, sendo estas últimas consequência dos problemas de seca enfrentados pelos estados do Nordeste.

As obras de edificações representam a maior parte desse universo, uma vez que a Paraíba é um estado com grandes carências de infraestrutura. O Governo Federal, buscando melhorar a qualidade de vida da população carente, investe de forma contínua em obras como escolas, creches, Unidades de Pronto Atendimento- UPAS, Unidades Básicas de Saúde –

(UBS), unidades habitacionais, módulos sanitários domiciliares, Postos de Saúde da Família, ginásios, academias de saúde, centros odontológicos, entre outras.

Vale destacar que esse padrão observado na Paraíba é semelhante ao de outros estados vizinhos do Nordeste. Para se ter uma noção da magnitude desse investimento, somente em obras de edificações, que foram objeto de perícia pela Polícia Federal no estado da Paraíba, foram analisados contratos no valor de R\$ 1.315.063.608,22 (BATISTA, 2022).

Tipo de Obra x Quantidade de laudos

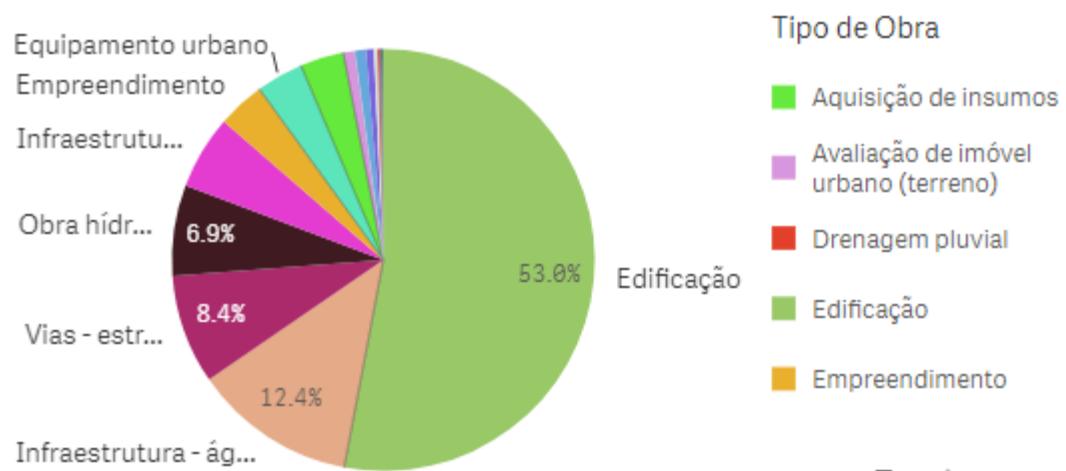


Figura 1- Tipologia de obras periciadas pela Polícia Federal no Estado da Paraíba

Fonte: (BATISTA, 2022)

As obras de edificações, frequentemente periciadas no âmbito da Polícia Federal e financiadas pela União, envolvem diversos serviços de engenharia que contribuem para a definição do custo final da obra. Entre os principais serviços presentes nesse tipo de obra estão: execução de estrutura de concreto armado, execução de alvenaria, execução de revestimento em argamassa, execução de piso, revestimento cerâmico, cobertura (estruturas e telhas), fornecimento e instalação de esquadrias, além de outros serviços com menor impacto no orçamento final. Dessa forma, é essencial que o perito possua um conhecimento adequado das metodologias construtivas e da correta caracterização de cada um desses serviços, a fim de identificar possíveis práticas de superfaturamento na execução do contrato. O superfaturamento, conforme consta na Lei Federal 14.133/2021 é definido no Artigo LVII como:

LVII - superfaturamento: dano provocado ao patrimônio da Administração,

caracterizado, entre outras situações, por:

- a) medição de quantidades superiores às efetivamente executadas ou fornecidas;
- b) deficiência na execução de obras e de serviços de engenharia que resulte em diminuição da sua qualidade, vida útil ou segurança;
- c) alterações no orçamento de obras e de serviços de engenharia que causem desequilíbrio econômico-financeiro do contrato em favor do contratado;
- d) outras alterações de cláusulas financeiras que gerem recebimentos contratuais antecipados, distorção do cronograma físico-financeiro, prorrogação injustificada do prazo contratual com custos adicionais para a Administração ou reajuste irregular de preços(BRASIL, 2021)

Dentro da análise do superfaturamento por quantidade e/ou qualidade da obra, cabe ao Perito Criminal realizar perícia *in loco*, com o intuito de verificar a forma como os serviços contratados e eventualmente pagos pela contratante foram executados, e confrontá-los com os quantitativos e especificações técnicas constantes nos projetos, planilhas orçamentárias e cadernos de especificações técnicas vigentes (VALLIM, 2018, p. 151). Em caso de divergência nos quantitativos verificados durante a inspeção em relação aos previstos e pagos pelo órgão público, o Perito procede a análise deste superfaturamento considerando o dano ao erário a multiplicação dos valores unitários dos serviços contratados não executados pela quantidade não executada. Esses quantitativos podem ser quantificados através de diversas unidades tais como: m (metro), m² (metro quadrado), m³ (metro cúbico), un (unidade), seguindo sempre a unidade prevista na planilha orçamentária vigente na obra.

O superfaturamento por qualidade ocorre quando um serviço contratado é executado em desacordo com as especificações técnicas previstas, ainda que tenha sido realizado. Esse tipo de irregularidade gera um prejuízo imediato aos cofres públicos, pois, frequentemente, são utilizados materiais ou métodos que reduzem os custos em relação ao previsto na planilha orçamentária. Além disso, pode resultar em problemas mais graves a médio e longo prazo devido à baixa qualidade do serviço prestado. Nos últimos anos, esse tipo de dano tem se tornado cada vez mais comum, como demonstrado por perícias de campo e pelo crescente número de ocorrências de falhas estruturais em edificações, sejam elas públicas ou privadas.

Enquanto o superfaturamento por falta de quantidade pode, em alguns casos, ser identificado por medições simples no local, a avaliação da qualidade dos serviços exige um conhecimento técnico mais aprofundado por parte do perito. Essa análise pode se basear tanto na experiência profissional quanto em conhecimentos técnicos e respaldo científico. Para determinados serviços, uma simples inspeção visual e a comparação com as especificações

podem ser suficientes para constatar a divergência na qualidade dos materiais ou da execução, geralmente resultando em um padrão inferior ao esperado. Exemplos comuns incluem a instalação de portas e janelas, aparelhos sanitários, revestimentos cerâmicos, luminárias, equipamentos elétricos, pintura e estrutura de madeira.

Por outro lado, há serviços que representam uma parte significativa dos custos finais das edificações, como materiais cimentícios — por exemplo, concretos e argamassas de revestimento. Embora seus quantitativos possam ser medidos no local utilizando instrumentos comuns, sua avaliação em relação às especificações (características físico-químicas) é relativamente mais complexa.

Dentre os serviços mais relevantes em obras de edificação contratadas pela União, especialmente aquelas voltadas para a melhoria da qualidade de vida da população, como creches, escolas, Unidades Básicas de Saúde (UBS), Unidades de Pronto Atendimento (UPA), unidades habitacionais e melhorias sanitárias domiciliares, destaca-se o serviço de execução de revestimento em argamassa mista formada por cimento, cal e areia. Esse tipo de serviço é comum em obras de edificação, principalmente nos projetos padronizados financiados pela União. Além de possuir um custo inferior ao revestimento cerâmico, o revestimento em argamassa é mais fácil de ser executado, levando em consideração a qualidade da mão de obra normalmente empregada em diferentes localidades do Brasil, especialmente em municípios do interior, que têm menos infraestrutura e uma qualificação inferior dos trabalhadores.

Apesar de muitas vezes ser subestimado nas análises quantitativas e qualitativas das obras, o serviço de revestimento de paredes em argamassa mista possui um custo de extrema relevância. Dependendo do porte da obra, esse custo pode até superar o do concreto armado, por exemplo.

Neste sentido, foi realizado um estudo pelo autor, no qual buscou-se dentre as principais obras de edificação periciadas e mencionadas na Figura 2 a planilha orçamentária dos custos de cada uma, aplicando para estas o Método da Curva ABC⁴ de forma a identificar a relevância dos serviços aplicados nas obras. No estudo foram analisados 22 tipos de obras de edificação periciadas pelo GPEL/SETEC/SR/PF/PB, das quais 15 se trata de obras padronizadas, ou seja, que se repetem em dezenas de vezes sua casuística, além de 07 obras de edificação aleatórias. Para estas, verificou-se a relevância no valor global dos custos dos serviços de revestimento em

⁴ Método que segmenta os custos das obras em três faixas conforme percentuais pré-definidos, onde os serviços que, no presente caso, representaram, de maneira acumulada, aproximadamente 80% dos custos da obra foram enquadrados na Faixa A. Os serviços que se situaram entre a faixa A e 90% do custo total da obra foram enquadrados na Faixa B e os demais serviços na Faixa C. (PF,2006)

argamassas, bem como da execução de estrutura em concreto armado, obtendo-se o resultado apresentado a seguir.

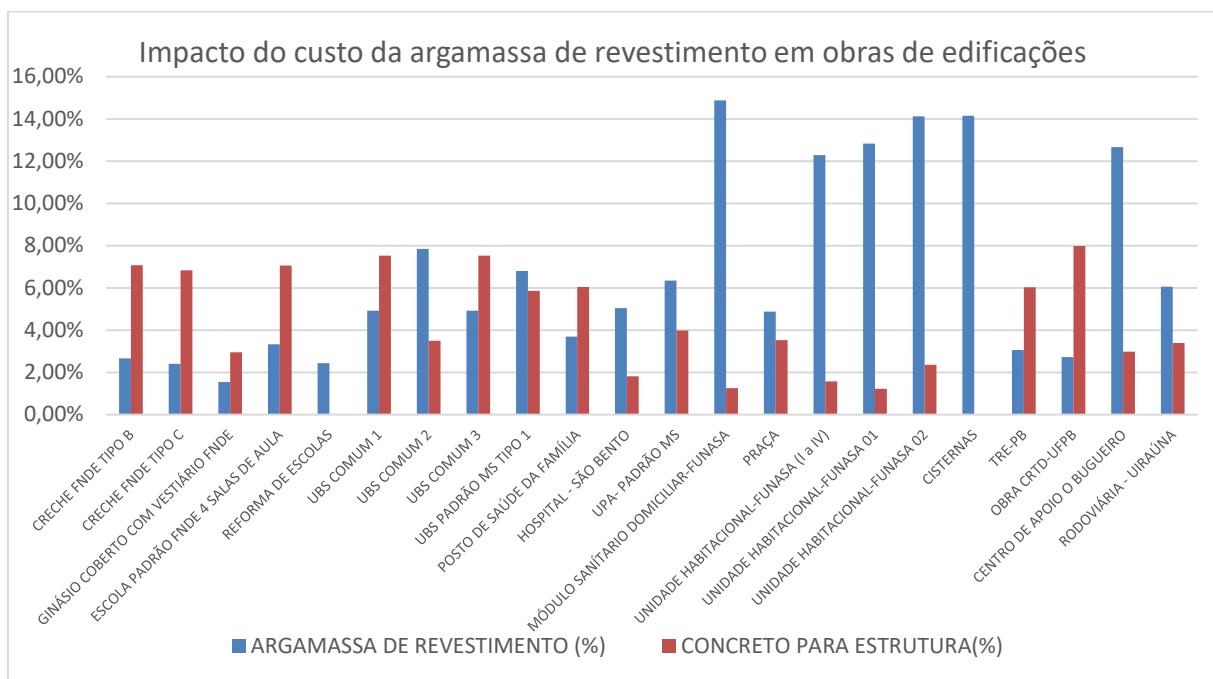


Figura 2- Gráfico contendo a relevância no custo global dos serviços de argamassa de revestimento e concreto para estruturas das principais obras de edificação objeto de perícia

Fonte: O autor

A análise dos dados apresentados no gráfico revela que, em diversas obras de edificações, o custo total da argamassa de revestimento supera o das estruturas de concreto armado. Especificamente, em 22 tipos de obras analisados, o percentual médio do custo do revestimento em argamassa em relação ao valor global da obra é de 6,50%, enquanto o impacto das estruturas de concreto armado corresponde a 3,93%. Esses dados destacam a importância de uma caracterização precisa desse material para uma análise físico-financeira adequada da obra. De acordo com (BRANDSTETTER et al., 2018) o revestimento com argamassa de paredes internas, configura um serviço de impacto relevante no planejamento de uma obra, além de corresponder a mais de 10% do custo de construção das edificações.

Embora a resistência do concreto possa ser avaliada por ensaios não destrutivos, como o esclerômetro, a caracterização precisa de argamassas de revestimento aplicadas em obras públicas apresenta desafios para a perícia. Mesmo quando são coletadas amostras para análise laboratorial, a diversidade de composições disponíveis dificulta a comparação e a avaliação adequada do material.

Dessa forma, o perito pode, de maneira involuntária, validar um serviço executado com os quantitativos previstos em contrato, mas que não atende às especificações exigidas, como a

proporção dos materiais na composição. Nessa situação, além de não identificar um prejuízo imediato ao erário, ele também pode deixar de registrar em seu laudo a possibilidade de danos a médio prazo — potencialmente mais graves — decorrentes de patologias que podem surgir devido à baixa qualidade do revestimento.

Outro aspecto relevante impactado pela correta caracterização das argamassas de revestimento é o custo de sua reprodução. Atualmente, de acordo com a legislação vigente no Brasil (2013), a análise dos custos de referência utilizados na contratação de obras públicas baseia-se em valores unitários extraídos de fontes oficiais, especialmente no banco de dados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI). Esse sistema é administrado pela Caixa Econômica Federal em parceria com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (LOPES JR., 2014).

No entanto, conforme o caderno de especificações para argamassas do próprio SINAPI (GEPAD, 2019), existem atualmente 36 composições aferidas para os serviços de emboço ou massa única em argamassa, abrangendo diferentes proporções e métodos de preparo. Consequentemente, esses fatores impactam diretamente os custos por metro quadrado (m^2).

Diante da grande variedade de custos para serviços relacionados à argamassa de revestimento, é essencial que o Perito, durante a vistoria in loco, saiba identificar corretamente as características físicas da argamassa utilizada na obra. Embora a caracterização completa do material seja concluída por meio de análises laboratoriais após o retorno à unidade de perícia, essa avaliação inicial permite uma comparação mais precisa com as especificações previstas na planilha orçamentária. Além disso, possibilita ao Perito determinar com maior exatidão qual custo de referência deve ser adotado, considerando as características da argamassa executada.

O uso de técnicas de microcaracterização de compostos cimentícios, especialmente de argamassas, é amplamente aplicado em estudos de argamassas históricas afetadas por patologias, que necessitam de recuperação e, em alguns casos, até substituição (NOGUEIRA, 2021). Para auxiliar nesse processo, diversas técnicas podem ser empregadas, como a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) e a Difração de Raios X (DRX) (PARRACHA *et al.*, 2020).

As ciências forenses, em especial a engenharia forense, assim como qualquer outra ciência precisa estar em constante atualização, e atenção à evolução das fraudes praticadas contra o erário público. Conforme expresso pelo Professor Rodholphe Reiss em 1907 em (REISS, 1907) :

A humanidade progride. Mas tanto progride do lado do bem, quanto do lado do mal.
Nosso sábios physicos, chimicos, technicos procuram melhorar os processos

científicos ou tecnícos existentes, ou substituir os por outros melhores, e os malfeiteiros utilizam essas descobertas para o aperfeiçoamento do processo criminoso. (...) Os antigos processos policiais de transporte de há cinquenta anos não têm êxito hoje; é preciso combater o criminoso com armas adequadas, superá-lo, se for possível, em argucia, o que somente se alcançará com a introdução de métodos científicos nas buscas judiciais.(REISS, 1907)

Para uma atuação mais precisa, o Perito deve utilizar as técnicas científicas disponíveis no meio acadêmico, adaptando-as à sua realidade prática. No caso da investigação da qualidade e das especificações das argamassas de revestimento aplicadas em obras públicas, as técnicas de microcaracterização, amplamente utilizadas para argamassas históricas em diversas partes do mundo, podem ser incorporadas à rotina da perícia. Isso é especialmente viável no contexto da Polícia Federal, que, além de contar com os equipamentos necessários, possui acordos de cooperação com universidades que podem oferecer apoio e realizar os ensaios necessários.

Para aplicação destas técnicas avançadas para fins de quantificação e caracterização dos particulados que compõe as argamassas mistas, torna-se necessária a avaliação dos parâmetros estruturais e microestruturais dos compósitos, considerando os aspectos reológicos e os efeitos nas propriedades mecânicas destes, tarefa esta que será apresentada ao longo deste trabalho.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar os principais parâmetros estruturais e microestruturais de argamassas mistas de revestimento aplicadas em obras públicas, por meio de análises físico-químicas, com ênfase na vinculação entre os parâmetros analisados e quantificação dos particulados integrantes do compósito cimentício.

1.2 Objetivos específicos:

- a) Determinar o traço de argamassa de revestimento mais comum, especialmente aquele especificado para obras de edificação financiadas com recursos da União, analisar a forma como estas são orçadas e especificadas, com base na legislação vigente e apresentar um referencial teórico sobre argamassas mistas de revestimento com traço 1:2:8 (cimento:cal:areia) aplicadas no Brasil.
- b) Investigar o impacto da variação de características dos agregados – como densidade de empacotamento, módulo de finura, coeficiente de uniformidade e distribuição granulométrica – nas propriedades de argamassas nos estados fresco e endurecido. A pesquisa também buscará analisar a influência da variação no número de classes de grãos e no volume de areia do traço,

aprofundando o conhecimento sobre as consequências desses fatores na reologia e nas propriedades mecânicas das argamassas.

- c) Estabelecer parâmetros e critérios científicos que auxiliem na microcaracterização de argamassas mistas utilizadas em revestimentos, inclusive as industrializadas, permitindo a estimativa de reconstituição de seu traço;
- d) Desenvolver uma metodologia minimamente destrutiva para a coleta e análise de argamassas de revestimento, por meio de sua microcaracterização, estabelecendo parâmetros que auxiliem na estimativa do seu traço.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ciências Forenses e a Engenharia Forense

Antes de adentrar propriamente dito nos estudos voltados para a Engenharia Legal ou Engenharia Forense, torna-se necessária a contextualização do seu papel dentro das Ciências Forenses. Para isto, inicialmente, será feita uma contextualização desta disciplina, principalmente em âmbito nacional.

2.1.1 CIÊNCIAS FORENSES

As Ciências Forenses, que vêm se desenvolvendo amplamente em todo mundo (CALAZANS, 2005), possuem algumas definições conhecidas em seu meio. Para Silva e Rosa, (2013), Sebastiany *et al.* (2012) e Chemello (2006) a Ciência Forense é uma área interdisciplinar que envolve física, biologia, química, matemática, dentre outras ciências, com o objetivo de dar suporte às investigações relativas à justiça civil e criminal. Segundo Velho *et al.* (2021), de forma simplificada, pode-se entender ciências forenses como a aplicação das ciências naturais à análise de vestígios, no intuito de resolver determinada demanda. De maneira ainda mais resumida, Saferstein (2011) define as ciências forenses como aplicação da ciência para a lei.

De acordo com Barros *et al.* (2021) e Giovanelli (2024), as ciências forenses são compostas por todos os conhecimentos científicos e técnicos utilizados para apurar crimes e assuntos legais diversos e têm a função de estudar e interpretar os vestígios que caracterizam as infrações, com o objetivo de esclarecer os atos delituosos.

Já em Ristenbatt III *et al.* (2021), a ciência forense é definida como a aplicação de princípios e técnicas científicas em favor da justiça criminal, especialmente no que se relaciona à coleta, exames e análises físicas de evidências.

Para Rankin e Bolton-King (2024), a ciência forense é a aplicação de disciplinas científicas voltadas para o reconhecimento, identificação, individualização e avaliação de evidências físicas, por meio dos princípios, tecnologias e métodos das ciências naturais, com o objetivo de administrar a justiça criminal ou servir à lei.

Conforme consta no trabalho de Rankin e Bolton-King (2024), ultimamente têm surgido definições para ciências forenses que buscam afastar o conceito de sua ligação direta com a aplicação na esfera legal. Uma sinalização clara dessa tendência pode ser vista na Declaração de Sydney, que foi apresentada de maneira oficial no encontro da *International Association of Forensic Sciences* (IAFS) em 2022, que, de acordo com Roux *et al.* (2022), apresenta a seguinte definição:

A ciência forense é um trabalho baseado em casos (ou em múltiplos casos), orientado para a pesquisa e fundamentado na ciência, que estuda vestígios – os remanescentes de atividades passadas (como a presença e as ações de um indivíduo) – por meio de sua detecção, reconhecimento, recuperação, exame e interpretação, com o objetivo de compreender eventos anômalos de interesse público (por exemplo, crimes e incidentes de segurança).

Além disso, na Declaração de Sydney se aponta sete princípios fundamentais que articulam a natureza e os fundamentos dessa disciplina dentro de uma estrutura comum, abrangendo desde a investigação do crime (ou de um evento de interesse público) até a apresentação dos achados, quais sejam:

1. A atividade e a presença produzem vestígios que são vetores fundamentais de informação.
2. A investigação de cenas é um trabalho científico e diagnóstico que requer conhecimento especializado.
3. A ciência forense é baseada em casos e depende do conhecimento científico, da metodologia investigativa e do raciocínio lógico.
4. A ciência forense consiste na avaliação de achados dentro de um contexto devido à assimetria temporal.
5. A ciência forense lida com um contínuo de incertezas.
6. A ciência forense possui propósitos e contribuições multidimensionais.
7. Os achados da ciência forense adquirem significado dentro de um contexto.

Em Duarte (2009) e Rankin e Bolton-King (2024) aponta-se que, em uma perspectiva histórica, os primeiros cientistas forenses foram os médicos, pois eram os primeiros a chegar no cenário do crime e que a menção mais antiga que se conhece acerca da aplicação de

conhecimentos médicos à resolução de crimes encontra-se no livro chinês “*Hsi Duan Yu*” (Registro Oficial da causa da Morte), datado de 1248. Todavia, conforme mencionado em Soglio (2015), ao que tudo indica a inserção da ciência propriamente dita nas investigações criminais como fator determinante para se estabelecer a possível dinâmica de um crime, inclusive propiciando uma mudança na maneira de julgar o acusado, ocorreu no século XIX, com os trabalhos do juiz de instrução austríaco Hanns Gross (1847-1945), no ano de 1883. O juiz, criador do termo “criminalística”, incentivou a ampliação do foco de atuação pericial, propondo o uso sistemático e organizado de métodos científicos provenientes de várias áreas de conhecimento, além da medicina legal, voltados para investigação policial (GIOVANELLI, 2021).

Na obra prima de Gross (1894), reeditada e traduzida em português no ano de 2022 (GROSS, 2022), o autor, logo na introdução do livro, destaca que, em função de sua experiência como juiz, estava convencido que o investigador deve ser preciso em seu trabalho, no sentido exato, no significado científico mais elevado do termo.

Segundo Soglio (2015), no Brasil a prova pericial foi mencionada de maneira discreta no Código de Processo Criminal de primeira instância, em 1832, mencionando-se sobre eventual análise de corpo de delito, ressaltando-se que, nessa época, a atuação das ciências forenses era resumida à medicina legal, a qual era vinculada às universidades (GARRIDO e GIOVANELLI, 2009).

De acordo com Oliveira (2019), somente no fim do século XIX e início do século XX, acompanhando uma tendência mundial, se iniciou de fato o avanço em técnicas de criminalística e criação do corpo de especialistas em investigações de crimes não ligados à atuação médica.

Ainda de acordo com o trabalho de Oliveira (2019), no Rio de Janeiro, Distrito Federal à época, as ciências forenses começaram a se desenvolver em torno de 1907, principalmente com a atuação de Elysio de Carvalho, o qual já foi chamado de “Sherlock Brasileiro”. Todavia, é unanimidade entre os estudiosos (SOGLIO, 2015; OLIVEIRA, 2019; GIOVANELLI, 2021) que o grande avanço na criminalística no Brasil se deu a partir de 1913, quando da visita do Professor Rudolph Archibald Reiss (1875 – 1929), Titular da Universidade de Lausanne (Suíça), ocasião em que o mesmo ministrou o primeiro curso de “Polícia Científica”. No trabalho de Soglio (2015) relata-se que a finalidade do curso ministrado pelo Professor Reiss, que durou 3 meses, era qualificar policiais brasileiros e, de maneira brilhante, o mesmo, de forma quase simplista, porém objetiva, introduziu a arte da Polícia Científica no Brasil. Além do curso, o Professor Reiss, conforme destacado por Oliveira (2019), criou e dirigiu uma

coleção intitulada Biblioteca do Boletim Policial, com 35 obras, as quais propagaram, não só em âmbito nacional, o conteúdo das ciências forenses da época (REISS, 1907).

Atualmente, as ciências forenses no Brasil já consta com vasta leitura, pesquisadores, periódicos e têm avançado continuamente, na busca da melhoria da sua qualidade (SILVA *et al.*, 2020; PADILHA *et al.*, 2021; CALAZANS, 2005). Alavancada pela necessidade de constante modernização e desenvolvimento, a ciência forense tem se popularizado, principalmente com a exposição em diversos programas e séries televisivas (SOGLIO, 2015), despertando o interesse de vários estudantes e profissionais. Além disso, acompanhando o desenvolvimento da ciência, o meio acadêmico tem, cada vez mais, introduzido disciplinas que tratam de ciências forenses (FACHONE e VELHO, 2007), bem como incentivado pesquisas, firmando inclusive parcerias com as polícias, na busca de desenvolvimento de novas tecnologias e metodologias, como é o caso do Programa de Cooperação Acadêmica em Segurança Pública e Ciências Forenses⁵ promovido pela CAPES- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

A criminalística possui papel preponderante na apuração das infrações penais. De acordo com Dror (2018), a análise correta de uma evidência é uma ferramenta poderosa para afastar a culpa de um inocente ou identificar um culpado. Desta forma, como apontado por Barros *et al.* (2021), ao realizar seu trabalho o Perito deve ser imparcial, uma vez que a sociedade em si deposita nele uma confiança acerca do resultado de suas atividades.

Conforme mencionado na obra de Velho *et al.* (2021), as ciências forenses atuam no processo de geração e/ou transferência de conhecimento científico e tecnológico com a intenção de aplicação deste conteúdo na análise dos vestígios⁶, com intuito de dirimir questões científicas de interesse judicial.

A utilização de metodologia científica é a base da criminalística, uma vez que tudo que é analisado, com auxílios das mais diversas ciências, somente se prestará para auxiliar o Perito em suas conclusões se preencher os requisitos científicos básicos, ou seja, a utilização de métodos comprovados, possíveis de serem testados e que outros possam, seguindo a mesma metodologia, encontrar os mesmos resultados (VELHO *et al.*, 2021).

⁵ <https://www.gov.br/capes/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/bolsas/programas-estrategicos/formacao-de-recursos-humanos-em-areas-estrategicas/procad-seguranca-publica-e-ciencias-forenses>. Consultado em 20/10/2022.

⁶ Vestígios: objetos, marcas ou sinais sensíveis localizados no local de crime que possam ter relação com o fato investigado. (VELHO *et al.*, 2021)

No trabalho de Saferstein (2011), é apontado que as ciências forenses são, na verdade, um “guarda-chuva” de diversas ciências, na qual profissionais com diferentes expertises técnicas trabalham em conjunto para auxiliar o andamento das investigações.

Existem várias áreas científicas que “emprestam” seus conhecimentos para a criminalística. Algumas delas estão representadas na Figura 3 a seguir, extraída de Velho *et al.* (2021).

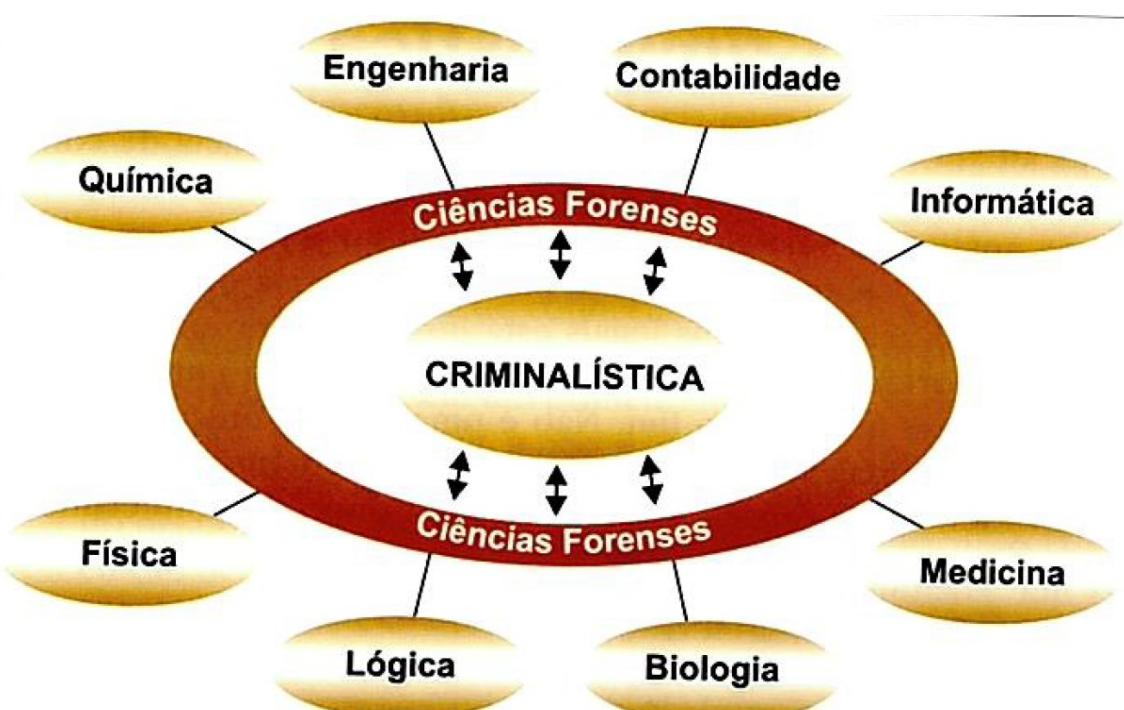


Figura 3- Diagrama indicando diversos ramos científicos contribuintes para as Ciências Forenses.

Fonte: Velho *et al.* (2021).

Dentre as áreas mencionadas encontra-se a engenharia, que deu origem à Engenharia Legal ou Engenharia Forense.

2.1.2 ENGENHARIA LEGAL OU ENGENHARIA FORENSE

Inicialmente, é importante relembrar o conceito de engenharia. Segundo Houaiss (2001), a definição de engenharia é a ciência dedicada a transformar os recursos da natureza em benefício do ser humano. Desta forma, de maneira geral, o engenheiro aplica seu conhecimento científico, matemático e sua criatividade para desenvolver soluções para problemas técnicos do cotidiano.

Os conhecimentos da engenharia, desta forma, também são utilizados para dirimir dúvidas relativas a objetos correlatos à ciência e encontrar causas associadas a acidentes, crimes, eventos catastróficos. Segundo Aguiar e Medeiros (2021), a aplicação dos conhecimentos de engenharia com tal ênfase representa o fundamento do que se denomina Engenharia Legal ou, como é conhecida nos países de língua inglesa, Engenharia Forense.

A norma NBR 14653-1 (ABNT, 2019) adota o conceito de Engenharia Legal como sendo a parte da engenharia que atua na interface técnico-legal, envolvendo avaliações e toda espécie de perícias relativas a procedimentos judiciais.

Já para o Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia do Rio de Janeiro-IBAPE/RJ, sucessor do Instituto Brasileiro de Engenharia Legal (IEL), conceitua o termo da seguinte maneira:

Engenharia legal compreende todas as atividades do engenheiro, tendentes a solucionar problemas jurídicos que dependem de conhecimentos técnicos, os quais normalmente não são inerentes aos advogados e magistrados, traduzindo especialmente a função do perito judicial em matéria de engenharia.
(IBAPE, 2022)

Em sua obra (RABELLO, 1996), o Professor Eraldo Rabello define Engenharia Forense como:

Engenharia Forense como sendo um ramo especial da Criminalística que se vale dos recursos e conhecimentos próprios da Engenharia, em todas as modalidades desta (construção civil, minas, mecânica, eletricidade, eletrônica etc.), para o esclarecimento e a prova de questão de fato de interesse para a investigação criminal e para a Justiça cujo exame implique a posse e a efetiva aplicação de tais conhecimentos e recursos.

No trabalho de Aragão (2020), Engenharia Forense é definida como ramo da criminalística, na qual se aplica conhecimentos e métodos das diversas áreas da Engenharia no estudo das questões de fato que demandam a atuação da justiça criminal.

De maneira geral, a Engenharia Legal é caracterizada pelas provas periciais que envolvem matéria técnica de engenharia, as quais têm potencial de auxiliar no esclarecimento de questões jurídicas, tanto no âmbito cível quanto no penal (DEUTSCH, 2011).

A Engenharia Legal se torna oficial no Brasil quando, em 11 de dezembro de 1933, foi publicado, pelo então presidente Getúlio Vargas, o Decreto nº 23.569, o qual regulamentou à época a profissão de engenheiro, arquiteto e agrimensor, trazendo dentre o rol de atividades permitidas para tais profissionais a prática da Engenharia Legal.

Atualmente, no âmbito da criminalística, o termo mais comumente utilizado é Engenharia Forense, uma vez que o termo Engenharia Legal também está intimamente ligado à Engenharia Diagnóstica, que está relacionada basicamente à atuação na esfera cível. Alguns autores mais recentes, a exemplo de Vallim (2018) e Wissmann (2024), têm preferido utilizar o termo Engenharia Forense para tratar, exclusivamente, da atuação de peritos engenheiros em demandas criminais, uma vez que o termo Engenharia Legal remeteria mais à atuação cível, porém não exclusiva nesta esfera.

A seguir, serão apresentados alguns dos principais exames realizados no âmbito da Engenharia Forense.

2.1.2.1 Constatção de ligação clandestina de serviços (energia elétrica, água, linha telefônica, TV a cabo, etc.);

Nesses exames, cabe ao Perito tentar identificar, por meio de vestígios encontrados no local, a fraude de usuários que tentam usufruir de serviços sem o devido pagamento, seja de maneira a disfarçar o seu consumo, indicando valores menores que os reais, seja pelo uso do serviço sem nenhum pagamento. Importante destacar que, para a realização de tais exames, muitas vezes torna-se necessária a presença de representantes de concessionárias de serviços durante a realização dos exames, pois estes podem franquear o acesso às caixas ou quadros de medição e/ou distribuição de sua responsabilidade, além dos mesmos poderem providenciar e autorizar a eventual retirada de materiais e/ou equipamentos para realização de exames mais aprofundados em laboratórios.

Conforme mencionado por Aguiar e Medeiros (2021), as técnicas utilizadas pelos fraudadores têm constante evolução, o que demanda um contínuo estudo e aprimoramento dos procedimentos periciais a serem aplicados. Em relação ao furto de energia elétrica, pode-se encontrar na obra de Maia (2019) um amplo estudo relativo a esta prática, podendo-se constatar os diversos tipos de irregularidades já encontradas, bem como o fato de que foram categorizadas em função dos locais específicos onde são aplicadas, criando uma espécie de roteiro para realização desses tipos de exames.

2.1.2.2 Sinistros envolvendo obras de Engenharia, máquinas e equipamentos no âmbito da Engenharia Forense.

Infelizmente são cotidianos e rotineiros os sinistros envolvendo máquinas, equipamentos e obras de engenharia, porém normalmente são noticiados os mais notórios, aqueles que atingem grandes proporções, ocasionando em muitas vítimas e danos materiais e/ou ambientais extensos. Em Aguiar e Medeiros (2021), estão relacionados alguns dos sinistros de grande repercussão ocorridos no Brasil entre 1988 e 2019, porém, infelizmente, o número de acidentes de grande magnitude não para de crescer, não só pela imperícia ou imprudência dos envolvidos nas obras, mas também pela ocupação desordenada do solo nos grandes centros urbanos, ocasionando grandes acidentes algumas vezes relacionadas com gatilhos naturais, principalmente de origem geológica, como deslizamentos de terra, além de grandes inundações.

Em função de tudo o que envolve um sinistro, desde suas possíveis causas, responsáveis, até suas consequências, torna-se imprescindível uma investigação técnica minuciosa, buscando não só o estabelecimento da verdade, como auxiliar nos procedimentos legais decorrentes do mesmo, seja em uma eventual condenação ou em um possível reparo dos danos causados, sejam eles materiais ou não. Na abrangente coletânea de Wissmann (2024), pode-se encontrar diversos estudos sobre os mais diferentes tipos de sinistros e acidentes envolvendo obras de engenharia, com aplicações diversas na Engenharia Forense.

Hoje em dia é amplamente doutrinado, na esfera do Direito Penal, que se deve considerar na execução das obras, primordialmente, a implantação dos melhores meios técnicos e científicos, aplicando e respeitando os normativos e legislação existentes, assegurando a segurança dos trabalhadores, sob pena de responsabilização criminal (FAYET JUNIOR, 2022). Em função disso, mesmo que eventualmente não haja vítimas fatais, na ocorrência de acidentes em obras, para fins de instrução do devido processo penal, cabe à Engenharia Forense atuar na análise dos vestígios para, assim como num crime comum, apurar a dinâmica e, eventualmente a autoria.

Durante a realização dos exames, torna-se necessário ao Perito verificar se as Normas Regulamentadoras do Ministério do Trabalho estavam sendo atendidas, em especial os procedimentos relacionados à Engenharia de Segurança. Cotomácia (2021) e Wissmann (2024) apresentam um rol de procedimentos a serem adotados pela perícia nessas situações, não só no que tange à perícia no local, mas também na eventual análise de documentação da obra que possa auxiliar na determinação da causa do acidente.

Outro tipo de sinistro comum são os que envolvem máquinas e equipamentos. Dentre os equipamentos que podem sofrer sinistros, sendo necessária a realização de perícia, destacam-se os elevadores, sejam eles de transporte de pessoas ou de materiais. Neste caso, importante o Perito avaliar se todos os equipamentos e peças necessárias estão em bom estado e se há a

manutenção necessária nos mesmos (MAMEDES,2023). Para isto, no intuito de auxiliar o Perito, sempre que possível deve-se ter o acompanhamento dos responsáveis pelos serviços de manutenção dos elevadores, geralmente realizados por empresas especializadas, pois as mesmas, além de prover a documentação, inclusive manuais referentes aos equipamentos, podem auxiliar com seus equipamentos. (CARVALHO et al., 2016; MAMEDES, 2023)

Os sinistros que envolvem obras de Engenharia normalmente apresentam grande repercussão, seja pelo dano material causado ou pela presença de vítimas fatais. (WISSMANN, 2024). Estes podem acontecer em função de diversas causas e em etapas variadas da vida de uma edificação ou estrutura, de maneira que, quando o mesmo ocorre já na fase de utilização, há um dano maior. Wissmann (2024) aponta diversas causas de sinistros em obras de características variadas, sendo catalogadas diversas situações em uma obra que podem contribuir com a ocorrência de acidentes, além de orientações para auxiliar os trabalhos da perícia.

Os desastres envolvendo edificações, tais como prédios residenciais ou comerciais, apesar de não serem muito comuns, possuem um alto índice de letalidade. Durante o trabalho da perícia, é necessária a realização de vistoria *in loco* para identificação dos vestígios, bem como a análise de toda documentação que possa auxiliar nos trabalhos periciais. Além disso, é de suma importância para a perícia tentar obter imagens de vídeos das ocorrências e tratá-las como evidências, pois além de ilustrarem a dinâmica dos fatos, ajudam a determinar o momento da ocorrência (WISSMANN, 2024). Outro aspecto primordial a se observar é a segurança do local para a realização da inspeção, sendo indicado realizar exames periciais no local somente após autorização expressa da Defesa Civil e Corpo de Bombeiros.

Além de edificações, ocorrem vários outros sinistros envolvendo obras de engenharia, como pontes, viadutos, passarelas e obras de terra. Destacando-se os sinistros envolvendo barragens, não há como não mencionar o rompimento das barragens de rejeitos da empresa Samarco, em Mariana/MG, e da Mina do Córrego do Feijão, situada em Brumadinho/MG, ocorridos em 2015 e 2019, respectivamente. No primeiro desastre, os Peritos tiveram que se deparar com a peculiaridade de simplesmente não existir mais a barragem para realização dos exames, tampouco imagens do momento da ruptura, havendo a necessidade de ampla análise da documentação para investigação das prováveis causas do colapso e determinação dos danos, o que somente pôde ser feito através de trabalho multidisciplinar, envolvendo, além de engenheiros civis, engenheiros de minas e geólogos. (BARBOSA et al., 2018; BARBOSA, 2022, BARBOSA, 2024). Já no desastre ocorrido em Brumadinho/MG, o qual foi registrado por imagens de câmeras do local, apesar de ter havido menor dano ambiental que o provocado

pela ruptura da Barragem de Mariana, foi muito mais letal, por se encontrar próximo à área administrativa da empresa Vale, responsável pela operação da mina (BARBOSA, 2024).

Outros sinistros que são objeto da Engenharia Forense são os desabamentos, deslizamentos de terra e as inundações. Normalmente, tais acidentes estão amplamente associados a altos índices pluviométricos e o fato de existir uma ocupação totalmente desordenada do solo nos grandes centros urbanos, havendo atividades de construção civil em locais propícios a alagamentos ou em taludes e encostas sujeitos a deslizamentos. Em Wissmann (2024) foram abordados aspectos teóricos e práticos relacionados a sinistros envolvendo desabamento e soterramento, assim como procedimentos auxiliares relacionados à criminalística a serem incorporados durante os trabalhos periciais. Já em relação a sinistros ocasionados por enchentes, alguns aspectos foram destacados em Silva Filho (2016). Normalmente, nestes casos, para a realização das perícias nos locais deve-se atentar às condições de segurança, atuando somente com liberação e, preferencialmente, na presença dos agentes da Defesa Civil.

2.1.2.3 Levantamento em local de esbulho possessório, em locais de parcelamento e loteamento irregulares e em invasão de faixas de domínio público.

As perícias de Engenharia Forense com esta temática consistem na realização de exames periciais para determinação precisa dos limites de determinado terreno, com determinação da área do polígono, com o intuito de esclarecer os conflitos que possam configurar em invasão de propriedades, esbulho possessório ou parcelamento e loteamento irregulares. Para realização dos exames, torna-se necessário o uso dos conhecimentos de topografia e georreferenciamento, tomando como base as informações constantes na escritura do terreno objeto da perícia, pois neste documento há indicação da área e limites a serem confrontados por meio de exame local. (AGUIAR E MEDEIROS, 2021). Caso não haja disponibilidade de escrituras da área a ser analisada, pode-se valer de outros documentos, tais como cartas, mapas, memoriais descritivos e informações obtidas em Prefeituras. No trabalho de Martins (2012) é possível verificar algumas das fases para confecção de laudo de exame de terras demarcadas, mas que servem para outras demandas relativas a conflitos envolvendo limites fundiários.

Outro tipo de perícia que possui grande demanda no âmbito da Engenharia Forense são as invasões por terceiros de faixas de domínio das rodovias estaduais ou federais, regulamentadas pela Lei nº 13.913/2019 (BRASIL, 2019), bem como das faixas de domínio de ferrovias e de áreas destinadas à instalação de torres de transmissão de energia elétrica. Nestes casos, antes da realização do confronto nos locais, é de suma importância a obtenção das

referências oficiais com os órgãos responsáveis pela área, tais como Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes- (DNIT), Departamento de Estradas de Rodagem do respectivo Estado (DER) e operadoras de linhas de transmissão de energia elétrica, pois somente estes podem definir as larguras das faixas, normalmente representadas por gráfico linear.

Os exames de local para estas situações, que anteriormente era feitos majoritariamente por meio de levantamentos topográficos com a utilização de teodolitos e estações totais, agora são realizados por meio de RPA (Aeronave Remotamente Pilotada), em conjunto com aparelhos de GPS de precisão RTK (*Real-time Kinematic*) e com a análise de imagens de satélite, tornando, além de mais práticos, mais precisos os levantamentos e delimitações das áreas avaliadas, podendo serem corroborados, inclusive, pela indicação das datas da ocorrências dos eventos a serem apurados (MEDEIROS, et al., 2008; BARROS *et al.*, 2017; DIAS *et al.*, 2014)

2.1.2.4 Avaliação de Bens

Outra atribuição comum ao Perito no âmbito da Engenharia Forense trata-se da avaliação de bens, sejam ele imóveis (rurais ou urbanos), equipamentos, máquinas ou empreendimentos, de forma a determinar seu valor de mercado. Estas avaliações possuem diversas finalidades, tais como solução de litígios em casos de herança, instruir financiamentos imobiliários, contratos de aluguel ou aquisição por ente público, desapropriações, sendo, porém, as avaliações de extrema importância no combate ao crime de lavagem de dinheiro (MAGRO, 2022). No âmbito da Criminalística da Polícia Federal estas avaliações são recorrentes (AZEVEDO FILHO e LIMA, 2018; SPONCHIADO e CARVALHO, 2016a;2016b) e auxiliam muitas vezes na investigação de ocultação de patrimônio por meio de transações imobiliárias, prática muito comum para lavagem de dinheiro obtido de maneira ilícita, não só no Brasil como em todo o mundo (OCDE).

Segundo a norma NBR 14653 (ABNT, 2019), a definição de avaliação de bens trata-se da análise técnica para identificar valores, custos ou indicadores de viabilidade econômica, para um determinado objetivo, finalidade e data, consideradas determinadas premissas, ressalvas e condições limitantes. Já em Vallim (2018), no caso de avaliação de imóveis, pode se definir como:

Determinação do preço de determinada propriedade, estimando-se um valor que deva refletir o equilíbrio entre a disponibilidade de recursos de mercado versus o interesse de liquidez do público.(VALLIN, 2018)

A avaliação de um bem não se trata apenas de atribuir-lhe um valor. Para realização da análise deve-se seguir as normas da ABNT, em especial a NBR 14.653/2019. O método utilizado pelo Perito normalmente não consiste em uma pesquisa direta de valor de mercado, mas sim em uma metodologia que envolve a coleta de dados, o tratamento dos mesmos mediante inferência estatística e, principalmente, a análise crítica e interpretação correta dos resultados (DANTAS, 2005).

De acordo com Vallim (2018), existem 04 (quatro) metodologias principais aplicáveis a avaliação de bens, e a aplicação de cada método depende da natureza do bem avaliado, da finalidade da avaliação e da disponibilidade, qualidade e quantidade dos dados de mercado coletados. A seguir, de maneira suscinta, serão apresentados os métodos supramencionados.

a) Método Comparativo Direto

O método comparativo direto trata-se da identificação do valor de mercado do bem por meio de tratamento técnico dos atributos dos elementos comparáveis, constituintes da amostra (ABNT, 2019). No caso de imóveis, por exemplo, este método é empregado quando o valor do imóvel é obtido através da comparação com outros que possuam características similares, cujo valores de mercado são de conhecimento do avaliador. Neste caso, os dados podem ser obtidos através de ofertas anunciadas para vendas ou de valores obtidos em transações realmente efetivadas, mas tendo em mente que o levantamento dos dados deve ser realizado com pleno conhecimento da situação do mercado imobiliário à época da avaliação (BRASIL, 2015).

Após a coleta dos dados deve-se realizar o seu tratamento estatístico, preferencialmente por meio de regressão linear simples ou múltipla, pois estes permitem a análise de variáveis que podem vir a contribuir na formação do valor do bem e distinguir aquelas que não apresentam significância em sua formação (CAIXA, 2018).

b) Método Inolutivo

De acordo com a norma NBR 16653-1:2019, este método consiste em determinar o valor do bem, baseado no seu aproveitamento eficiente, considerando modelos de estudo de viabilidade técnico-econômica, mediante hipotético empreendimento compatível com as características do bem e com as condições do mercado no qual está inserido, considerando-se cenários viáveis para execução e comercialização do produto. Este método é mais utilizado na avaliação de terrenos e deve-se determinar as condições máximas permitidas e recomendáveis para a ocupação do terreno, considerando a utilização mais propícia do mesmo no local,

considerando se se trata de uma região com afinidades comerciais, residenciais ou industriais (MOREIRA, 1994).

c) Método Evolutivo

Este método calcula o valor do bem por meio do somatório de seus componentes. No caso de imóveis, seria a determinação de maneira separada dos valores do terreno em si, das benfeitorias e equipamentos eventualmente incorporados ao imóvel. Este método trata-se de alternativa ao Avaliador quando o imóvel se encontra em situação de ausência ou quando há pouca quantidade de dados assemelhados à disposição no mercado, dificultando – às vezes até inviabilizando – a aplicação do Método Comparativo Direto (CAIXA, 2018). Importante ressaltar que o valor de mercado final do imóvel não se obtém somando-se diretamente os custos das benfeitorias ao terreno, pois há a necessidade de se quantificar o valor que o mercado acrescenta ou diminui da soma das parcelas relativas ao terreno e às benfeitorias, levando-se em conta as condições de mercado vigentes, a tipologia e a adequabilidade das edificações na localização do imóvel.

d) Método da Capitalização da Renda

Segundo a norma NBR 16453, este método identifica o valor do bem, com base na capitalização presente da sua renda líquida prevista, considerando cenários viáveis. Nesta metodologia, no caso de imóveis, deve-se avaliar sua capacidade de gerar receita em operação, bem como seus custos operacionais. Ressalta-se que a avaliação econômica de um empreendimento se trata de uma matéria complexa, que requer o conhecimento de matérias diversas tais como: análise de fontes de receita, taxas de atratividade de mercado, riscos operacionais do setor, estudo do mercado consumidor, legislação vigente, estudos tributários, etc. (VALLIM, 2018).

Independente da metodologia aplicada, deve-se sempre apresentar de maneira clara nos laudos todos os passos realizados, bem como qualificar os dados utilizados como base para análise, ressaltando o grau de confiança obtido no exame pericial, bem como os fatores e circunstâncias que o determinaram.

2.1.2.5 Exames documentais de obras de engenharia custeadas com recursos públicos.

2.1.2.5.1 Licitação para contratação de obras públicas.

Neste item serão destacados alguns conceitos aplicados à Engenharia Forense para realização de perícia na contratação de obras públicas, sobre as quais paire suspeita de dano ao erário. Esta casuística, que ganha cada vez mais atenção no universo da criminalística e da sociedade, consiste na principal demanda de Engenharia Forense no âmbito da Polícia Federal.

Para o Tribunal de Contas da União (TCU, 2014), obra pública pode ser considerada toda construção, reforma, fabricação, recuperação ou ampliação de bem público. No Brasil, a contratação de qualquer obra pública deve seguir as disposições da Lei nº 14.133/2021 (Lei de Licitações e Contratos), que substituiu a Lei nº 8.666/1993. Segundo o arcabouço jurídico nacional, a obra pode ser realizada de forma direta pelo próprio ente público, por seus meios próprios, ou de forma indireta, quando ela é contratada com terceiros por meio de licitação.

A Lei nº 14.133/2021, em seu artigo 17, aponta as fases da licitação conforme desenho ilustrativo a seguir.

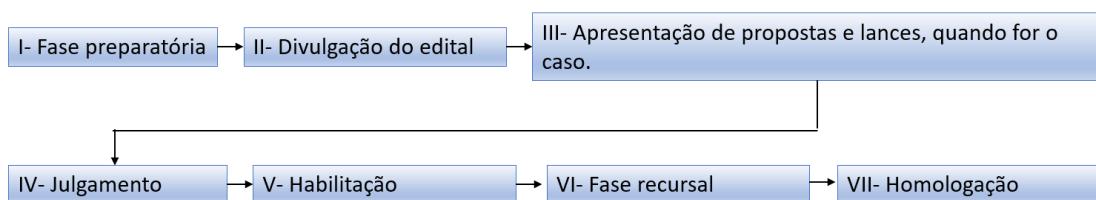


Figura 4- Desenho esquemático das fases da licitação

Fonte: O autor

Conforme destacado pelo Instituto Nacional de Criminalística (BRASIL, 2022), a nova legislação traz a inversão de fases como regra para as licitações, em relação à anteriormente prevista, de forma que agora a fase de julgamento das propostas ocorre antes da fase de habilitação das licitantes, em todas as modalidades licitatórias.

Ainda de acordo com a legislação vigente, a licitação pode ser feita em modalidades distintas. Até a vigência da Lei nº 8.666/93, as modalidades previstas eram: convite, tomada de preços, concorrência pública, leilão, concurso público e pregão. Já a partir da Lei nº 14.133/2021 as modalidades possíveis são as seguintes: pregão, concorrência, concurso, leilão e diálogo definitivo. Ressalta-se que, na legislação atual, ao contrário do previsto na Lei nº 8.666/93, a escolha da modalidade não obedece mais ao critério do valor estimado para a contratação, de forma que a escolha da modalidade da licitação depende agora do objeto a ser licitado e de suas peculiaridades (BRASIL, 2022).

Os critérios de julgamento são opções apresentadas para balizar a seleção da proposta apta a gerar o resultado de contratação mais vantajoso para a Administração pública (TCU, 2014). A lei de licitações vigente incorporou, além das opções da Lei nº 8.666/93, outros critérios já abarcados pela Lei nº 12.462/2011 (Regime Diferenciado de Contratação) e pelo Decreto nº 10.024/2019, que regulou o pregão eletrônico. Desta forma, os critérios a serem utilizados são: menor preço, maior desconto, melhor técnica ou conteúdo artístico, técnica e preço, maior lance, no caso de leilão, e maior retorno econômico.

A forma como o objeto licitado pode ser contratado é definida pelo regime de execução optado. A partir da Lei nº 14.133/2021, foram incorporados aos regimes já previstos na antiga lei de licitações os regimes constantes nas Leis nº 12.462/2011 (Regime Diferenciado de Contratação) e nº 13.303/2016 (Lei das estatais). Em função disso, os possíveis regimes de contratação pactuados, de acordo com a legislação são: empreitada por preço unitário, empreitada por preço global, empreitada integral, contratação por tarefa, contratação integrada, contratação semi-integrada e fornecimento e prestação de serviço associado.

A Lei nº 14.133/2021, em seu art. 55, estabeleceu os prazos mínimos para apresentação das propostas e lances, contados a partir da data de divulgação do edital. Um desenho esquemático com a indicação de tais prazos consta no manual produzido pelo Instituto Nacional de Criminalística (BRASIL, 20220) e é reproduzido a seguir.

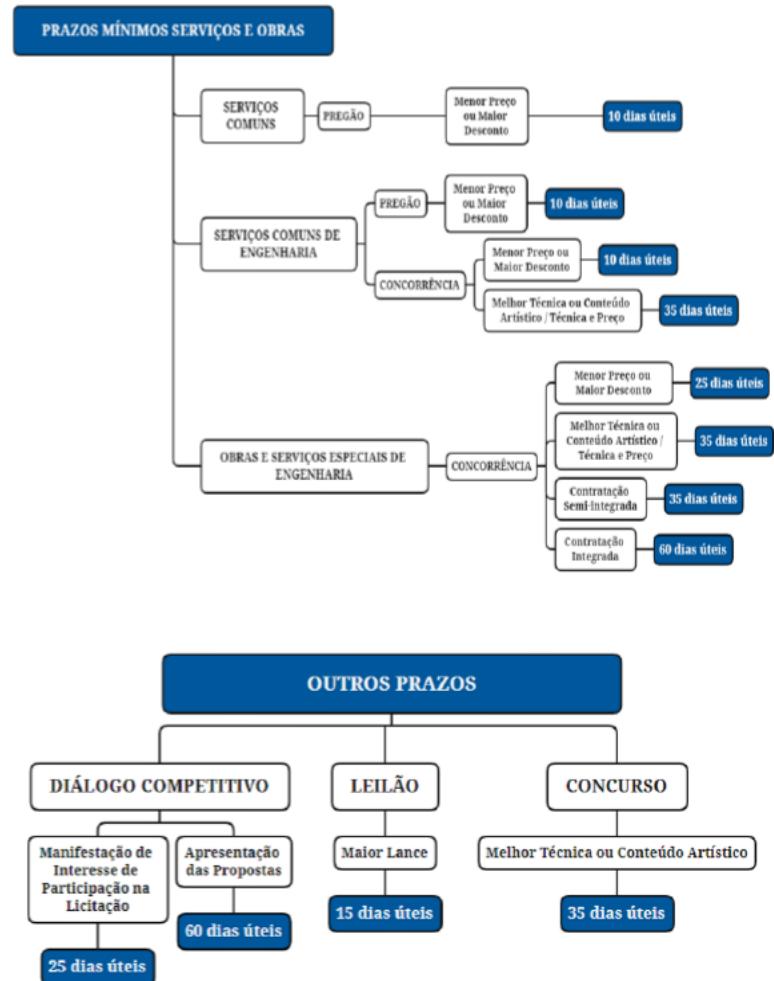


Figura 5- Desenho esquemático com apresentação dos prazos mínimos para apresentação de propostas e lances de acordo com a Lei nº 14.133/2021.

Fonte: (BRASIL, 2022).

A legislação vigente permite que a administração pública contrate o particular, para fornecer qualquer bem ou serviço, sem realizar o processo licitatório, desde que atenda a uma série de exigências. Esta contratação, intitulada como Contratação Direta, pode ser feita por meio de inexigibilidade ou por dispensa de licitação e, apesar de ter um rito mais simplificado, carece de documentação adequada que justifique e embase legalmente a sua realização.

2.1.2.5.2 Mecanismos de fraude à licitação

Existem diversas maneiras de fraudar processos licitatórios, sejam elas aplicadas de maneira regular entre um grupo de empresas, como na cartelização da contratação de obras públicas exposta por meio da Operação lava-jato (VALLIM, 2018; SIGNOR *et al.*, 2017), ou

através de conluio esporádico entre empresas, que podem ou não envolver agentes públicos (MELO, 2012).

A comprovação da ocorrência de fraude nas licitações não é uma tarefa fácil, uma vez que os fraudadores procuram ao máximo dissimular esta prática criminosa, seja por meio de acordos verbais entre licitantes e/ou agentes públicos ou por mecanismos duradouros de partilha de contratos com distribuição dos lucros auferidos de maneira ilegal (BRASIL, 2022; OLIVEIRA JR, 2022).

A ideia do legislador ao tentar aprimorar as regras e procedimentos de processos licitatórios visa aumentar o caráter competitivo dos certames, em busca de auferir alguma vantagem financeira para Administração Pública na contratação de obras, mantendo-se os padrões e exigências das normas vigentes em nosso país. Seria, de maneira geral, a busca do Estado para pagar o menor valor para um determinado serviço a ser contratado. (SIGNOR *et al.*, 2020a).

Para que haja o efetivo ganho em favor da Administração pública torna-se vital a manutenção do ambiente de competitividade entre os fornecedores, conforme estudos estatísticos já elaborados envolvendo licitações de obras públicas (PEREIRA, 2002; LIMA, 2010; LOPES e TRALDI, 2018). Os resultados desses estudos apontam para uma tendência de descontos relevantes (de 15% a 30%) em relação ao preço de referência do órgão contratante quando o número de empresas habilitadas é superior a 05 (cinco). Outro estudo que indica a correlação entre o número de competidores e os descontos praticados nos certames foi realizado por MATTOS⁷ (2014), apresentando comportamento semelhante ao apresentado nos estudos mencionados anteriormente.

A seguir, serão apresentados alguns dos principais mecanismos de fraude em licitação, baseados na casuística da Criminalística da Polícia Federal.

2.1.2.5.2.1 Direcionamento do edital

O direcionamento do edital é possivelmente a prática mais comum dentre as fraudes em licitação (VALLIM, 2018 e CAMPELO e CAVALCANTE, 2018). Este direcionamento é muitas vezes realizado de maneira sutil, com inclusão de exigências técnicas aos participantes de licitações de obras de engenharia que fogem do que rege a legislação, bem como ao

⁷ MATTOS, Aldo Dórea. A influência da quantidade de proponentes no resultado da licitação. PINI. 2014. Disponível em <<http://blogs.pini.com.br/posts/Engenharia-custos/a-influencia-da-quantidade-de-proponentes-no-resultado-da-licitacao-307801-1.aspx>>. Acesso em: 25/03/2025

entendimento dos órgãos de controle, tais como o Tribunal de Contas da União (CAMPELO e CAVALCANTE, 2018).

A formulação de exigências técnicas aos participantes de licitações de obras de engenharia é uma prática necessária, que visa resguardar o Erário de contratar empresas que não tenham capacidade técnica ou operacional para executar a obra a contento, causando assim prejuízos à população. Todavia, tais exigências devem ser compatíveis com o porte e natureza dos serviços a serem executados, para garantir que o maior número possível de empresas possa participar do certame, resguardando, ao mesmo tempo, a qualidade do serviço a ser prestado e o caráter competitivo do certame (OLIVEIRA JR., 2022).

Um ponto importante a ser destacado desde então é que a existência de uma exigência desarrazoada, por si só, não é suficiente para invalidar a licitação. Nesse passo há que se ponderar se essa exigência foi capaz de comprometer a competitividade do certame e a obtenção da proposta mais vantajosa e, ainda, se a repetição do processo licitatório não causaria mais ônus do que benefícios para a Administração.

No que concerne às obras de engenharia, as principais exigências para qualificação técnica para participação nos certames são a qualificação técnico-profissional e a capacidade técnico-operacional. A qualificação técnico-profissional refere-se à existência de profissionais habilitados pertencentes ao quadro permanente da empresa que já tenham sido responsáveis técnicos pela execução de obra semelhante à licitada, devendo ser utilizados como parâmetros os serviços definidos como de maior relevância e valor significativo. Já a capacidade técnico-operacional refere-se à comprovação de que a empresa já tenha realizado esses serviços em quantidades mínimas que permitam inferir a sua capacidade operacional de executá-los nas quantidades e prazos exigidos pelo objeto. Segundo a jurisprudência atual do TCU, tais quantidades não possuem um mínimo exigido, mas devem representar no máximo 50% (cinquenta por cento) do montante total dos serviços mais relevantes e podem ser comprovados por meio de Certidão de Acervo Técnico (CAT) emitida pelo Conselho Regional de Engenharia e Agronomia - CREA e por atestados emitidos por pessoas jurídicas de caráter público ou privado, desde que o emissor não faça parte da empresa licitante em questão. Ressalta-se que é facultado ao licitante somar os quantitativos de certidões diversas para atingir o quantitativo exigido no referido edital.

2.1.2.5.2.2 Fracionamento de licitação.

Para Vallim (2018) o fracionamento da licitação é resultado da burla à previsão de parcelamento de obras e já era vedada desde a Lei nº 8.666/1993. No caso da legislação antiga, buscava principalmente burlar a aplicação da modalidade licitatória adequada, geralmente mais ampla, com maior publicidade e transparência. O fracionamento do objeto é utilizado como subterfúgio para a abertura de várias licitações em modalidades mais simples, seja porque são mais rápidas, seja porque o rol de interessados é menor e, portanto, mais simples o procedimento, seja porque os requisitos de habilitação não são tão severos e há menor publicidade.

Com advento da nova legislação, Lei nº 14.133/2021, a modalidade da licitação já não sofre influência do valor do objeto, de forma que a tendência é que esta modalidade de fraude diminua. Ela não será extinta, uma vez que, pela nova lei, pode-se fracionar o objeto para buscar a dispensa da licitação, em função dos valores a serem contratados. Todavia, ainda segundo a lei, para aferição dos valores enquadrados como dispensa de licitação, serão somados todos os valores de despesas dentro do exercício financeiro, de 1º de janeiro a 31 de dezembro, de uma mesma unidade gestora, para objetos de mesma natureza, ou seja, relativos a contratações no mesmo ramo de atividade.

2.1.2.5.2.3 Conluio entre empresas e Cartel.

O conluio acontece quando empresas que vão participar de uma licitação formam um grupo de maneira ilegal, e fazem arranjos de maneira que possam aumentar seu lucro e eventualmente controlar mercados específicos (SIGNOR *et al.*, 2021). Neste cenário, empresas que normalmente são concorrentes, formam uma aliança para acabar com o caráter competitivo do certame. Esta aliança, conhecida mundialmente como cartel, funciona mediante combinações entre empresas concorrentes, as quais definem entre si quem será a vencedora do certame e quais serão as contrapartidas das empresas que entram para cobrir a proposta vencedora. (VALLIM, 2018).

Esta ação delituosa, que se tornou mais conhecida no Brasil em consequência de operações tais como Caixa Preta (LOPES, 2019), Caixa de Pandora (LOPES, 2015) e Lava Jato (VALLIM, 2018; SIGNOR *et al.*, 2017, 2020a, 2021), é extremamente nociva à administração pública e à sociedade como um todo, custando anualmente bilhões de reais para o país. Esta prática, presente em todo mundo (OCDE, 2018), impacta tanto economicamente que passou a

ser mais profundamente estudada pelo meio científico (VALLIM, 2018; SIGNOR *et al.*, 2017, 2020a, 2020b, 2020c, 2021).

Na prática do conluio, uma das consequências mais comuns são as propostas com baixo índice de desconto em relação à proposta base. Tal fato pode pontualmente chamar a atenção, mas por si só não caracteriza da maneira necessária a prática de colusão. Para fornecer uma prova robusta, tem-se buscado e praticado técnicas periciais intimamente ligadas à estatística, resultando na adoção de diferentes estratégias para alcançar essa finalidade (BRASIL, 2022).

Atualmente, no âmbito da criminalística da Polícia Federal (BRASIL, 2022), tem-se aplicado a técnica apresentada em Signor *et al.* (2021), a qual parte de um cenário de referência obtido por meio de dados de licitações consideradas como honestas e das quais tenha participado de seis a oito empresas, classificando os processos licitatório pelas características das obras contratadas. A partir dessas licitações, realiza-se a distribuição de probabilidades e seus parâmetros, checa-se o orçamento de referência questionado e calcula-se a probabilidade de conluio. Em caso de suspeita de cartel, recomenda-se a análise em massa de licitações do grupo.

Importante ressaltar que hoje em dia é plenamente possível obter dados sobre as licitações de uma determinada unidade da federação por meio de dos Tribunais de Contas dos Estados. A solicitação de tais dados, quando não disponível em portais digitais institucionais, pode ser feita institucionalmente ou mesmo em caráter particular, nos termos da Lei nº 12.527/2011 (Lei de Acesso à Informação).

Outro aspecto que vale o destaque é que, com o advento do avanço das ciências que envolvem a análise de dados, como metologias de “*machine learning*” e Inteligência Artificial, há um constante progresso no desenvolvimento de processos e ferramentas computacionais que visam à identificação de comportamentos “estranhos” em licitações, incluindo eventual prática de conluio, por meio do processamento dos dados relativos a licitações já mencionados anteriormente, auxiliando nas investigações e nas fiscalizações dos órgãos de controle (LIMA, 2021; COUTO, 2023).

2.1.2.6- Exames de obra de engenharia (análise de superfaturamento em suas diversas modalidades).

Antes de adentrar nas modalidades de superfaturamento em si, torna-se necessária a abordagem do conceito de orçamentos, uma vez que a planilha orçamentária decorrente da contratação da obra torna-se a guia mestre da execução e do acompanhamento de obras

públicas, pois por meio desta se define boa parte das diretrizes de execução e soluções técnicas adotadas.

Apesar de existir contratação de obras por meio de estimativas de custo ou por meio de orçamento sintético, tem-se como boa prática o uso de orçamento analítico para contratação de obras (TCU, 2014a, TCU, 2014b; LOPES JR., 2014; GOMES, 2020). Por meio deste há uma maior precisão na determinação dos valores dos serviços a serem contratados, haja vista que a planilha orçamentária contempla os quantitativos necessários para cada item, obtido por meio de análise detalhada dos projetos, passando pelo estudo das especificações técnicas e de aspectos logísticos da obra, que permitem a elaboração das composições dos custos unitários dos serviços a serem contratados (VALLIM, 2018). Além da necessidade de se conhecer de maneira aprofundada os projetos referentes à obra a ser orçada, é necessário o conhecimento do fluxo de caixa disponível e das condições ambientais do local onde a obra será executada (LOPES, 2019).

De acordo com a Orientação Técnica 004/2012 (IBRAOP, 2012), o orçamento detalhado deverá ser elaborado com base nas composições de custos unitários, bem como em extensa pesquisa dos preços dos insumos. Além disso, recomenda-se que os orçamentos devem apresentar discriminação adequada de cada serviço, além de unidade de medida, quantidade, custo unitário e custo parcial. As composições de custos unitários são modelos quantitativos de custos de um determinado serviço, apresentando os insumos necessários, incluindo mão de obra, bem como seus coeficientes de utilização, especificações e unidades (CARVALHO E PINI, 2012).

De acordo com Lopes (2019), além da planilha orçamentária, com respectivas composições dos custos unitários dos serviços a serem contratados, o orçamento, para ser completo, necessita do cronograma físico-financeiro da obra, bem como a tabela de cálculo da taxa de despesas indiretas e bonificações (lucro bruto) - BDI. Esta taxa de BDI, baseada em experiências anteriores do orçamentista, deve obedecer aos limites impostos pelo Tribunal de Contas da União por meio de seus acórdãos (TCU, 2014a; TCU, 2014b).

Cabe ressaltar que a elaboração e apresentação de um orçamento detalhado não suprime a necessidade da elaboração de caderno de encargos e especificações técnicas dos serviços de construção a serem executados, pois são neles que consta de maneira detalhada a metodologia executiva a ser aplicada, incluindo parâmetros e normas a serem seguidas.

2.1.2.6.1 Superfaturamento

No Brasil, os primeiros estudos relacionados à análise de superfaturamento de obras públicas foram realizados pelo Tribunal de Contas da União, iniciando-se no final da década de 1990 e avançando na primeira década do século XXI (LOPES, 2022). O primeiro trabalho envolvendo a análise de superfaturamento de grande repercussão trata-se da obra de construção do Tribunal Regional do Trabalho do Estado de São Paulo, quando auditores do TCU, juntamente com técnicos da Caixa Econômica Federal, apontaram em relatório de auditoria, no final de década de 1990, a ocorrência de superfaturamento de milhões de reais à época (TCU, 2016).

O primeiro laudo elaborado no âmbito da Polícia Federal relativo à análise de superfaturamento foi emitido em 1995, envolvendo uma obra pública na Paraíba. Já no ano de 2002, a partir do maior ingresso de Peritos Criminais Federais na Polícia Federal com formação em engenharia, começou-se a aprofundar mais as pesquisas sobre o tema, de forma a evoluir nos conceitos de superfaturamento já apresentados pelo TCU, de forma que foi criada a própria metodologia de superfaturamento (LOPES, 2019). Para difusão do conceito e eventual aplicação, já em 2006 tentou-se a implementação formal destes conceitos na legislação e, em paralelo a isso, com base no conhecimento desenvolvido por ocasião da aplicação do conceito em diversas grandes operações que miravam o dano ao erário por meio de obras públicas, tentou-se ampliar o conhecimento deste conceito através de meios acadêmicos e profissionais, levando a uma aceitação significativa dos órgãos de controle e dos estudiosos do tema (POLÍCIA FEDERAL, 2006, LOPES *et al.*, 2008, SILVA FILHO, 2008; POLÍCIA FEDERAL, 2010; LOPES 2011, IBRAOP, 2012, OLIVEIRA JR., 2012; TCU, 2012).

Desta forma, com a maior divulgação e aceitabilidade do conceito de superfaturamento desenvolvido pela Polícia Federal, que passou a ser usado por diversos profissionais, mesmo que eventualmente, com algumas pequenas adaptações, este conceito foi finalmente incorporado na legislação por meio da Lei Federal 13.303/2016, conhecida como Lei das estatais (BRASIL, 2016). Posteriormente, já amplamente aceito pelo meio, o conceito de superfaturamento foi englobado pela nova Lei das Licitações, Lei nº 14.133/2021 (BRASIL, 2021).

As modalidades de superfaturamento mais comuns e abarcadas pela legislação são: superfaturamento por sobrepreço, superfaturamento por falta de quantidade, superfaturamento por falta de qualidade e por jogo de planilha. Apesar de existirem outras modalidades, estas quatro (04) mencionadas correspondem praticamente à totalidade da casuística no âmbito da

Engenharia Forense. Para mostrar a evolução no tempo dos conceitos de superfaturamento, foi elaborada a Tabela 1, com as definições de cada uma das quatro modalidades (LOPES, 2022) a partir de diferentes referências. Nos subitens a seguir serão aprofundados alguns conceitos sobre os tipos de superfaturamento.

Tabela 1- Definições de Superfaturamento ao longo do tempo

Fonte: Tabela extraída de (LOPES, 2022) adaptada pelo autor

REFERÊNCIAS	DEFINIÇÕES			
	SOBREPREÇO	QUANTIDADE	QUALIDADE	JOGO DE PLANILHA
Manual de Perícias de Engenharia-Cálculo de Superfaturamento e Outros Danos (LOPES et al., 2008)	Pagamento de obras, bens e serviços por preços manifestamente superiores à tendência central (mediana ou média) praticada pelo mercado ou incompatíveis com os fixados pelos órgãos oficiais competentes, bem como pela prática de preços unitários acima dessa tendência central (mediana ou média) do mercado.	Medição de quantidades superiores às efetivamente executadas/fornecidas.	Deficiência na execução de obras e serviços de engenharia que resulte em diminuição da qualidade, vida útil ou segurança.	Quebra do equilíbrio econômico - financeiro inicial do contrato em desfavor da Administração por meio de alteração de quantitativos (jogo de planilha) e/ou preços (alterações de cláusulas financeiras) durante a execução da obra.
INSTRUÇÃO TÉCNICA N°002/2010- DITEC, de 10/03/2010. (BRASIL, 2010)	Pagamento de obras, bens e serviços por preços manifestamente superiores à tendência central (mediana ou média) praticada pelo mercado ou incompatíveis com os fixados pelos órgãos oficiais competentes, bem como pela prática de preços unitários acima dessa tendência central (mediana ou média) do mercado.	Medição de quantidades superiores às efetivamente executadas/fornecidas.	Deficiência na execução de obras e serviços de engenharia que resulte em diminuição da qualidade, vida útil ou segurança	Quebra do equilíbrio econômico - financeiro inicial do contrato em desfavor da Administração por meio de alteração de quantidades e/ou preços (jogo de planilha) durante a execução da obra.
Livro Superfaturamento de Obras Públicas (LOPES, 2011)	Pagamento de obras, bens e serviços por preços manifestamente	Medição de quantidades superiores às efetivamente executadas/fornecidas.	Deficiência na execução de obras e serviços de engenharia que	Quebra do equilíbrio econômico - financeiro inicial

REFERÊNCIAS	DEFINIÇÕES			JOGO DE PLANILHA
	SOBREPREÇO	QUANTIDADE	QUALIDADE	
	superiores à tendência praticada pelo mercado ou incompatíveis com os fixados pelos órgãos oficiais competentes, bem como pela prática de preços unitários acima dessa tendência de mercado.		resulte em diminuição da qualidade, vida útil ou segurança.	do contrato em desfavor da Administração por meio de alteração de quantidades e/ou preços (jogo de planilha) durante a execução da obra.
Orientação técnica nº002-IBRAOP (IBRAOP, 2012)	Pagamento de obras, bens e serviços por preços manifestamente superiores aos tomados como paradigma.	Medição de quantidades superiores às efetivamente executadas/fornecidas.	Deficiência na execução de obras e serviços de engenharia que resulte em diminuição da qualidade, vida útil ou segurança	Quebra de equilíbrio econômico-financeiro inicial do contrato em desfavor da Administração por meio de alteração de quantitativos e/ou preços durante a execução da obra.
Lei Federal nº 13.303/2016 (BRASIL, 2016)	Os preços orçados para a licitação ou os preços contratados são expressamente superiores aos preços referenciais de mercado, podendo referir-se ao valor unitário de um item, se a licitação ou contratação for por preços unitários de serviço, ou ao valor global do objeto, se a licitação ou a contratação for por preço global ou por empreitada.	Medição de quantidades superiores às efetivamente executadas/fornecidas.	Deficiência na execução de obras e serviços de engenharia que resulte em diminuição da qualidade, vida útil ou segurança.	Por alterações no orçamento de obras e de serviços de engenharia que causem o desequilíbrio econômico-financeiro do contrato em desfavor do contratado.
Lei Federal nº 14.133/2021 (BRASIL, 2021)	Preço orçado para licitação ou contratado em valor expressivamente superior aos preços referenciais de mercado, seja de apenas 1 (um) item, se a licitação ou a contratação for por preços unitários de	Medição de quantidades superiores às efetivamente executadas ou fornecidas	Deficiência na execução de obras e de serviços de engenharia que resulte em diminuição da sua qualidade, vida útil ou segurança;	Alterações no orçamento de obras e de serviços de engenharia que causem desequilíbrio econômico-financeiro do contrato em favor do contratado

REFERÊNCIAS	DEFINIÇÕES			
	SOBREPREÇO	QUANTIDADE	QUALIDADE	JOGO DE PLANILHA
	serviço, seja do valor global do objeto, se a licitação ou a contratação for por tarefa, empreitada por preço global ou empreitada integral, semi-integrada ou integrada;			

2.1.2.6.1.1 Superfaturamento por sobrepreço

Antes de adentrar nas considerações acerca desta prática, torna-se necessário o balizamento em relação a algumas definições e legislações sobre o tema.

Uma das etapas da elaboração do Projeto Básico consiste na elaboração de uma planilha orçamentária que seja formada pelos quantitativos e preços dos serviços a serem contratados pela administração Pública (TCU, 2014b). Porém, quais são os preços a serem praticados?

Atualmente há várias fontes oficiais disponíveis para o orçamentista, sejam eles dados a nível nacional ou a nível estadual. As fontes de preços nacional mais conhecidas são o SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil e o SICRO - Sistema de Custos Referenciais de Obras (LOPES, 2011; LOPES, JR, 2014; VALLIM, 2018; GOMES, 2020). O SINAPI, gerido pela Caixa Econômica Federal, dispõe de maneira mensal, para todas as unidades da Federação, a mediana dos custos de diversos insumos e composições de serviços, baseado em tratamento estatístico de preços coletados pelo IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (GEPAD, 2019). Já o SICRO, gerido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, apresenta de maneira bimestral a mediana dos custos de insumos e serviços atrelados a obras de infraestrutura de transportes (DNIT, 2017).

Existem diversas outras fontes oficiais regionais, que também servem de referência para o orçamentista, tais como: *Tabela de Custos Unificada da Secretaria de Infraestrutura do Ceará* (SEINFRA/CE), *Tabelas de Custos de Edificações e Infraestrutura da Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras da Prefeitura Municipal de São Paulo* (SIURB/PMSP), *Boletins e Catálogos de Referência da Empresa de Obras Públicas do Estado do Rio de Janeiro* (EMOP/RJ) e *Tabelas de Custos da Secretaria de Estado de Infraestrutura e do Desenvolvimento Urbano de Sergipe* (ORSE) (VALLIM, 2018).

Os valores dos custos dos serviços extraídos de fontes oficiais podem e devem servir de referência para elaboração do orçamento na contratação de obras públicas (TCU, 2014a; TCU, 2014b; AGUIAR e MEDEIROS, 2021), sendo, todavia, importante deixar claro que eles não representam os preços finais propostos pela Administração. Conforme mencionado por Vallim (2018), esses preços devem representar não somente os custos dos serviços em si, mas também devem também abranger outros custos, tais como despesas financeiras, fiscais, seguros e despesas administrativas, além do lucro da empresa, que comumente estão incorporadas às taxas de Bonificação e Despesas Indiretas – BDI. Outros fatores podem influenciar na composição dos preços praticados em obras públicas, tais como efeito cotação e barganha (SILVA FILHO *et al.*, 2012), assim como efeito escala (VALLIM, 2018b), que podem diminuir os custos finais de insumos, além de outros aspectos como a localização da obra (SIGNOR e GRIPP, 2016).

A primeira vez na legislação brasileira onde se fez referência a uma fonte de preços oficiais como parâmetro de preços para contratação de obras públicas foi na Lei de Diretrizes Orçamentárias – LDO (BRASIL, 2002), para o ano de 2003, que preconizava o SINAPI como indicador oficial para aferição da razoabilidade dos custos das obras públicas realizadas com recurso federais (LOPES, 2011; LOPES JR, 2014; AGUIAR E MEDEIROS, 2021). Apesar disso, somente por meio do Decreto nº 7.983/2013 (BRASIL, 2013), houve, no aspecto legal, a determinação de uma metodologia para elaboração do orçamento de referência de obras e serviços de engenharia contratados e executados com recursos dos orçamentos da União, indicando expressamente a preferência do uso do SINAPI e SICRO como fonte de preços dos serviços que compõem a obra pública a ser contratada (GOMES, 2020). Finalmente, na nova lei de licitações, Lei nº 14.133/2021 (BRASIL, 2021), consta de maneira expressa, no parágrafo 2º do Art. 23, a obrigatoriedade da definição do valor estimado pelo poder público para a contratação, conforme apresentado:

“§ 2º No processo licitatório para contratação de obras e serviços de engenharia, conforme regulamento, o valor estimado, acrescido do percentual de Benefícios e Despesas Indiretas (BDI) de referência e dos Encargos Sociais (ES) cabíveis, será definido por meio da utilização de parâmetros na seguinte ordem:

I - composição de custos unitários menores ou iguais à mediana do item correspondente do Sistema de Custos Referenciais de Obras (Sicro), para serviços e obras de infraestrutura de transportes, ou do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices de Construção Civil (Sinapi), para as demais obras e serviços de engenharia;

II - utilização de dados de pesquisa publicada em mídia especializada, de tabela de referência formalmente aprovada pelo Poder Executivo federal e de sítios eletrônicos especializados ou de domínio amplo, desde que contenham a data e a hora de acesso;

III - contratações similares feitas pela Administração Pública, em execução ou concluídas no período de 1 (um) ano anterior à data da pesquisa de preços, observado o índice de atualização de preços correspondente;

IV - pesquisa na base nacional de notas fiscais eletrônicas, na forma de regulamento.”

Assim, a análise de superfaturamento por sobrepreço, que consiste na comparação entre os preços a serem licitados ou já contratados e os preços de referência, é norteada pela legislação vigente, que define de maneira clara quais serão os preços a serem considerados como indicativos de que estão de acordo com os do mercado da construção civil (LOPES, 2011; LOPES JR, 2014).

Existem algumas críticas em relação à adoção da mediana dos preços extraídos do SINAPI ou SICRO, por exemplo, pois estes não contemplam, em especial, os efeitos de escala, cotação e barganha (SILVA FILHO *et al.*, 2012; VALLIM, 2018), que podem levar, na prática, à redução dos valores dos insumos, havendo, inclusive, estudos que indicam que a própria referência oficial de preços, muitas vezes não reflete o preço real do mercado da construção civil (ROSEMANN e AZEVEDO FILHO, 2008; LOPES JR, 2014; AZEVEDO FILHO, 2016b), deixando de haver uma economia para administração pública.

Apesar disso, principalmente a partir da aferição das composições do SINAPI, que é a referência mais utilizada para obras urbanas, realizada pela comunidade científica através de contrato com a CAIXA (GEPAD, 2019), bem como a disponibilização gratuita das planilhas, acompanhadas de diversos materiais com as metodologias consideradas na elaboração das composições, tem havido um progresso no sentido de levar o sistema a uma maior robustez e confiabilidade por parte dos atores envolvidos no mercado da construção civil de obras públicas. Se antes havia diversas críticas das empresas contratadas pela administração pública em relação à realidade das composições dos serviços disponibilizados, hoje em dia estas participam ativamente junto à Caixa Econômica Federal na apresentação de sugestões e em debates técnicos sobre a formação dos preços dos serviços disponíveis no sistema.

Na Polícia Federal, uma das abordagens de análise do comportamento dos preços já adotada foi baseada na Lei de Benford (AZEVEDO FILHO, 2018), em que a lei foi aplicada na análise do desconto no preço unitário constante da proposta vencedora em relação ao orçamento base da licitação.

Existem algumas peculiaridades relativas à análise de superfaturamento por sobrepreço, principalmente em função da fase em que esta eventualmente ocorre (licitação, contratação ou

nas medições), as quais influenciam, principalmente, nos valores dos quantitativos a serem considerados e na data base a ser utilizada nas respectivas análises

Ressalta-se que, ao longo do tempo, no âmbito da criminalística da Polícia Federal, se buscou o desenvolvimento de ferramentas computacionais que permitissem acelerar e tornar mais precisa a análise dos preços dos serviços contratados em obras públicas, viabilizando consultas de maneira célere dos preços e composições do caderno de serviços do SINAPI.

2.1.2.6.1.1 Superfaturamento por Quantidade e/ou Qualidade.

Para realização da análise de superfaturamento por falta de quantidade e/ou deficiência da qualidade, torna-se essencial a realização de levantamento de campo, mesmo que eventualmente se detecte divergências de quantitativos entre os valores dos projetos e os constantes nas planilhas orçamentárias contratadas. Somente com a vistoria *in loco* o Perito tem como determinar, com a precisão requerida, se houve de fato pagamentos por serviços executados com quantitativos inferiores aos medidos ou se estes foram executados atendendo às especificações previstas na contratação, uma vez que a diminuição da qualidade dos serviços executados, mesmo que em quantidades corretas, podem causar um dano ao erário imediato ou que se apresente ao longo do tempo (RAUPP e SIGNOR, 2014; BARBOSA e ALBUQUERQUE, 2016).

Em função das características e natureza da obra objeto da perícia, deve-se realizar um planejamento prévio para realização dos exames dos locais, que envolve o pleno estudo dos projetos, planilhas e especificações da obra e passa pela escolha dos equipamentos corretos, do transporte adequado, das necessidades de logística, sob pena de haver um prejuízo no resultado dos exames. Se, para alguns tipos de obras, recomenda-se o levantamento de campo de toda sua área ou extensão, para outros pode-se obter, por meio de estudos estatísticos, parcelas representativas dos serviços contratados, através da escolha correta de amostragem que represente o comportamento da obra com um todo (VALLIM, 2018).

Para realização dos exames de levantamento de campo, deve-se lançar mão do uso de equipamentos que possam auxiliar com maior precisão na apuração dos quantitativos, bem como da qualidade dos serviços executados. Alguns equipamentos básicos sempre estão presentes nas vistorias, tais como trena eletrônica, trena convencional, aparelhos de GPS (*Global Positioning System*), pranchetas, máquina fotográfica. Todavia, com o desenvolvimento tecnológico, diversos outros aparelhos têm sido utilizados na criminalística

da Polícia Federal. Já há na literatura diversos trabalhos sobre a aplicação de equipamentos diversos no âmbito da Engenharia Forense, dependendo da demanda da perícia.

Se antes diversos levantamentos topográficos eram feitos por meio de teodolito ou estação total, atualmente tem-se intensificado, neste tipo de perícia, o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas - RPA, as quais também são utilizadas na coleta de imagens aéreas de obras diversas, incluindo edificações e obras de drenagem e saneamento (MEDEIROS *et al.*, 2017; PATRIOTA, 2018a; 2018b).

Alguns tipos de perícia *in loco*, em especial de obras rodoviárias ou que envolvem pavimentação, necessitam de coleta de amostras do pavimento, havendo a utilização de equipamentos de extração adequados, enquanto em outros casos, de maneira não destrutiva, pode-se determinar a presença de armação em pavimentos de concreto armado por meio do Ground Penetrating Radar - GPR (BLUM *et al.*, 2018).

Quando da coleta de amostras, a perícia deve garantir a preservação da cadeia de custódia dos vestígios coletados, mantendo assim a integridade da prova e do material a ser analisado posteriormente em laboratório. Em obras situadas abaixo do nível da água, em que há a necessidade do levantamento das cotas subaquáticas, pode-se utilizar os ecobatímetros (CHIDELLI e PAZ, 2018), de forma que a batimetria forneça informações para auxiliar nos trabalhos periciais.

Para determinação da qualidade do material aplicado, muitas vezes torna-se necessários ensaios mais detalhados, com equipamentos muitas vezes não portáteis, os quais podem ser aplicados nas amostras coletadas. Dentre os equipamentos utilizados para auxiliar a perícia encontram-se o Microscópio Óptico, o Microscópio de Varredura Eletrônica-MEV, Difratômetro de Raio-X- DRX e Fluorescência de Raio-X – FRX (MEDEIROS, 2019), os quais são determinantes na microcaracterização dos materiais aplicados nas obras, em especial os materiais cimentícios. Já para análise de materiais betuminosos, em especial de materiais utilizados em pavimentação rodoviária, torna-se necessário o uso de equipamentos auxiliares, tais como fornos, Rotarex dentre outros, que podem auxiliar o perito na caracterização do material examinado.

Na busca incessante do aprimoramento e otimização das técnicas de levantamento de campo aplicadas à Engenharia Forense, surgem novas soluções como, por exemplo, algumas criadas dentro da própria Polícia Federal para auxiliar os Peritos no levantamento de quantidades de serviços (MONTEZANO *et al.*, 2023), como também se tem utilizado de ferramentas tecnológicas destinadas a exames de local de crime, tais como o *scanner* 3D.

2.1.2.6.1.2 Superfaturamento em função de desequilíbrio econômico e financeiro do Contrato (Jogo de Planilha)

O superfaturamento por jogo de planilha, conforme definido na legislação (BRASIL, 2021), é o dano ao erário causado em decorrência de alterações no orçamento de obras e de serviços de engenharia que causem desequilíbrio econômico-financeiro do contrato em favor do contratado. Esse dano pode diminuir ou anular um ganho auferido pela Administração na contratação decorrente de processo licitatório ou, até mesmo, fazer com que se pague ao contratado um valor maior que o previsto no orçamento base do órgão contratante (CAMPITELLI, 2006; OLIVEIRA JUNIOR, 2012).

Segundo Kresch (2008) e Vallim (2018), a prática do jogo de planilha se dá majoritariamente por meio da elaboração de termos aditivos ao contrato vigente, que buscam acrescer os quantitativos de serviços com preços com desconto inferior ao global, decréscimo de serviços cujos preços unitários apresentam descontos superiores ao desconto global, inclusão de novos serviços com preços unitários sem o desconto praticado no contrato ou abandono da obra, deixando-se de executar serviços cujos descontos sejam significativamente maiores que o global. Muitos dos aditivos nas obras públicas são decorrentes da prática de projetos básicos malfeitos, utilizados como referência nos processos licitatórios, abrindo margem para este tipo de fraude (LOPES, 2011).

Além da prática em si por meio de jogo de planilha, pode haver um desequilíbrio econômico-financeiro do contrato em favor do contratado, por meio de alterações de cláusulas contratuais, tais como índices de reajuste dos pagamentos, obrigando o Perito a realizar uma análise minuciosa nos eventuais termos aditivos firmados no âmbito dos contratos envolvendo obras públicas.

2.2 Argamassas para construção civil

2.2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA ARGAMASSA

A argamassa é utilizada como material de construção civil desde a pré-história. Seu primeiro registro histórico data de entre 10 000 a.C. e 7 000 a.C. Em 1985, durante escavações em uma rua ao sul da Galileia, próximo a Yiftah'el, Israel, foi descoberto um piso polido com cerca de 180 m². Esse pavimento era composto por pedras unidas por uma mistura de cal e areia, evidenciando o uso ancestral da argamassa na construção (CARASEK, 2010; ARIZZI; CULTRONE, 2013). Desde então, houve grande desenvolvimento em sua tecnologia e sua

aplicação na construção civil se ampliou de tal maneira que se encontra presente em praticamente todas as obras de edificações, mesmo que com funções distintas.

Na literatura há diversas definições para a argamassa. De acordo com Carasek (2010) e Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2002), argamassas são materiais de construção, com propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo (areia) e água, podendo conter ainda aditivos e adições minerais. Já em relação à argamassa de revestimento, esta, conforme a NBR 13281 (ABNT, 2023), pode ser definida como uma mistura homogênea de aglomerantes inorgânicos, agregados miúdos e água, contendo ou não aditivos, possuindo capacidade de aderência e endurecimento.

Conforme consta em Fiorito (1994), os tipos de aglomerantes ou as suas misturas são determinadas em função da destinação da argamassa. Já em Recena (2017), pode-se observar que as funções da argamassa variam de acordo com sua aplicação, diferenciando-as quando estas são utilizadas para revestimento ou para assentamento. De acordo com Spósito (2020) as argamassas podem ser classificadas conforme consta na Figura 6.

Tipo de Argamassa	Propriedade(s) Específica(s)
Revestimento	Aderência e endurecimento
Comum	Varia de acordo com a proporção e o tipo de aglomerante utilizado
Aditivada	Melhoria das propriedades no estado fresco ou endurecido
Colante	Efeito Adesivo
Rejuntamento	Preenchimento de juntas entre peças de revestimentos
Proteção Radiológica	Impede a passagem de radiações nocivas à saúde
Hidrófuga	Redução da capilaridade e ou permeabilidade por uso de aditivo hidrofugante, sem que dificulte a difusão do vapor de água
Impermeabilização	Estanqueidade à água
Termoisolante	Menor condutividade térmica
Refratária	Maior resistência a alta temperatura
Acústica	Proporciona menor propagação do som

Figura 6- Tabela com a classificação normatizada das argamassas

Fonte: Spósito (2020).

De maneira mais aprofundada, Carasek (2010) classificou as argamassas de acordo com os critérios constantes nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2- Classificação das argamassas (CARASEK,2010)

Critério de classificação	Tipos
Quanto à natureza do aglomerante	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa aérea • Argamassa hidráulica
Quanto ao tipo de aglomerante	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa de cal • Argamassa de cimento • Argamassa de cimento e cal • Argamassa de gesso • Argamassa de cal e gesso
Quanto ao número de aglomerantes	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa simples • Argamassa mista
Quanto à consistência da argamassa	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa seca • Argamassa plástica • Argamassa fluida
Quanto à plasticidade da argamassa	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa pobre ou magra • Argamassa média ou cheia • Argamassa rica ou gorda
Quanto à densidade de massa da argamassa	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa leve • Argamassa normal • Argamassa pesada
Quanto à forma de preparo ou fornecimento	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa preparada em obra • Mistura semipronta para argamassa • Argamassa industrializada • Argamassa dosada em central

Tabela 3- Classificação quanto a sua função (CARASEK,2010)

Função	Tipos
Para construção de alvenarias	Argamassa de assentamento (elevação de alvenaria) Argamassa de fixação ou encunhamento
Para revestimento de paredes e tetos	Argamassa de chapisco Argamassa de emboço Argamassa de reboco Argamassa de camada única Argamassa para revestimento decorativo monocapa
Para revestimento de pisos	Argamassa de contrapiso Argamassa de alta resistência para piso
Para revestimentos cerâmicos	Argamassa de assentamento de peças cerâmicas - colante Argamassa de rejuntamento
Para recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

Finalmente, conforme à NBR 13281 (ABNT, 2023) as argamassas utilizadas tanto para assentamento quanto para revestimento podem ser classificadas de acordo com alguns requisitos obtidos através de resultados de ensaios tanto em argamassas no estado fresco quanto endurecido. Algumas propriedades são requisitos classificatórios, enquanto outras são requisitos informativos. Os requisitos classificatórios são: resistência potencial de aderência à tração ao substrato, resistência potencial à tração superficial, módulo de elasticidade dinâmico e variação dimensional. Já os requisitos informativos são: retenção de água, densidade de massa no estado fresco, teor de ar incorporado, tempo de uso, densidade de massa no estado endurecido, resistência à tração na flexão, coeficiente de absorção de água por capilaridade e fator de resistência à difusão de vapor de água. A partir dos resultados característicos obtidos, segue-se uma nomenclatura com as faixas relativas aos valores obtidos em cada ensaio, destacando-se que esses requisitos servem tanto para argamassas produzidas *in loco*, quanto industrializadas.

Adentrando de maneira mais detalhada em relação à classificação da argamassa de revestimento, conforme NBR 13529 (ABNT,2013), estas podem ser definidas como:

Chapisco: Camada de preparo da base, aplicada de forma contínua ou descontínua, com a finalidade de uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência do revestimento;

Emboço: Camada de revestimento executada para cobrir e regularizar a superfície da base ou chapisco, propiciando uma superfície que permita receber outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo, ou que se constitua no acabamento final.

Reboco: Camada de revestimento utilizada para cobrimento do emboço, propiciando uma superfície que permita receber o revestimento decorativo ou que se constitua no acabamento final.

Massa única: Revestimento executado numa camada única, cumprindo as funções do emboço e reboco.

Para melhor ilustrar as definições, a seguir apresenta-se o desenho esquemático apresentando as camadas de revestimento.

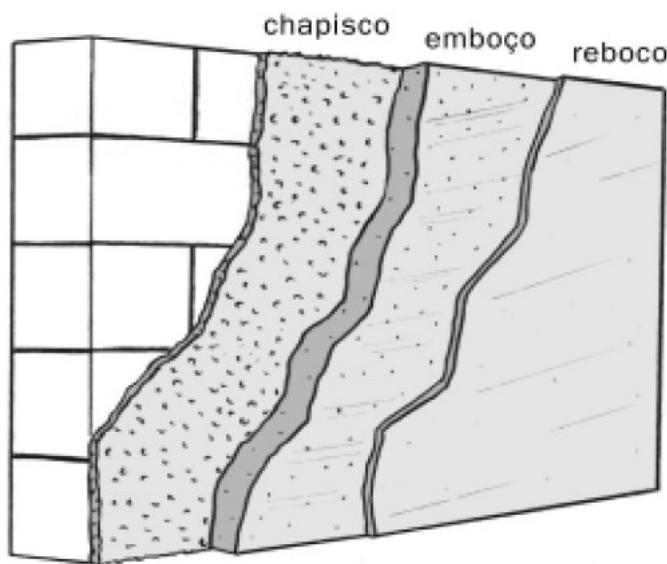


Figura 7- Camadas de revestimento

Fonte: ABCP (2002).

2.2.2 COMPONENTES DAS ARGAMASSAS SIMPLES E MISTA

O estudo aprofundado dos materiais que compõem a argamassa, bem como de suas funções e efeitos no desempenho do composto, justifica-se por diversos fatores. Entre eles, destaca-se a ausência de normas mais claras e amplamente difundidas para a especificação desses materiais, que muitas vezes são definidos com base em critérios empíricos, apoiados em experiências isoladas de profissionais da construção civil (BAUER, 2005). Na escolha dos revestimentos, conforme apontam Selmo e Helene (1991), devem ser consideradas as propriedades dos aglomerantes, as características dos agregados — como a granulometria —, entre outros fatores, além do método de mistura, os requisitos do revestimento, a qualidade da base e as condições locais. Dessa forma, considerando que a argamassa é um material complexo e heterogêneo (TAHEREH e HAMID, 2021), torna-se essencial o pleno conhecimento dos materiais constituintes para garantir o controle adequado de seu desempenho.

No trabalho de Santos (2006), observa-se que os principais materiais constituintes da argamassa de revestimento, quando produzida de forma manual, são: cimento, cal, areia, argilominerais, aditivos e água. Por outro lado, nas argamassas industrializadas, os materiais já são previamente dosados e selecionados em fábrica.

2.2.2.1 Cimento

Existem, na literatura, diversas definições para o cimento Portland, entre elas a da NBR NM 2:2000 (ABNT, 2000), que o define como um cimento hidráulico produzido pela moagem de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidratados e por uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfatos de cálcio.

Há registros do uso de materiais com características cimentícias desde a época dos grandes impérios greco-romanos, que utilizavam misturas de calcário calcinado, areia, pedra fragmentada e água em suas construções (NEVILLE, 2016). Segundo Medeiros (2019), o surgimento do cimento Portland propriamente dito ocorreu a partir de tentativas de reproduzir as características dos antigos cimentos romanos na confecção de argamassas ou concretos. O êxito mais significativo nessas tentativas deu-se apenas a partir do século XVIII, com os estudos e experimentos dos ingleses John Smeaton e James Parker, sendo posteriormente consolidado ao longo do século XIX, com os avanços promovidos pela experimentação e pelas publicações científicas do francês Louis Vicat e com a patente do produto — então denominado “cimento Portland” — registrada pelo inglês Joseph Aspdin.

No Brasil, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2021), o país encerrou o ano de 2021 com um total de 64,7 milhões de toneladas de cimento vendidas, representando um aumento de 6,6% em relação ao ano anterior, retomando assim o patamar de comercialização registrado em dezembro de 2015.

O cimento Portland pode ser definido como um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer. Este, por sua vez, é composto essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos e uma pequena quantidade de sulfato de cálcio, sendo obtido a partir de matérias-primas como calcário ou giz, sílica e alumina — presentes em argilas ou folhelhos — e óxidos de ferro. Quando combinados em proporções adequadas e submetidos a altas temperaturas, esses materiais dão origem ao clínquer (MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE e BROOKS, 2013).

As variações entre os diferentes tipos de cimento Portland disponíveis no mercado decorrem das adições misturadas ao clínquer. Essas adições podem incluir: gesso, escória, pozolana, sílica ativa ou carbonatos (SANTOS, 2014). Os tipos de cimento existentes no

mercado brasileiro são normatizados pela ABNT, especialmente pela NBR 16.697/2018, e são livremente comercializados conforme as nomenclaturas e referências apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 4- Tipos de cimento de acordo com NBR16.697/2018.

Designação Normatizada (Tipo)	Subtipo	Sigla
Cimento Portland Comum	Sem adição	CP I
	Com adição	CP I-S
Cimento Portland Composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E
	Com material carbonático	CP II-F
	Com material pozolânico	CP II-Z
Cimento Portland de Alto Forno		CP III
Cimento Portland Pozolânico		CP IV
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial		CP V ARI
Cimento Portland Branco	Estrutura	CPB
	Não estrutural	CPB

De acordo com a literatura existente, o tipo de cimento influencia significativamente as propriedades da argamassa. Segundo Bolorino e Cincotto (1997), por meio de ensaios comparativos com cinco tipos diferentes de cimento (CP II-E, CP II-F, CP II-Z, CP IV e CP V-ARI), constatou-se que, no estado plástico, não ocorreram grandes variações em função do tipo de cimento utilizado. No entanto, em relação às propriedades no estado endurecido, observou-se que a retração por secagem das argamassas contendo cimento CP III não resultou em fissuras, possivelmente devido à presença de escória, que retarda a velocidade de hidratação. Por outro lado, argamassas compostas com cimento CP V-ARI, por apresentarem hidratação inicial acelerada, demonstraram maior retração e formação de fissuras.

Outro aspecto observado no estudo foi a resistência de aderência, que atingiu valores máximos em períodos distintos. As argamassas com CP III apresentaram menor resistência inicial, porém com crescimento contínuo até atingir o valor máximo aos 182 dias. Já a argamassa com cimento CP IV-ARI apresentou os maiores valores de aderência até os 63 dias. Além disso, os menores valores de resistência à compressão axial foram registrados nas argamassas com CP II-F (com adição de filler calcário), enquanto os maiores valores foram observados com o uso do CP V-ARI RS.

O cimento Portland é considerado o principal responsável pela resistência mecânica das argamassas (FREITAS, 2010), além de ser determinante na aderência ao substrato, principalmente devido à atuação da etringita — um dos produtos da hidratação do cimento

(CARAZEK, 1996; CARAZEK, 2001). Segundo Gallegos (2005), além da influência direta na resistência e adesão, o cimento também contribui significativamente para a coesão da argamassa.

Outro fator importante relacionado ao cimento é a finura de seus grãos. Tristão (1995) aponta que cimentos com maior finura proporcionam maior trabalhabilidade às argamassas. Além disso, quanto mais finos os grãos, maior é a área específica, resultando em maior absorção e retenção de água. Complementando esse aspecto, Carneiro (1993) observou que a retração da argamassa aumenta com o teor de finos após as primeiras 24 horas, sugerindo inclusive a adição de cal para mitigar esse efeito.

Diante do exposto, fica evidente a importância do conhecimento das características do cimento utilizado na produção de argamassas, visto que ele influencia diretamente suas propriedades físicas e mecânicas.

2.2.2.2 Cal

A cal é definida por Guimarães (2002) como um produto químico aglomerante derivado de rochas carbonatadas calco-magnesianas, composto por óxidos anidros de cálcio e, eventualmente, de magnésio, sendo obtido por meio da calcinação da matéria-prima a temperaturas entre 900 °C e 1200 °C. A calcita (carbonato de cálcio – CaCO_3) é o mineral mais importante presente nessas rochas. Alguns pesquisadores consideram que a calcita se forma por precipitação direta a partir de soluções, originando, posteriormente, a dolomita (carbonato de cálcio e magnésio – $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). Outra definição para cal a descreve como a designação genérica de um aglomerante simples, subproduto da calcinação de rochas calcárias. Essas rochas são compostas basicamente por carbonatos de cálcio (CaCO_3) e/ou dolomita ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$), com proporção máxima de uma unidade de cálcio para uma unidade de magnésio (CINCOTTO et al., 2010; RIBEIRO et al., 2015).

Segundo Isaia (2010), a cal é um aglomerante inorgânico obtido pela calcinação de calcários (CaCO_3) ou dolomitos ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$), por meio de uma reação química de decomposição térmica. A cal virgem é originada desse processo e, ao entrar em contato com água em quantidade suficiente para satisfazer sua afinidade química, transforma-se em cal hidratada. No estudo de Cincotto, Quarconi e John (2010), afirma-se que o desempenho da cal é influenciado tanto pela composição da matéria-prima quanto pelas condições do processo de produção.

De maneira resumida, Almeida (2015) ilustrou o ciclo da cal conforme imagem abaixo.

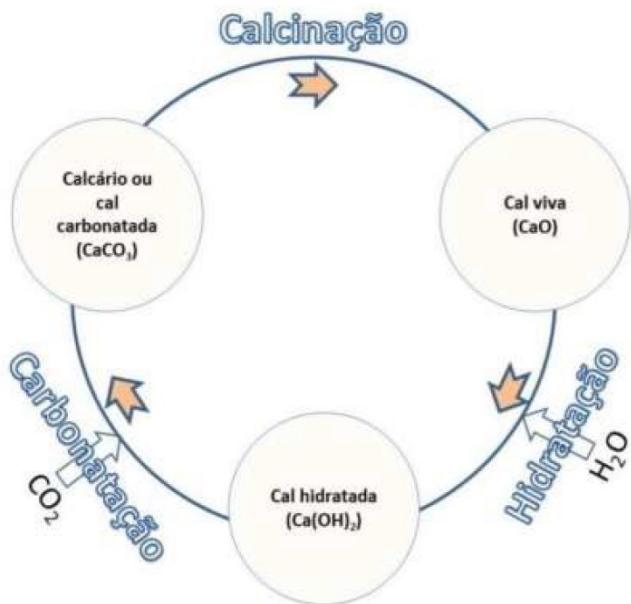


Figura 8- Ciclo da Cal

Fonte: Almeida (2015).

Apesar do uso difundido da cal desde as civilizações mais antigas (VÁLEK e VEIGA, 2005), os primeiros registros de sua aplicação em argamassas no Brasil datam de aproximadamente 1550 (GUIMARÃES, 2002), quando foi fundada a primeira mineradora de calcário do país. Essa extração ocorreu a partir dos depósitos conchíferos existentes no fundo da Baía de Todos os Santos, hoje localizada no estado da Bahia. Essa matéria-prima foi utilizada nas primeiras construções e na caiação de casas no Brasil.

Atualmente, a norma responsável por classificar os tipos de cal no país é a NBR 7175 (ABNT, 2003), que estabelece três categorias: CH I, CH II e CH III. A cal do tipo CH I é a cal hidratada especial, com maior teor de óxidos totais e elevada reatividade em comparação às demais. Essa maior reatividade contribui para a melhoria das propriedades da argamassa, especialmente no que diz respeito à retenção de água e à trabalhabilidade. A cal CH II é classificada como cal hidratada comum, enquanto a CH III corresponde à cal hidratada comum com adição de carbonatos finamente moídos. A norma também estabelece requisitos técnicos relacionados ao teor de óxidos, plasticidade, estabilidade, retenção de água, finura e índice de incorporação na areia.

A cal hidratada, como já mencionado, exerce grande influência no comportamento das argamassas mistas, sendo essencial o estudo de suas características. No trabalho de Rago e Cincotto (1997), verificou-se que o tipo de cal afeta a viscosidade e o limite de escoamento, impactando diretamente na plasticidade e consistência da argamassa. Nesse estudo, observou-

se que a cal cárnea, por ser mais viscosa, proporciona maior consistência em comparação à cal dolomítica, embora esta última apresente maior plasticidade.

Além de ser um aglomerante, a cal, devido à sua elevada finura, possui importantes propriedades plastificantes e de retenção de água (CARAZEK, 2001). Sua adição às argamassas proporciona maiores deformações sem ocorrência de fissuração, bem como maior retenção da água de amassamento, resultando em melhor aderência ao substrato (SANTOS, 2014).

Conforme exposto por Cincotto *et al.* (1995), a cal confere maior plasticidade às pastas e argamassas no estado fresco, permitindo maiores deformações no estado endurecido, sem formação de fissuras — comportamento não comumente observado em argamassas compostas exclusivamente por cimento Portland. Ademais, segundo Vladimir *et al.* (2011), uma argamassa contendo cal exige maior quantidade de água, em comparação a uma argamassa composta apenas por cimento, para atingir a mesma consistência.

De maneira a resumir algumas das influências da cal hidratada no comportamento das argamassas de cimento-cal, Mota (2004) apontou os seguintes efeitos:

- a) Maior resistência às altas temperaturas;
- b) Menor retração por secagem;
- c) Maior retenção de água;
- d) Menor movimentação higroscópica;
- e) Maior trabalhabilidade;
- f) Maior elasticidade;
- g) Maior plasticidade;
- h) Maior capacidade de aderência.

O papel da cal nas argamassas se mantém em destaque desde o início de sua aplicação, de forma que este aglomerante aéreo deve ser estudado de maneira devida quando se vislumbra seu uso em argamassas mistas.

2.2.2.3 Agregados

Nas argamassas, a escolha dos agregados deve ser feita com critério, uma vez que esses materiais representam aproximadamente 60% a 80% da massa da argamassa pronta, influenciando significativamente seu comportamento no estado fresco, bem como o desempenho final do revestimento (CARAZEK, 2010). Conforme observado por Carazek *et al.* (2016), embora o Brasil não esteja entre os maiores consumidores mundiais de agregados, é, certamente, um dos países que mais impactam negativamente o meio ambiente, principalmente

devido à extração descontrolada de minerais para a construção civil, com destaque para a areia natural de rio.

De acordo com a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção – ANEPAC (2022), o mercado de agregados registrou, em 2021, um crescimento de 9% em relação ao ano anterior, atingindo 660 milhões de toneladas. Esse número consolidou uma série de cinco anos de recuperação, após a queda histórica de 33% observada entre 2013 e 2017. Do total extraído, 385 milhões de toneladas correspondem à areia, enquanto o restante refere-se à brita

Segundo Tristão (2005), as areias mais utilizadas no Brasil são as naturais provenientes dos leitos de rios, além da areia de cava ou barranco e das areias eólicas. Entre as naturais, a areia de leito de rio é a mais empregada, ao passo que, entre as artificiais, destaca-se a areia de britagem.

A NBR 7211 (ABNT, 2009) define agregado miúdo como aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm, observados os limites estabelecidos na norma, por meio de ensaio realizado conforme a ABNT NM 248 (ABNT, 2003).

Há uma grande variabilidade nas areias utilizadas, principalmente em função de suas diferentes origens — tanto em relação aos minerais que as compõem quanto aos processos de intemperismo, desintegração e erosão que atuam sobre os materiais (TRISTÃO, 2005).

De acordo com Neto (2005), os agregados podem ser classificados quanto à origem em naturais, britados, artificiais e reciclados. Os agregados naturais não necessitam de beneficiamento, passando apenas por processos de lavagem, enquanto os agregados artificiais são provenientes de processos industriais. Já os reciclados podem ser resíduos industriais granulares que apresentam propriedades adequadas para uso como agregado ou resultar de entulhos de construção civil e demolição. Em relação aos agregados de origem em britagem, estes têm sido cada vez mais utilizados na construção civil, principalmente devido à escassez gradual das jazidas de areia natural e ao elevado impacto ambiental causado pela sua extração (CARAZEK *et al.*, 2016).

Nos estudos de argamassa, a caracterização dos agregados geralmente é realizada com base na curva granulométrica, módulo de finura e coeficiente de uniformidade (CARNEIRO *et al.*, 1997).

As diferentes características dos agregados utilizados nas argamassas influenciam significativamente suas propriedades. Carneiro *et al.* (1997) indicam que a granulometria do agregado exerce grande influência na argamassa, assim como o diâmetro máximo e a forma dos

grãos, que impactam o empacotamento, controlando o volume de vazios a ser preenchido pela pasta (cimento, cal, água e incorporados).

Quanto à forma dos grãos, Wejtz (2004) considera que partículas com elevada esfericidade, porém angulosas, são ideais para argamassas, enquanto partículas alongadas e lamelares devem ser evitadas devido à maior área específica e ao consequente aumento no consumo de pasta. Shutter e Poppe (2004), em estudo sobre areias de forma arredondada (provenientes de rios e mar), destacam que a massa unitária da areia é o parâmetro mais importante para quantificar a demanda de água nas argamassas. Essa importância da massa unitária já havia sido ressaltada anteriormente por Carneiro *et al.* (1997).

Langston *et al.* (2008) e Mothé Filho *et al.* (2002) apontam que a utilização de agregados com alta porosidade pode reduzir a durabilidade do compósito, exigindo ajustes no teor de pasta.

Em relação ao módulo de finura do agregado, Tristão (1995) destaca que quanto maior esse módulo, menor é a relação água/materiais secos, e que argamassas preparadas com areias compostas por grãos mais uniformes necessitam de mais água do que aquelas com areias de uniformidade média ou baixa. Já Cincotto *et al.* (1995) consideram que a trabalhabilidade é favorecida à medida que diminui o módulo de finura do agregado e o teor de grãos angulosos.

Yu e Standish (1993) destacam que o aumento do diâmetro das partículas inicialmente eleva a porosidade até atingir um valor máximo, após o qual a porosidade diminui. Os autores também afirmam que, para grãos esféricos, a porosidade em misturas com diferentes tamanhos de grãos é menor do que em misturas compostas por grãos de tamanho uniforme.

A área superficial dos agregados também apresenta influência sobre as propriedades mecânicas de argamassas, logo, indica-se realizar proporcionamento das misturas considerando diretamente essa variável (GOBLE E COHEN, 1999).

Carazek *et al.* (2001) afirmam que a capacidade de aderência das argamassas de revestimento depende do teor e da granulometria da areia empregada, recomendando-se, para boa aderência, o uso de areias com distribuição granulométrica mais contínua. Já Angelim *et al.* (2003) destacam que areias mais finas proporcionam maior resistência de aderência da argamassa.

Sabbatini (1998) apresenta uma sinopse qualitativa da influência dos parâmetros granulométricos nas principais propriedades das argamassas, conforme tabela a seguir.

Tabela 5- Influência das características granulométricas das areias nas propriedades das argamassas de assentamento

Propriedades	Características da areia		
	Quanto menor o módulo de finura	Quanto mais descontínua for a granulometria	Quanto maior o teor de grãos angulosos
Trabalhabilidade	Melhor	Pior	Pior
Retenção de água	Melhor	Variável	Melhor
Resiliência	Variável	Pior	Pior
Retração na secagem	Aumenta	Aumenta	Variável
Porosidade	Variável	Aumenta	Variável
Aderência	Pior	Pior	Melhor
Resistências mecânicas	Variável	Pior	Variável
Impermeabilidade	Pior	Pior	Variável

2.2.2.4 Água

Na formação da argamassa, a água é um ingrediente essencial, desempenhando duas funções principais: permite que a mistura seja trabalhável e, ao reagir com os aglomerantes, promove o endurecimento e a resistência da argamassa (CARASEK, 2001). As águas potáveis são as mais indicadas para a elaboração de produtos à base de cimento Portland; no entanto, ensaios de qualidade podem viabilizar o uso de água não potável (LARA *et al.*, 1995; DIOGENES *et al.*, 2019).

A quantidade de água utilizada durante a produção da argamassa é determinante para sua performance, afetando sua consistência, o processo de endurecimento, a aderência ao substrato, as características no estado endurecido e a qualidade final dos revestimentos (FERREIRA, 2010). Recomenda-se a adição de água de amassamento de forma a garantir a consistência necessária para que a argamassa apresente trabalhabilidade adequada e possa ser aplicada corretamente (AGOSTINHO, 2008). Alguns especialistas sugerem que a quantidade ideal de água seja aquela que proporcione uma consistência avaliada por meio da mesa de espalhamento (flow table), com valor de 260 ± 10 mm (GOMES e NEVES, 2002). Outros estudos indicam que o percentual de água em relação ao total de materiais secos deve ficar em torno de $15 \pm 5\%$ (BAIA e SABBATINI, 2008; SOUZA, 2010; SANTOS, 2011; SANTOS, 2014).

A importância da água na composição da argamassa é tamanha que diversas metodologias de dosagem se baseiam no volume de água utilizado (SELMO, 1989; LARA *et al.*, 1995; CARNEIRO *et al.*, 1997; CAMPITELI *et al.*, 1995; QUARCIONI *et al.*, 1999).

Como amplamente discutido na literatura, o aumento da quantidade de água na mistura eleva o fator água/cimento (a/c), o que melhora a trabalhabilidade, mas reduz a resistência à compressão (HAMAMI *et al.*, 2011; SINGH *et al.*, 2015; CHEN e WU, 2012; SCHULZE, 1999; SEAR *et al.*, 1995; ZIVICA, 2009). Além disso, a quantidade de água influencia diretamente a durabilidade e a porosidade da argamassa. Kim *et al.* (2014) observaram que, quanto maior o fator a/c, maior a porosidade da argamassa, o que pode comprometer sua durabilidade. Thamboo *et al.* (2019) destacam que o controle do fator a/c durante a produção pode evitar o surgimento de fissuras.

Adicionalmente, o fator água/cimento também afeta o comportamento térmico da argamassa. Estudos como o de Shafiq *et al.* (2020) demonstram que, quanto maior o fator a/c, menor a condutividade térmica do material.

2.2.3 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE PRODUÇÃO DA ARGAMASSA

Para execução e confecção das argamassas, devem-se seguir algumas etapas, as quais encontram-se normatizadas por meio da ABNT NBR 7200(1998). A norma apresenta alguns procedimentos que devem ser seguidos, conforme se pode observar na tabela a seguir.

Tabela 6- Principais etapas a serem seguidas para confecção de argamassas

COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS	<ul style="list-style-type: none"> • Determinação do traço por projetista ou construtor. • Determinar o traço em massa. • Registrar o consumo de material.
MEDIÇÃO DOS MATERIAIS	<ul style="list-style-type: none"> • Medição dos materiais pode ser em volume. • Utilizar recipiente com volume conhecido. • Utilizar régua para nivelar em caso do recipiente estiver cheio. • Não usar recipiente que assegure um volume constante. • Dar preferência para recipientes cujo volume seja compatível com o volume dos sacos dos aglomerantes. • Fazer correção da quantidade de agregado e adições em função da umidade.
PREPARO DA MISTURA	<ul style="list-style-type: none"> • A argamassa deve ser misturada preferencialmente por processo mecânico. • No processo mecanizado o tempo de mistura deve ser entre 2min e 5min. • No processo manual o volume misturado deve ser inferior a 0,05m³. • No preparo de argamassas com cal ou mista, deve-se maturar a cal. • Para as obras que empreguem pasta de cal hidratada, deve-se colocar a cal em um recipiente com água até que forme uma pasta bem viscosa, não devendo ser usada água em excesso. A pasta produzida deve maturar durante o mínimo de 16h. • Para obras que empreguem mistura prévia de cal e areia, deve-se misturar primeiramente a areia e a cal, e após, acrescentar água, atingindo-se consistência seca. A mistura produzida deve ser deixada em maturação durante 16 h no mínimo.

	<ul style="list-style-type: none"> • A mistura da cal e areia e a pasta de cal, quando armazenadas, devem ser mantidas úmidas para evitar enrijecimento. • No preparo de argamassas mistas, o cimento deve ser adicionado no momento da sua aplicação, atendido o prazo de maturação da pasta ou da mistura cal e areia. No preparo das argamassas industrializadas, seguir as instruções de documento técnico que acompanham o produto. • O volume de produção de argamassa de cimento ou mista deve ser controlado de modo que seja utilizado em prazo máximo de 2 h e 30 min.
--	---

Desta forma, o modo de preparo das argamassas deve ser conduzido de acordo com as condições preconizadas. No estudo de Souza *et al.* (2019) foi demonstrado que as propriedades das argamassas podem variar de acordo com o tipo de misturador empregado. Já Romano *et al.* (2007) estudou o efeito do tempo de mistura na produção da argamassa com ar incorporado no comportamento das propriedades destas.

2.2.4 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

As principais propriedades da argamassa que influenciam no desempenho do revestimento têm sido, constantemente, objeto de estudo (SELMO, 1989; CARASEK, 2010). A argamassa somente cumprirá de maneira adequada suas funções se apresentar um conjunto de propriedades específicas (BAÍA e SABBATINI, 2008).

De acordo com Cincotto *et al.* (1995), a determinação das propriedades das argamassas que influenciam no desempenho do sistema argamassa + base deve considerar o estado em que se encontram, seja no estado fresco ou no estado endurecido.

A seguir, apresenta-se uma tabela com as principais propriedades da argamassa, associadas ao respectivo estado (fresco ou endurecido). Em seguida, cada uma dessas propriedades será discutida de forma individual.

Tabela 7- Resumo das principais propriedades das argamassas.

ESTADO FRESCO					
Densidade de massa e teor de ar incorporado	Trabalhabilidade	Consistência	Retenção de água	Adesão inicial	Retração
ESTADO ENDURECIDO					
Aderência	Capacidade de absorver deformações	Resistência Mecânica	Durabilidade	Permeabilidade	Absorção de água por capilaridade

2.2.4.1 Propriedades relacionadas ao Estado Fresco.

2.2.4.1.1 *Densidade de massa e teor de ar incorporado.*

A densidade de massa, também conhecida como massa específica da argamassa, está diretamente relacionada à massa específica dos agregados utilizados, bem como ao teor de ar incorporado na mistura. Essa propriedade pode ser determinada por meio dos ensaios descritos na NBR 13.278 (ABNT, 2005).

Segundo Carasek (2010), argamassas mais leves, ou seja, com menor densidade de massa, apresentam maior teor de ar incorporado e, por isso, são mais trabalháveis durante a aplicação. Além da trabalhabilidade, o ar incorporado afeta diretamente a resistência mecânica da argamassa e contribui para a redução da absorção de água por capilaridade (WANG e KO, 2008; FREITAS, 2010).

A NBR 13.281 (ABNT, 2023) classifica as argamassas conforme sua densidade de massa em cinco categorias: DF0 para argamassas com massa específica inferior a 1.400 kg/m^3 , e DF4 para aquelas com massa específica superior a 2.000 kg/m^3 .

De acordo com Carasek *et al.* (2016), as características das areias utilizadas na composição das argamassas exercem forte influência sobre suas propriedades no estado fresco, especialmente em relação à densidade de massa e à consistência. O estudo aponta que arranjos com agregados de maior densidade de empacotamento reduzem a porosidade, o que, por sua vez, eleva a densidade de massa e reduz a consistência da mistura.

2.2.4.1.2 *Trabalhabilidade*

Carasek (2010) aponta que a trabalhabilidade é a propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, mantendo-se em uma condição homogênea. De acordo com a norma americana C125 (ASTM, 2018), a trabalhabilidade é definida como a facilidade com que o compósito ainda no estado fresco pode ser misturado, aplicado, consolidado e acabado. Trata-se de uma propriedade complexa e de difícil quantificação, sendo, muitas vezes, avaliada de forma empírica e intuitiva (TRISTÃO, 1995).

Para Yoshida e Barros (1995), a trabalhabilidade resulta da combinação de outras características das argamassas, como plasticidade, coesão, consistência e densidade. Essa propriedade influencia diretamente as condições de aplicação da argamassa, a aderência ao substrato e as propriedades finais no estado endurecido.

Segundo Cincotto *et al.* (1995), a adição de cal pode melhorar significativamente a trabalhabilidade da argamassa. Além disso, agregados com menor módulo de finura tendem a impactar positivamente essa propriedade.

Alguns especialistas sugerem que a trabalhabilidade ideal da argamassa é atingida quando sua consistência, avaliada por meio da mesa de espalhamento (*flow table*), apresenta valor de 260 ± 10 mm (GOMES e NEVES, 2002).

2.2.4.1.3 Consistência e plasticidade

Para Cincotto *et al.* (1995), a consistência das argamassas refere-se à sua maior ou menor fluidez, estando associada à capacidade da mistura em resistir ao escoamento. A argamassa pode apresentar consistência seca, plástica ou fluida. Segundo o estudo, consistências mais fluidas indicam misturas com menores valores de tensão de escoamento. Já para Carasek (2010), consistência representa a facilidade com que a argamassa se deforma sob a ação de cargas. Ainda segundo o autor, ao buscar a consistência ideal para aplicação, o operário tende a adicionar água à mistura, alterando sua trabalhabilidade.

Para cada finalidade e método de aplicação, há uma plasticidade ideal. A quantidade ótima de água necessária para se alcançar a consistência adequada depende do traço da argamassa e dos materiais empregados (CARASEK, 2010).

A NBR 12.276 (ABNT, 2016) estabelece os procedimentos para avaliação da consistência da argamassa no estado fresco, utilizando a mesa de consistência (*flow table*). Esse ensaio é amplamente utilizado por ser simples e representar bem as condições reais de aplicação de materiais cimentícios (GRANDES *et al.*, 2019).

De acordo com Cardoso (2009), a plasticidade é a propriedade da argamassa no estado fresco que permite que ela se deforme e retenha parte dessa deformação mesmo após a redução das tensões aplicadas. Essa propriedade é influenciada tanto pela natureza e quantidade dos agregados (TRISTÃO, 1995), quanto pela quantidade e tipo de aglomerantes presentes na mistura (CINCOTTO *et al.*, 1995).

Conforme já mencionado por Carazek *et al.* (2016), a distribuição granulométrica e a forma dos agregados influenciam diretamente a consistência da argamassa. Isso ocorre porque o grau de empacotamento das partículas altera a porosidade da mistura — sendo que arranjos menos compactos tendem a resultar em argamassas com maior consistência.

2.2.4.1.4 Retenção de água

A retenção de água é a propriedade da argamassa no estado fresco que lhe confere a capacidade de manter sua trabalhabilidade mesmo quando submetida a condições que favorecem a perda da água de amassamento, seja por evaporação ou por absorção pelo substrato (BAUER *et al.*, 2005; CARASEK, 2010). Essa propriedade é determinante para o tempo disponível de aplicação, regularização e desempenho da argamassa (TRISTÃO, 1995).

Segundo Yoshida e Barros (1995), a capacidade de retenção de água está diretamente relacionada à superfície de contato entre os constituintes da argamassa. O acréscimo de cal na mistura tende a melhorar essa propriedade, uma vez que a cal apresenta elevada superfície específica.

Conforme demonstrado por Tristão (2005), o tipo de areia utilizado como agregado na composição da argamassa também influencia significativamente a capacidade de retenção de água.

A avaliação dessa propriedade é realizada conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 12.777 (ABNT, 2005). Já a NBR 13.281 (ABNT, 2023) classifica as argamassas em quatro faixas, de acordo com o índice de retenção de água obtido: U0 para valores inferiores a 70%, e U3 para valores superiores a 90%.

É importante destacar que, conforme observado por Carneiro (1999), a retenção de água também interfere na retração por secagem da argamassa — um dos principais fatores causadores de fissuração no estado endurecido. Isso se deve à velocidade de evaporação da água de amassamento, que afeta diretamente o comportamento da argamassa após a aplicação.

2.2.4.1.5 Adesão Inicial

Segundo Cincotto *et al.* (1995), a adesão inicial da argamassa ao substrato está relacionada à reologia da pasta aglomerante, sendo influenciada pela trabalhabilidade da argamassa e pelas características da base, como sua textura e porosidade. Essa adesão inicial é determinante para o desempenho futuro do conjunto substrato/revestimento em termos de aderência.

Essa propriedade, também chamada de “pegajosidade”, está diretamente correlacionada com as características reológicas da pasta aglomerante, especialmente com sua tensão superficial (CARASEK, 2010). A redução da tensão superficial diminui o ângulo de contato entre as superfícies, promovendo maior adesão.

A diminuição da tensão superficial e, consequentemente, o aumento da adesão inicial pode ser obtida com a adição de cal ou de aditivos específicos (CARASEK, 2010).

Além disso, outros fatores fundamentais para garantir uma boa aderência inicial das argamassas incluem as condições da superfície do substrato. Este deve estar limpo, livre de poeira, partículas soltas, óleos ou gorduras, que possam comprometer a ligação entre o revestimento e a base.

2.2.4.1.6 Retração

A retração é o fenômeno de contração volumétrica do material decorrente da perda da água de mistura. Segundo Carasek (2010), esse processo está diretamente associado à variação de volume da pasta aglomerante, provocada pela evaporação da água, especialmente em misturas com elevada relação água/aglomerante.

De acordo com Cincotto (1995), quando a argamassa é exposta ao ambiente, ocorre perda de água por evaporação, resultando em uma contração volumétrica. Essa retração pode comprometer o desempenho do revestimento, influenciando diretamente na estanqueidade e durabilidade da argamassa.

Jiang *et al.* (2018) destacam que o excesso de retração, especialmente quando não controlado, pode reduzir a vida útil do sistema e comprometer sua confiabilidade estrutural a longo prazo.

Ainda segundo Carasek (2010), o teor de finos da pasta influencia significativamente na retração: quanto maior o conteúdo de partículas com diâmetro inferior a 5 μm — como as argilas —, maior será o potencial de retração da argamassa. Tristão (2005) também investigou o comportamento de retração em argamassas produzidas com diferentes tipos de agregados, conforme apresentado na figura a seguir.

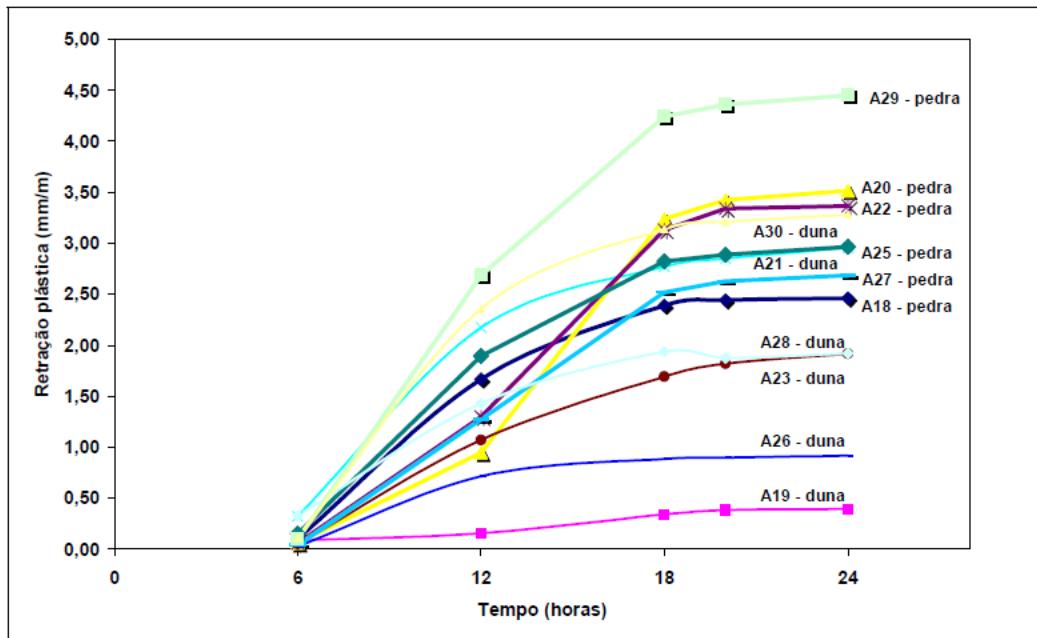


Figura 9- Retração plástica de argamassas com diferentes agregados para traço 1:2:9

Fonte: Tristão (2005)

O resultado do estudo apontado em Tristão (2005) indica que existe uma tendência de aumento da retração com o aumento da relação água/materiais secos, além de demonstrar que se fixando a composição granulométrica dos agregados e as proporções em volume, as características da areia influenciam na retração da argamassa. Além disso, indica-se que argamassas produzidas na proporção de mistura em volume de 1:2:9 apresentaram maiores retrações plásticas do que as argamassas com proporção de mistura em volume 1:1:6.

2.2.4.2 Propriedades no estado endurecido

2.2.4.2.1 Aderência

A aderência é a propriedade resultante das ligações que ocorrem na interface entre duas superfícies (COSTA, 2014). Para Wu (2017), aderência pode ser definida como o estado em que duas fases permanecem unidas por contato interfacial, permitindo que forças mecânicas ou trabalho sejam transferidos através dessa interface. Já Gutowski (1982) considera a aderência como um sistema termodinâmico, cujo desempenho pode ser analisado a partir da energia interfacial entre as fases.

De acordo com Carasek (2010), a aderência descreve a resistência e a extensão do contato entre a argamassa e o substrato, sendo resultado da combinação de três propriedades da

interface argamassa-base: resistência de aderência à tração, resistência de aderência ao cisalhamento e extensão da aderência.

A norma europeia EN 1015-12 (2016) define a aderência como a tensão máxima suportada por uma carga aplicada perpendicularmente a um revestimento de argamassa sobre um substrato.

No estudo conduzido por Vaz e Carasek (2019), com base em ampla revisão bibliográfica, são apresentadas diversas metodologias empregadas mundialmente para a determinação da aderência. A pesquisa revela que o tipo de traço e os materiais empregados na composição da argamassa estão entre os principais fatores que influenciam a aderência ao substrato.

Essa propriedade é fundamental na interação da argamassa de revestimento com a base, sendo determinante para o desempenho mecânico e a durabilidade do sistema, que tendem a ser mais elevados quanto maior for a compatibilidade entre revestimento e suporte (AGOSTINHO, 2008).

Cincotto *et al.* (1995) ressaltam que a aderência é fortemente influenciada pelas características da base receptora, como porosidade, capacidade de absorção de água, resistência mecânica, textura superficial e pelas condições de aplicação da argamassa.

Carvalho (2005) destaca a teoria do intertravamento mecânico como o principal mecanismo responsável pela aderência em argamassas. Nesse modelo, a aderência ocorre por meio da ancoragem da pasta nos poros do substrato. Parte da matriz ou da água de amassamento contendo ligantes é absorvida pelos poros do suporte, onde se consolida, promovendo a fixação. A figura a seguir ilustra esse fenômeno.

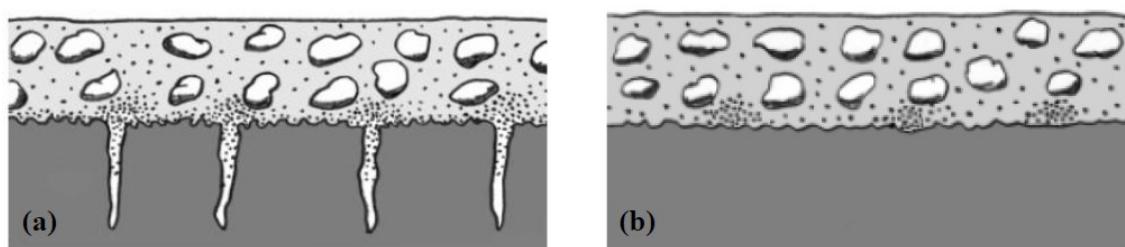


Figura 10- Mecanismo de intertravamento mecânico da matriz nos poros e rugosidade do substrato. a) aderência adequada, com penetração da matriz nos poros. b) aderência inadequada em função da baixa porosidade do substrato

Fonte: Costa (2014)

Conforme mencionado por Carazek (2010), o tipo de cimento utilizado na confecção da argamassa influencia em sua aderência. Atualmente, diversas técnicas como o uso de

microscópio de varredura eletrônica auxiliam na análise detalhada desta interação argamassa/substrato (CARAZEK, 1996; COSTA, 2014). Ainda conforme Carazek (2010):

Com relação ao proporcionamento dos materiais, as argamassas com elevado teor de cimento, em geral, apresentam elevada resistência de aderência, mas podem ser menos duráveis, uma vez que possuem maior tendência a desenvolver fissuras. Por outro lado, argamassas contendo cal possuem alta extensão de aderência, tanto em nível macro como em nível microscópico.

Importante ressaltar que no estudo realizado por Bueno *et al.* (2022) conclui-se que após uma exposição de alvenaria revestida com argamassa, ocorre uma redução de quase 70% da resistência de aderência do revestimento.

2.2.4.2.2 Capacidade de absorver deformações

A capacidade de absorver deformações da argamassa no estado endurecido refere-se à sua aptidão de deformar-se sob solicitações externas sem que ocorra ruptura, retornando à forma e ao volume iniciais após a cessação dessas solicitações (CINCOTTO, 1995). Essa propriedade está diretamente relacionada ao módulo de elasticidade da argamassa (CARASEK, 2010).

O comportamento ideal esperado de uma argamassa é que ela acompanhe as deformações próprias e da base onde é aplicada, sem apresentar falhas estruturais (NAKAKURA e CINCOTTO, 2004). Tal desempenho é crucial para que o revestimento contribua de forma eficaz para a estanqueidade das paredes, evitando a passagem de umidade.

Fiori (1994) investigou o comportamento de argamassas quanto às tensões de tração induzidas por retração e constatou que as chamadas argamassas ricas – com maior teor de ligantes–, por apresentarem maior módulo de elasticidade, estão mais sujeitas a elevadas tensões de tração.

De acordo com Cruz (2008), argamassas com menor teor de cimento apresentam módulo de elasticidade mais baixo e, consequentemente, maior capacidade de dissipar energia por meio de microfissuras. Contudo, a ocorrência excessiva de fissuras ou rupturas compromete o desempenho do revestimento, afetando negativamente sua estanqueidade e aderência.

A NBR 13281:2023 classifica as argamassas com base em seu módulo de elasticidade dinâmico (Ed) em quatro faixas, sendo a classe E1 correspondente a argamassas com Ed entre 12.000 e 14.000 MPa e a classe E4 para aquelas com Ed inferior a 7.000 MPa.

2.2.4.2.3 Resistência mecânica

A resistência mecânica das argamassas é a propriedade que indica a capacidade do material de resistir a esforços de tração, compressão ou cisalhamento, decorrentes de cargas estáticas ou dinâmicas atuantes na edificação (FREITAS, 2010). A normatização brasileira, em especial a NBR 13281 (ABNT, 2023), classifica as argamassas em função de sua resistência à tração na flexão, a qual é determinada conforme a ABNT NBR 13.279 (2005). De acordo com a norma, as argamassas podem ser classificadas em quatro classes quanto à resistência à tração na flexão, sendo R1 para F_t menor que 0,50 MPa e R4 para F_t maior que 3,0 MPa.

Conforme apontado por Tristão (2005) e Carneiro (1999), a resistência das argamassas tende a aumentar com o incremento do coeficiente de uniformidade do agregado. Isso ocorre devido à redução dos índices de vazios da areia, aumentando a capacidade de compacidade da mistura.

Haddad *et al.* (2020) verificaram que a resistência das argamassas também tende a aumentar com o aumento do módulo de finura do agregado utilizado, uma vez que, quanto mais finos os grãos, maior é sua superfície de contato. Essa característica demanda mais água para atingir a mesma trabalhabilidade, o que pode ocasionar uma redução na resistência mecânica.

No estudo de Shafiq *et al.* (2020), concluiu-se que argamassas com maior resistência à compressão tendem a apresentar maior condutividade térmica. Singh (2015), por sua vez, aponta que quanto maior o fator água/cimento da argamassa, menor será sua resistência à compressão.

Bollorino e Cincotto (1997) investigaram o comportamento da resistência mecânica à compressão e à tração por flexão das argamassas em função dos tipos de cimento utilizados na mistura, concluindo que os valores mais baixos de resistência ocorrem nos cimentos do tipo CP II F, enquanto os mais elevados são observados para o CPV ARI. Além disso, observaram que os cimentos que contêm escória (CP II E e CP III) apresentam aumento da resistência até 63 dias, ao passo que os demais estabilizam a partir dos 28 dias.

2.2.4.2.4 Durabilidade

A durabilidade das argamassas sofre influência direta do ambiente ao qual estão expostas, bem como dos materiais que as compõem (BRITO, 2012). Cincotto *et al.* (1995) destacam que a durabilidade e o desempenho de uma argamassa de revestimento são influenciados por fatores intrínsecos e extrínsecos, os quais atuam nas mais variadas fases dos

processos de produção, uso e manutenção. Segundo Bauer (1994), algumas das causas mais comuns que afetam negativamente a durabilidade da argamassa são::

- a. deficiências de projeto;
- b. por desconhecimento das características dos materiais empregados e/ou emprego de materiais inadequados;
- c. por erros de execução, seja por deficiência de mão-de-obra, desconhecimento ou não observância de Normas Técnicas;
- d. por problemas de manutenção.

Baía e Sabbatini (2008) apontam, entre os fatores que prejudicam a durabilidade das argamassas de revestimento – além dos mencionados anteriormente – a fissuração, a espessura excessiva e a eventual proliferação de microrganismos.

Santos *et al.* (2021) ressaltam que a relação água/aglomerante e o ar aprisionado devem ser objeto de controle tecnológico na confecção da argamassa e de todos os materiais cuja matriz seja cimentícia. Isso porque, quanto maior a porosidade, maior será a percolação e a possibilidade de difusão de agentes deletérios, o que reduz, consequentemente, a durabilidade.

2.2.4.2.5 Permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade à água caracteriza a passagem da água através da argamassa, seja por infiltração sob pressão ou por capilaridade, quando a água é absorvida pelos materiais em contato superficial com ela (TRISTÃO, 1995). Entre os métodos possíveis para avaliar a permeabilidade e absorção de água, Almeida Dias e Carazek (2003) propõem o uso do ensaio pelo Método do Cachimbo, concluindo que, com o passar do tempo — entre 7 dias e 2 meses — ocorre uma redução gradual da absorção e da permeabilidade à água do revestimento. Essa redução é resultado das alterações na microestrutura das argamassas, decorrentes da hidratação do cimento e da carbonatação da cal e do próprio cimento.

O empacotamento, os tipos e o tamanho dos agregados aplicados na argamassa, assim como o fator água/cimento, influenciam diretamente a porosidade, afetando, por consequência, a permeabilidade dos materiais cimentícios (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com Nakakura e Cincotto (2004), a existência dos poros e suas características, como o diâmetro, podem contribuir ou não para a permeabilidade. Caso os poros estejam interligados, eles facilitam o deslocamento de fluidos, aumentando a permeabilidade da argamassa. Por outro lado, se forem descontínuos, tornam-se ineficazes para o fluxo de fluidos, diminuindo a permeabilidade, mesmo em casos de alta porosidade.

A NBR 13281-2023 classifica as argamassas de revestimento em relação ao fator de resistência à difusão de vapor d'água (μ) em três classes: DV0, quando μ for maior que 30; e DV2, quando for menor que 20.

2.2.4.2.6 Absorção de água por capilaridade.

De acordo com Freitas (2010), a absorção de água representa a capacidade da argamassa de reter a água de amassamento contra a sucção da base ou contra a evaporação. Conforme Carasek (2010), o aumento da absorção de água pela argamassa pode ser obtido pelo aumento da superfície específica de seus constituintes ou pela inserção de aditivos que, por suas características, absorvem água ou impedem sua percolação através da massa sólida.

No estudo de Bollorino e Cincotto (1997), é demonstrado que a absorção de água pelas argamassas nas primeiras idades é muito elevada, ocorrendo saturação dos corpos de prova até 14 dias. A partir dos 28 dias, observa-se uma redução nítida da absorção por capilaridade, que tende a diminuir e estabilizar. Ressalta-se que, para as argamassas com cimento Portland CPV ARI, a redução da capilaridade já é notória a partir dos 14 dias.

Tristão (2005) destaca que o tipo de areia utilizado nas argamassas testadas exerce influência significativa na absorção de água por capilaridade. Além disso, segundo Silva (2006), para argamassas com a mesma relação agregado/aglomerante, o aumento da proporção cal/cimento eleva o coeficiente de capilaridade, devido à redução do raio dos capilares com o incremento do teor de material fino.

A ABNT NBR 15.259 (2005) normatiza o método para determinação da absorção de água e do coeficiente de capilaridade. Com base nesses resultados, a ABNT NBR 13.281 (2023) classifica as argamassas segundo o coeficiente de capilaridade, dividindo-as em sete categorias, sendo a categoria W1 destinada às argamassas com coeficientes superiores a $8,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ até W7 para os casos em que o coeficiente seja inferior a $1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$.

2.3 Empacotamento de Partículas e sua influência.

O estudo do empacotamento de partículas é de suma importância para a otimização dos insumos utilizados em compósitos cimentícios (Haddad *et al.*, 2020). Uma das formas de otimizar o consumo de cimento na produção de argamassas, por exemplo, ocorre por meio da busca por um melhor arranjo dos agregados finos aplicados, uma vez que quanto maior a densidade de empacotamento, menor o número de vazios no arranjo, demandando menos pasta

para preenchê-los (Powers, 1968; Brouwers e Radix, 2005; Estrada, 2016; Londro *et al.*, 2021;).

Segundo Pandolfelli *et al.* (2000), o estudo do empacotamento de partículas envolve a escolha apropriada da proporção e do tamanho das partículas, de modo que os espaços maiores sejam preenchidos por partículas menores, que, por sua vez, terão seus vazios preenchidos por partículas ainda menores, e assim sucessivamente. Esse tipo de estrutura pode ocorrer de forma aleatória, o que dificulta sua reprodução, ou de maneira ordenada, com sistematização e base matemática. Estruturas ordenadas tendem a apresentar densidade de empacotamento maior em comparação às aleatórias (Rivas, 2010).

A densidade de empacotamento pode ser definida como o volume do sólido em relação a um volume unitário (Chu *et al.*, 2021) e é influenciada por características como tamanho e morfologia das partículas (Oliveira *et al.*, 2000; Youd, 1972). Por exemplo, agregados com curvas de distribuição granulométrica contínua e faixa de tamanhos de grãos variada tendem a apresentar menos vazios. Entretanto, seu desempenho em densidade de empacotamento piora à medida que os grãos se afastam da forma esférica (Adesina *et al.*, 2024; Yu e Standish, 1993; Tristão, 1995 e 2005).

Para grãos com diâmetro inferior a 125 μm , outros fatores influenciam a densidade de empacotamento do conjunto. Esses grãos, devido à pequena massa e tamanho, além da grande área superficial, podem apresentar aglomeração causada pelas forças de coesão entre eles (Damineli *et al.*, 2017; Kwan e Fung, 2009). Nesses casos, as forças de Van der Waals, cargas eletrostáticas e ligações químicas são predominantes em detrimento dos efeitos de parede e soltura considerados nos modelos clássicos (Fennis, 2011; Parteli *et al.*, 2014).

Tristão (1995) demonstrou a grande influência da distribuição granulométrica dos agregados no comportamento da densidade de empacotamento do conjunto. Conforme observado, quanto maior o Coeficiente de Uniformidade (CU) — ou seja, quanto menos uniforme for o conjunto — maior será sua densidade de empacotamento e maior sua massa unitária (Carneiro, 1995; 1999).

Quanto às consequências da variação da densidade de empacotamento dos agregados no comportamento das argamassas, diversos autores estudaram sua influência (Tristão, 1995; Ferreira *et al.*, 2019). Dentre as conclusões, destaca-se que areias muito uniformes (coeficiente de uniformidade menor que cinco) resultam em argamassas com maior consumo de aglomerante, menor massa específica no estado fresco e maior absorção de água por capilaridade no estado endurecido. Em relação às características mecânicas, evidenciou-se a influência do Módulo de Finura (MF) das areias no desempenho das argamassas. Argamassas

produzidas com agregados cuja distribuição granulométrica apresenta menor módulo de finura possuem maior área superficial, o que gera aumento da demanda de água para manutenção da mesma trabalhabilidade. Esse aumento no consumo de água eleva o fator água/cimento (A/C) e, consequentemente, reduz as resistências à compressão e à tração das argamassas, além de diminuir seu módulo de elasticidade.

2.3.1 ASPECTOS TEÓRICOS DE MODELOS DE EMPACOTAMENTO

Vários estudos sobre a densidade de empacotamento de agregados foram realizados ao longo dos anos (De Larrard, 1999; Liu *et al.*, 2019; Roquier, 2017, 2019; Stovall *et al.*, 1986; Wong e Kwan, 2014; Yu *et al.*, 1996). No trabalho recente de Roquier (2024a), foram apresentados 50 modelos diferentes para determinação da densidade de empacotamento, classificados por áreas disciplinares e divididos em três diferentes concepções. O estudo também ressaltou que esses modelos vêm sendo modernizados conforme suas aplicações e o aprofundamento do conhecimento sobre suas limitações decorrentes do uso.

Já no estudo realizado por Liu *et al.* (2020), dez modelos teóricos consagrados foram classificados em duas categorias: modelos de empacotamento lineares e não lineares.

Modelos de distribuição do tamanho das partículas têm sido estudados desde o início do século XX com o objetivo de otimizar o empacotamento (Oliveira *et al.*, 2000). Um dos primeiros trabalhos relevantes sobre o tema foi apresentado por Füller e Thompson em 1907 (Füller e Thompson, 1907) a partir do qual a equação 1 foi desenvolvida, na qual o expoente “q” adotado foi de 0,5.

$$CPFT(\%) = 100 \cdot \left(\frac{D}{D_{max}} \right)^q \quad (1)$$

Onde:

CPFT = porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D;

D= Diâmetro da partícula

D_{max} = Diâmetro máximo da partícula.

Subsequentemente, outros modelos como de Andreasen e Andersen, que alteraram o valor de “q” para 0,37, foram desenvolvidos com o objetivo de produzir curvas granulométricas com distribuições ideais de partículas. No início da década de 1980, os modelos existentes foram aprimorados por Funk e Dinger (FUNK e DINGER, 1980), pois eles adicionaram um limite inferior ao conjunto de partículas. Assim, CPFT (%), a porcentagem volumétrica de

partículas menores que o diâmetro D^q , passou a ser determinado conforme equação 2, na qual “q” = 0.37.

$$CPFT(\%) = 100 \cdot \left(\frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \right) \quad (2)$$

Onde:

$CPFT$ = porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D

D^q = diâmetro das partículas

D_{max} = partícula com diâmetro menor

D_{max} = partícula com diâmetro maior

Além disso, vários estudos foram realizados considerando a variação do quociente “q” nas equações para obtenção do CPFT, com o objetivo de verificar sua influência no desempenho de compósitos cimentícios (Brouwers e Radix, 2005) e na densidade de empacotamento como um todo (Brouwers, 2006). É importante destacar que o expoente ideal “q” diminui à medida que aumenta o número de partículas finas, com diâmetros inferiores a 75 μm (Estrada, 2016).

Como mencionado anteriormente, diversos modelos para determinação da densidade de empacotamento foram desenvolvidos ao longo dos anos. Entre os modelos aplicáveis a conjuntos de grãos não esféricos, destaca-se o modelo não linear de De Lillard (De Lillard, 1999), aqui referido como CPM (Compressible Particle Model). Esse modelo se diferencia por considerar a combinação de n diferentes classes de tamanhos de partículas em um conjunto granular específico (grãos de múltiplos tamanhos) e por determinar a respectiva densidade de empacotamento com elevada confiabilidade (Baghaee Moghaddam e Baaj, 2018; Li *et al.*, 2021).

A aplicação do modelo CPM para agregados, conforme será adotada neste estudo, requer a determinação da densidade de empacotamento de cada uma das classes de grãos presentes no conjunto como parâmetro de entrada (Kwan e Fung, 2009), o que implica na necessidade de determinar a densidade aparente e a relação de vazios de cada classe granulométrica que compõe o conjunto.

Conforme demonstrado na literatura (Fennis e Walraven, 2012; Roquier, 2016; Sun *et al.*, 2018), o modelo CPM leva em consideração a interação entre partículas com base em seus respectivos diâmetros. A formulação considera tanto o efeito de afastamento — que ocorre quando o diâmetro de uma partícula é maior que o espaço vazio disponível no arranjo — quanto o efeito de parede — que acontece quando duas partículas de diâmetros muito distintos se encontram, de modo que a superfície de contato da partícula de maior diâmetro atua como um

plano para as partículas menores, resultando em um aumento dos vazios (Roquier, 2019). Esses efeitos decorrentes da interação entre partículas de diferentes diâmetros são representados pelas equações 3 e 4.

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1,02}} \quad (3)$$

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1,50} \quad (4)$$

Onde:

i = classe dominante.

j = demais classes com exceção da classe dominante i

Os coeficientes que representam a interação entre as partículas de n classes, a_{ij} e b_{ij} , serão utilizados para calcular o empacotamento analítico ou virtual para um conjunto de n classes. O empacotamento teórico é calculado usando as equações 5 e 6, conforme equação a seguir:

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

$$\gamma = \text{MIN}(\gamma_i) (1 \leq i \leq n) \quad (6)$$

Onde:

β_i = densidade de empacotamento de cada classe i .

γ_i = densidade de empacotamento virtual considerando a classe dominante i

y_j = percentual de cada classe j que está interagindo com a classe i

Uma vez determinados os valores de empacotamento virtual, o próximo passo será determinar a densidade de empacotamento real do conjunto (ϕ), levando em consideração a compactação dos grãos através do índice de compactação (K) mostrado na Tabela 8, conforme a equação 7:

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{y_i / \beta_i}{1 / \phi^{-1} / y_i} \quad (7)$$

Tabela 8- Valores do índice de compactação K por De Larrard.

Processo de Compactação	K
Lançamento simples	4.10
Apiloamento	4.50
Vibração	4.75
Demandas de água	6.70

Processo de Compactação	K
Vibração e compressão de 10kPa	9.00
Empacotamento virtual	∞

Diversos estudos têm avaliado a precisão dos modelos para determinação da densidade de empacotamento. Pesquisas anteriores analisaram arranjos com quatro classes de tamanho de grãos, aplicando o modelo CPM (De Larrard, 1999) e comparando os resultados com dados experimentais (Londero *et al.*, 2017).

Outros trabalhos também consideraram quatro classes granulométricas, comparando os resultados dos modelos de De Larrard (1999), Yu *et al.* (1996) e Kwan e Fung (2009). Já Muhadeer *et al.* (2023) avaliaram a precisão de três métodos distintos — De Larrard (1999), Wong e Kwan (2014) e Yu *et al.* (1996) — utilizando até três classes de tamanho de grãos. Um estudo recente de destaque comparou cinco modelos diferentes para grupos binários e ternários de partículas (Roquier, 2024a).

2.4 Micrcaracterização das argamassas

A caracterização microestrutural refere-se a um conjunto de parâmetros que identificam a argamassa a partir de uma análise detalhada de sua estrutura interna. Nessa análise, observam-se as características estruturais internas que influenciam as propriedades da argamassa, ou seja, como seus constituintes estão organizados em escala microscópica (GOMINHO, 2016).

A principal diferença entre a caracterização macroestrutural e a microestrutural está, especialmente, nas técnicas utilizadas e na escala de observação. As técnicas aplicadas no nível macroestrutural apresentam baixa ampliação, captando detalhes acima do milímetro (como registros fotográficos e uso de lupa), e fornecem informações gerais sobre as amostras (DIJK, 1980). Já os estudos de caracterização microestrutural demandam técnicas com ampliação elevada, que exigem equipamentos especializados para atingir escalas nanométricas e micrométricas (BRANDON e KAPLAN, 2008).

Esses dois níveis de observação são complementares, uma vez que a maioria dos fenômenos observados na escala macroestrutural tem sua origem no nível microestrutural.

2.4.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A análise de elementos macroscópicos de um material, muitas vezes realizada com o auxílio de equipamentos simples, como lupas, ou até mesmo a olho nu, permite identificar diversos aspectos descritivos. Contudo, para materiais que não apresentam uma diferenciação

de fases muito nítida — como os materiais cimentícios — ou para a análise de microcaracterísticas do material, torna-se necessário, no mínimo, o uso de um microscópio.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é amplamente utilizado para caracterização e análise da microestrutura de amostras em diversos campos do conhecimento. Além de gerar imagens com aspecto tridimensional e alta resolução, o MEV, quando acoplado a outras ferramentas, fornece informações sobre a composição química do material, permitindo a identificação da estrutura, morfologia, elementos químicos e topografia da superfície da amostra (DEDAVID *et al.*, 2007).

Os microscópios eletrônicos modernos possuem capacidade de ampliação de até cerca de 10^5 vezes, possibilitando o exame da microestrutura de materiais com resolução de até frações de 1 μm (MEHTA e MONTEIRO, 2013). O uso da técnica de análise de imagens em conjunto com o MEV tem se tornado, nos últimos anos, uma ferramenta importante para o estudo de materiais cimentícios, como argamassas e concretos (CORREIA *et al.*, 2014).

O princípio do MEV baseia-se nas interações físico-químicas entre um feixe de elétrons de alta energia e os átomos da amostra. Quando o feixe colide com a superfície, três principais tipos de interação ocorrem: emissão de elétrons secundários (secondary electrons – SE), elétrons retroespalhados (*backscattered electrons* – BSE) e raios X característicos, cada um associado a diferentes profundidades na amostra (LENG, 2013).

Os elétrons secundários, resultantes do espalhamento inelástico, possuem energia significativamente menor que os elétrons incidentes e são usados para gerar contraste topográfico da superfície da amostra. Já os elétrons retroespalhados, originados do espalhamento elástico, retêm cerca de 60–80% da energia do feixe original e são empregados para criar contraste baseado na composição elementar da amostra. Nas micrografias BSE, áreas escuras indicam fases compostas por elementos leves, como carbono, enquanto áreas claras correspondem a elementos mais pesados.

Além disso, a interação do feixe de elétrons com a amostra gera raios X característicos, que podem ser utilizados para identificação química dos elementos por meio da técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) (SCRIVENER, 2004).

As maiores limitações para o uso do MEV são seu alto custo de aquisição e a necessidade de preparação das amostras, incluindo o revestimento com material condutor em amostras não condutoras, como as argamassas.

No presente estudo, que trata da caracterização avançada de argamassas mistas, a aplicação do MEV permite, por exemplo, um estudo aprofundado dos aspectos físicos dos

agregados, da matriz cimentícia, dos poros existentes, bem como da interação entre matriz e agregados.

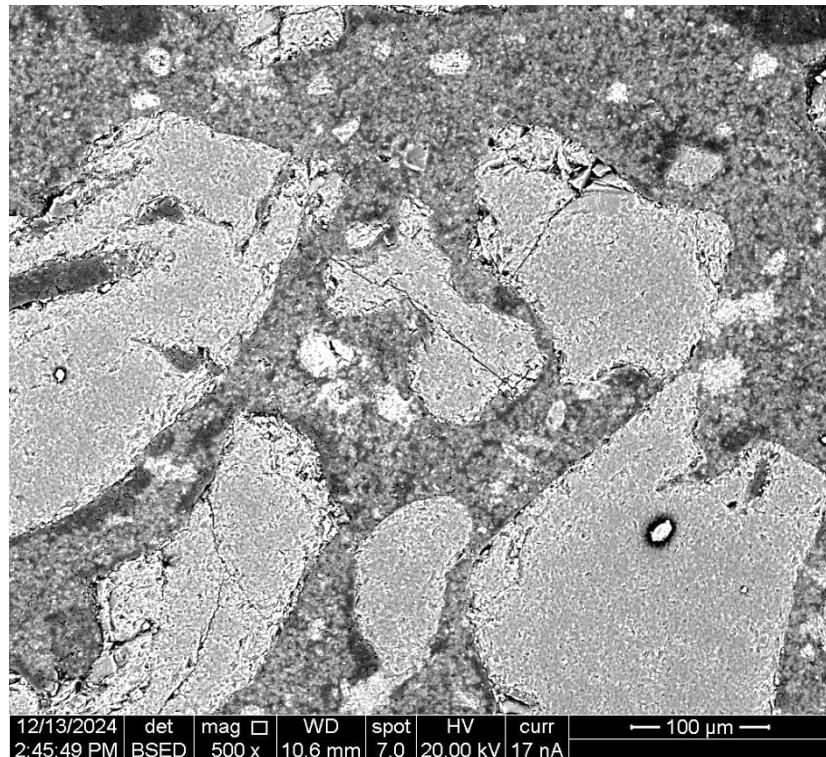


Figura 11- Exemplo de imagem extraída do MEV de uma das amostras pesquisadas com magnificação de 500x

2.4.2 ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS X (EDS)

A espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) é uma técnica analítica amplamente utilizada em ciências dos materiais, com o objetivo de caracterizar os elementos químicos presentes em amostras, realizando análises qualitativas e quantitativas (VIEIRA *et al.*, 2021). O sistema de EDS, quando acoplado ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), possibilita alta capacidade de ampliação e visualização da amostra, permitindo a análise detalhada de áreas específicas (FERRER-ERES *et al.*, 2010).

A técnica baseia-se na interação dos raios X com a matéria, especialmente no fenômeno de ionização dos átomos. Quando um feixe de elétrons (ou outro tipo de radiação de alta energia) incide sobre a amostra, elétrons das camadas internas dos átomos são ejetados, criando lacunas que são preenchidas por elétrons de camadas externas. Durante esse processo, a diferença de energia entre as camadas é liberada na forma de raios X característicos para cada elemento, possibilitando a identificação e quantificação dos elementos químicos presentes na amostra. Essa característica torna o uso do EDS bastante atraente, uma vez que permite, de

forma não destrutiva e por meio das imagens geradas pelo MEV, uma microcaracterização precisa do material analisado (LENG, 2013). Uma limitação dessa técnica é a eventual sobreposição de picos para elementos com energias similares, o que pode exigir análises complementares para melhor distinção.

O EDS permite uma avaliação química qualitativa e semiquantitativa, já que sua análise está restrita à superfície da amostra. Embora não forneça medições absolutamente precisas, possibilita uma estimativa da concentração dos elementos presentes. Para garantir resultados satisfatórios, a topografia da amostra é um fator essencial: quanto mais plana e polida for a superfície, melhores serão os resultados semiquantitativos obtidos (DUARTE *et al.*, 2003; DEDAVID *et al.*, 2007).

No presente estudo, a caracterização química por meio da imagem possibilita estimar a composição dos elementos que compõem as argamassas, especialmente para a quantificação aproximada dos materiais utilizados nas dosagens, como cimento, cal e areia.

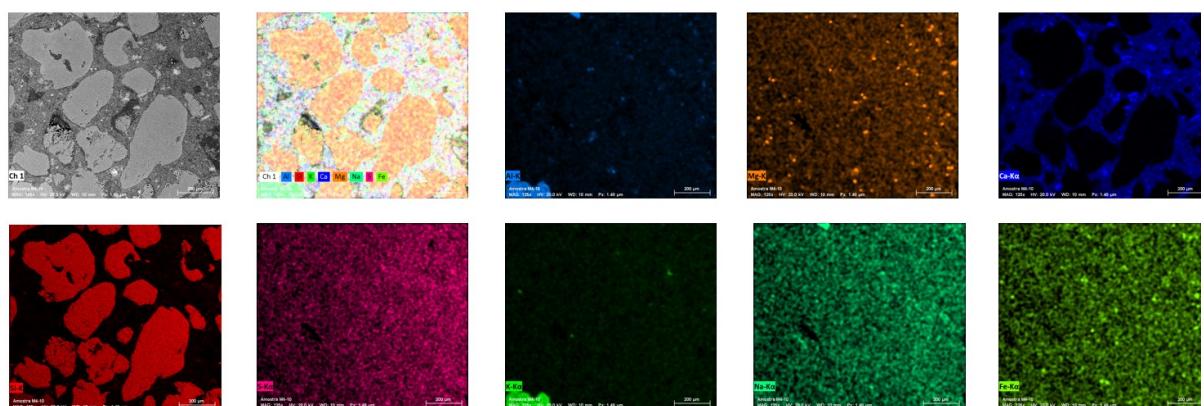


Figura 12- Exemplo de resultado de análise de uma das amostras pelo EDS

2.4.3 MULTI-ANALYSIS ZONNING EXPERT (MAZE)

O MAZE é um software desenvolvido em 2018 no âmbito do projeto P&D+I da CHESF, o qual tem sido utilizado como ferramenta complementar ao MEV em pesquisas realizadas no laboratório TECNOMAT-UFPB. Esse programa é um pacote tecnológico projetado para identificação de fases em rochas, análise automatizada de danos em concreto por meio de ensaios não destrutivos e predição da reação álcali-agregado utilizando técnicas de aprendizado de máquina.

A estrutura do MAZE é organizada em quatro módulos principais: base de dados de agregados, análise e segmentação de imagens, ensaios de microdureza e redes neurais.

Desenvolvido na linguagem Python, o software utiliza bibliotecas como PyQt5, NumPy, SciPy, Pandas, Matplotlib, Seaborn e OpenCV.

O software MAZE é capaz de classificar padrões das impressões geradas pelas amostras analisadas. Cada ponto da amostra produz uma impressão que reflete as variações resultantes da heterogeneidade da amostra, de sua formação mineralógica e do padrão de dureza (COSTA, 2019). Para isso, o MAZE processa as imagens pixel a pixel, ajustando os tons de cinza das micrografias e categorizando-os conforme o número de classes definido pelo operador. Recomenda-se que a quantidade de classes seja, no mínimo, igual ao número de fases físicas visíveis na imagem.

Além disso, o MAZE dispõe de um banco de dados contendo informações sobre agregados e fases cristalinas presentes em concretos, o que facilita a classificação das imagens microscópicas relacionadas a obras de engenharia civil, bem como a quantificação das fases visíveis. No presente trabalho, o MAZE auxiliará, juntamente com o Difratômetro de Raios X, na determinação dos quantitativos de elementos químicos, especialmente a presença de Si, Na, K e Al (indicativos de agregado) e de Ca (indicativo de matriz cimentícia).

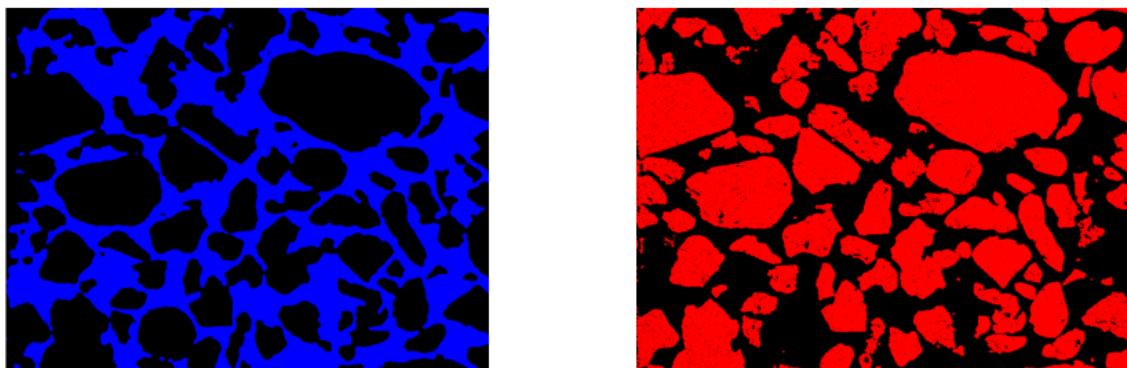


Figura 13- Exemplo de extração de resultado do MAZE para amostras da argamassa, considerando 02 fases.

2.4.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

O método de difração de raios-X (DRX) desempenha papel fundamental na análise mineralógica e microestrutural de materiais, fornecendo informações detalhadas sobre a natureza e os parâmetros do reticulado cristalino, além de aspectos como tamanho, perfeição e

orientação dos cristais (PADILHA e AMBROSIO FILHO, 1985). Segundo Dias (2021), a difração de raios-X resulta de uma dispersão coerente, na qual a variação no comprimento de onda é muito pequena, permitindo que a interação seja considerada elástica.

De acordo com DA SILVA (2020) e JENKINS e SNYDER (1996), nesse tipo de interação, o fóton altera apenas sua trajetória após a colisão, mantendo inalterados a fase e a energia em relação à radiação incidente.

A aplicação do DRX neste estudo está diretamente relacionada à identificação das fases cristalinas, auxiliando na interpretação das análises realizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Além disso, o método possibilita a quantificação dos elementos químicos presentes nas amostras, com ênfase nos constituintes dos agregados e da matriz cimentícia das argamassas analisadas.

Ainda segundo Padilha e Ambrosio Filho (1985), quando um feixe de raios-X incide sobre um átomo isolado, os elétrons do átomo são excitados e passam a vibrar com a mesma frequência do feixe incidente, fenômeno essencial para a identificação das estruturas cristalinas dos materiais estudados.

De acordo com Cullity e Stock (2001), a difração de raios-X ocorre quando a radiação incidente possui comprimento de onda comparável ao espaçamento entre os planos do reticulado cristalino.

Cada átomo funciona como um núcleo que espalha a radiação em todas as direções; contudo, a interferência construtiva acontece somente em direções específicas, quando os átomos estão regularmente espaçados em um reticulado cristalino e a radiação incidente apresenta comprimento de onda da ordem de grandeza desse espaçamento (PADILHA e AMBRÓSIO FILHO, 1985).

Como exemplo, Padilha e Ambrósio Filho (1985) elaboraram o esquema apresentado na Figura 14, no qual um feixe monocromático de raios-X, com comprimento de onda λ , incide sob um ângulo θ em um conjunto de planos cristalinos com espaçamento d .

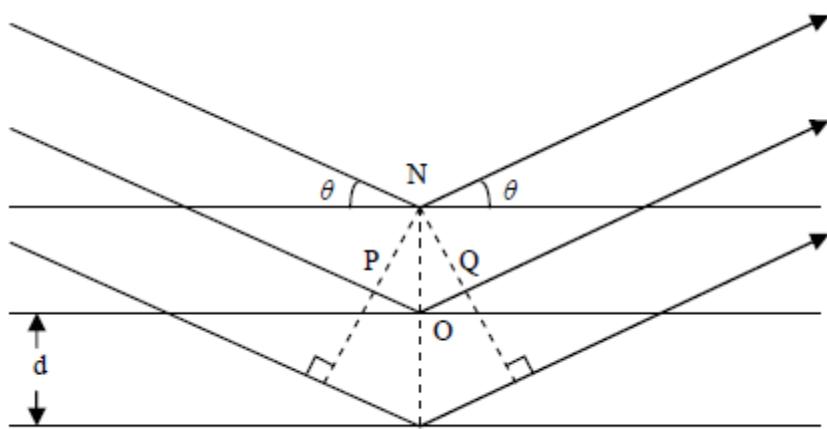


Figura 14- Difração de raios-X por um cristal.

Fonte: Padilha e Ambrósio Filho (1985)

Em um difratograma, a escala horizontal, que representa o ângulo de difração, fornece informações sobre o espaçamento entre os planos do arranjo cristalino, enquanto a escala vertical, correspondente à altura do pico, indica a intensidade do raio difratado. Quando uma amostra submetida à análise por raios X contém mais de um mineral, as intensidades dos picos característicos dos minerais individuais são proporcionais às suas quantidades relativas na amostra (MEHTA e MONTEIRO, 2013).

A aplicação dos ensaios de Difração de Raios X em compósitos cimentícios é amplamente conhecida e difundida na comunidade acadêmica, permitindo a quantificação das fases presentes tanto no cimento quanto nas argamassas e concretos (ALMEIDA, 2021). Embora o método mais comumente utilizado para estimar a composição potencial das fases do cimento Portland seja o Método de Bogue (BOGUE, 1929), essa abordagem pode resultar em valores significativamente diferentes dos reais (ALMEIDA, 2021).

Para aprimorar a quantificação das fases no cimento e seus compósitos, uma técnica moderna e precisa é a análise por difração de raios X associada ao refinamento de Rietveld (DE LA TORRE, 2003). Entre suas vantagens, destaca-se o fato de não requerer padrões ou curvas de calibração (MOLLER, 1995). Esse método constitui uma ferramenta eficaz para análises quantitativas estruturais, especialmente útil na caracterização de materiais cristalinos que não estão disponíveis em forma pura.

O método de Rietveld baseia-se na simulação do perfil difratométrico com base nas estruturas cristalinas, possibilitando a extração de um maior número de informações a partir do difratograma. Ele analisa o perfil completo do padrão difratométrico, utilizando as intensidades

individuais em cada passo angular, e permite o refinamento de estruturas cristalinas complexas, assim como a determinação quantitativa das fases com elevada precisão (WILL, 2006).

Na aplicação da difração de raios X em pastas de cimento imersas em argamassas ou concretos, podem ser observadas diversas fases; calcita (CaCO_3), Calcita magnesiana (MgCO_3) e Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) (MEHTA e MONTEIRO, 2013). A partir da quantificação dessas fases cristalinas, é possível estimar o teor de pasta cimentícia nas argamassas e concretos, que além da pasta são compostos majoritariamente por agregados. Ressalta-se que na pasta de cimento pode constar ainda o Hidrato de Silicato de Cálcio (C-S-H), porém esta possui estrutura amorfa e não será detectado no ensaio de DRX.

Em relação à aplicação da difração de raios X combinada com o método de Rietveld para análise de agregados, especialmente o agregado miúdo oriundo de jazidas naturais e leitos de rios, permite-se quantificar e qualificar as fases existentes, sendo que o quartzo, presente majoritariamente na forma de sílica, é um dos constituintes principais (ALMEIDA, 2021), porém pode-se encontrar ainda feldspato na forma de ortoclásio, microclínio, e albita. Em uma argamassa, por exemplo, a partir da quantificação da presença do quartzo e do feldspato, é possível determinar o teor de agregado no compósito.

No presente trabalho, a referida técnica auxiliará na quantificação dos elementos químicos, em especial sílica (Si), sódio (Na), potássio (K) e alumínio (Al) (fases presentes majoritariamente nos agregados), além de cálcio (Ca) presente na calcita, calcita magnesiana, portlandita, etringita (indicativo da matriz cimentícia), servindo como complemento à análise das imagens obtidas por MEV/EDS, assim como corroborando os quantitativos desses elementos obtidos por meio do software MAZE.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os aglomerantes utilizados na confecção das argamassas mistas foram cimento e cal. Em relação ao tipo de cimento, foi utilizado o Cimento Portland com filler tipo CPII F-32 (NBR 16697/2018) com massa específica de 2.96 g/cm^3 (NBR 16.605/2017) e massa unitária de 1.04 g/cm^3 (NBR 16.972/2021) e resistência à compressão de 32MPa a 28 dias (BETIOLI *et al.*, 2009; LOPES *et al.*, 2020). A cal hidratada utilizada foi a do tipo CH-I, com massa específica de $2,69 \text{ g/cm}^3$ massa unitária de $0,48 \text{ g/cm}^3$.

O agregado miúdo utilizado nos ensaios foi proveniente do leito do Rio Paraíba. A areia foi previamente lavada e, posteriormente, seca em estufa a 105°C por um período de 48 horas.

A determinação de sua massa unitária seguiu os procedimentos da norma NBR 16.972/2021, resultando em um valor de 1,54 g/cm³. Já a massa específica foi obtida por meio do ensaio com frasco de Chapman, conforme a NBR NM 52/2009, apresentando um valor de 2,62 g/cm³. Após essas etapas, a areia foi submetida à peneiração em peneiradora mecânica, utilizando peneiras com aberturas de malha entre 2,36 mm e 0,075 mm, sendo, então, classificada de acordo com o tamanho dos grãos (faixas granulométricas). As imagens dos grãos podem ser vistas na Figura 15.

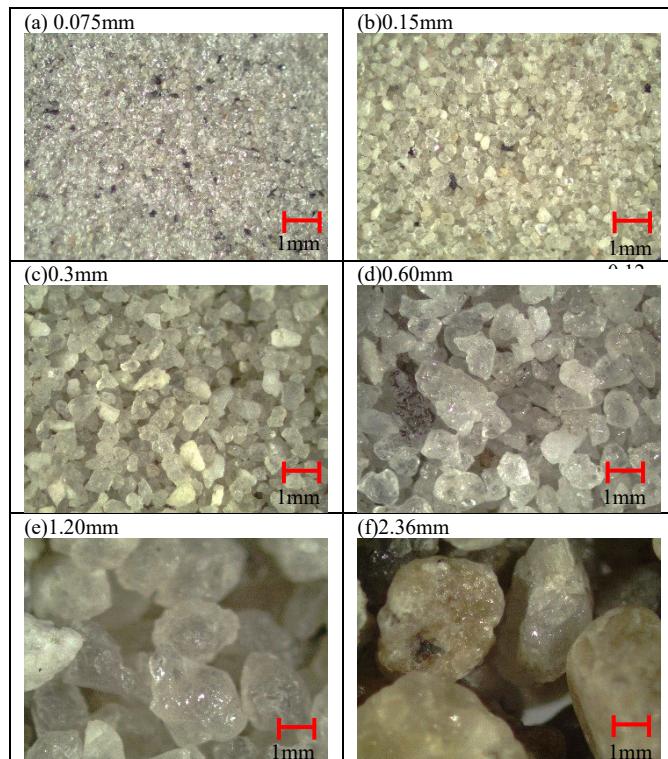


Figura 15- Imagem dos grãos com ampliação de 25x obtido usado equipamento Regula 4307: a)0.075mm, b) 0.15mm, c) 0.30mm, d) 0.6mm, e) 1.20mm, f) 2.36mm

A partir das massas unitárias por classe de grão obtidas, as densidades de empacotamento por classe de grão foram calculadas a partir da equação 8. Os valores de massa unitária e densidade de empacotamento para cada classe de grão podem ser vistos na Tabela 9.

$$\beta_i = 1 - \frac{y_a - \rho_i}{y_a} \quad (8)$$

Onde:

y_a = massa específica da areia

ρ_i = massa unitária dos grãos por classe i .

Tabela 9- Massa unitária e densidade de empacotamento de cada classe de grão.

Classes (Grãos)	4,75mm	2,36mm	1,2mm	0,6mm	0,3mm	0,15mm	0,075mm
Massa Unitária , ρ (kg/m ³)	1,390	1,387	1,373	1,351	1,320	1,284	1,276
Densidade de empacotamento, β_i	0,531	0,530	0,524	0,516	0,504	0,490	0,487

Conforme apresentado na Tabela 9, observa-se que o aumento do diâmetro dos grãos resulta em maiores valores de massa unitária e densidade de empacotamento. Esse comportamento já era esperado, como destacado em estudos anteriores (FENNIS, 2011; WU et al., 2022), uma vez que, à medida que as partículas se tornam mais finas, a interação entre elas se intensifica e o efeito da gravidade torna-se menos significativo. Essa combinação favorece a formação de aglomerados, aumentando o volume de vazios na estrutura do material.

Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados no laboratório da Unipê – Centro Universitário – Campus João Pessoa, do Setor Técnico Científico da Superintendência da Polícia Federal no Estado da Paraíba e no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas da Universidade Federal da Paraíba.

3.2 Metodologia

3.2.1 ELABORAÇÃO DE TRAÇOS TEÓRICOS DIVERSOS DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO MANTENDO-SE A PROPORÇÃO 1:2:8 (CIMENTO, CAL E AREIA).

Os preços de referência utilizados em obras contratadas por entes públicos no Brasil são obtidos a partir do catálogo de serviços do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI). Uma das características dessas composições de serviços é que os preços são definidos de forma determinística (Signor, 2016), especialmente quando se leva em conta as propriedades dos insumos considerados na composição. No caso específico da argamassa mista de revestimento, o SINAPI estabelece uma composição padrão envolvendo areia, cal e cimento. No entanto, na prática, as obras realizadas em diferentes regiões do país utilizam insumos com características bastante variáveis.

Visando trazer maior clareza sobre a influência dessa variabilidade—principalmente no caso da areia, cuja qualidade não é normatizada como os aglomerantes—este trabalho propõe uma metodologia capaz de contemplar a diversidade de materiais efetivamente utilizados nas argamassas de revestimento de obras públicas.

Com esse objetivo, foi definido um intervalo de variação de 7% para a massa unitária do agregado, 2% para o cimento e 3% para a cal, permitindo avaliar os efeitos dessas oscilações

no comportamento das argamassas com traço volumétrico de 1 (cimento):2 (cal):8 (areia). Tal abordagem justifica-se pelo fato de que a massa unitária influencia diretamente a ocupação volumétrica dos materiais, afetando, consequentemente, a quantidade de cada insumo utilizado na formulação da argamassa.

Neste estudo, para a obtenção dos quantitativos de insumos correspondentes ao traço 1:2:8, partiu-se da análise do empacotamento granular, considerado aqui como um problema de otimização, cujo objetivo é selecionar a proporção e o tamanho adequado das partículas para maximizar o preenchimento dos vazios entre os grãos maiores com partículas menores. Esse processo impacta diretamente o desempenho final da argamassa de revestimento (OLIVEIRA *et al.*, 2000; MACIEL *et al.*, 2023).

Assim, a definição das composições dos traços 1:2:8 baseou-se nas ocupações volumétricas dos materiais em um cubo hipotético de argamassa com volume de 1 m³, sendo essas ocupações ajustadas conforme as diferentes características físicas dos materiais disponíveis.

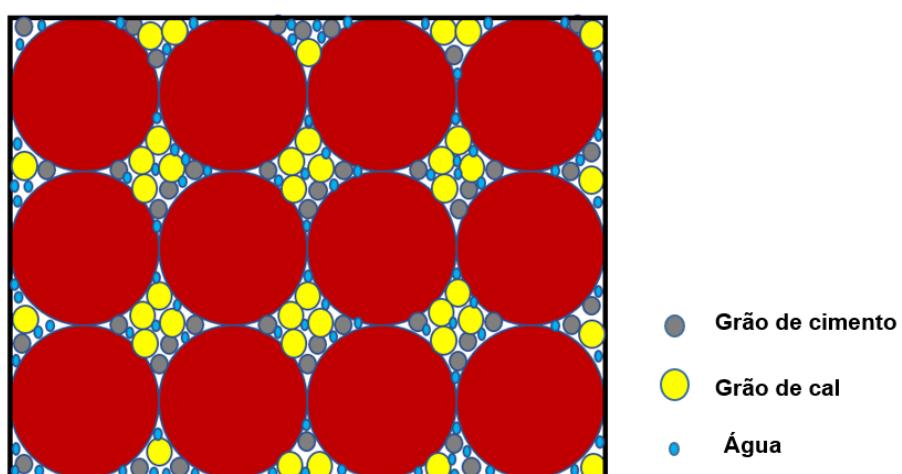


Figura 16- Desenho esquemático da ocupação dos materiais aplicado em uma argamassa

Conforme discutido anteriormente neste trabalho, existem diversas abordagens para a determinação da densidade de empacotamento de sólidos. Entretanto, estudos indicam que uma forma eficiente e prática de estimar a ocupação real dos sólidos em relação ao volume total é por meio do cálculo baseado na massa unitária (CARASEK *et al.*, 2016). Essa metodologia consiste em dividir a massa unitária do material (também conhecida como massa específica aparente) pela sua massa específica real.

Embora fatores como o formato das partículas e o grau de esfericidade possam influenciar significativamente a densidade de empacotamento, essa abordagem experimental tem se mostrado bastante eficaz para a caracterização do empacotamento de sólidos.

Para a determinação dos valores de densidade de empacotamento de cada um dos insumos utilizados na formulação das argamassas de revestimento, foram adotadas as seguintes etapas:

- a) Foi realizada pesquisa em diversos artigos, dissertações e teses, obtendo-se valores distintos de massa específica aparente e massa específica real de cimento, cal e areia, com diferentes tipos de materiais para representar sua heterogeneidade. Destes valores foram extraídas as médias, de forma que para cimento, cal e areia foram encontradas para as massas unitárias (massa específica aparente) os valores de 1,136 g/cm³, 0,644 g/cm³ e 1,469 g/cm³, respectivamente, enquanto para massa específica real foram encontradas as medias de 3,039 g/cm³, 2,398 g/cm³ e 2,628 g/cm³ respectivamente.
- b) Com base nos valores médios e nos desvios-padrão obtidos para as massas específicas aparentes, aplicou-se o método de Monte Carlo (CARVALHO, 2017) para a geração de 100 valores simulados de massa específica aparente (massa unitária) para os materiais analisados: areia, cal e cimento.

O método de Monte Carlo fundamenta-se na geração de dados estocásticos a partir de distribuições de probabilidade, as quais alimentam o modelo responsável por representar o processo físico associado à obtenção das respostas estocásticas (LAQUINI et al., 2009). A aplicação dessa abordagem probabilística garante a aleatoriedade necessária para representar adequadamente a variabilidade dos materiais empregados em obras públicas nas diferentes regiões do país. Dessa forma, é possível realizar uma análise mais realista da heterogeneidade inerente aos insumos utilizados na produção de argamassas.

- c) A partir dos valores obtidos pelo método Monte Carlo, foi calculada a ocupação dos materiais, aplicando-se a razão entre da massa específica aparente e massa específica real dos insumos, da seguinte forma:

Para cada uma das 100 massas unirárias de areia geradas de maneira estocástica, dividiu-se as mesmas pela média aritmética das massas específicas reais obtidas pela literatura, perfazendo a ocupação real da areia em um volume de 1m³.

$$\beta_{areia}^i = \frac{\rho_{areia}^i}{\bar{\gamma}_{areia}} \quad (9)$$

Onde:

i = representa o material;

β_{areia}^i = representa a ocupação de cada areia;

ρ_{areia}^i = representa cada massa específica aparente (massa unitária) da areia;

$\bar{\gamma}_{areia}$ = valor médio da massa específica real da areia.

Para determinar a ocupação de cimento no vazio restante ($1-\beta_{areia}^i$) têm-se duas etapas. A primeira seria determinar o quanto o cimento ocuparia em $1m^3$ de espaço, dividindo-se as 100 massas específicas aparentes de cimento, geradas pelo Método Monte Carlo, pela média aritmética das massas específicas reais do cimento obtidas pela literatura, obtendo-se o fator de ocupação dele. Posteriormente, considerando o traço estudado (uma proporção de cimento), determina-se o quanto o cimento realmente ocuparia em $1m^3$ de argamassa

$$Fator_{cim}^i = \frac{\rho_{cimento}^i}{\bar{\gamma}_{cim}} \quad (10)$$

$$\beta_c^i = \frac{(1-\beta_{areia}^i)}{3} \times Fator_{cim}^i \quad (11)$$

Onde:

i = representa um material;

$Fator_{cim}^i$ = fator de ocupação do cimento;

$\rho_{cimento}^i$ = representa cada massa específica aparente (massa unitária) do cimento;

$\bar{\gamma}_{cim}$ = valor médio da massa específica real do cimento.

β_c^i = representa ocupação de cada cimento i .

A determinação da ocupação da cal nos vazios remanescentes ocorre em duas etapas principais. Na primeira etapa, calcula-se o volume que cada tipo de cal ocuparia em $1 m^3$ de espaço disponível, dividindo-se as massas específicas aparentes obtidas experimentalmente pela média aritmética das massas específicas reais reportadas na literatura. Esse procedimento resulta no fator de ocupação da cal.

Na segunda etapa, considerando-se o traço de estudo, que adota uma proporção de 2 partes de cal, determina-se o volume efetivamente ocupado pela cal em $1 m^3$ de argamassa.

$$Fator_{cal}^i = \frac{\rho_{cal}^i}{\bar{\gamma}_{cal}} \quad (12)$$

$$\beta_{cal}^i = \frac{2 \times (1 - \beta_{areia}^i)}{3} \times Fator_{cal}^i \quad (13)$$

Onde:

i = representa um material;

$Fator_{cal}^i$ = fator de ocupação da cal;

ρ_{cal}^i = representa cada massa específica aparente (massa unitária) da cal;

$\bar{\gamma}_{cal}$ = valor médio da massa específica real da cal.

β_{cal}^i = representa ocupação de cada cal i .

Com base nas informações anteriormente descritas, além da ocupação dos agregados e aglomerantes, é necessário considerar também a ocupação da água e dos poros presentes na argamassa. Para determinar o volume ocupado pela água, foi realizada uma pesquisa na literatura sobre diferentes relações água/cimento e água/aglomerante utilizadas em argamassas de revestimento. Especial atenção foi dada àquelas formuladas com o traço 1:2:8, correspondente ao estudo em questão.

A partir dessa análise, obteve-se um valor médio de relação água/aglomerante igual a 0,846, o qual se mostrou compatível com as médias encontradas nas metodologias consagradas na literatura (CARNEIRO e CINCOTTO, 1999; LARA et al., 1995; SELMO, 1989; SELMO e HELENE, 1991).

A ocupação no m^3 teórico referente a água foi calculada em função deste fator médio e das ocupações de aglomerantes ($\beta_{cim+cal}^i$).

$$\beta_{água}^i = \overline{a/aglo} \times \beta_{cim+cal}^i \quad (14)$$

Onde:

i = representa um traço 1:2:8;

$\beta_{água}^i$ = ocupação de água de cada traço i .

$\overline{a/aglo}$ = representa o fator água aglomerante médio encontrado com base na literatura

V- Finalmente, para obtenção do índice de ocupação dos poros em $1m^3$ de argamassa, subtrai-se do todo os valores de ocupação de agregado, aglomerantes e água conforme a seguir:

$$\beta_{poros}^i = 1 - (\beta_{areia}^i + \beta_c^i + \beta_{cal}^i + \beta_{água}^i) \quad (15)$$

Onde:

i = representa um traço 1:2:8

β_{poros}^i = ocupação de água de cada traço

Baseado nos resultados obtidos por meios das fórmulas supramencionadas, se obteve 100 traços 1:2:8 (cimento, cal e areia), cujas propriedades e custos foram estudados e serão demonstrados no próximo item. O resultado gráfico esquemático da formatação dos índices de ocupação de cada traço pode ser visualizado na Figura 17.

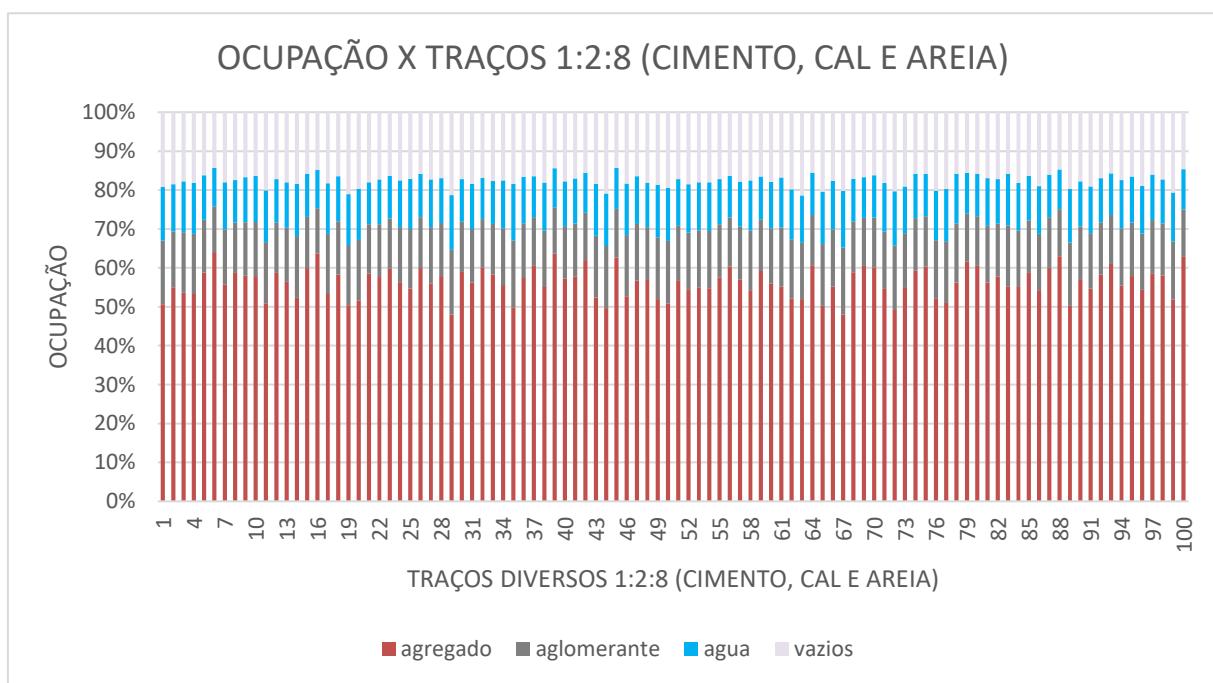


Figura 17- Gráfico ilustrativos das ocupações dos traços teóricos encontrados

3.2.2 DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES E CUSTOS DAS ARGAMASSAS

De posse dos 100 diferentes traços 1:2:8 (cimento, cal e areia) gerados para a produção de argamassas de revestimento, o estudo avançou para a determinação de algumas propriedades teóricas dessas formulações, entre as quais se destacam: porosidade, resistência à compressão e massa específica.

Além disso, foi realizada uma análise do custo total dos insumos (aglomerantes e agregado), com o objetivo de comparar os resultados obtidos com o valor de referência oficial estabelecido pela legislação vigente, representado pelo Sistema Nacional de Pesquisa de Custos

e Índices da Construção Civil (SINAPI), tendo como base os custos unitários correspondentes ao mês de abril de 2022.

Para a determinação da porosidade de cada traço, foi aplicada a metodologia descrita no subitem 3.2 deste documento, com destaque para a utilização da equação 15, por meio da qual foram obtidos os respectivos valores de β_{poros}^i .

Já Para determinação da Massa Específica da Argamassa, utilizou-se os valores de ocupação para cada traço de cimento, cal, areia e água, bem como suas respectivas massas específicas médias extraídas da literatura, conforme demonstrado a seguir.

$$\rho_{arg.}^i = \beta_{areia}^i \times \bar{\gamma}_{areia} + O_{cim}^i \times \bar{\gamma}_{cim} + \beta_{cal}^i \times \bar{\gamma}_{cal} + \beta_{água}^i \times \gamma_{água} \quad (16)$$

Onde:

i = representa um traço 1:2:8

$\rho_{arg.}^i$ = Massa específica da argamassa em kg/m³

A estimativa da resistência à compressão das argamassas formuladas foi realizada com base na aplicação da Lei de Abrams (SEAR *et al.*, 1996). Essa lei estabelece uma correlação entre a resistência mecânica e o fator água/cimento, considerando também variáveis derivadas de amostras experimentais que influenciam diretamente o desempenho à compressão.

Para o desenvolvimento do modelo de previsão utilizado neste estudo, foi empregada uma amostra composta por 30 diferentes traços de argamassa, a partir da qual foram determinados os parâmetros necessários para a aplicação da referida lei.

$$Fc^i = \frac{K_1}{(K_2)^{a/c^i}} \quad (17)$$

Onde:

i = representa um traço 1:2:8

Fc^i = Resistência a compressão do traço i .

K_1 = fator encontrado = 3,44;

K_2 = fator encontrado = 1,22;

a/c^i = fator água/cimento do traço i .

O gráfico que representa a correlação entre fator A/C e Resistência a compressão Fc^i encontra-se a seguir e representa, como previsto, ao comportamento da Lei de Abrams.

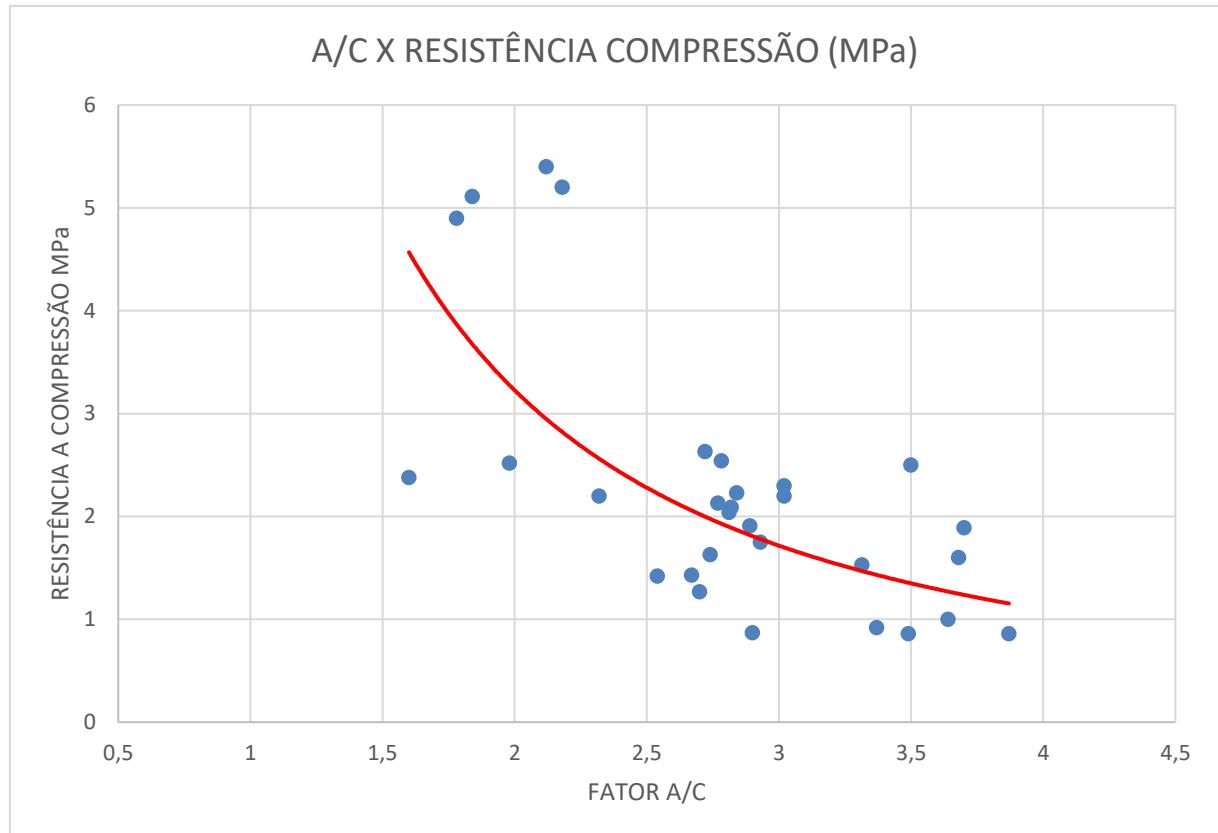


Figura 18- Correlação entre fator A/C e Resistência à Compressão de argamassas obtidas na literatura

Já em relação à obtenção dos custos, conforme já mencionado, se utilizou os preços dos insumos cimento, cal e areia dispostos no SINAPI para o mês de abril de 2022, considerando a composição 87292 do banco de dados que se trata de “*Argamassa Traço 1:2:8 (em volume de*

cimento, cal e areia média úmida) para emboço/massa única/assentamento de alvenaria de vedação, preparo mecânico”, conforme figura abaixo.

MACROCLASSE . CLASSE . GRUPO	CÓDIGOS	DESCRICAÇÃO	UNIDADE	COEFICIENTE
01 . SEDI . ARGA . 014/01	87292	ARGAMASSA TRAÇO 1:2:8 (EM VOLUME DE CIMENTO, CAL E AREIA MÉDIA ÚMIDA) PARA EMBOÇO/MASSA ÚNICA/ASSENTAMENTO DE ALVENARIA DE VEDAÇÃO, PREPARO MECÂNICO COM BETONEIRA 400 L. AF_08/2019	M3	
INSUMO	370	AREIA MÉDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	M3	1,1600000
INSUMO	1106	CAL HIDRATADA CH-I PARA ARGAMASSAS	KG	174,1000000
INSUMO	1379	CIMENTO PORTLAND COMPOSTO CP II-32	KG	195,8600000
COMPOSICAO	88377	OPERADOR DE BETONEIRA ESTACIONÁRIA/MISTURADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	4,5000000
COMPOSICAO	88830	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - CHP DIURNO. AF_10/2014	CHP	1,0500000
COMPOSICAO	88831	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - CHI DIURNO. AF_10/2014	CHI	3,4500000

Figura 19- Trecho da composição 87292 extraída do caderno de composições do SINAPI

Fonte: GEPAD (2019)

3.2.3 METODOLOGIA DE ESTUDO DOS AGREGADOS

A partir da análise de sessenta e oito curvas granulométricas de areias utilizadas em argamassas, extraídas da literatura, foram identificadas e classificadas três categorias principais: areias mais finas (F), médias (M) e mais grossas (G). Para cada uma dessas categorias, foram elaboradas curvas granulométricas contendo 4, 5, 6 e 7 classes de grãos, com a normalização das porcentagens de cada classe sempre que necessário, garantindo que a soma total dos grãos correspondesse a 100%. Essa normalização é fundamental para a correta aplicação do modelo CPM.

Além disso, para os modelos teóricos de Füller e Thompson (FT) e Funk e Dinger (FD), foram determinadas distribuições granulométricas equivalentes às mesmas quantidades de classes (4, 5, 6 e 7), abrangendo uma faixa granulométrica entre 0,075 mm e 4,75 mm. Essas distribuições, identificadas neste estudo como FT e FD, foram analisadas com o propósito de comparar seus resultados com as demais curvas granulométricas desenvolvidas. As distribuições granulométricas das areias estão detalhadas na Tabela 10.

Com base nesses dados, foi elaborado um gráfico relacionando a distribuição percentual dos grãos por diâmetro para cada conjunto, organizado conforme o número de classes, conforme apresentado nas Figuras 20 (a), (c), (e) e (g), bem como suas respectivas curvas granulométricas nas Figuras 20 (b), (d), (f) e (h). Destaca-se que as curvas granulométricas ilustradas nessas figuras foram complementadas pelas curvas de referência extraídas da norma NBR 7211 (ABNT, 2022), especialmente aquelas que representam a zona ótima dos limites inferior e superior, bem como a curva média.

Tabela 10- Distribuição granulométrica dos conjuntos granulares com número de classes de grãos variando entre 4 e 7

Conjuntos	Fração (%)						
	4.75mm	2.36mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	0.075mm
M4			19.74	23.47	32.98	23.81	
F4			0.00	2.00	18.00	80.00	
G4			32.05	55.13	7.56	5.26	
FT4			39.05	27.61	19.52	13.82	
FD4			35.26	27.29	21.11	16.34	
M5			18.12	21.54	30.28	21.86	8.19
F5			0.00	1.33	12.00	53.33	33.33
G5			32.05	55.13	7.56	5.26	0.00
FT5			35.57	25.16	17.78	12.58	8.90
FD5			31.38	23.76	18.91	14.63	11.32
M6		2.67	17.64	20.97	29.47	21.27	7.97
F6		0.00	0.00	1.33	12.00	53.33	33.33
G6		22.00	25.00	43.00	5.90	4.10	0.00
FT6		33.71	23.58	16.68	11.79	8.34	5.89
FD6		29.06	22.26	16.85	13.41	10.37	8.03
M7	0.17	2.67	17.47	20.97	29.47	21.27	7.97
F7	0.00	0.00	0.00	1.33	21.27	53.33	33.33
G7	3.00	19.00	25.00	43.00	5.90	4.10	0.00
FT7	32.12	22.88	16.00	11.32	8.00	5.66	4.00
FD7	27.14	21.17	16.21	12.28	9.77	7.55	5.85

Com base nas curvas granulométricas dos vinte conjuntos granulares analisados, o próximo passo da pesquisa foi o cálculo do coeficiente de uniformidade dos agregados. Em seguida, aplicou-se o Método CPM (*Compressible Particle Method*) para determinar as densidades de empacotamento virtual e real desses arranjos. Após essa etapa, foi estabelecida uma correlação entre os coeficientes de uniformidade das curvas granulométricas e suas respectivas densidades de empacotamento, virtuais e reais. Posteriormente, o autor propôs um modelo aproximado para o cálculo da densidade de empacotamento, considerando os valores virtuais obtidos pelo método CPM e as propriedades físicas da areia matriz dos arranjos.

Dentre as curvas granulométricas apresentadas na Tabela 10, foram selecionadas as curvas M4, F4, G4, FD4, M5, F5, G5, FD5 e FD6 para reprodução experimental em laboratório. O objetivo foi comparar os resultados reais e virtuais da densidade de empacotamento, bem como confrontar os valores obtidos pela formulação proposta com os resultados experimentais. Para essas nove composições, foram realizados testes para determinação da massa unitária e da densidade específica, permitindo o cálculo das respectivas densidades de empacotamento experimental, conforme a equação 8.

Por fim, realizou-se uma comparação entre os valores de densidade de empacotamento virtuais, reais e calculados pela formulação proposta, confrontando-os com os dados

experimentais. Essa análise possibilitou avaliar as distorções das metodologias aplicadas, com ênfase na comparação dos erros em função do módulo de finura dos arranjos.

3.2.4 METODOLOGIA DE PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

A partir dos nove arranjos de agregados elaborados (M4, F4, G4, FD4, M5, F5, G5, FD5 e FD6), foram selecionadas as areias F4, M4, G4 e M5, com as quais foram confeccionadas argamassas mistas de cimento, cal e areia na proporção volumétrica 1:2:8 — um traço amplamente utilizado em revestimento de alvenarias. A escolha das areias F4, G4 e M4 baseou-se na norma NBR 7211 (ABNT, 2022), que regula os agregados para concreto, enquanto a areia M5 foi selecionada por apresentar, em sua curva granulométrica, grãos que passam pela peneira de 150 μm e ficam retidos na de 75 μm , característica não contemplada pela granulometria recomendada pela norma. Além disso, foi desenvolvido um traço 1:2:10 para o arranjo da areia M4, com o intuito de comparar as características das argamassas com maior proporção de areia em relação ao traço 1:2:8 (cimento: cal: areia).

A mistura foi realizada em misturadora de eixo vertical, onde inicialmente foram adicionados os materiais secos, seguidos da quantidade de água necessária para alcançar um índice de consistência de 260 mm, medido pela mesa de espalhamento conforme NBR 13276 (2005). Esse índice foi adotado por ser considerado ideal para a trabalhabilidade e aplicação da argamassa (FERREIRA *et al.*, 2019, 2023; LARA *et al.*, 1995; SANTOS *et al.*, 2018). Dessa forma, cada uma das cinco argamassas produzidas, que contém a mesma quantidade de aglomerantes, apresentou variação na quantidade de água necessária para manter o índice de consistência, em função da areia utilizada (F4, M4, G4 ou M5) e do volume de areia empregado (8 ou 10).

Os procedimentos seguiram as normas brasileiras aplicáveis. A tabela a seguir apresenta as proporções dos materiais utilizados para cada argamassa neste estudo.

Tabela 11- Dosagem das argamassas confeccionadas.

Argamassas	Composição (g)				A/Aglo
	Cimento Portland	Cal	Agregado miúdo	Água	
F4	204	188	2.131	600	1,53
M4	204	188	2.395	465	1,18
G4	204	188	2.218	418	1,06
M5	204	188	2.518	478	1,21
M4-10	204	3188	2.993	544	1,38

A tabela acima demonstra que, para atingir o índice de consistência de 260 mm na mesa de espalhamento, as argamassas contendo areias com menor módulo de finura apresentaram maior consumo de água. Esse comportamento era esperado, pois partículas mais finas possuem uma área superficial maior em comparação às partículas mais grossas, exigindo, portanto, maior quantidade de água para garantir a trabalhabilidade desejada.

Além disso, ao analisar argamassas produzidas com o mesmo tipo de agregado, porém com variação no volume de areia de 8 para 10 partes, verificou-se que a necessidade de água aumentou proporcionalmente ao volume de agregado utilizado. No caso da argamassa M4-10, que contém um maior volume de areia, foi necessário um teor de água mais elevado para alcançar o mesmo índice de consistência.

Para a caracterização das argamassas no estado endurecido, foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, e prismáticos com dimensões de 40 mm × 40 mm × 160 mm. A moldagem e a compactação dos corpos de prova foram realizadas conforme as diretrizes das normas brasileiras aplicáveis. Durante as primeiras 48 horas, as superfícies dos corpos de prova foram protegidas com placas de vidro para evitar a evaporação da água de mistura. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados e mantidos em exposição ao ar, em temperatura ambiente controlada ($25 \pm 5^\circ\text{C}$), por 28 dias, até a realização dos ensaios no estado endurecido.



Figura 20- Corpos de prova após 28 dias.

3.3 Ensaios realizado nas argamassas

3.3.1 ENSAIOS DE MACROCARACTERIZAÇÃO

Para as 05 argamassas confeccionadas neste trabalho, foram realizados, para fins de macrocaracterização, ensaios no estado fresco e no estado endurecido, todos estes realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas da UFPB, no Laboratório do Setor Técnico Científico da Polícia Federal do Estado da Paraíba e do Unipê, Centro Universitário de João Pessoa. A seguir na Tabela 12 consta a relação dos exames realizados no estado fresco e endurecido, bem como suas respectivas normas. Além disso, na sequência será realizada uma breve descrição dos ensaios realizados.

Tabela 12- Relação de ensaios de macrocaracterização das argamassas produzidas.

Ensaios no Estado Fresco	
Ensaios	Norma ABNT
Consistência (Flow Table)	13276-2016
Densidade de massa e teor de ar incorporado	13278-2005
Ensaios no Estado Endurecido	
Ensaios	Norma ABNT
Resistência Compressão axial	13279-2005
Resistência à tração na flexão	13279-2005
Módulo de elasticidade dinâmico pelo ultrassom	8522-2021
Densidade de massa no estado endurecido	13280-2005
Absorção de água por capilaridade	9779-2012

3.3.1.1 Ensaio de Consistência

O ensaio de consistência, realizado por meio da mesa de espalhamento (*Flow Table*), é utilizado para avaliar a trabalhabilidade das argamassas. No procedimento, a argamassa é colocada sobre a mesa e submetida a 30 golpes em um intervalo de 30 segundos, gerando oscilações que promovem sua dispersão. Em seguida, mede-se o diâmetro do espalhamento em duas direções perpendiculares. O valor final da consistência corresponde à média desses dois diâmetros, refletindo a fluidez e a capacidade de deformação da argamassa.



Figura 21- Medida de espalhamento da argamassa na mesa de consistência após aplicação dos golpes

3.3.1.2 Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado

O ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado é realizado conforme as normas técnicas vigentes. Inicialmente, pesa-se o molde vazio. Em seguida, a argamassa é introduzida no molde, sendo compactada em camadas conforme as exigências normativas, até o preenchimento completo do cilindro. Após esse procedimento, pesa-se o molde contendo a argamassa. Com a massa e o volume da amostra conhecidos, calcula-se sua densidade de massa.

Para determinar o teor de ar incorporado, calcula-se a densidade de massa teórica da argamassa, considerando a massa de cada componente e suas respectivas massas específicas. O teor de ar incorporado é obtido a partir da razão entre a densidade de massa medida da argamassa e sua densidade teórica, refletindo a quantidade de ar aprisionado na mistura.



Figura 22- Imagem de um dos corpos de prova com argamassa utilizado nos ensaios.

3.3.1.3 Resistência a compressão axial.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 28 dias de idade em três corpos de prova. O teste foi conduzido em uma prensa vertical, que aplicou força até a ruptura das amostras. A resistência à compressão foi determinada a partir da relação entre a força máxima aplicada no momento da ruptura e a área da seção transversal do corpo de prova, permitindo o cálculo da tensão de resistência do material.



Figura 23- Corpo de prova na prensa vertical para ensaio de compressão axial.

3.3.1.4 Resistência a tração na flexão.

Para aferição das tensões de tração a que são submetidas as argamassas (f_t), realiza-se o ensaio de tração na flexão, que no caso em questão, foi utilizada uma prensa da SHIMADZU AG-X, 10KN, com dois pontos de apoio. O valor obtido por meio deste equipamento já é a própria tensão de tração por flexão das amostras.



Figura 24- Equipamento utilizado para ensaio a tração por flexão.

3.3.1.5 Módulo de Elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi determinado pelo método ultrassônico de acordo com a norma BS-1881 Part 203, por meio do equipamento da PROCEQ com frequência de 54KHz. Através da velocidade com que a onda ultrassônica percorre o corpo de prova no sentido longitudinal, considerando coeficiente de Poisson de 0,2 e densidade da argamassa no estado endurecido é possível obter o módulo de elasticidade dinâmico da amostra.

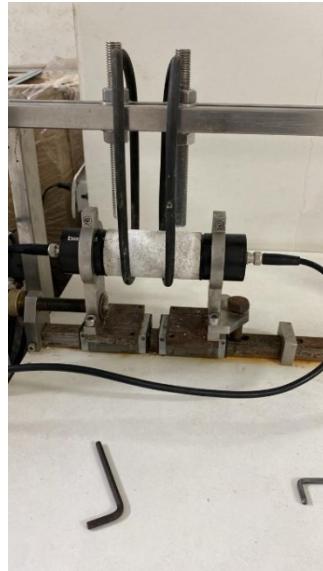


Figura 25- Imagem do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo método ultrassônico

3.3.1.6 Densidade de massa no estado endurecido.

De acordo com a norma vigente (NBR 13280-2005) a densidade de massa no estado endurecido da argamassa é definida pela fração entre a massa do corpo de prova e seu volume.



Figura 26- Determinação da massa do corpo de prova para determinação da densidade de massa.

3.3.1.7 Ensaio de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.

O ensaio de absorção por capilaridade inicia-se com a pesagem dos corpos de prova aos 28 dias de idade. Em seguida, as amostras são secas em estufa a 105°C ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) por 24 horas e pesadas novamente. Após a secagem, os corpos de prova são posicionados em um recipiente

contendo água limpa, com uma profundidade de 5 mm, de forma que apenas a base das amostras fique em contato com a água. A absorção é monitorada por meio de pesagens realizadas nos intervalos de 1 h, 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h, registrando-se o aumento de massa ao longo do tempo.

Por fim, o coeficiente de absorção por capilaridade é calculado a partir da relação entre o ganho de massa da amostra, a quantidade de água absorvida e a área de contato, considerando o tempo total do ensaio.



Figura 27- Ensaio de absorção de água por capilaridade.

3.3.2 ENSAIOS DE MICROCARACTERIZAÇÃO

A microcaracterização das argamassas desempenha papel fundamental na análise dos resultados obtidos pela macrocaracterização, proporcionando uma compreensão mais detalhada do comportamento e das interações dos materiais na composição da argamassa. Nesta etapa do estudo, além das argamassas previamente mencionadas (F4, M4, G4, M5 e M4-10), também foram submetidas à microcaracterização argamassas mistas com traço 1:2:12 (cimento, cal e areia), assim como uma argamassa industrializada da marca POLIMASSA, amplamente utilizada para revestimento. A inclusão dessas amostras teve como objetivo ampliar a comparação das microcaracterísticas de diferentes tipos de argamassas de revestimento usadas no país, permitindo uma análise mais abrangente de suas propriedades e desempenho.

Por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e da Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS), é possível analisar a microestrutura das amostras, detectando a presença de macroporos, microporos, fissuras, fases do agregado e da matriz

cimentícia, além de identificar eventuais manifestações patológicas. A partir das imagens produzidas por esses dois métodos, utiliza-se o software MAZE, que possibilita calcular digitalmente as porcentagens de agregados, produtos hidratados e eventuais defeitos.

Por fim, a realização da análise por Difratômetro de Raios-X (DRX), associada ao refinamento Rietveld-DRX, permite quantificar as fases cristalinas e verificar a compatibilidade da relação cimentícia/mineral encontrada nas matrizes cimentícias das amostras, buscando determinar de forma aproximada o traço utilizado nas argamassas.

3.3.2.1 Preparação das amostras para as microscopias e espectroscopias.

De posse dos corpos de prova cilíndricos, foi realizado cortes nos mesmos utilizando uma serra circular modelo CONTENCO I-3056 do LABEME-UFPB de tal forma que foram obtidos, para cada tipo de argamassa, quatro testemunhos cilíndricos com altura de 2,5cm, permitindo que estes fossem utilizados nos ensaios para microcaracterização. (Figura x)



Figura 28- Seccionamento dos corpos de prova para análise microestrutural.

A partir da obtenção das amostras, foram selecionados dois discos de cada tipo de argamassa, enquanto os demais discos foram armazenados para eventuais testes de contraprova dos resultados.

De posse das amostras, inicialmente houve a regularização da espessura das mesmas, por meio do *cutoff* do Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) do CT-UFPB, máquina Strues Minitom e do lixamento das amostras utilizando lixas d'água números 400, 600 e 1200, sendo aplicadas em duas direções perpendiculares sobre a superfície dos testemunho das argamassas,

partindo da lixa mais rugosa (nº 400) para a mais lisa (nº 1200). Por meio deste lixamento é possível, mesmo que de forma preliminar, planificar e corrigir superficialmente as amostras, permitindo o futuro polimento com maior eficiência.

Na etapa de polimento, foi utilizada a politriz PLF FORTEL do Laboratório de Siderurgia (LASID) do CT-UFPB. Primeiramente, foram preparados panos de polimento metalográfico com pastas diamantadas de 3, 1 e 1/4 μm . Em seguida, realizou-se o polimento das amostras por 3 minutos, iniciando com a pasta de maior granulometria (3 μm) e finalizando com a de menor granulometria (1/4 μm). Entre cada etapa de polimento, as amostras foram submetidas a um ciclo de banho ultrassônico de 480 segundos com álcool isopropílico, com o objetivo de remover impurezas e resíduos. Esse processo foi repetido até a conclusão do polimento. O principal objetivo desta etapa é realizar uma retificação microscópica da superfície das amostras, garantindo uma melhor visualização das estruturas e fases dos materiais no MEV.

A etapa seguinte consiste na aplicação de resina a frio para selamento da superfície lateral e posterior das amostras, a fim de melhorar a performance do ensaio realizado pelo MEV, haja vista que a amostra fica submetida a vácuo no interior do equipamento, além de preencher os vazios existentes.

Para realização do ensaio no MEV, com intuito de melhorar sua performance, em especial a condução do material examinado, foi realizada metalização da sua superfície com ouro.



Figura 29- Imagem da das amostras preparadas com resina e após metalização da superfície com ouro.

3.3.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para realização da caracterização através do MEV foi utilizado microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta 450, o qual apresenta uma câmara ambiental, Peltier e EDS. A análise foi realizada em modo de alto vácuo (em torno de 10^{-3} Pa), tensão de filamento de 20 kV e uma distância de trabalho em torno de 10 mm.

A metodologia adotada neste trabalho consistiu em setorizar as amostras, de forma a garantir maior aleatoriedade na escolha das regiões analisadas, permitindo uma caracterização mais fidedigna.

Inicialmente, para cada tipo de argamassa, a seção transversal das amostras, com 5 cm de diâmetro, foi dividida em 25 seções de 1 cm x 1 cm. A partir dessas seções, foram selecionados aleatoriamente três quadrantes. Devido ao uso da magnificação de 100x no MEV, cada um desses quadrantes foi subdividido em nove áreas menores, medindo 3,3 mm x 3,3 mm. Para cada argamassa, um desses nove quadrantes foi analisado no MEV.

Essa magnificação foi escolhida por proporcionar uma representação adequada do universo dos agregados, respeitando suas curvas granulométricas, além de permitir uma visualização clara da pasta de cimento e de outros elementos presentes na amostra. O desenho esquemático da metodologia adotada pode ser observado na Figura X.

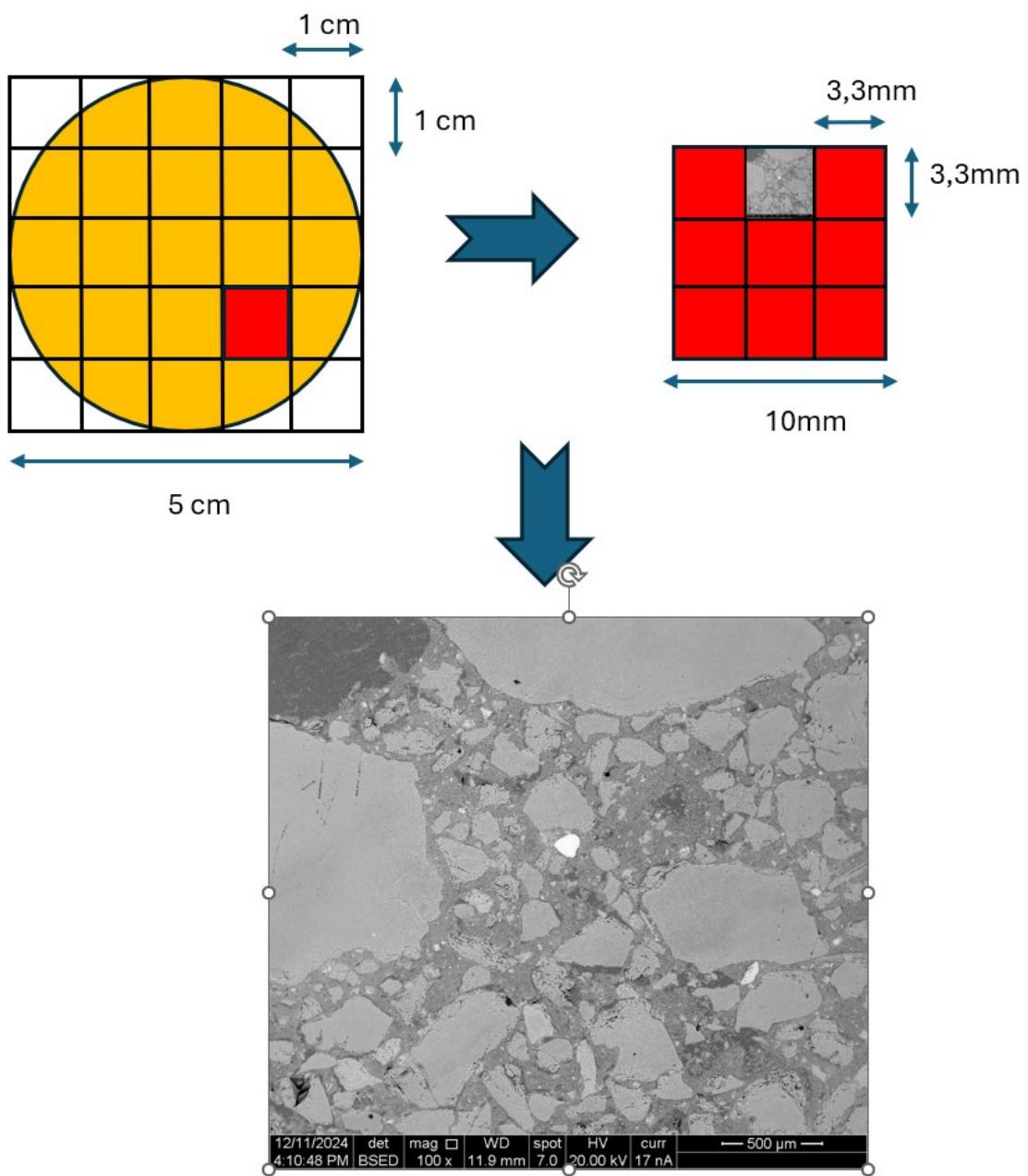


Figura 30- Desenho esquemático da metologia adotada no uso do MEV.

3.3.2.3 Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS)

Utilizando um detector XFlash 630M acoplado ao equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foi realizada a análise por Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS) das amostras, com o objetivo de identificar a composição das fases pontuais observadas nas micrografias. Para padronizar o ensaio, selecionaram-se fases

representativas presentes nos agregados e na matriz cimentícia, buscando obter inicialmente uma visão geral dos dados coletados.

O uso dessa metodologia na análise das argamassas visa à reconstituição aproximada dos traços por meio de exames de imagem, que, quando complementados pelos resultados quantitativos do DRX, podem fornecer estimativas precisas da composição (HENRIQUES, 2022).

A partir das imagens e dos resultados do EDS, é possível identificar a presença de elementos químicos diversos, cujas quantificações podem ser confirmadas pela difração de raios X.

No caso estudado, a areia utilizada na composição provém do quartzo, que apresenta elevado teor de sílica (SiO_2), frequentemente superior a 90% da sua composição (SOUZA et al., 2014; MEHTA e MONTEIRO, 2013). Além disso, ocasionalmente, detecta-se a presença de feldspatos nos agregados, cujos constituintes químicos incluem potássio, sódio, cálcio e, principalmente, silicatos de alumínio. Assim, a partir da determinação do teor de sílica (Si) por meio do EDS, torna-se possível estimar, para uma dada imagem do MEV, a proporção de agregado presente na argamassa, contribuindo para uma análise detalhada da composição do material e sua influência nas propriedades finais.

Quanto à matriz cimentícia, ela é composta majoritariamente por silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), Calcita, Portlandita, Albita, Calcita Magnesiana (MEHTA e MONTEIRO, 2013). No presente estudo, além do cimento, utilizou-se cal hidratada (Ca(OH)_2), que pode participar de reações pozolânicas formando C-S-H, pode sofrer carbonatação ao reagir com CO_2 , ou ainda permanecer como óxido de cálcio livre (CaO). Para estimar a porcentagem de pasta (matriz cimentícia) nas amostras, foi determinado pelo EDS o teor de cálcio (Ca) nas regiões analisadas, já que este é o elemento químico predominante na matriz cimentícia das argamassas mistas.

3.3.2.4 Multi-Analysis Zonning Expert (MAZE)

Após a aquisição das imagens por MEV e EDS, realizou-se a quantificação visual das micrografias com o auxílio do software MAZE. Para as imagens obtidas por MEV, que apresentam uma composição multifásica das argamassas, foram definidas três classes de cores para o dimensionamento: vermelho, representando os agregados; amarelo, a pasta cimentícia; e preto, os vazios. Essa categorização possibilitou uma avaliação detalhada da distribuição dos componentes na estrutura da argamassa.

Nas imagens de EDS, especialmente as relacionadas à sílica (Si) e ao cálcio (Ca), devido às características dos dados, foi necessária a conversão para tons de cinza antes da quantificação visual dos elementos. Para as imagens de sílica (Si), foram adotadas duas classes de cor: vermelho para indicar a presença de Si e preto para os demais elementos. Já para as imagens de cálcio (Ca), utilizou-se azul para Ca e preto para o restante da amostra.

Dessa forma, para cada uma das três amostras analisadas em cada uma das sete argamassas, foi possível quantificar o volume relativo de agregado (baseado no Si) e da matriz cimentícia (baseado no Ca), além dos demais componentes presentes na composição.

3.3.2.5 Difração de raios X (DRX)

Para a realização do DRX, que exige o material em forma de pó, há a necessidade da preparação da amostra, cuja metodologia empregada na preparação das amostras para o ensaio será detalhada. Inicialmente foram selecionadas amostras da mesma face dos testemunhos cortados lentamente, porém diferentes daquelas utilizadas para as microscopias, com o objetivo de possibilitar a correlação entre os dados obtidos nos diferentes ensaios.

Uma vez escolhida a amostra, realiza-se a etapa de fragmentação desta, utilizando placa e barra de aço, através de batidas lentas. A próxima etapa trata-se da desagregação da pasta com o objetivo de descolar a pasta dos agregados menores. Nessa etapa de desagregação da pasta, utilizou-se de um almofariz e pistilo para permitir, por meio de movimentos leves e circulares durante um ciclo de dez minutos, a separação da pasta dos agregados menores por inércia.

Para a próxima fase, a de peneiramento, foi utilizada uma malha formada pelas peneiras nº 100, 200, 325, 400 e 635 o que permitiu utilizar, assim, um agitador de peneiras durante um ciclo de 30 segundos. O objetivo final desta fase é obter um material passante na peneira nº 635, o qual seria utilizado para o DRX.

Os pós das amostras foram analisados por difração de raios X usando um equipamento Bruker D8 Advance operando com radiação Cu K α ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) de Tensão 30 kV e Corrente 10 mA com um detector PSD Linxeye. Para a maior parte dos materiais foi utilizado um porta amostra plano no intervalo 2θ de $5^\circ - 70^\circ$, com passo angular de $0,02^\circ$ e tempo de varredura por passo de 5s. Para os materiais do interior do forno (FN1) foi utilizado um porta amostra zero-background de monocrystal de silício no intervalo 2θ de $5^\circ - 120^\circ$, com passo angular de $0,006^\circ$ e tempo de varredura por passo de 3 s.



Figura 31- Equipamento da Marca Bruker modelo D8 Advance utilizado na análise de Difração de Raios-X.

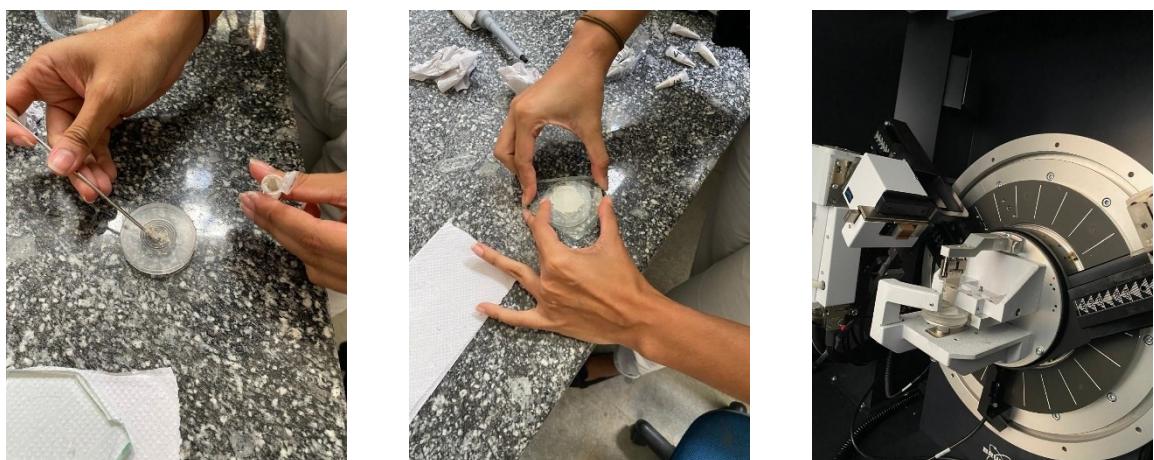


Figura 32- (a) distribuição do pó no porta amostra. (b) nivelamento com placa de vidro. (c) posicionamento do porta amostra no DRX.

Quantificação de fases cristalinas: Identificação e quantificação das fases cristalinas das amostras foi feita através de Refinamento Rietveld dos dados da difração de raios X do pó utilizando o software TOPAS V4 (*Total Pattern Analysis Software* ®), usando a função “parâmetros fundamentais” para ajuste dos picos.

A aplicação da difração de raios-X combinada com o método de Rietveld nas argamassas confeccionadas neste trabalho visa determinar a proporção de pasta cimentícia em relação a quantidade de agregados, podendo assim auxiliar na reprodução dos traços utilizados

que no caso foi 1:2:8 (cimento:cal:areia) para as argamassas F4, M4,G4 e M5, 1:2:10 para argamassa M4-10, além de argamassa 1:2:12.

Em função das estruturas cristalinas já conhecidas do cimento Portland, em especial a Calcita, Portlandita, Calcita Magnesiana se torna possível quantificar a proporção de aglomerante na argamassa em relação ao agregado, cuja quantidade, por ter origem no quartzo, é determinada por meio do teor de sílica presente. O estabelecimento desta proporção auxilia na reconstituição do traço da argamassa investigada.

Na figura a seguir é possível observar um resumo dos ensaios realizados neste trabalho para as amostras das argamassas produzidas, em especial as intituladas F4, M4, G4, M5 e M-10.

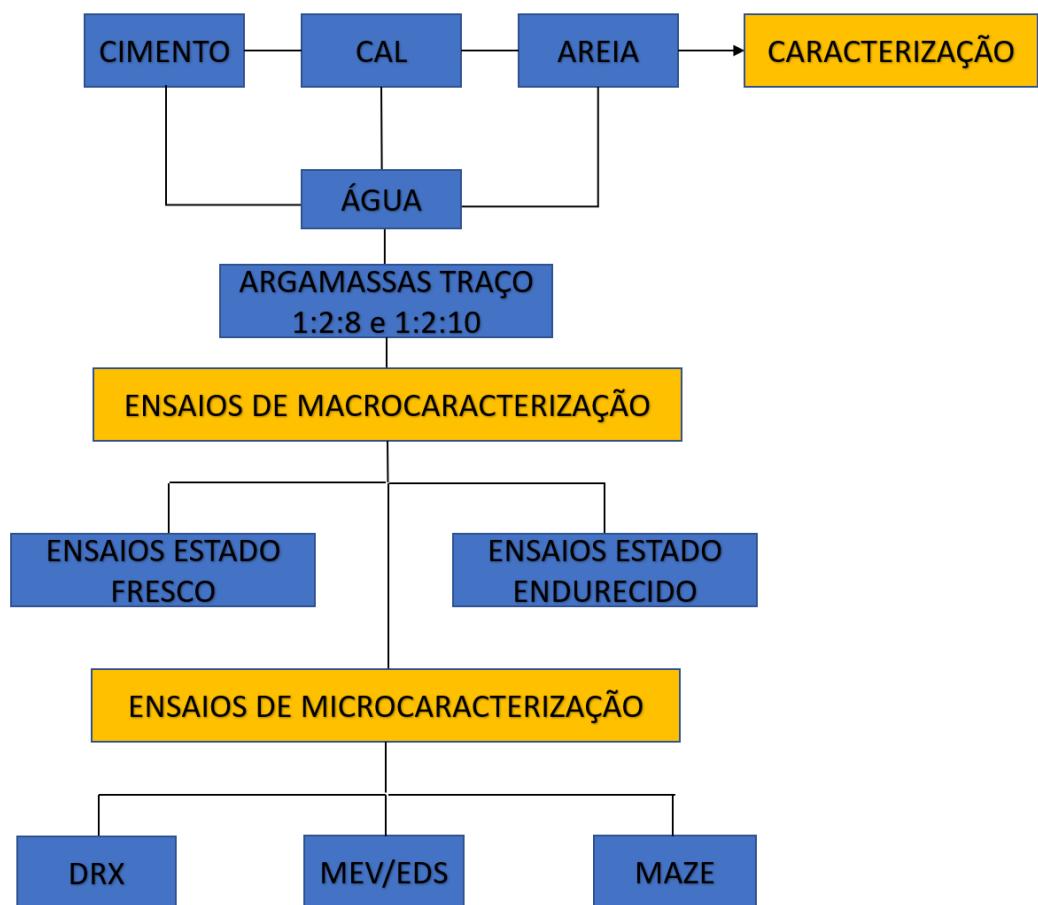


Figura 33- Roteiro dos ensaios realizados

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultado do estudo teórico do comportamento de argamassas com traço 1:2:8 a partir da variação da massa unitária de seus componentes

Com a elaboração de cem diferentes traços teóricos na proporção 1:2:8 (cimento, cal e areia) para argamassas de revestimento, o estudo avançou na determinação de propriedades teóricas como porosidade, resistência à compressão e massa específica. Além disso, calculou-se o custo total dos insumos (aglomerantes e agregado) visando analisar a variação e amplitude desses custos, o que possibilita compreender melhor a influência dos materiais no desempenho técnico e na viabilidade econômica das argamassas.

Com base nos resultados obtidos, foram elaboradas duas tabelas: a Tabela 13 apresenta a variação das três propriedades estudadas para os traços 1:2:8, mostrando os valores máximos e mínimos obtidos teoricamente; a segunda tabela compara os custos por metro quadrado (m^2) de reboco, considerando os preços unitários dos insumos segundo o SINAPI e os valores da composição 87292 do SINAPI, restrita aos insumos aplicados (cimento, cal e areia).

Tabela 13- Valores teóricos de propriedades obtidos para os 100 traços gerados.

MENOR RESISTÊNCIA	MAIOR RESISTÊNCIA	RESISTÊNCIA MÉDIA	MENOR POROSIDADE	MAIOR POROSIDADE	POROSIDADE MÉDIA	MENOR DENSIDADE	MAIOR DENSIDADE	DENSIDADE MÉDIA
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(KG/M ³)	(KG/M ³)	(KG/M ³)
2,12	2,22	2,17	15,71	21,36	17,55	1818,16	2075,17	1953,79

Tabela 14- Comparação dos custos obtidos por m² de reboco.

VALORES ENCONTRADOS	VALOR OBTIDO (R\$)	CUSTO SINAPI (R\$)
MENOR CUSTO	255,03	
MAIOR CUSTO	335,91	281,08
CUSTO MÉDIO	290,45	

Considerando os parâmetros mencionados, foram elaborados ternários normatizados com os valores das propriedades e do custo das argamassas de revestimento, baseados nos traços obtidos no estudo. Destaca-se que, para facilitar a apresentação dos resultados, os valores de ocupação foram normatizados de modo que sua soma totalize 1.

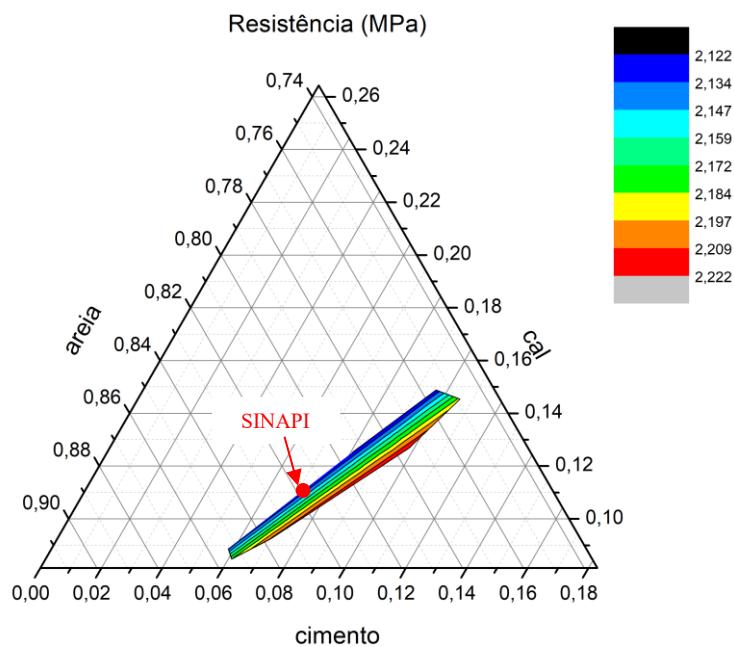


Figura 34- Ternário normatizado com variação da resistência à compressão para as argamassas obtidas no estudo.

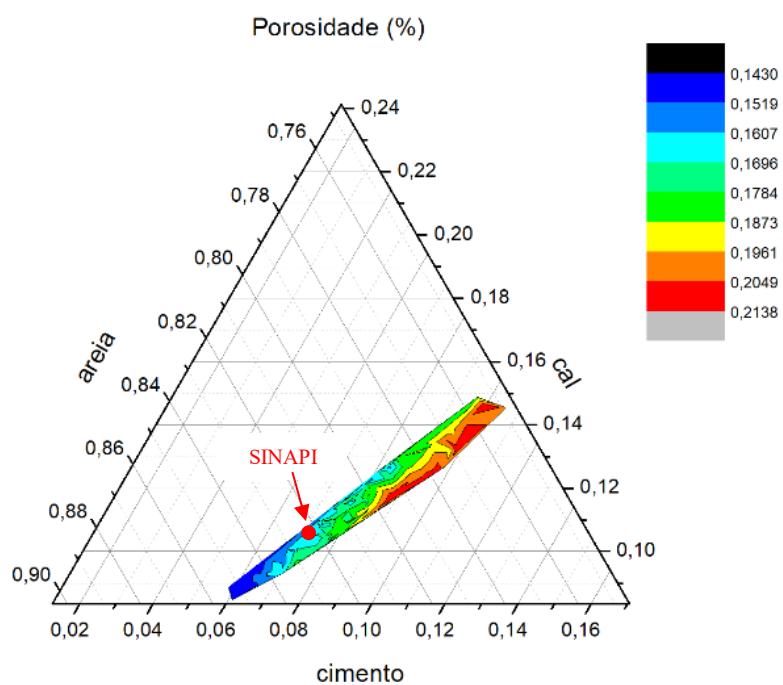


Figura 35- Ternário normatizado com variação da porosidade para as argamassas obtidas no estudo.

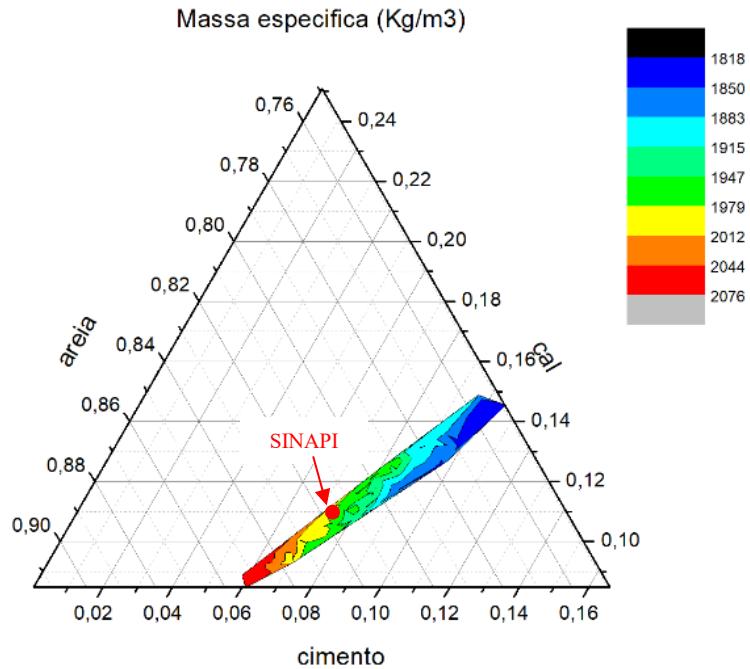


Figura 36- Ternário normatizado com variação da massa específica para as argamassas obtidas no estudo.

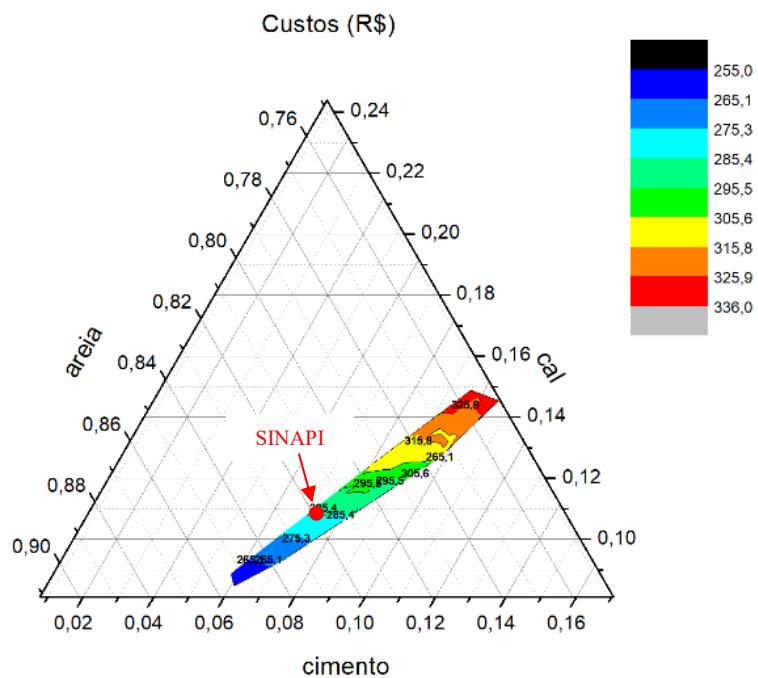


Figura 37- Ternário normatizado com variação da porosidade para as argamassas obtidas no estudo.

A análise dos resultados apresentados nas Tabelas 13 e 14, bem como nas Figuras 35 a 38, evidenciou que, para obter propriedades equivalentes em uma argamassa de revestimento composta por cimento, cal e areia no traço 1:2:8, é teoricamente possível empregar diferentes quantidades de insumos, resultando em custos finais variados. Esse aspecto é especialmente

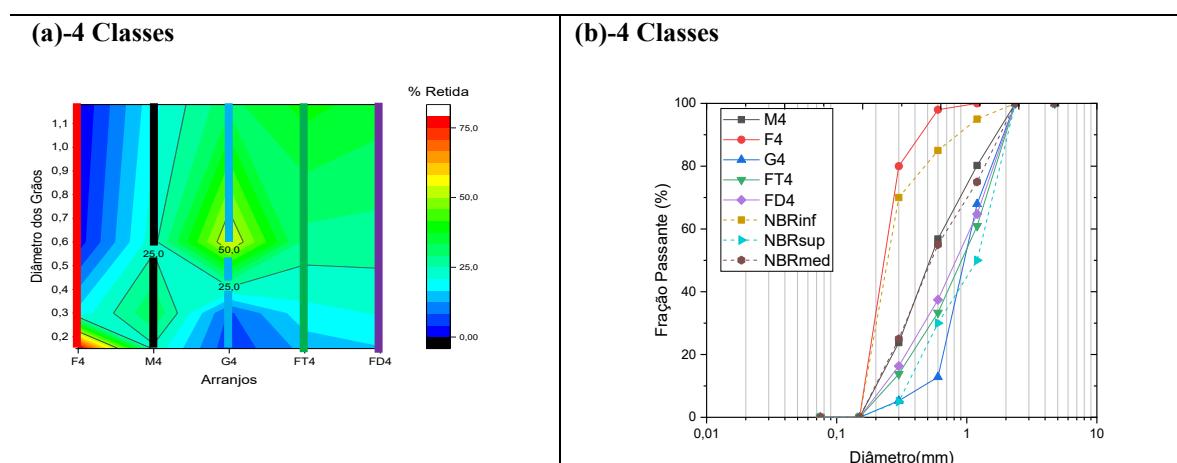
relevante, pois pode auxiliar peritos na identificação de possíveis casos de superfaturamento relacionados à qualidade da execução das argamassas, permitindo uma avaliação mais precisa da compatibilidade entre os materiais utilizados e os custos envolvidos.

A análise dos gráficos indica que a composição constante no banco de dados do SINAPI para argamassa de revestimento no traço 1:2:8, comumente adotada em obras públicas, apresenta propriedades compatíveis com as argamassas teóricas com traço similar. Contudo, o custo para reprodução dos insumos pode ser superior ou inferior aos valores estimados pelo método de Monte Carlo, dependendo das características específicas dos materiais empregados.

Como já mencionado, a composição de insumos do SINAPI adota uma abordagem determinística na aplicação das propriedades físicas dos agregados e aglomerantes, sobretudo no que tange às suas massas unitárias e massa específica.

4.2 Resultado do estudo da densidade de empacotamento dos agregados utilizados na produção de argamassas

Inicialmente, baseado nos dados apresentados na Tabela 10, foi elaborado um gráfico relacionando a distribuição percentual dos grãos por diâmetro para cada conjunto, organizado conforme o número de classes, conforme apresentado nas Figuras 38 (a), (c), (e) e (g), bem como suas respectivas curvas granulométricas nas Figuras 38 (b), (d), (f) e (h). Destaca-se que as curvas granulométricas ilustradas nessas figuras foram complementadas pelas curvas de referência extraídas da norma NBR 7211 (ABNT, 2022), especialmente aquelas que representam a zona ótima dos limites inferior e superior, bem como a curva média.



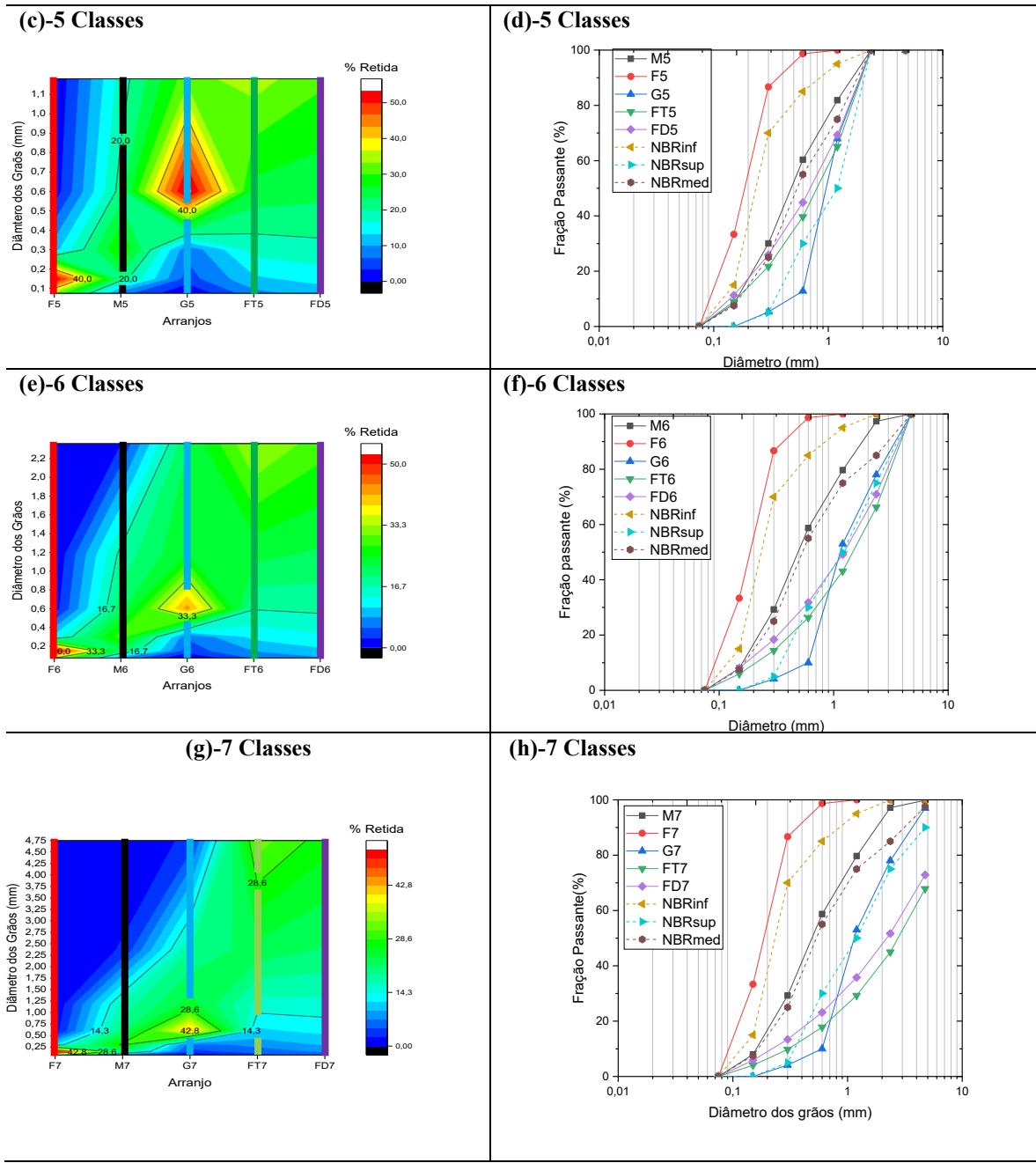


Figura 38- Distribuição Granulométrica (a, c, e, g) e Curva Granulométrica (b, d, f, h) dos arranjos utilizados no estudo

As Figuras 38 (b, d, f e h) evidenciam que as faixas ótimas de curvas granulométricas estabelecidas pela norma NBR 7211 (ABNT, 2022) não abrangem todas as areias utilizadas na produção de argamassas, o que resulta na eventual utilização de areias fora das especificações normativas. Outro aspecto relevante é que, conforme o número de classes aumenta, as curvas geradas pelos modelos teóricos de Fuller e Thompson e de Funk e Dinger tendem a se afastar da zona ótima exigida pela norma, especialmente a partir de seis classes de grãos.

Além disso, ao analisar as imagens nas Figuras 38 (a, c, e e g), observa-se que, para composições granulares com quatro classes, a distribuição granulométrica dos modelos teóricos

apresenta um comportamento similar à zona intermediária entre areias médias e grossas, conforme previsto na literatura. Contudo, nas Figuras 38 (e) e (g), que representam conjuntos com seis e sete classes, percebe-se um desvio significativo das distribuições naturais, com maior concentração de grãos grossos. Isso ocorre porque, segundo as Equações 1 e 2, esses modelos iniciam a distribuição pelo grão de maior diâmetro, diferentemente do padrão observado nas areias naturais.

Diante desse comportamento, conclui-se que os modelos teóricos de Füller e Thompson e de Funk e Dinger apresentam melhor desempenho para areias com 4 classes granulométricas. Para composições com seis e sete classes, além de se afastarem da zona recomendada pelas normas brasileiras, suas distribuições diferem substancialmente das encontradas na natureza. Ainda, vale destacar que as curvas médias para todas as classes apresentam alta similaridade com as curvas médias da zona ótima normativa, reforçando a importância de utilizar distribuições granulométricas alinhadas às diretrizes normativas para garantir melhor empacotamento e desempenho das argamassas.

Após o estudo sobre as curvas granulométricas dos arranjos e a partir dos resultados de massa unitária obtido para cada classe de grãos dos compostos granulares, foi aplicado o método CPM para obtenção da densidade de empacotamento de cada um dos 20 arranjos propostos. Incialmente, seguindo a metodologia imposta pelo CPM, foram calculadas as densidades de empacotamento virtuais (γ) dos conjuntos, conforme se observa na Figura 39.

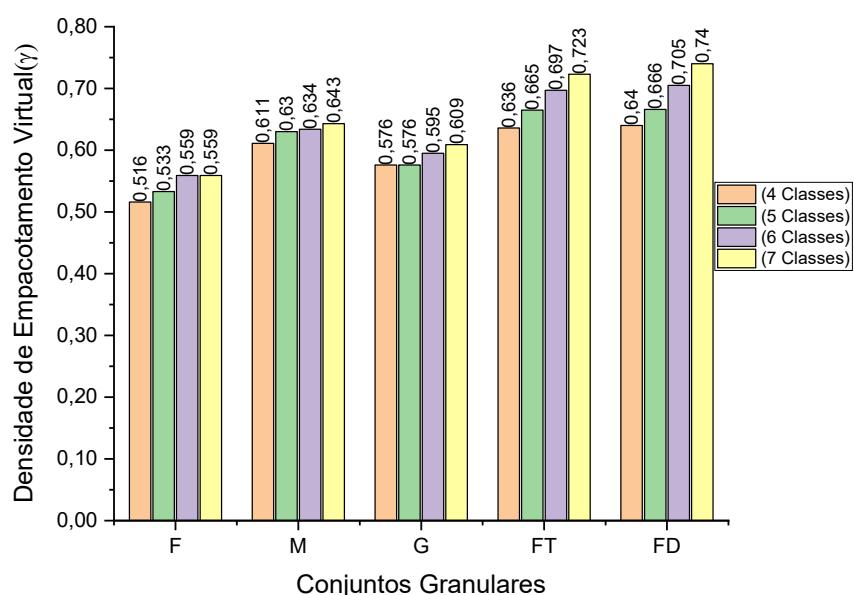


Figura 39- Densidade de empacotamento virtual (γ) dos conjuntos granulares calculados utilizando método CPM.

A Figura 39 mostra que, para as composições granulares extraídas da literatura (média - M, fina - F e grossa - G), apesar da variação no número de classes granulométricas, a densidade de empacotamento virtual obtida pelo CPM apresentou variações de 3,76% para as composições médias (M), 8,33% para as finas (F) e 5,72% para as grossas (G). Em contrapartida, nos modelos teóricos, a densidade de empacotamento virtual variou significativamente com o aumento do número de classes granulométricas. A variação positiva foi de 13,67% para o modelo de Füller e Thompson e de 15,44% para o modelo de Funk e Dinger. Isso indica que, para os conjuntos obtidos por meio de modelos teóricos, o aumento no número de classes granulométricas exerce maior impacto sobre a densidade de empacotamento virtual do que nos arranjos comumente encontrados e aplicados na produção de argamassa.

Segundo os resultados apresentados, o modelo teórico de Funk e Dinger, para um composto granular com 7 classes de grãos, alcançou uma densidade de empacotamento virtual de 0,74, valor máximo para grãos esféricos (HALES, 2005; KWAN e FUNG, 2009).

Outro aspecto observado é que, entre as composições granulares extraídas da literatura, para todas as classes estudadas, as curvas médias (M) sempre apresentaram maior densidade de empacotamento. Esse comportamento ocorre devido à melhor distribuição dos grânulos, permitindo um preenchimento mais uniforme dos vazios existentes. A partir dos valores da densidade de empacotamento virtual dos conjuntos e de seus respectivos coeficientes de uniformidade, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura a seguir, que relaciona essas duas grandezas.

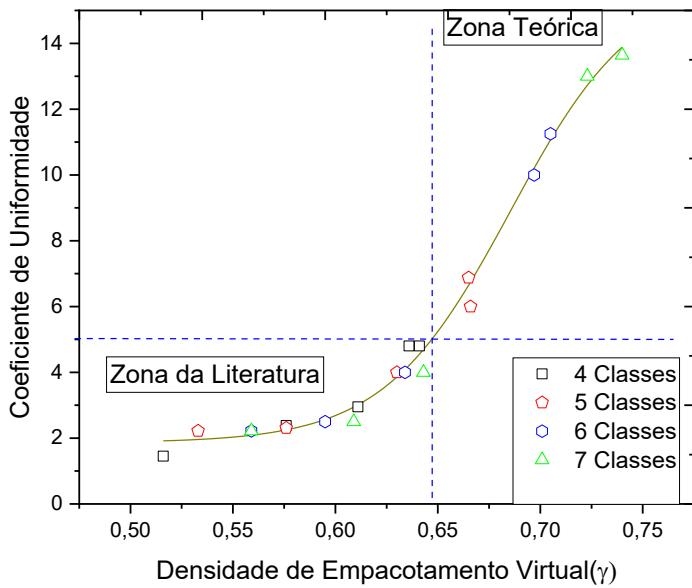


Figura 40- Correlação entre densidade de empacotamento virtual e coeficiente de uniformidade

Analizando a Figura 40, observa-se uma forte correlação entre o coeficiente de uniformidade das areias e sua densidade de empacotamento (YOUNG, 1972), apresentando um ajuste sigmoidal. Quanto maior o coeficiente de uniformidade, ou seja, uma areia com uniformidade média ou baixa, maior é a densidade de empacotamento (ADESINA *et al.*, 2024). Esse comportamento pode auxiliar na tomada de decisões ao especificar uma areia com menor índice de vazios.

Além disso, pode-se ver claramente que apenas os conjuntos granulares desenvolvidos a partir de modelos teóricos, especialmente a partir de 5 classes, alcançaram coeficientes de uniformidade maiores que 6 (Zona Teórica). Esse agrupamento indica que o comportamento desses modelos se desvia do comportamento das areias obtidas da literatura à medida que o número de classes aumenta, mas possibilita a produção de areias menos uniformes (ESTRADA, 2016).

A partir da Figura 40, aplicando o Modelo Sigmoidal de Boltzmann aos resultados, obtemos a seguinte equação:

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{(x - x_0)}{dx}}} + A_2 \rightarrow C.U_i = \frac{-14,13}{1 + e^{\frac{\gamma_i - 0,69}{0,03}}} + 15,98 \quad R^2 = 0,992 \quad (18)$$

Onde:

A_1 = Valor Inicial; A_2 = Valor Final

x_0 = Centro

dx = largura de transição

i = Arranjos

$C.U_i$ = Coeficiente de Uniformidade $i \left(D_{60}/D_{10} \right)$

γ_i = Densidade de empacotamento virtual i

O passo seguinte, de acordo com o modelo CPM, é calcular a densidade de empacotamento real (ϕ) dos compostos granulares utilizando a equação 7, na qual foi considerado um valor de $K=4, 5$, que corresponde ao processo de aplicação de compactação por empilhamento, sendo este o processo utilizado experimentalmente. O software *Matlab* foi utilizado para resolver a equação, pois foi necessário solucionar equações de quarto, quinto, sexto e sétimo graus. A Figura 41 apresenta os resultados da densidade de empacotamento real obtida para os vinte conjuntos granulares.

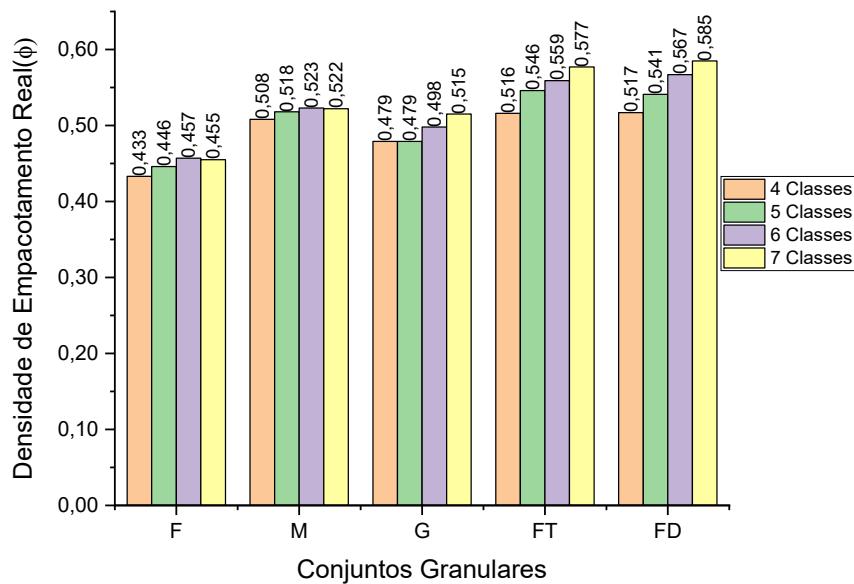


Figura 41- Densidade de Empacotamento Real (ϕ) dos conjuntos granulares calculados por meio do método CPM.

A partir da Figura 41, conclui-se que, para as areias médias (M) e finas (F), o aumento do número de classes granulométricas teve pouca influência na densidade de empacotamento real, com variações positivas de 2,75% para as areias médias e 5,00% para as finas. Já para as areias grossas (G), observou-se um aumento ligeiramente maior na densidade de empacotamento real com o aumento do número de classes, resultando em um ganho de 7,5% ao variar de 4 para 7 classes de grãos.

Assim como ocorreu com a densidade de empacotamento virtual, a aplicação do modelo CPM a compostos granulares baseados em modelos teóricos revelou um ganho considerável com o aumento do número de classes. A variação positiva foi de 11,60% para o modelo de Füller e Thompson e de 13,15% para o modelo de Funk e Dinger. Conforme esperado, o aumento no número de classes amplia a variação no tamanho dos grãos, reduzindo os vazios no conjunto (BAGHAEE MOGHADDAM e BAAJ, 2018; WIĘCEK e STASIAK, 2018; YOUD, 1972).

A diferença entre o conjunto com maior densidade de empacotamento real e o com menor densidade variou no presente estudo de 19,00% para conjuntos com 4 classes, 19,90% para 5 classes, 24,00% para 6 classes e 28,57% para 7 classes. Em todos os casos, os maiores valores foram obtidos para os conjuntos granulares desenvolvidos com base em modelos teóricos, conforme esperado (OQUENDO-PATIÑO e ESTRADA, 2022), uma vez que, ao contrário dos agregados naturais, esses conjuntos possuem distribuição granulométrica otimizada.

De acordo com a Figura 41, os conjuntos granulares classificados como finos (F4, F5, F6 e F7), que possuem os menores coeficientes de uniformidade e não incluem grãos maiores (#1,2; #2,36; #4,75 mm), apresentaram a menor densidade de empacotamento real para todas as classes. As maiores densidades foram encontradas nos arranjos baseados no modelo de Funk e Dinger (FD4, FD5, FD6, FD7), cujas distribuições apresentam menor uniformidade (maiores coeficientes de uniformidade). Entre os conjuntos obtidos da literatura, as areias médias (M4, M5, M6 e M7) exibiram as maiores densidades de empacotamento para todas as classes.

Com base nos valores da densidade de empacotamento real e dos coeficientes de uniformidade, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 42, que relaciona essas duas grandezas.

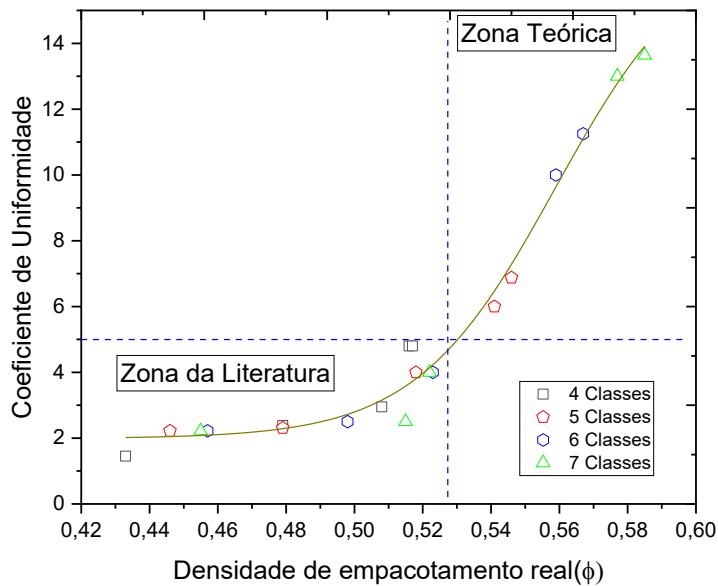


Figura 42- Correlação entre densidade de empacotamento real e seus respectivos coeficientes de uniformidade.

Conforme esperado, há uma forte correlação entre o coeficiente de uniformidade das areias e sua densidade de empacotamento real, apresentando um ajuste sigmoidal. Assim como na densidade de empacotamento virtual, apenas os conjuntos granulares formulados a partir de modelos teóricos com mais de 5 classes ficaram fora da zona das areias baseadas em distribuições obtidas na literatura.

A partir dos resultados observados na Figura 6, aplicando o Modelo Sigmoidal de Boltzmann, obtemos a seguinte equação:

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{(x - x_0)}{dx}}} + A_2 \rightarrow C.U_i = \frac{-15,23}{1 + e^{\frac{\phi_i - 0,560}{0,020}}} + 17,21 \quad R^2 = 0,979 \quad (19)$$

Onde:

A_1 = Valor Inicial; A_2 = Valor Final

x_0 = Centro

dx = largura de transição

i = Arranjos

$C.U_i$ = Coeficiente de Uniformidade $i \left(\frac{D_{60}}{D_{10}} \right)$

ϕ_i = Densidade de empacotamento real i

Em função do esforço matemático necessário para calcular a densidade de empacotamento real dos agregados pelo método CPM e considerando a correlação sigmoidal entre a densidade de empacotamento e coeficiente de uniformidade, este trabalho sugere um

maneira prática e efetiva para determinar densidade de empacotamento de conjuntos granulares a partir dos dados obtidos para densidade de empacotamento virtual, os quais são mais simples de serem automatizados em planilhas eletrônicas, de forma a economizar tempo do projetista na hora de decidir qual agregado aplicar na confecção e argamassas de revestimento, por exemplo. A solução, denominada de densidade de empacotamento real modificada pode ser vista na equação abaixo:

$$\Phi mod_i = \frac{\rho_{sand}}{Y_{sand}} \times + (\gamma_{med} \times dx_{\gamma}) \times \ln \left(\frac{-14,13}{C.U_i - 15,98} - 1 \right) \quad (20)$$

Onde:

Φmod_i = Densidade de empacotamento real modificada i

i = Arranjos

ρ_{sand} = Massa unitária da areia de origem

Y_{sand} = Massa específica da areia de origem

γ_{med} = Densidade de empacotamento virtual média

dx_{γ} = largura de transição obtido por Boltzman aplicado na densidade de empacotamento virtual

$C.U_i$ = Coeficiente de Uniformidade i (D_{60}/D_{10})

Como pode ser observado, a Equação 20 permite determinar, a partir do coeficiente de uniformidade, a densidade de empacotamento real modificada de um conjunto granular cujos grãos possuem a mesma massa unitária da areia original. Dessa forma, mantendo a mesma origem da areia, é possível, utilizando apenas a curva granulométrica dos conjuntos granulares com 4 a 7 classes, estimar a densidade de empacotamento real modificada, sem a necessidade de repetir os cálculos complexos para o empacotamento virtual ou real — que envolvem a resolução de equações polinomiais de 4 a 7 graus, normalmente realizadas por softwares específicos.

Vale destacar que a Equação 20 considera a correlação entre a massa unitária e a densidade específica da areia matriz, o que incorpora fatores não contemplados pelo modelo de De Larrard (DE LARRARD, 1999), como a forma e a esfericidade dos grãos (DU et al., 2022; ROQUIER, 2023, 2024b; WONG e KWAN, 2014). É importante mencionar que o uso do coeficiente de uniformidade da areia para estimar a densidade de empacotamento de um conjunto granular é uma prática conhecida desde pelo menos a década de 1970 (YOUS, 1972).

A Figura abaixo apresenta os valores da densidade de empacotamento real modificada, calculados a partir da Equação 20 (Φmod_i).

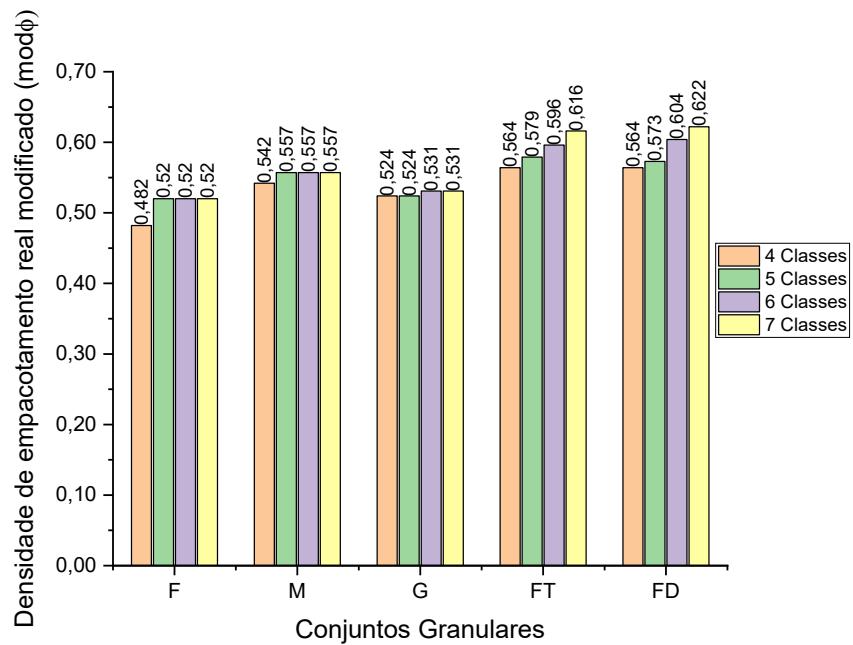


Figura 43- Densidade de empacotamento real modificado (ϕ mod.) dos conjuntos granulares, obtidos utilizando equação 20.

A partir dos resultados apresentados na Figura 43, observou-se que, ao utilizar o modelo CPM para calcular a densidade de empacotamento real modificada, apenas os conjuntos granulares com distribuição granulométrica baseada em modelos teóricos apresentaram um ganho significativo na densidade de empacotamento conforme o número de classes aumentou, chegando a uma variação de até 10% no modelo de Funk e Dinger.

Para facilitar a visualização e comparação dos valores obtidos para a densidade de empacotamento — conforme expressos pela Equação 20 — em relação aos resultados derivados do modelo tradicional CPM, foi elaborada a Figura 44. Nela, são correlacionados os coeficientes de uniformidade dos vinte conjuntos granulares com suas respectivas densidades de empacotamento virtual, real e real modificada.

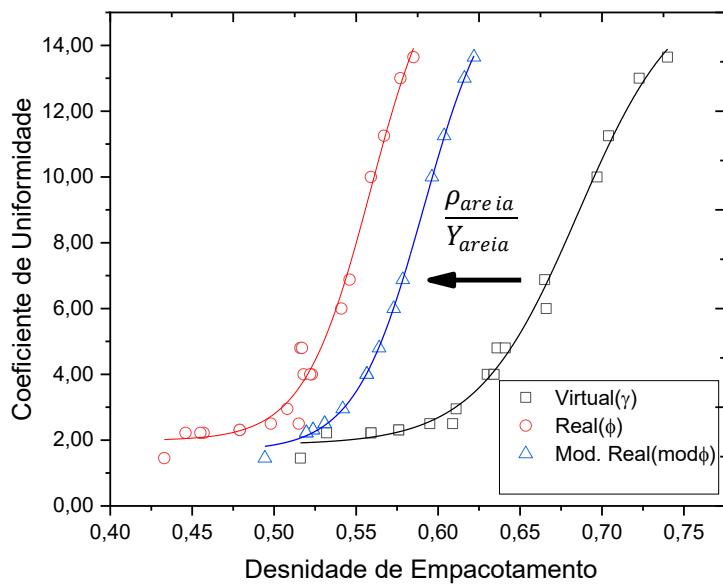


Figura 44- Relação entre coeficiente de uniformidade e densidade de empacotamento virtual, real e real modificado dos conjuntos granulares.

A diferença entre os valores da densidade de empacotamento real calculados pelo modelo CPM e pelo método modificado utilizando a Equação 20 variou entre 3,10% e 16,0%, sendo que os valores obtidos pela Equação 20 são sempre superiores aos obtidos pelo método CPM.

Essa simplificação possibilita, por exemplo, que uma indústria de grande porte, que utiliza um único depósito de areia para a produção de argamassa, realize apenas a primeira etapa do modelo CPM — a determinação da densidade de empacotamento virtual. Esse cálculo é de fácil automatização e permite estabelecer a relação entre o coeficiente de uniformidade e os valores da densidade de empacotamento virtual.

Com base nesses dados, ao aplicar o modelo sigmoidal de Boltzmann, é possível desenvolver uma formulação simples que permite estimar a densidade de empacotamento real modificada para outros conjuntos granulares apenas a partir da análise de suas curvas granulométricas. Essa metodologia facilita a tomada de decisões na fabricação de argamassas, otimizando o empacotamento entre as partículas.

Além disso, essa abordagem pode ser valiosa para a seleção da distribuição granulométrica ideal de agregados utilizados em argamassas destinadas à impressão 3D e aplicações autoadensáveis. Como essas tecnologias demandam um controle reológico rigoroso,

a densidade de empacotamento do agregado exerce um papel fundamental na qualidade e no desempenho final do material.

4.1.2 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DOS RESULTADOS

Na análise experimental, nove conjuntos granulares foram selecionados entre os vinte arranjos mostrados na Tabela 13, os quais foram feitos a partir de suas respectivas curvas granulométricas. Após a formulação e obtenção das areias, foram determinadas a massa unitária e a densidade específica e, consequentemente, a densidade de empacotamento experimental de cada conjunto, utilizando a fórmula 8. Além disso, o módulo de finura de cada conjunto foi calculado a partir de suas respectivas curvas granulométricas, utilizando as peneiras da série normal.

Tabela 15- Caracterização dos conjuntos granulares reproduzidos.

Arranjos	Massa Unitária (kg/m ³)	Massa Específica (kg/m ³)	Densidade de empacotamento(β_i)	Módulo de Finura
M4	1.524,74	2.617,80	0,583	2,39
F4	1.357,12	2.626,00	0,516	1,22
G4	1.412,46	2.622,00	0,538	3,14
FD4	1.553,36	2.617,80	0,593	2,80
M5	1.603,24	2.617,80	0,612	2,20
F5	1.405,26	2.626,00	0,534	0,81
G5	1.412,35	2.622,00	0,538	3,14
FD5	1.632,44	2.617,80	0,624	2,49
FD6	1.672,41	2.617,80	0,639	3,22

A Figura 45 abaixo mostra os resultados da densidade de empacotamento experimental (β), assim como as densidades de empacotamento virtual (γ) e real (ϕ) obtidas utilizando o modelo CPM, e a densidade de empacotamento real modificada ($\phi_{mod.}$) obtida a partir da Equação 20, para todos os conjuntos granulares na Tabela 15, além dos erros relativos dos modelos real e real modificado.

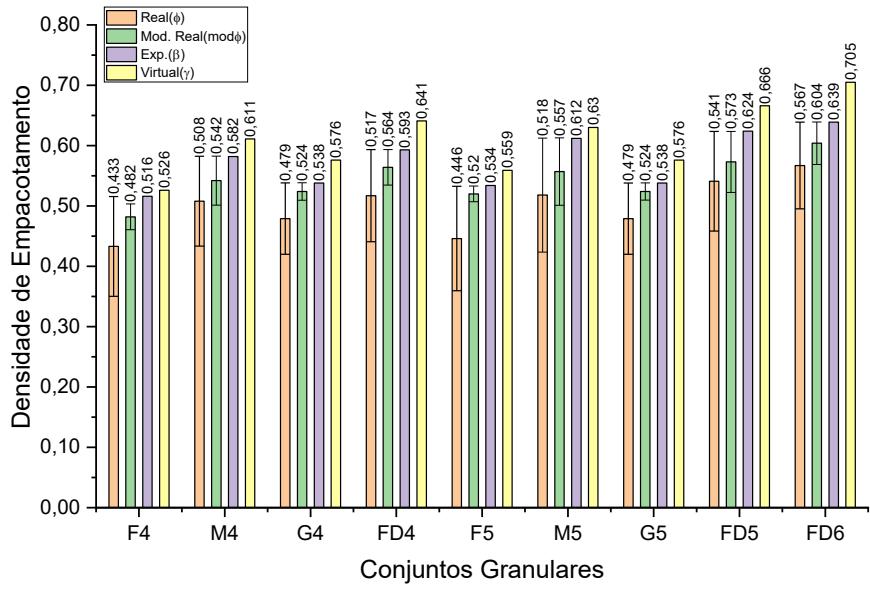


Figura 45- Validação experimental dos resultados teóricos obtidos pelo método CPM e pelo modelo proposto.

Para obter a densidade de empacotamento virtual utilizando o CPM, o índice de compactação K não é considerado, portanto, ao contrário da densidade de empacotamento real, ele não deve ser utilizado para fins de comparação com as densidades de empacotamento experimentais. Além disso, para obter o empacotamento teórico, considera-se que cada uma das partículas foi posicionada uma por uma, ao contrário de uma situação real, o que resulta no menor índice de vazios do conjunto (BAGHAAE MOGHADDAM e BAAJ, 2018; ROQUIER, 2024b).

Observando a Figura 45, verifica-se que as densidades de empacotamento experimentais aumentaram com o acréscimo do número de classes de grãos nos conjuntos. No caso da areia média, a variação de 4 para 5 classes resultou em um aumento de 5,15%, enquanto, no modelo teórico de Funk e Dinger, essa mesma variação levou a um incremento de 5,22%. Além disso, para esse modelo, a densidade de empacotamento do conjunto com seis classes foi 7,60% maior em relação ao conjunto com quatro classes. Outro aspecto observado no gráfico é que a densidade de empacotamento experimental foi superior à densidade de empacotamento real, com diferenças variando entre 11% e 16%, sendo a maior discrepância registrada para as areias mais finas.

Ao comparar os valores obtidos para a densidade de empacotamento real modificada (Equação 20) com os valores experimentais, observa-se que, embora ainda inferiores aos

experimentais, apresentam um erro menor, variando entre 2,5% e 9,1%. Dessa forma, a densidade de empacotamento real modificada demonstrou maior precisão em relação à obtida pelo método CPM. Essa maior precisão provavelmente se deve ao fato de que o modelo modificado, conforme descrito na Equação 11, considera alguns aspectos físicos não abordados pelo método CPM, como o fator de forma e a esfericidade dos grãos da areia matriz analisada. Isso ocorre porque a fórmula inclui a relação entre a densidade aparente e a densidade específica do material, permitindo uma representação mais realista das características do empacotamento.

Na Figura 46, pode-se ver a correlação entre as densidades de empacotamento obtidas de diferentes maneiras, incluindo a experimental, e seus respectivos coeficientes de uniformidade.

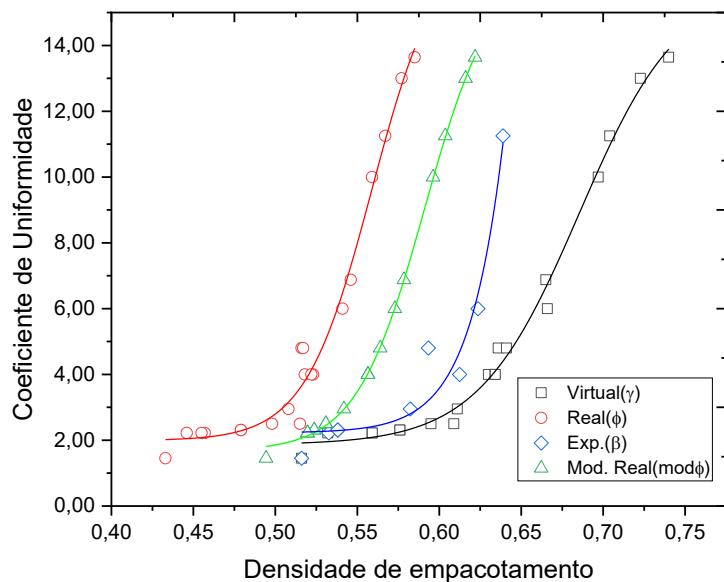


Figura 46- Relação entre os coeficientes de uniformidade e as densidades de empacotamento.

As variações das curvas permaneceram dentro dos limites assintóticos da densidade de empacotamento, situando-se entre 0,43 e 0,74, e do coeficiente de uniformidade, variando entre 1,50 e 14,00. Conforme esperado, a curva derivada dos valores calculados pela equação 20 apresentou-se mais próxima dos resultados experimentais do que a curva referente à densidade de empacotamento real obtida pelo modelo CPM. O desvio aparente do comportamento sigmoidal da curva gerada a partir dos dados experimentais (β) deve-se ao fato de que esses valores experimentais foram obtidos apenas para areias com até seis classes de grãos, enquanto as demais curvas consideram sete classes.

Entre os fatores que contribuem para o erro do modelo CPM está a utilização de um índice de compactação K uniforme para todas as classes de grãos, embora partículas com diferentes diâmetros respondam de maneira distinta às forças de compressão (FENNIS, 2011). Além disso, as equações do modelo CPM que tratam da interação entre os grãos apresentam distorções à medida que o diâmetro dos grãos diminui, especialmente para partículas menores que 125 μm (CAMPOS *et al.*, 2020; ROQUIER, 2016). Para esses grãos finos, de tamanho e massa reduzidos e grande área superficial, pode ocorrer aglomeração causada por forças de coesão (DAMINELI *et al.*, 2017; KWAN e FUNG, 2009). Nesses casos, forças como as de Van der Waals, cargas eletrostáticas e ligações químicas tornam-se predominantes, em detrimento dos efeitos de parede e desagregação considerados pelo modelo (FENNIS, 2011; PARTELI *et al.*, 2014).

Adicionalmente, como já mencionado, o modelo CPM não considera certos parâmetros físicos dos grãos e suas interações dentro do conjunto granular (ROQUIER, 2023; WONG e KWAN, 2014), o que explica por que esses efeitos são capturados de forma mais precisa na determinação experimental da densidade de empacotamento.

Para investigar o impacto da finura dos grãos que compõem os compostos granulares na aplicação do modelo CPM, a Figura 47 correlaciona a diferença entre os valores de densidade de empacotamento real obtidos por este modelo e os valores experimentais, em função do módulo de finura dos compostos. A mesma figura também apresenta a correlação entre as densidades de empacotamento calculadas pelo modelo proposto e o módulo de finura dos conjuntos

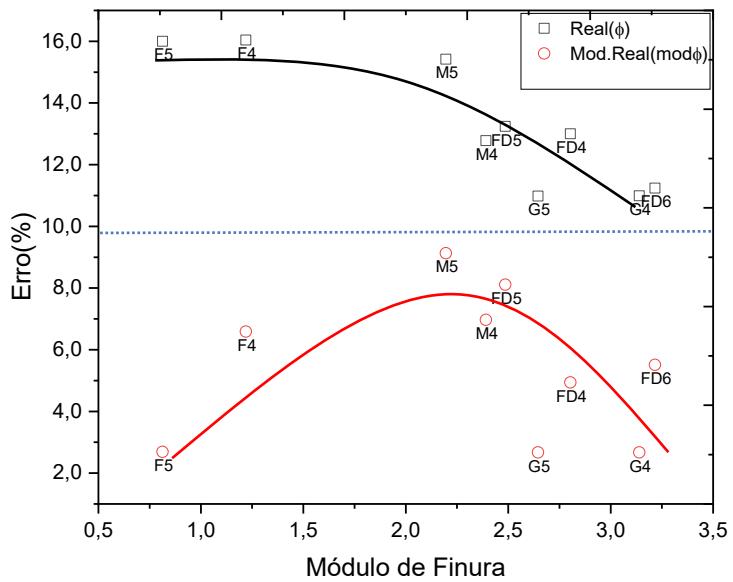


Figura 47- Módulo de Finura versus Erro normatizado entre os valores experimentais e os obtidos por modelos teóricos: (Preto): modelo CPM e (Vermelho): Modelo real modificado

Como pode ser observado, há uma forte correlação entre o módulo de finura do conjunto granular e o erro nos valores de densidade de empacotamento real obtidos pelo modelo CPM. Fica evidente que, quanto maior o módulo de finura do conjunto, mais precisos são os resultados fornecidos pelo modelo, pois a interação entre partículas mais grossas tende a ser melhor representada pela sua formulação (DU *et al.*, 2022).

No que diz respeito ao modelo proposto, os conjuntos granulares finos apresentaram boa precisão, provavelmente porque esse modelo incorpora aspectos físicos dos grãos em sua formulação, utilizando a densidade de empacotamento da areia original. Dessa forma, ele contempla fenômenos que não são devidamente abordados pelo modelo CPM.

Embora alguns autores recomendem adaptações no uso do modelo CPM para aplicações específicas (CAMPOS *et al.*, 2020; MUHADDEER *et al.*, 2023; ROQUIER, 2017), eles reconhecem que, apesar das limitações inerentes a um modelo teórico, o método pode ser utilizado com confiabilidade, uma vez que considera o processo de compactação e apresenta bons resultados tanto para grãos arredondados quanto para angulosos.

4.3 Resultados dos ensaios realizados nas argamassas no estado fresco.

Após a realização dos ensaios mencionados na metodologia relativos às argamassas em seu estado fresco, de forma que as argamassas F4, M4, G4 e M5 com traço 1:2:8 (cimento, cal

e areia) e M4-10 com traço 1:2:10 (cimento, cal e areia), obteve-se os resultados apontados na Tabela a seguir:

Tabela 16- Resumo dos resultados dos ensaios das argamassas estudadas no estado fresco.

PROPRIEDADES	ARGAMASSAS				
	F4	M4	G4	M5	M4-10*
Coeficiente de Uniformidade da areia (CU)	1,45	2,95	2,31	4,00	2,95
Módulo de Finura da areia (MF)	1,22	2,39	3,14	2,20	2,39
Dens. de Empacotamento da areia (β)	0,52	0,58	0,54	0,61	0,58
Peso material seco (kg)	2,52	2,79	2,61	2,91	3,39
Aglomerante/Agregado	0,18	0,16	0,18	0,15	0,13
Teor de ar incorporado (%)	3,64	3,26	4,45	0,82	2,54
Fator Água/Cimento	2,92	2,27	2,03	2,33	2,65
Consistência (mm)	260	260	260	260	260
Fator Água/Sólidos	0,24	0,17	0,160	0,164	0,161
Massa Específica (kg/m³)	1.943,9	2.071,90	2.064,47	2.129,06	2.097,43

* Argamassa moldada com areia M4, porém no traço 1:2:10

Inicialmente, para ilustrar os efeitos da variação da distribuição granulométrica das areias no comportamento das argamassas, bem como a implicância em aumentar o volume de em sua dosagem, foram elaborados os gráficos seguintes. O primeiro gráfico apresenta a correlação entre a densidade de empacotamento do agregado com a massa específica no estado fresco da argamassa.

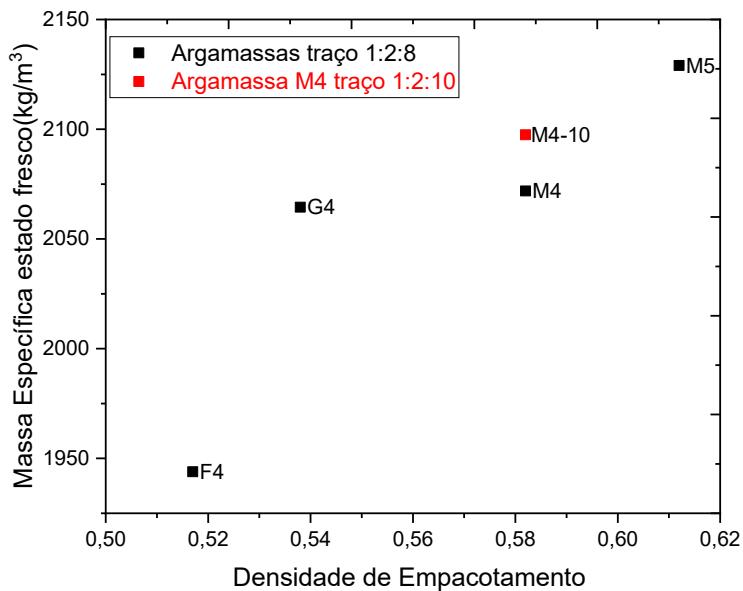


Figura 48- Relação entre a densidade de empacotamento do agregado e a massa específica no estado fresco da argamassa.

A partir do gráfico acima é possível concluir que as argamassas no traço 1:2:8 elaboradas com areias que apresentam maior densidade de empacotamento apresentam maiores massa específica, como previsto em Tristão (2005) variando neste caso a massa específica entre M5 (maior) e F4 (menor) cerca de 9,5%. Além disso, observou-se que a argamassa de traço 1:2:10 composta pela areia M4 apresenta maior massa específica que a argamassa M4 com traço 1:2:8.

Em seguida foi realizada a análise da variação da densidade de empacotamento dos agregados e a relação aglomerante/agregado das argamassas obtidas em massa.

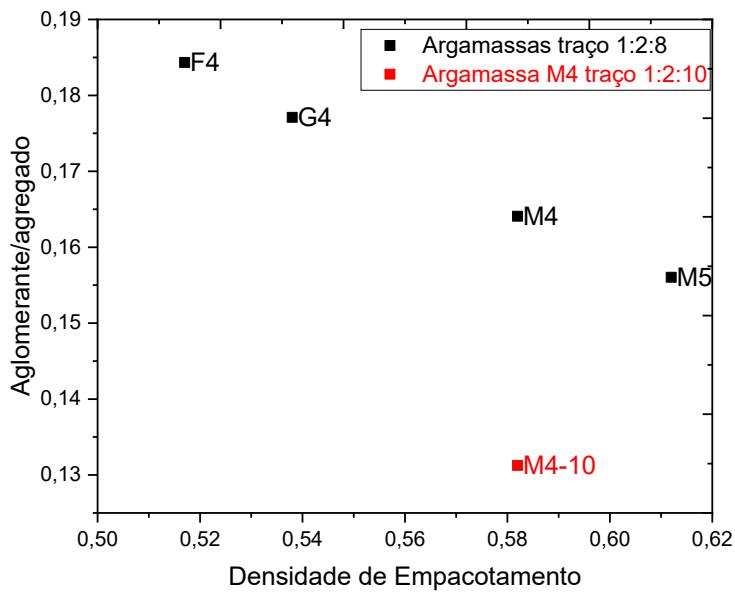


Figura 49- Relação entre a densidade de empacotamento do agregado e o fator aglomerante/agregado das argamassas.

Como pode ser observado, a densidade de empacotamento da areia influencia diretamente o consumo de aglomerante nas argamassas com o mesmo traço, de modo que a argamassa que utiliza agregado com maior índice de vazios (F4) apresenta uma maior relação de consumo de aglomerante, conforme previsto e demonstrado décadas atrás por Selmo (1989) e Carneiro (1999). Outro aspecto esperado é que a argamassa M4-10, que contém 10 partes de agregado em seu traço, apresenta um teor de aglomerante por agregado significativamente menor, devido ao maior volume de areia na composição.

Destaca-se que este estudo evidencia a possibilidade de otimizar o custo de produção das argamassas, nas quais o cimento representa o componente de maior impacto, apenas por meio da otimização da granulometria da areia utilizada, buscando uma curva com maior coeficiente de uniformidade. Além disso, essa otimização traz benefícios ambientais importantes, pois contribui para a redução do consumo de cimento na construção civil.

Dando continuidade aos estudos, buscou-se estabelecer uma relação entre a densidade de empacotamento dos agregados e o teor de ar incorporado nas argamassas, conforme será demonstrado a seguir.

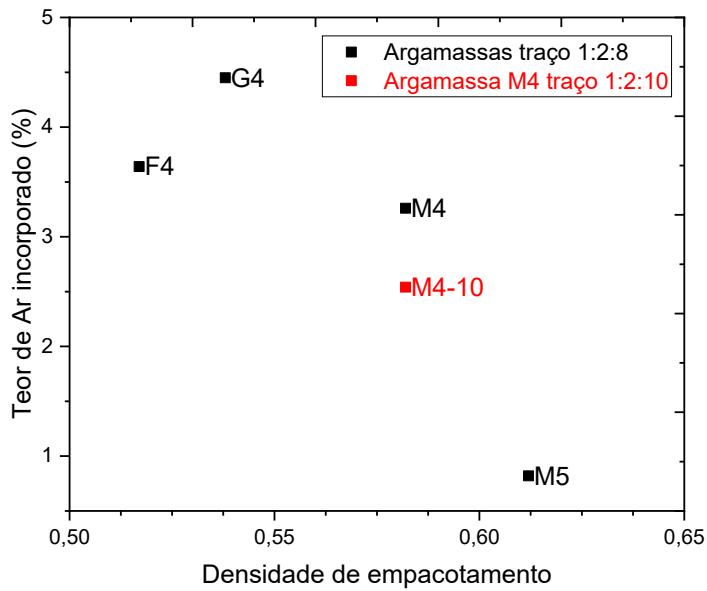


Figura 50- Relação entre a densidade de empacotamento do agregado e o teor de ar incorporado.

Conforme observado no gráfico acima, argamassas com o mesmo traço apresentam variações em função da granulometria do agregado utilizado. Nota-se uma tendência de que argamassas produzidas com areias mais uniformes apresentam um maior teor de ar incorporado. Assim como no estudo realizado por Tristão (1995), não foi possível chegar a uma conclusão definitiva sobre a influência da granulometria da areia no teor de ar incorporado da argamassa. No entanto, observa-se que, para areias com a mesma curva granulométrica, o teor de ar incorporado tende a aumentar quando a dosagem de areia na mistura é maior, como no caso em que o volume no traço variou de 8 para 10 partes.

Na esteira dos estudos, foi correlacionado a variação do consumo de água das argamassas para o mesmo índice de consistência no ensaio para aferir trabalhabilidade (*flow table*), variando a granulometria dos agregados utilizados, conforme demonstrado a seguir.

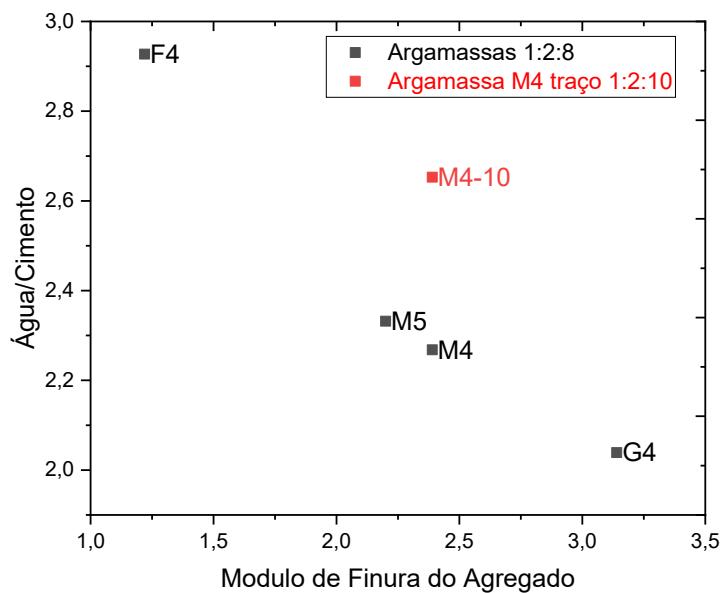


Figura 51- Relação entre o módulo de finura do agregado e o consumo de água para atingir consistência de 260mm no ensaio *flow table*.

O gráfico acima evidencia, como já era esperado, que a granulometria do agregado — especialmente o módulo de finura da areia utilizada na argamassa — influencia significativamente o consumo de água necessário para alcançar a mesma trabalhabilidade. Argamassas compostas por areias com módulo de finura mais elevado requerem menos água na mistura, o que impacta diretamente as propriedades da argamassa no estado endurecido (SELMO, 1989; CARNEIRO, 1999; TRISTÃO, 1995).

Outro aspecto observado foi que, entre as argamassas produzidas com a mesma areia, aquelas com maior dosagem de agregado apresentaram maior consumo de água. Ainda investigando o consumo de água em função do módulo de finura, realizou-se um estudo com argamassas no traço 1:2:8 para avaliar se o comportamento do consumo de água é semelhante quando considerado o cimento e os sólidos como um todo. Para isso, foi elaborado o gráfico a seguir.

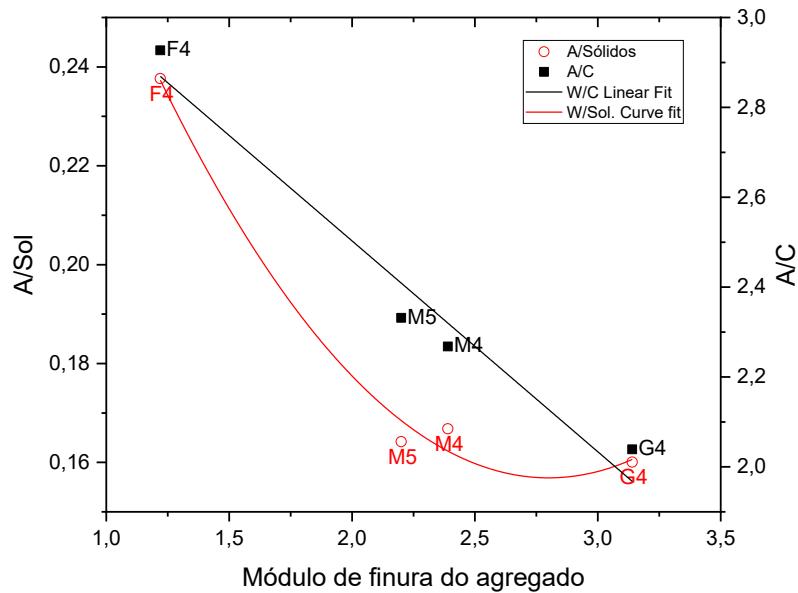


Figura 52- Relação entre o módulo de finura do agregado e o consumo de água para atingir consistência de 260mm no ensaio *flow table* em relação ao consumo de cimento e de sólidos.

Conforme observado no gráfico acima, se o comportamento do consumo de água em relação ao cimento apresenta comportamento linear, aumentando conforme diminui o módulo de finura, o consumo em relação aos sólidos totais apresenta comportamento curvo, pois areias com módulo finura semelhantes (M4 e M5) sofrem influência também do coeficiente de uniformidade da areia, uma vez que apesar de M4 ter módulo de finura ligeiramente superior ao M5 (8,60%), M5 apresentam coeficiente de uniformidade bem superior a M4 (35%) implicando em uma maior ocupação de sólidos.

Por fim, são apresentadas a distribuição de ocupação dos materiais e dos vazios nas argamassas estudadas, obtidas aplicando a metodologia apresentada por Quarcioni *et al.* (2009)

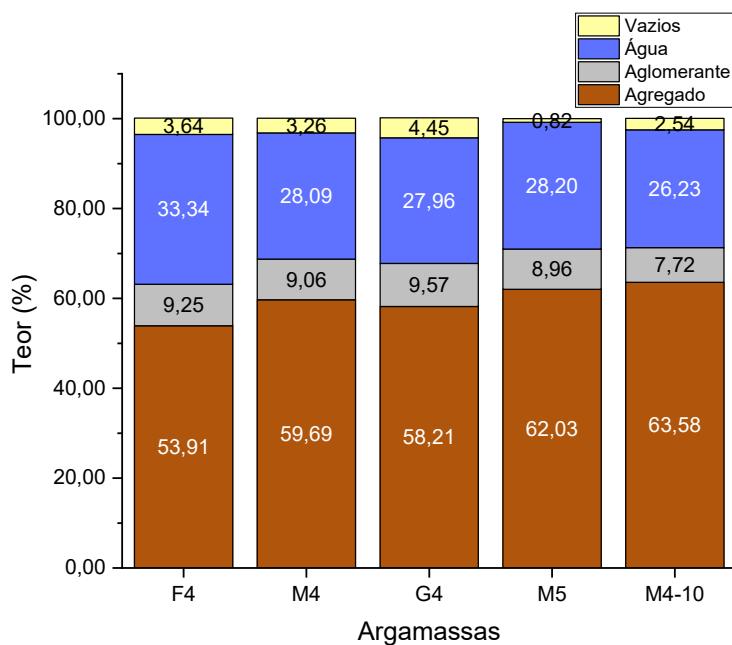


Figura 53- Ocupação dos materiais e vazios nas argamassas produzidas.

A figura acima ilustra que a argamassa M4-10, composta por 10 partes em volume de agregado, apresentou, como esperado, o maior teor de areia e de sólidos em sua composição.

Para as argamassas com traço 1:2:8, aquela produzida com o agregado M5, que possui maior densidade de empacotamento, apresentou maior volume de agregado, menor volume de ligante e menos vazios. Em contrapartida, a argamassa formulada com o agregado F4, que possui a menor densidade de empacotamento e o menor módulo de finura, exibiu menor teor de sólidos, maior consumo de cimento e uma relação água/ligante mais elevada, conforme previsto por Londero *et al.* (2021).

As argamassas que utilizaram a areia G4, apesar de apresentarem maior teor de vazios, registraram o menor fator água/cimento, devido ao maior módulo de finura do agregado empregado.

É importante ressaltar que não foram realizados estudos diretos correlacionando o índice de consistência com as características dos agregados. Esse índice, determinado por meio do ensaio na mesa de fluxo, foi mantido constante em 260 mm para todas as misturas. Como consequência, a quantidade de água variou entre as composições, mas o índice de consistência permaneceu o mesmo para todos os conjuntos de agregados.

4.4 Resultados dos ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido

Após a realização dos ensaios mencionados na metodologia relativos às argamassas em seu estado fresco, de forma que as argamassas F4, M4, G4 e M5 com traço 1:2:8 (cimento, cal e areia) e M4-10 com traço 1:2:10 (cimento, cal e areia), obteve-se os resultados apontados na Tabela abaixo.

Tabela 17- Resumo dos resultados dos ensaios das argamassas estudadas no estado endurecido.

PROPRIEDADES	ARGAMASSAS				
	F4	M4	G4	M5	M4-10*
Coeficiente de Uniformidade da areia (CU)	1,45	2,95	2,31	4,00	2,95
Módulo de Finura da areia (MF)	1,22	2,39	3,14	2,20	2,39
Densid. de Empacotamento da areia (β)	0,52	0,58	0,54	0,61	0,58
Resistência à compressão a 28 dias	1,15	1,78	2,25	1,71	1,21
Resistência à tração na flexão	0,57	1,00	1,21	0,87	0,75
Massa Específica (kg/m³)	1.636	1.853	1.865	1.883	1.844
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,58	6,74	7,74	6,31	5,82
Coeficiente de absorção por capilaridade (kg/m².h^{0,5})	3,33	2,56	2,64	2,44	2,70

* Argamassa moldada com areia M4, porém no traço 1:2:10

As primeiras propriedades das argamassas estudadas para o estado endurecido foram a resistência à compressão (f_c) a 28 dias e a resistência à tração na flexão (f_t), conforme gráfico a seguir:

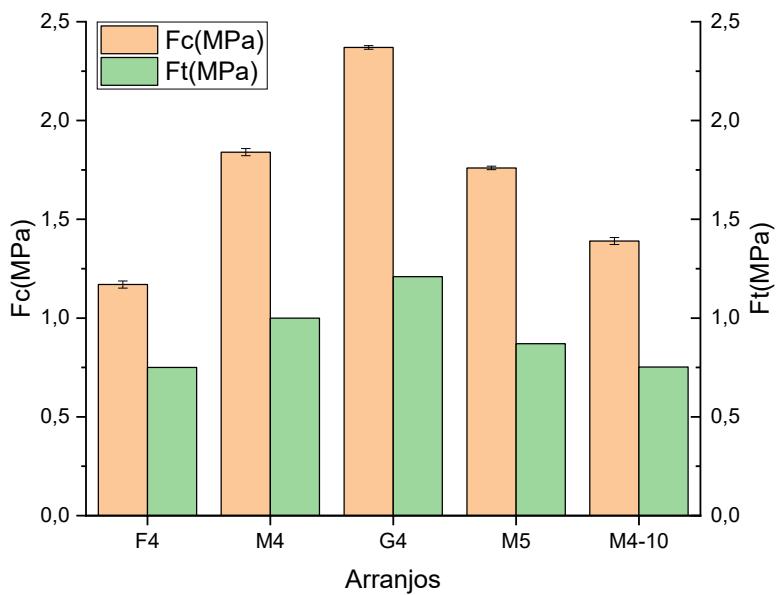


Figura 54- Resultados dos ensaios de resistência à compressão a 28 dias e de tração à flexão das argamassas.

Conforme observado na figura acima, a argamassa que apresentou a maior resistência à compressão aos 28 dias, bem como à tração na flexão, foi aquela composta pela areia G4. Por outro lado, a argamassa com menor resistência foi a formulada com o agregado F4. Além disso, ao comparar a argamassa com traço 1:2:10 com a de traço 1:2:8, utilizando o mesmo agregado, verifica-se que a primeira apresenta menores resistências tanto à compressão quanto à tração na flexão.

A variação entre o valor da resistência à compressão e da flexão à tração variou entre 61,57% a maior para argamassa M4-10 a 101% maior para argamassa F4. Considerando a Tabela 10 da NBR 13281-1:2023, que classifica as argamassas de revestimento em função da resistência à tração na flexão, pode-se considerar que todas as argamassas seriam classificadas como R2.

Aprofundando os resultados dos estudos relativos à resistência à compressão, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 55, o qual relaciona a resistência à compressão ao módulo de finura dos arranjos aplicados nas argamassas.

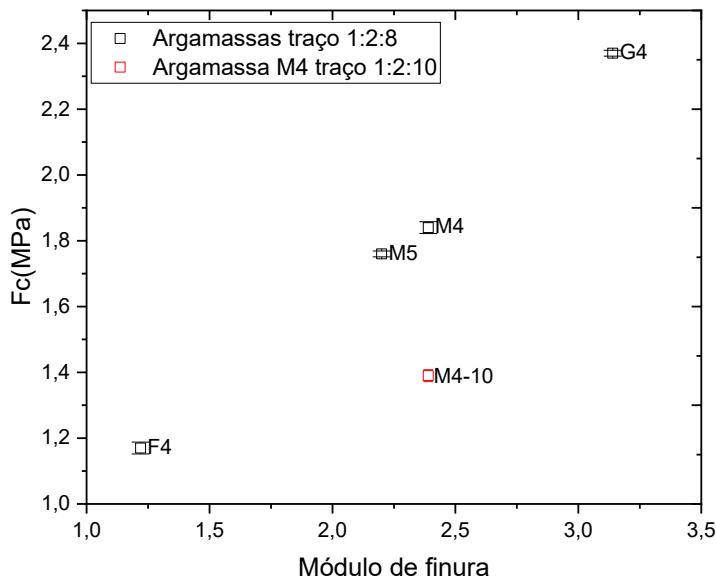


Figura 55- Relação entre resistência à compressão das argamassas aos 28 dias e o módulo de finura das areias utilizadas.

Ao analisar o gráfico, observa-se que o módulo de finura das areias influencia diretamente a resistência da argamassa. Argamassas produzidas com areias de menor módulo de finura tendem a apresentar redução na resistência. Isso ocorre principalmente porque areias com grãos menores possuem maior superfície de contato, exigindo um maior teor de água para atingir a trabalhabilidade desejada, o que, por sua vez, diminui a resistência à compressão da argamassa (TRISTÃO, 2005).

Outro ponto observado foi que a argamassa M4-10, composta por 10 partes de areia, apresentou resistência à compressão inferior à da argamassa M4, que utiliza a mesma areia, porém com apenas 8 partes. Esse resultado é explicado pela necessidade de maior quantidade de água para alcançar a trabalhabilidade desejada, fixada em 260 mm no ensaio do *flow table*.

Além disso, foi estudada a correlação entre a resistência à compressão e à tração na flexão nas argamassas, buscando compreender melhor a relação entre essas propriedades mecânicas.

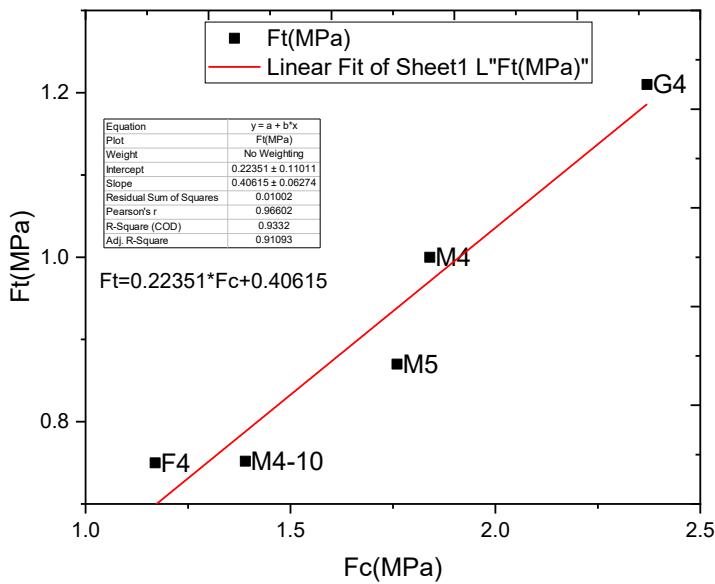


Figura 56- Relação entre resistência à compressão e à tração na flexão.

A partir do gráfico acima, pode-se concluir que a resistência à tração na flexão é proporcional à resistência à compressão, apresentando uma correlação linear de acordo com a equação apresentada, muito semelhante àquela descrita por Haddad (2020) para areia natural.

É importante destacar que as argamassas com quatro classes granulométricas de agregado exibiram um comportamento completamente linear, enquanto M5 e M-10 apresentaram um comportamento ligeiramente divergente.

Essa correlação pode ser útil em casos em que apenas os dados de resistência à compressão estão disponíveis para argamassas mistas produzidas com areia natural, auxiliando na estimativa da resistência à flexão.

Ainda estudando os valores de resistência, foi elaborado o gráfico a seguir correlacionando o fator água/cimento das argamassas com suas respectivas resistências à compressão aos 28 dias.

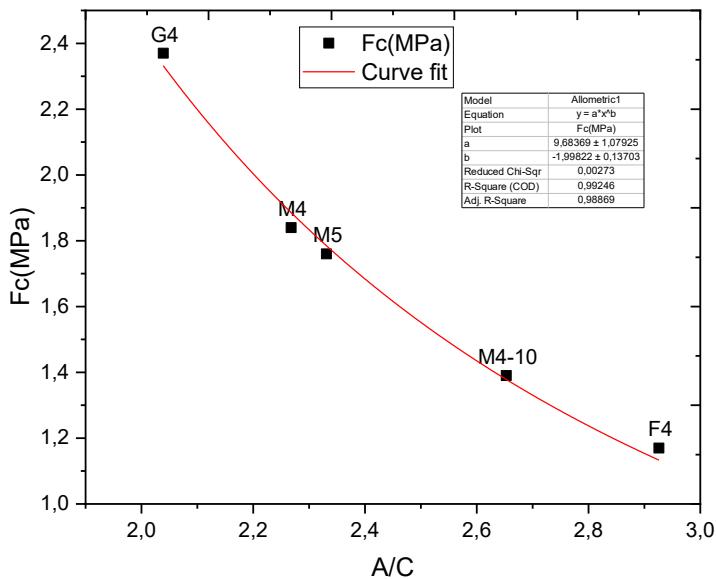


Figura 57- Relação entre resistência à compressão das argamassas aos 28 dias e o fator água cimento destas.

Ao analisar a correlação entre o fator água/cimento das argamassas, mantidas com a mesma trabalhabilidade, e suas respectivas resistências à compressão, observa-se, como esperado, que quanto menor o fator A/C, maior a resistência à compressão, confirmando a validade da Lei de Abrams (DAMINELI *et al.*, 2017; RAO, 2001; SCHUTTER e POPPE, 2004). Destaca-se que as argamassas com menor fator água/cimento foram justamente aquelas que utilizaram areias com menor módulo de finura.

O próximo passo deste estudo foi analisar o módulo de elasticidade das argamassas, estabelecendo correlações com as propriedades das areias empregadas.

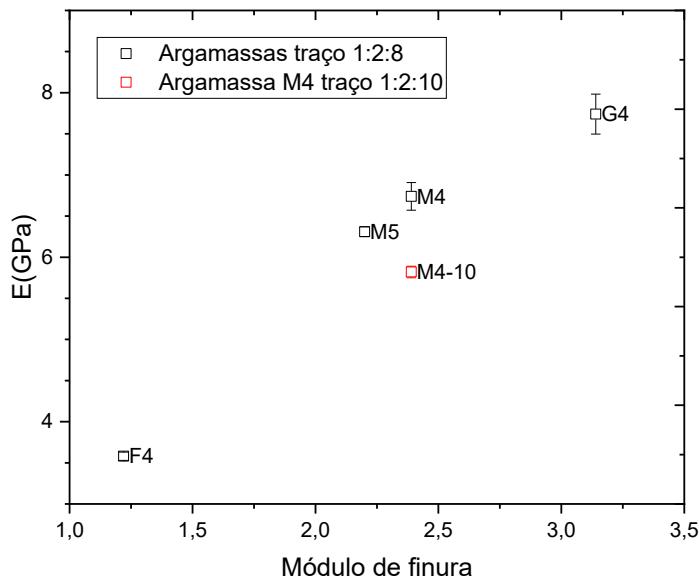


Figura 58- Relação entre módulo de finura das areias utilizadas nas argamassas e seus respectivos módulos de elasticidade.

A partir do gráfico acima, pode-se concluir que argamassas elaboradas com areias que apresentam menor módulo de finura apresentam menor módulo de elasticidade, influenciando mais que o coeficiente de uniformidade dos agregados, como apresentando em Santos (2014). A argamassa composta pela areia G4, que possui maior módulo de finura, é que apresentam maior módulo de elasticidade. Além disso, observa-se que argamassa elaborada com 10 porções de areia em seu traço, M4-10, apresentam menor módulo de elasticidade que uma argamassa feita no traço 1:2:8 de mesma areia.

De acordo com a norma ABNT NBR 13281-1:2023 as argamassas F4, M5 e M4-10 seriam classificadas como E4, enquanto M4 e G4 seriam classificadas como E3.

Em seguida, em relação às propriedades físicas, inicialmente, foi estudado comportamento da massa específica no estado endurecido das argamassas em relação às propriedades dos agregados aplicados.

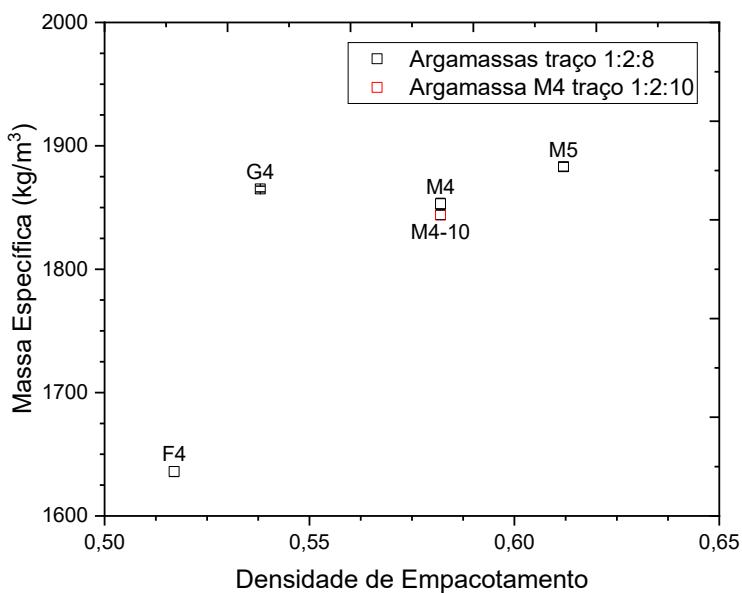


Figura 59- Correlação da densidade de empacotamento das areias utilizadas nas argamassas e suas respectivas massas específica.

Como se pode observar na figura acima, conclui-se que quanto maior a densidade de empacotamento (e, portanto, maior o coeficiente de uniformidade) do agregado utilizado na argamassa, maior tende a ser a sua massa específica. Isso ocorre principalmente devido à presença de agregados cuja granulometria, com maior coeficiente de uniformidade, resulta em um menor índice de vazios (TRISTÃO, 2005). Também foi observado que a argamassa M4-10, que contém 10 porções de areia em seu traço, apresenta uma massa específica ligeiramente inferior à da argamassa M4, que foi produzida com o traço 1:2:8.

De acordo com a norma ABNT NBR 13281-1:2023 a argamassa F4 seria classificada como DE4, enquanto as demais seriam classificadas em DE3.

Aproveitando o estudo, foi elaborado o gráfico relacionando a massa específica da argamassa com o módulo de finura das areias utilizadas em sua formação.

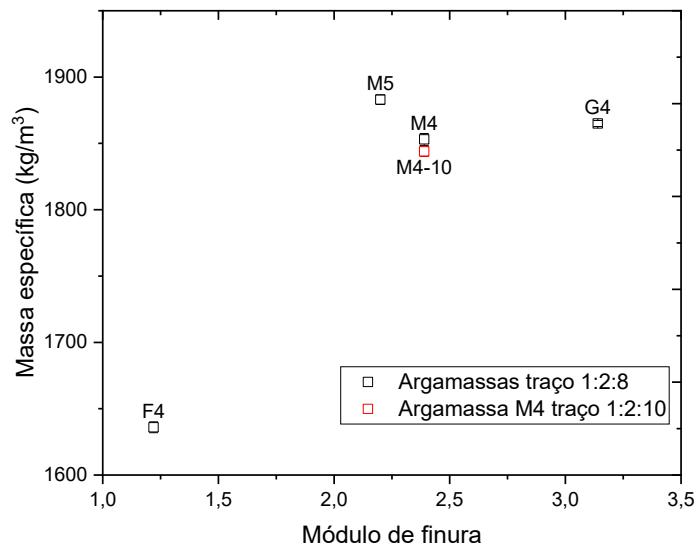


Figura 60- Correlação do módulo de finura das areias utilizadas nas argamassas e suas respectivas massas específica.

De acordo com o gráfico acima, observa-se que as argamassas elaboradas com areia que apresentam maior módulo de finura tendem a ter maior massa específica no estado endurecido. No entanto, fica claro que, como já mencionado, a densidade de empacotamento das areias também influencia essa propriedade. Por isso, a argamassa M5, apesar de ter um módulo de finura menor do que a argamassa G4, apresenta uma massa específica maior.

Outra propriedade física estudada, extremamente relevante para as argamassas de revestimento, foi a absorção por capilaridade das argamassas, conforme figura a seguir.

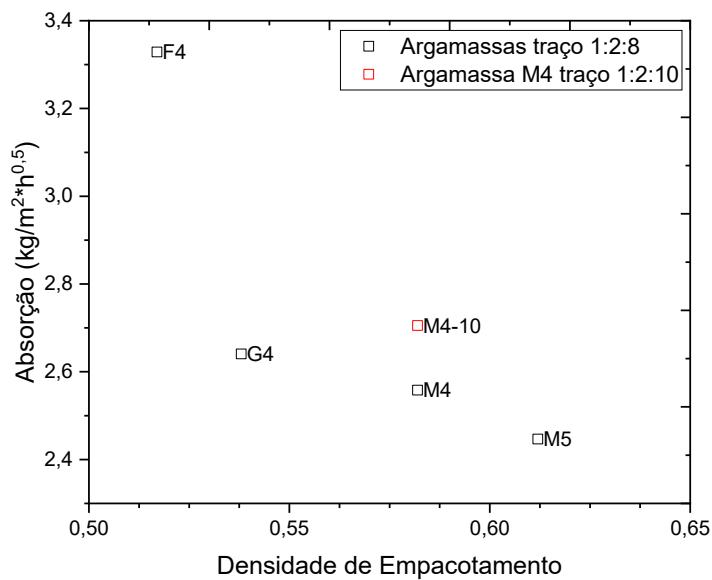


Figura 61- Relação entre densidade de empacotamento dos agregados e coeficiente de absorção por capilaridade das argamassas.

A partir do gráfico acima, observa-se que argamassas com maior densidade de empacotamento — e, consequentemente, maior coeficiente de uniformidade — tendem a apresentar menor coeficiente de absorção por capilaridade. Esse fenômeno ocorre porque as argamassas produzidas com areias que possuem menores índices de vazios apresentam menos espaços porosos, reduzindo assim a capacidade de absorção de umidade (TRISTÃO, 1995; CARNEIRO, 1999). Outro ponto observado é que a argamassa formulada com 10 porções de areia em seu traço (M4-10) teve maior absorção de água por capilaridade em comparação à argamassa M4, que contém 8 porções de agregado.

Segundo a norma ABNT NBR 13281-1:2023, a argamassa M5 seria classificada como W6, enquanto as demais seriam classificadas como W5.

Por fim, após a realização dos ensaios e a apresentação dos gráficos referentes à macrocaracterização das argamassas confeccionadas com traço 1:2:8 (cimento, cal e areia) utilizando areias com curvas granulométricas distintas, todas com a mesma trabalhabilidade, foram elaborados os gráficos de radar a seguir. Neles, estão evidenciados os efeitos do aumento do módulo de finura e do coeficiente de uniformidade dos agregados utilizados nas argamassas sobre suas propriedades, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

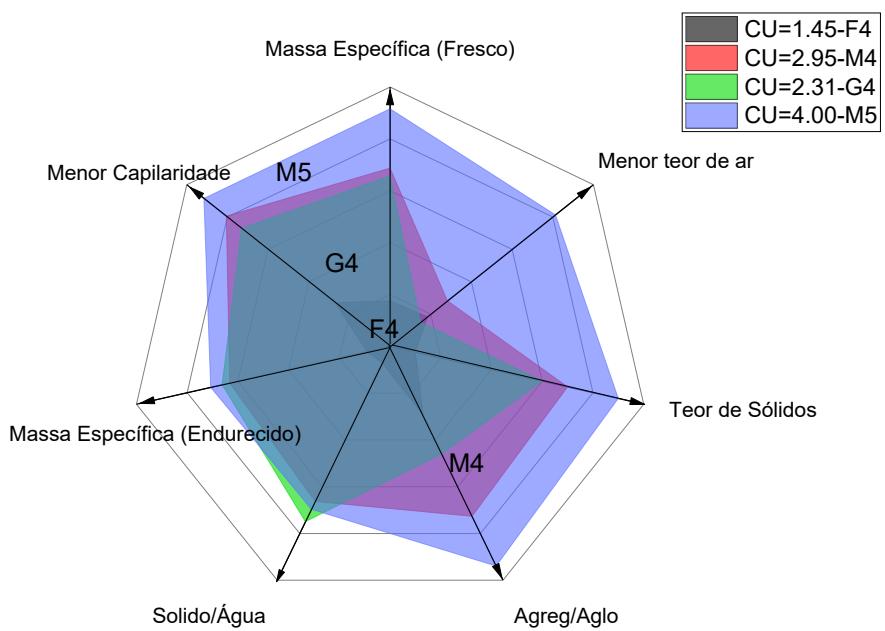


Figura 62- O gráfico radar apresenta o efeito da variação do coeficiente de uniformidade dos agregados sobre as propriedades estudadas. (roxo): Argamassa com agregado com 5 classes e granulometria média; (Vermelho): Argamassa com agregado com 4 classes e granulometria média; (Verde): Argamassa com agregado com 4 classes granulometria mais grosseira; (Preto): Argamassa com agregado com 4 classes e granulometria mais fina.

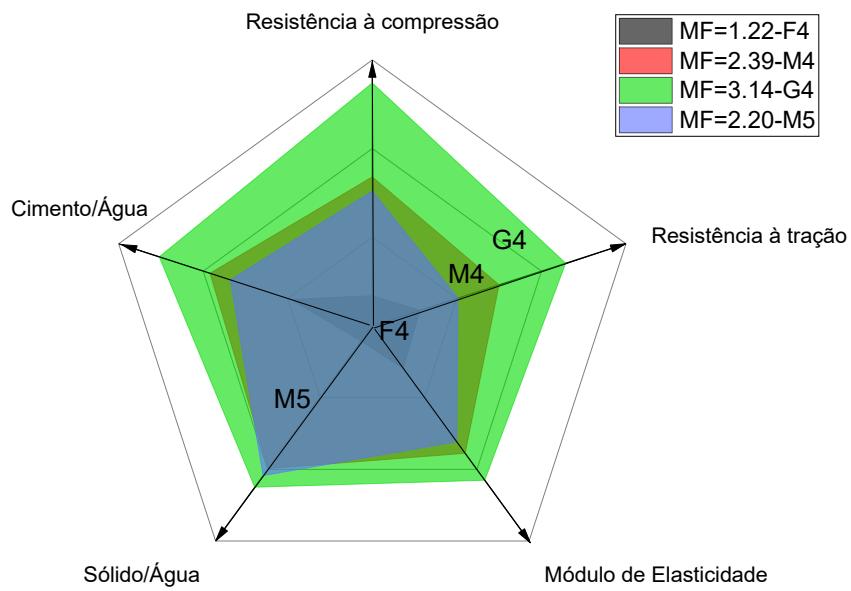


Figura 63- O gráfico radar apresenta o efeito da variação do módulo de finura dos agregados sobre as propriedades estudadas. (roxo): Argamassa com agregado com 5 classes e granulometria média; (Vermelho): Argamassa com agregado com 4 classes e granulometria média; (Verde): Argamassa com agregado com 4 classes granulometria mais grosseira; (Preto): Argamassa com agregado com 4 classes e granulometria mais fina.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 62 e 63, fica evidente que ambas as características dos agregados miúdos influenciam as propriedades da argamassa tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. As propriedades físicas da argamassa são influenciadas principalmente pelo coeficiente de uniformidade do agregado, enquanto as propriedades mecânicas estão mais correlacionadas com o módulo de finura dos agregados.

Para apresentar o impacto do aumento do volume de agregados nas argamassas mistas, mantendo o conteúdo de aglomerante, foi criada a Figura 64. Ela resume o comportamento das propriedades da argamassa produzida ao alterar o traço de 1:2:8 (M4) para 1:2:10 (M4-10) para o mesmo agregado, incluindo a variação do custo.

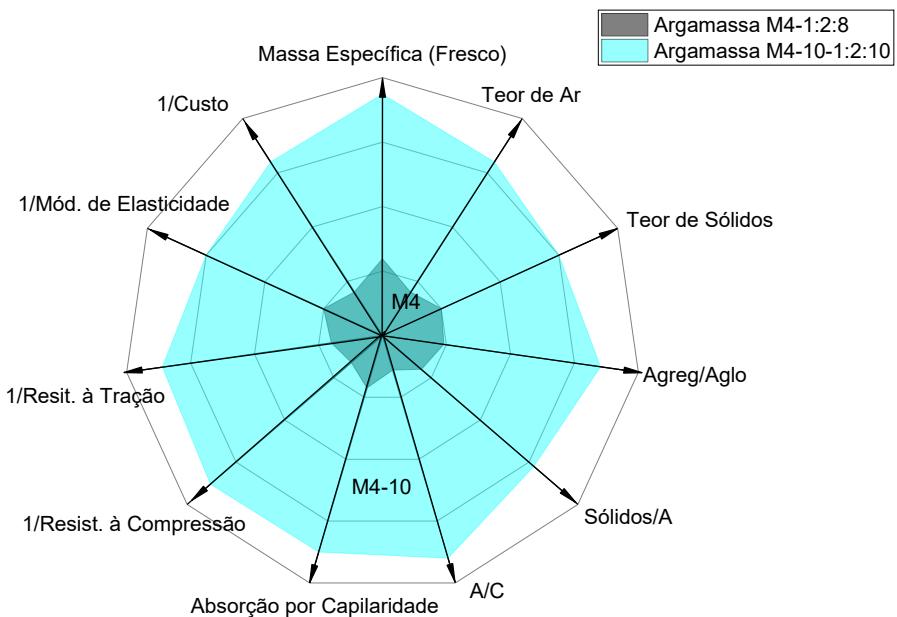


Figura 64- Gráfico radar apresentando o efeito nas propriedades da argamassa da variação do volume de agregado (M4-10 x M4). (Preto): Argamassa com agregado com 4 classes e granulometria média e traço 1:2:8; (Cian): Argamassa com agregado com 4 classes e granulometria média e traço 1:2:10.

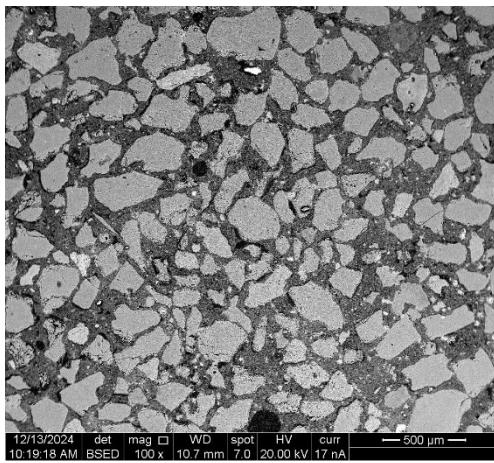
Como se pode observar acima, pode-se observar que o aumento do volume de agregado na mistura da argamassa, mantendo o teor de aglomerante, resulta em melhorias em algumas propriedades no estado fresco, particularmente no aumento de volume devido ao maior teor de sólidos. Isso implica em um custo menor para a produção por metro cúbico de argamassa. No entanto, também é evidente que, com o aumento do conteúdo de agregado, houve um prejuízo nas propriedades mecânicas da argamassa, além de um aumento na sua absorção capilar, o que é indesejável, especialmente para argamassas de revestimento. Esse fenômeno ocorre principalmente pela necessidade de adicionar mais água à mistura da M4-10 para alcançar o mesmo índice de trabalhabilidade observado na M4.

4.5 Resultados da microcaracterização das argamassas estudadas.

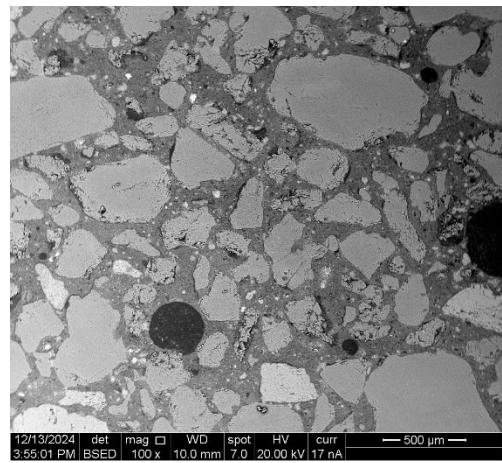
4.5.1 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

Para a análise das imagens e das informações extraídas do MEV, foram estudadas argamassas com traço 1:2:8 (cimento, cal e areia) utilizando areias de granulometria diversa (F4, M4, G4 e G5), além de argamassa moldada no traço 1:2:10 com areia de granulometria M4, argamassa moldada com traço 1:2:12 e argamassa industrializada.

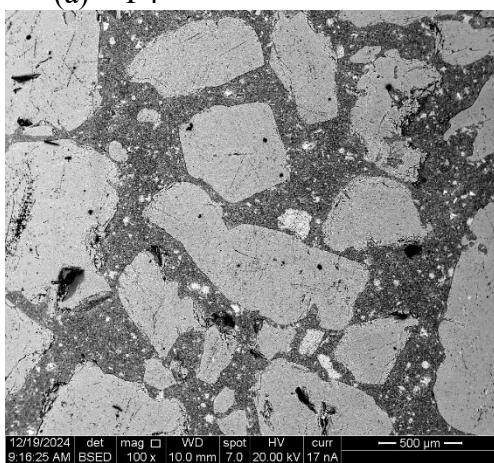
Para a comparação das caracterizações das argamassas, foram coletadas imagens com magnificação distintas, sendo destacada a magnificação de 100 vezes para a visualização dos arranjos das sete argamassas produzidas. Para cada tipo de argamassa, foram capturadas imagens de três zonas distintas de cada amostra. A seguir, apresentam-se, a título de ilustração, imagens coletadas de cada uma das argamassas analisadas.



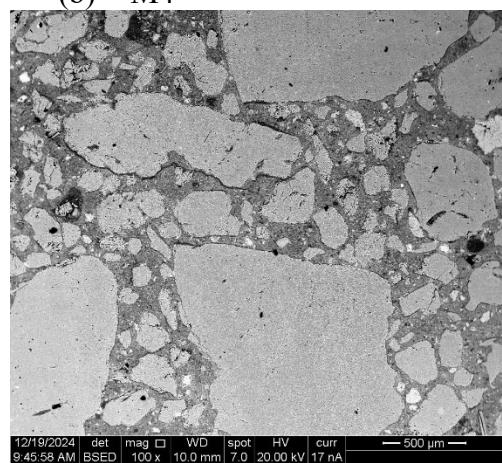
(a) – F4



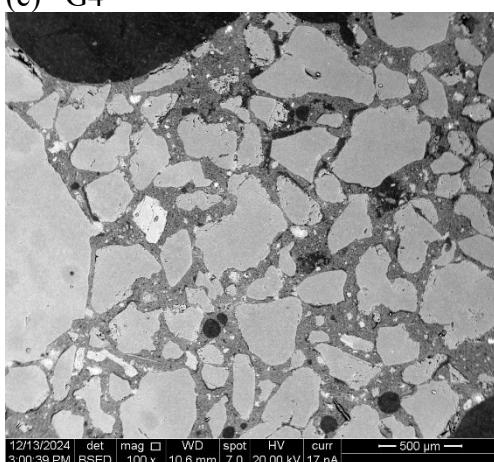
(b) – M4



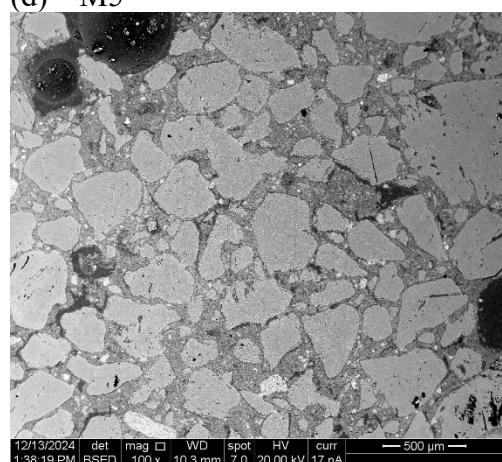
(c) – G4



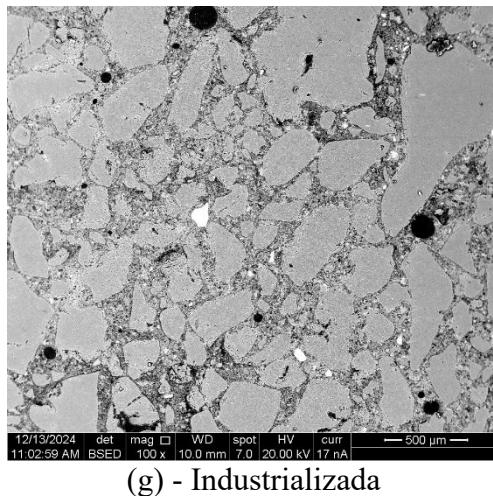
(d) – M5



(e) – M4-10



(f) - 1:2:12



(g) - Industrializada

Figura 65- Ilustração de uma das amostras de cada argamassa analisada pelo MAZE. (a) Argamassa moldada com areia fina com 04 classes e traço 1:2:8; (b) Argamassa moldada com areia média com 04 classes e traço 1:2:8; (c) Argamassa moldada com areia grossa com 04 classes e traço 1:2:8; (d) Argamassa moldada com areia média com 05 classes e traço 1:2:10; (e) Argamassa moldada com areia média com 04 classes e traço 1:2:10; (f) Argamassa moldada com areia natural e traço 1:2:12; (g) Argamassa industrializada;

Como pode ser observado, algumas características eram esperadas e confirmam os resultados obtidos na macrocaracterização. A argamassa F4 destaca-se por apresentar o maior teor de grãos de menor diâmetro e o menor módulo de finura dos agregados. Isso resulta em uma maior área de superfície de contato entre as partículas, o que, por sua vez, demanda maior quantidade de água para alcançar a mesma trabalhabilidade, refletindo em um fator A/C mais elevado. Por outro lado, a argamassa G4 possui maior concentração de grãos com diâmetros maiores e, conforme esperado, é composta por areia com módulo de finura superior. Essa característica fez com que ela exigisse menos água em comparação às demais argamassas com traço 1:2:8.

Outro aspecto claramente perceptível é a uniformidade dos grãos. A argamassa F4 (Figura 65(a)) apresenta maior uniformidade, evidenciada pelo seu menor coeficiente de uniformidade. Em contrapartida, as argamassas elaboradas com as areias M4 e M5 mostram agregados menos uniformes, especialmente a argamassa com areia M5, que possui cinco classes granulométricas distintas e uma curva com coeficiente de uniformidade superior ao das argamassas F4, G4 e M4, evidenciando uma maior variação no tamanho dos grãos.

Além disso, ao analisar as imagens, observa-se que as argamassas com traço 1:2:10 (Figura E) e 1:2:12 (Figura F) apresentam visualmente maior teor de agregado. Já a argamassa industrializada (Figura G) revela uma distribuição granulométrica menos uniforme, o que era

esperado, pois, sendo um produto industrializado, o fabricante provavelmente utiliza agregados com curva granulométrica otimizada para reduzir o consumo de cimento.

4.5.2 ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA

Para melhor ilustração da constituição química dos elementos que compõem as argamassas, serão apresentados a seguir resultados de microscopia associados à espectroscopia das amostras. Ressalta-se que para cada argamassa foram inspecionadas três zonas diferentes, porém para fins de ilustração, serão apresentados os resultados de uma das zonas de cada uma das sete argamassas estudadas. A seguir segue o resultado relativo à argamassa F4, enquanto as demais encontram-se no Anexo 1 do presente trabalho.

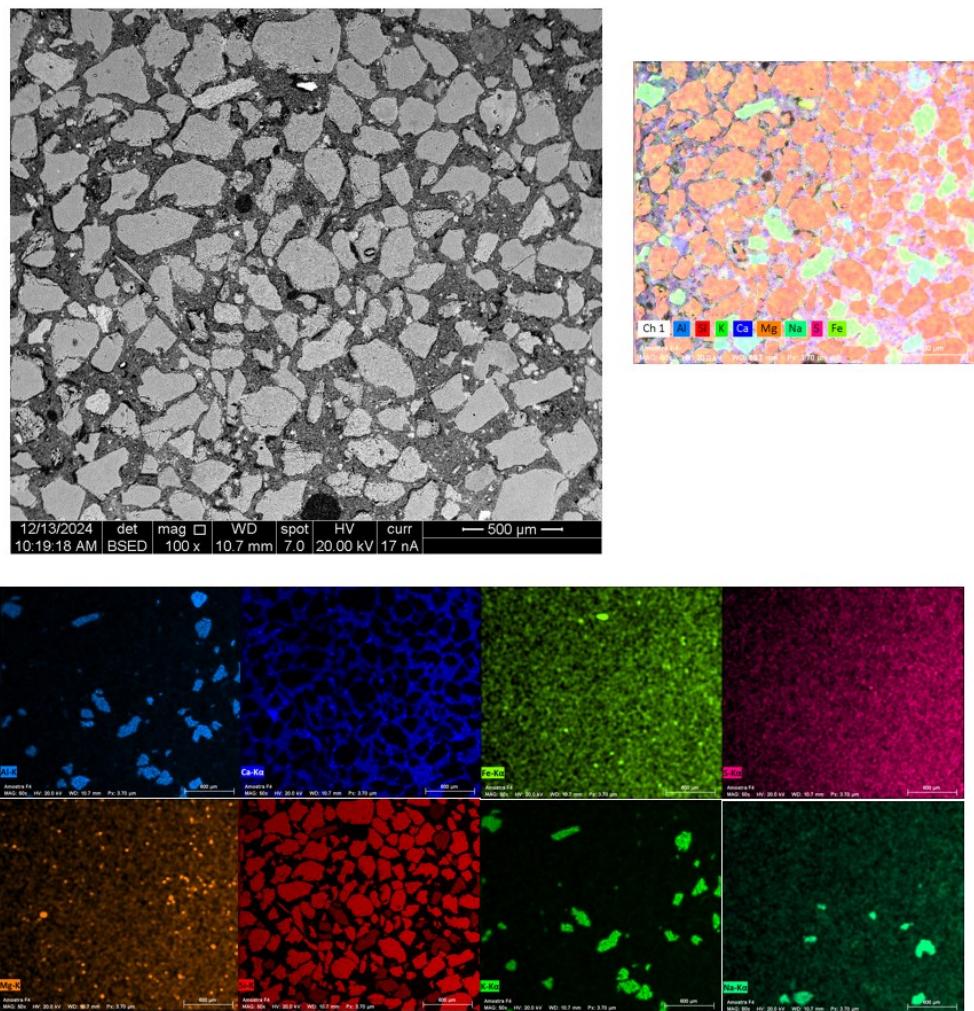


Figura 66- Imagem do EDS da argamassa F4

A partir dos resultados apresentados, observa-se, como esperado, que os elementos mais representativos nas argamassas analisadas são o cálcio (Ca), proveniente dos aglomerantes

(cimento e cal), e a sílica (Si), presente tanto nas areias de quartzo quanto no feldspato. No entanto, alguns aspectos chamaram a atenção neste estudo. Em particular, as argamassas F4, M4, G4 e M5 apresentaram teores detectáveis de alumínio (Al), potássio (K) e sódio (Na). Esses elementos, assim como o silício, têm origem no feldspato, que, apesar de estar presente em pequenas quantidades, compõe parte dos agregados extraídos do leito do rio.

Outro ponto relevante é a presença, ainda que em baixas concentrações, de ferro (Fe), magnésio (Mg) e enxofre (S), que podem ser atribuídos à composição do cimento utilizado na formulação das argamassas.

A análise das imagens capturadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), em diferentes magnificações e para três regiões distintas de cada amostra, aliada à análise por Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), revelou um fenômeno relevante no comportamento dos compostos formados por cálcio.

Embora, teoricamente, a pasta de cimento que envolve os agregados apresente grãos muito finos, com diâmetros inferiores a 75 μm (FENNIS, 2011), observou-se que, na prática, as argamassas mistas de revestimento compostas por cimento e cal como aglomerantes podem formar conglomerados devido à clusterização de partículas de cálcio. Esse processo resulta na geração de partículas com diâmetros significativamente maiores do que os grãos finos esperados. Esse fenômeno pode estar relacionado à falta de homogeneidade na mistura da argamassa ou às características específicas da cal utilizada. Conforme demonstrado nas Figuras 67 e 68, essa clusterização pode, eventualmente, levar à formação de partículas maiores do que os próprios agregados empregados na composição da argamassa.

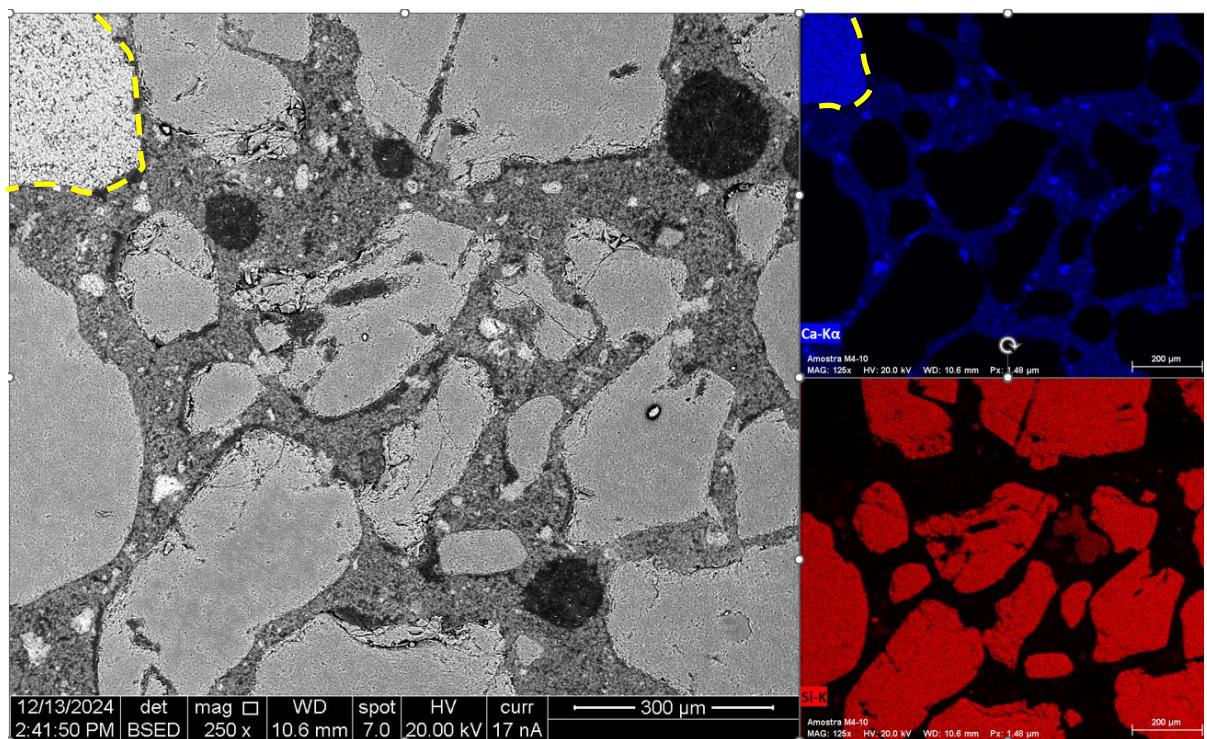


Figura 67- Imagem extraída do MEV com magnificação 250x de uma das argamassas confeccionadas, com sua composição de Ca e Si extraídas do EDS, observando a partícula formada de finos compostos Ca, bem como a formação de portlandita no entorno dos agregados (coloração mais clara).

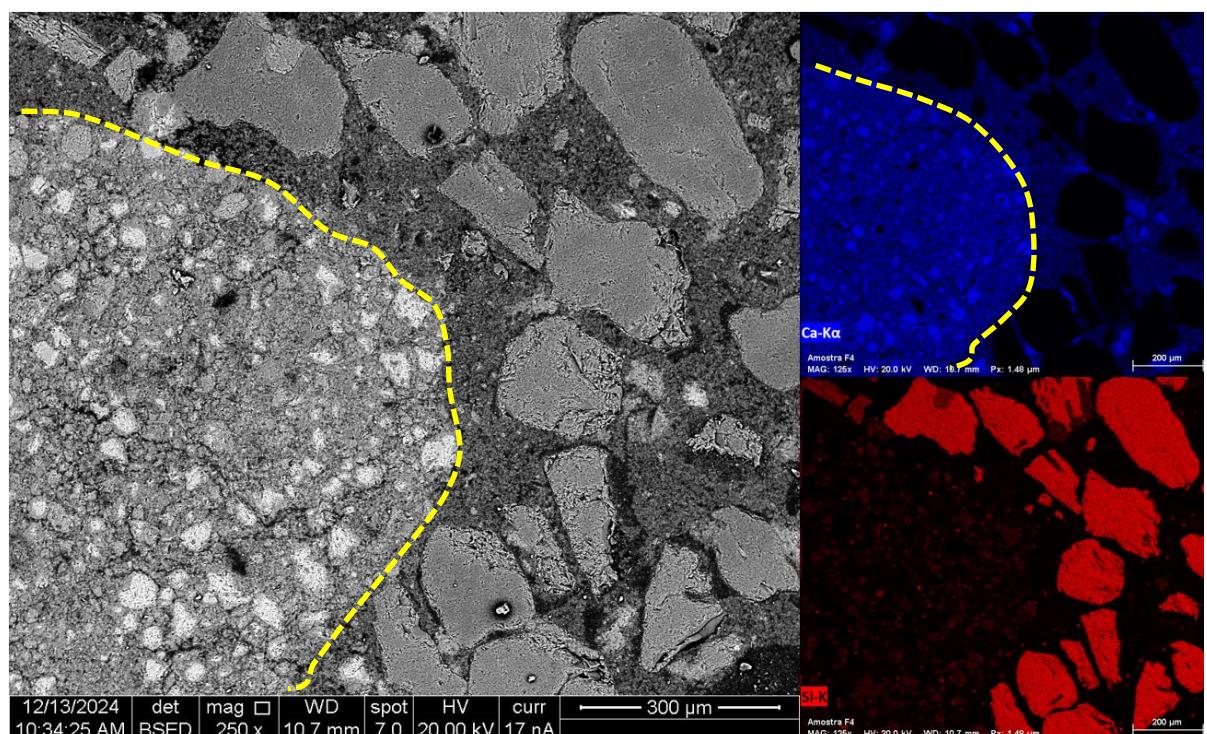


Figura 68- Imagem extraída do MEV com magnificação 250x de uma das argamassas confeccionadas, com sua composição de Ca e Si extraídas do EDS, observando a partícula formada de finos compostos Ca, bem como a formação de portlandita no entorno dos agregados (coloração mais clara).

Conforme ilustrado nas Figuras 67 e 68, as partículas finas resultantes da clusterização de compostos de cálcio (Ca) podem atingir dimensões superiores às de alguns agregados de sílica (Si) utilizados no traço. Esse fenômeno pode influenciar as propriedades da argamassa, especialmente aquelas relacionadas à variação da densidade de empacotamento dos agregados. Esse impacto tende a ser mais significativo quando a formação dessas partículas de cálcio ocorre com maior frequência na composição da argamassa mista de revestimento.

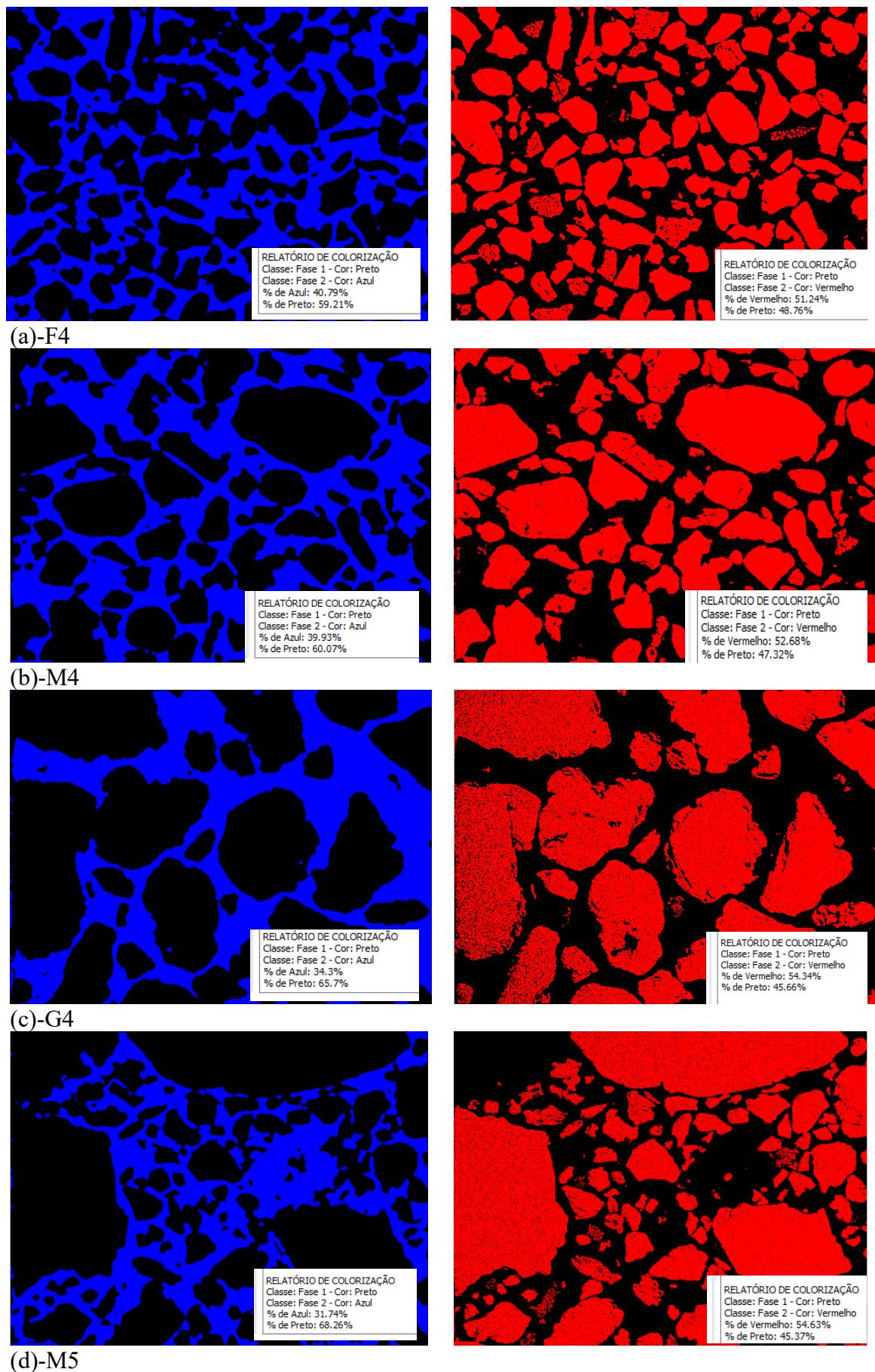
Além disso, as imagens obtidas por Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) evidenciam a clusterização de partículas finas de cálcio ao redor dos agregados (representadas pelas regiões mais claras nas figuras de Ca). Esse efeito ocorre devido à tendência de acúmulo de água na interface entre os agregados e a matriz cimentícia, fator essencial para o processo de hidratação das partículas de cálcio.

O processo nucleação das partículas de cálcio ocorre inicialmente com a dissolução destas em água (H_2O), transformando em portlandita ($Ca(OH)_2$) e posteriormente, com a presença de CO_2 transformando em calcário ($CaCO_3$), também identificado como calcita. Acontece que quando há a formação do portlandita no entorno dos agregados, em função da disponibilidade de H_2O , esta não necessariamente se transforma em calcita. Quando não há CO_2 suficiente para ocorrer a última etapa da nucleação, a partícula fica na forma de portlandita, que são justamente as clusterizações de finos destacada nas imagens.

A partir destes resultados pode-se destacar dois aspectos relacionados à produção de argamassas mistas de revestimentos: (i) a escolha de insumos com qualidade desejada, (ii) a importância da mistura dos componentes da argamassa para fins de obtenção de uma maior uniformização da pasta para que esta se comporte como previsto nos estudos de reologia das argamassas.

4.5.3 MULTI-ANALYSIS ZONNING EXPERT (MAZE)

A aplicação do MAZE nas imagens obtidas por Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), especialmente naquelas que indicam a presença de cálcio (Ca) e sílica (Si), permitiu a quantificação média do percentual desses elementos nas amostras analisadas. Destaca-se que, para cada argamassa, foram inspecionadas três zonas distintas. No entanto, para fins ilustrativos, serão apresentados a seguir os resultados referentes a uma das zonas de cada uma das sete argamassas estudadas.



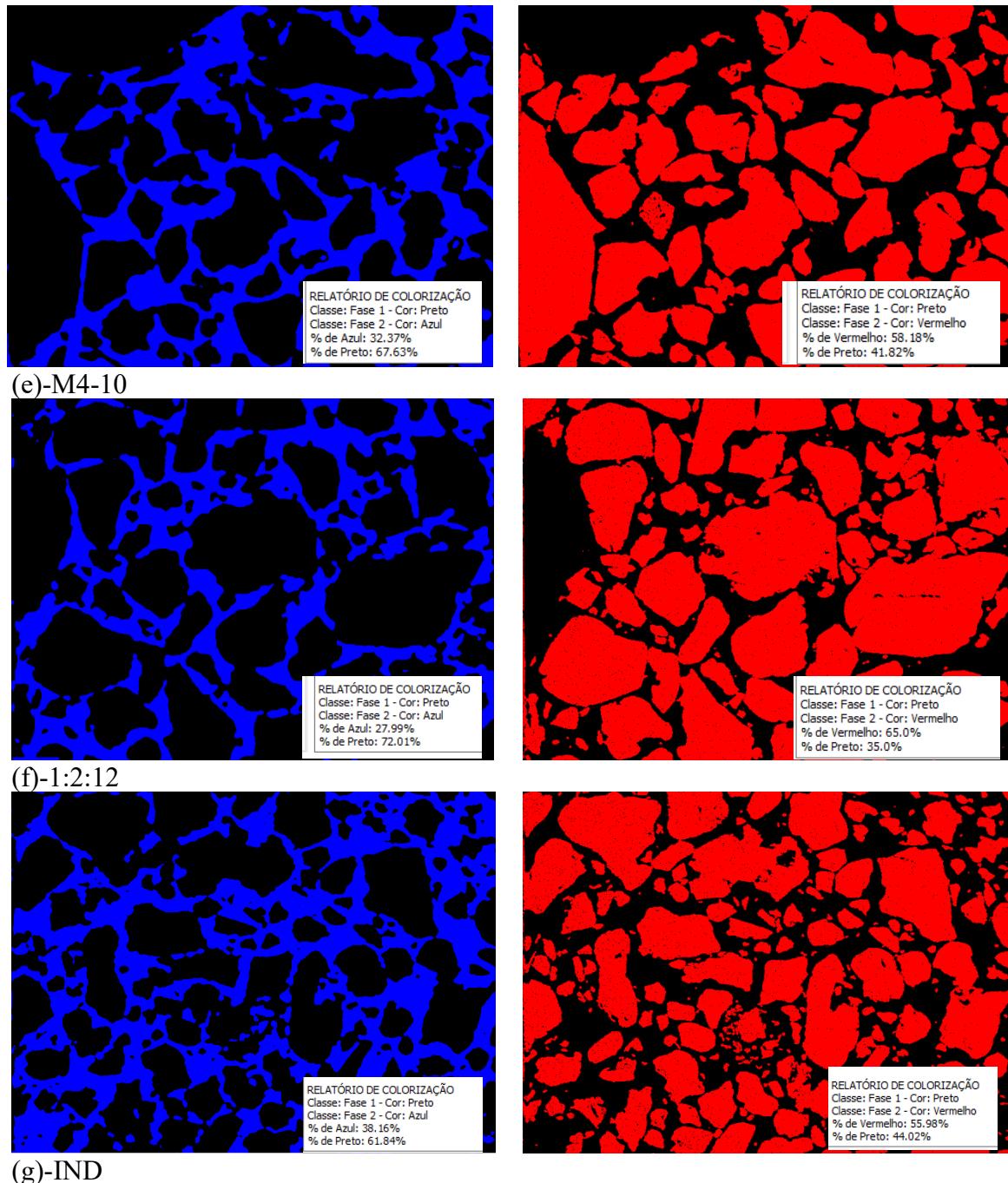


Figura 69- Ilustração de uma das amostras de cada argamassa analisada pelo MAZE. (a) Argamassa moldada com areia fina com 04 classes e traço 1:2:8; (b) Argamassa moldada com areia média com 04 classes e traço 1:2:8; (c) Argamassa moldada com areia grossa com 04 classes e traço 1:2:8; (d) Argamassa moldada com areia média com 05 classes e traço 1:2:8; (e) Argamassa moldada com areia média com 04 classes e traço 1:2:10; (f) Argamassa moldada com areia natural e traço 1:2:12; (g) Argamassa industrializada;

As imagens constantes na figura 69 realçam a variabilidade do teor de pasta (Ca, destacado na cor azul) e do teor de agregado (Si, destacado na cor vermelha) nas argamassas com a variação da granulometria da areia, bem como do traço adotado na confecção destas.

A seguir será apresentada tabela contendo os resultados obtidos para as 03 regiões de cada argamassa.

Tabela 18- Resumo dos teores de Cálcio e Sílica obtidos através do MAZE.

ARGAMASSA	Si (%)	Si_MED(%)	Ca (%)	Ca_MED(%)	OUTROS(%)	OUTROS_MED(%)
F4	1 51,24	49,81	40,79	39,28	7,97	10,91
	2 48,88		38,73		12,39	
	3 49,3		38,32		12,38	
M4	1 51,61	53,61	34,52	35,64	13,87	10,75
	2 52,68		39,93		7,39	
	3 56,55		32,47		10,98	
G4	1 51,03	52,18	34,13	37,10	14,84	10,72
	2 54,35		37,84		7,81	
	3 51,15		36,26		12,59	
01:02:12	1 53,99	59,87	32,31	30,64	13,7	9,48
	2 65,00		27,99		7,01	
	3 60,63		31,63		7,74	
M5	1 57,74	55,95	27,32	32,20	14,94	11,85
	2 54,63		34,06		11,31	
	3 55,49		30,56		13,95	
M4-10	1 54,41	59,32	31,4	30,27	14,19	10,40
	2 65,38		27,05		7,57	
	3 58,18		32,37		9,45	
IND	1 61,13	56,38	34,48	35,62	4,39	8,00
	2 52,03		34,23		13,74	
	3 55,98		38,16		5,86	

Com base na tabela acima, observa-se que, entre as argamassas moldadas com areia de quatro classes de grãos e traço 1:2:8, aquela produzida com areia de curva granulométrica média apresentou o menor teor de pasta (Ca) e o maior teor de sílica (Si), resultado atribuído ao seu melhor empacotamento. Por outro lado, a argamassa moldada com areia de cinco classes de grãos e traço 1:2:8, cuja distribuição granulométrica do agregado também é média, apresentou aproximadamente 8% a mais de teor de Si em comparação à média das argamassas feitas com areia de quatro classes, além de demandar menor consumo de pasta (Ca).

Esses resultados corroboram as observações feitas na macrocaracterização, reforçando que argamassas com agregados de melhor empacotamento tendem a exigir menor quantidade de aglomerantes.

Ao analisar os resultados das argamassas produzidas com os traços 1:2:10 (areia M4) e 1:2:12 (areia natural), é possível perceber que, por apresentarem maiores volumes de agregado, essas argamassas têm teores mais elevados de Si. Os resultados indicam que os teores de Si

nesses casos (cerca de 59%) são 13% superiores à média das argamassas com traço 1:2:8. Além disso, as argamassas com traços 1:2:10 e 1:2:12 apresentaram um consumo de pasta (Ca) cerca de 15% inferior à média das argamassas com traço 1:2:8. Esse menor consumo de pasta representa uma economia significativa, mas pode impactar as propriedades e características desejadas da argamassa.

Por fim, a argamassa industrializada apresentou um teor de Si superior à média das argamassas com traço 1:2:8 (cerca de 6,5%), mas o consumo de pasta cimentícia (Ca) foi similar ao das argamassas moldadas com esse traço.

Ao analisar os resultados apresentados na coluna intitulada “outros” da tabela, composta principalmente pelos vazios existentes e por diversos elementos químicos, conforme indicado pelos resultados do EDS, observa-se que os valores são semelhantes para todas as argamassas. No entanto, destaca-se a argamassa industrializada, que apresentou o menor teor de vazios, possivelmente devido à otimização da curva granulométrica do agregado utilizado, especialmente pela presença de finos.

Para ilustrar os dados constantes na Tabela 18 foram elaborados os gráficos a seguir.

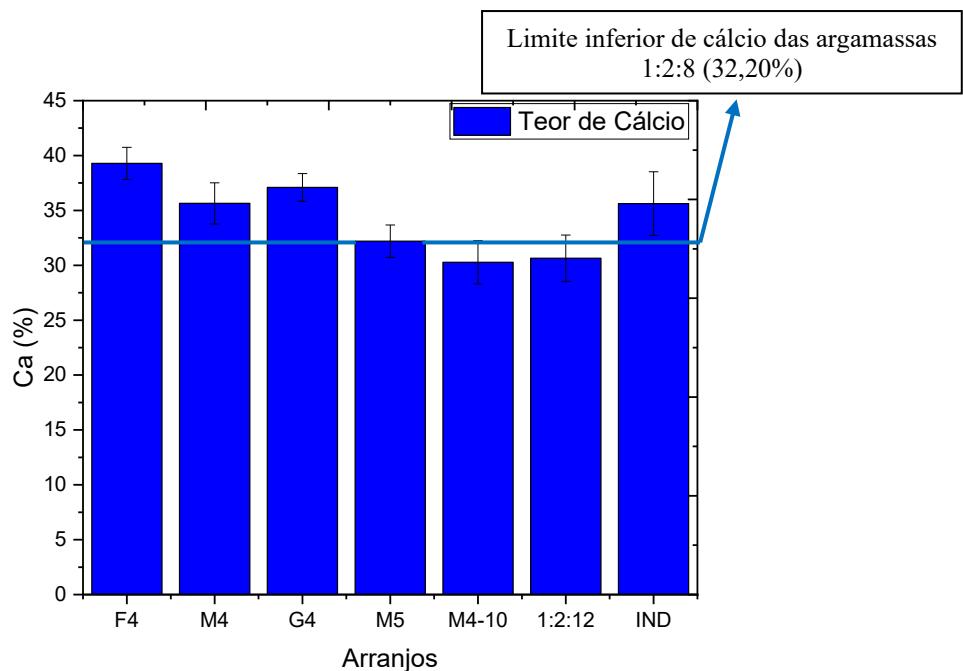


Figura 70- Relação dos teores de Cálcio nas argamassas analisadas.

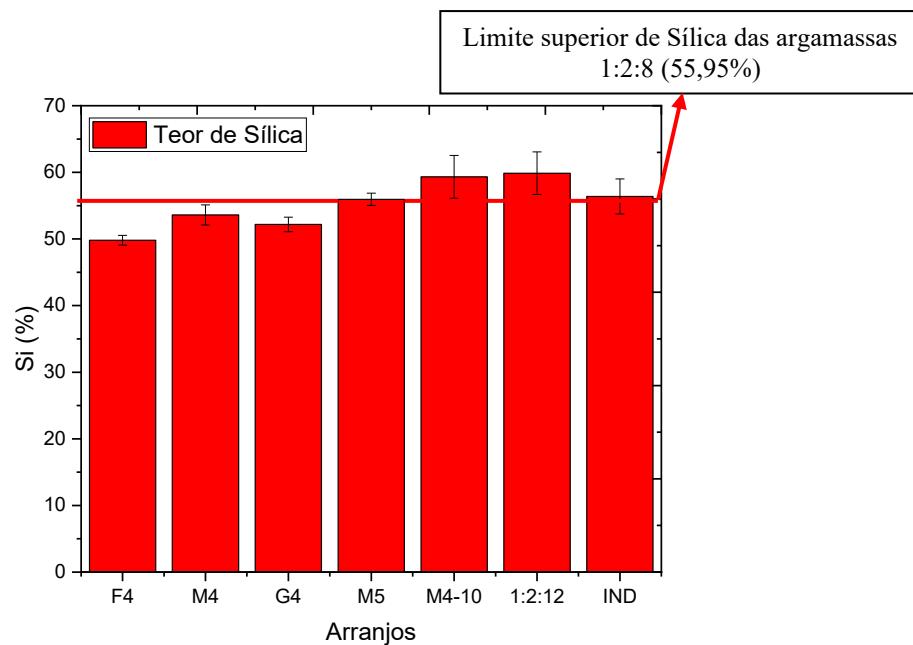


Figura 71- Relação dos teores de Sílica nas argamassas analisadas.

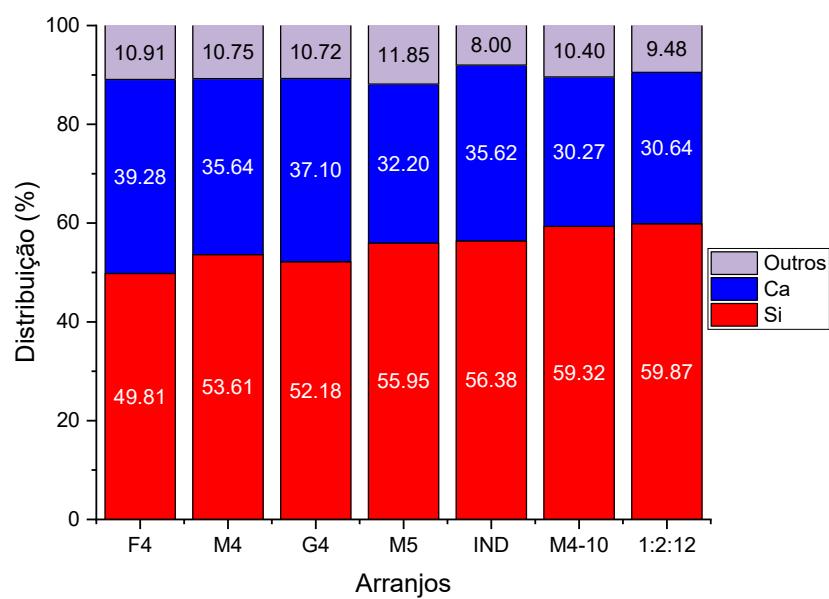


Figura 72- Distribuição dos teores de Ca, Si e demais elementos das argamassas.

Como se pode observar no gráfico apresentado nas Figura 71 e 72, as argamassas que não foram executadas com oito volumes de areia apresentam teor de sílica superior, em especial

as argamassas confeccionadas com 10 e 12 volumes, com percentuais de quase 60%. Desta forma, esta pode ser uma ferramenta para auxiliar na identificação de argamassas executadas com traço constituído de volumes de areia superior a 8. Ressalta-se que as argamassas confeccionadas com traço 1:2:8, mesmo variando a sua granulometria e número de classes dos agregados, não apresentou em nenhum momento índice de sílica superior a 56%, valor similar ao obtido para argamassas industrializadas.

Outro aspecto observado por meio da análise das figuras acima é que as argamassas com traço 1:2:8 e a industrializada apresentam teor de cálcio superior a 32,20%, enquanto as argamassas com traço 1:2:10 e 1:2:12 apresentam teor de cálcio próximo a 30,00%, portanto inferior àquelas com 8 volumes de areia.

Destaca-se a argamassa industrializada, apesar de não se saber o seu traço e a granulometria do agregado utilizado, esta apresenta características semelhantes à argamassa M5, que possui distribuição granulométrica média das amostras.

Para ilustrar a relação entre o teor de cálcio e sílica das amostras ensaiadas, foi elaborado o gráfico apresentado a seguir com as argamassas que foram objeto de estudos de macrocaracterização.

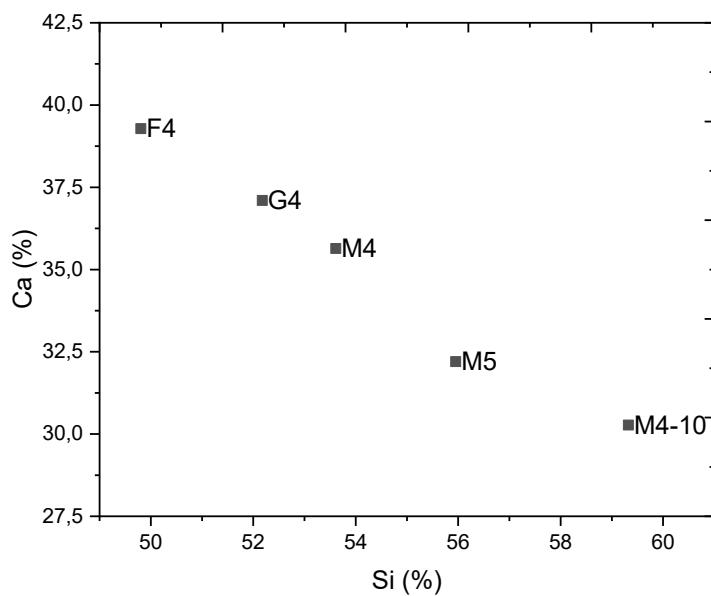


Figura 73- Relação entre o teor de cálcio e de sílica das argamassas moldadas com traço 1:2:8 e 1:2:10.

Como pode ser observado, para as argamassas confeccionadas com traços 1:2:8 e 1:2:10, os valores dos teores de pasta (Ca) são inversamente proporcionais aos valores de sílica

(Si), seja devido ao uso de areias com melhor empacotamento ou ao aumento do volume de areia no traço.

A seguir será apresentado o estudo correlacionando, para todas as argamassas, o teor de (cálcio + outros) com o teor de sílica das amostras.

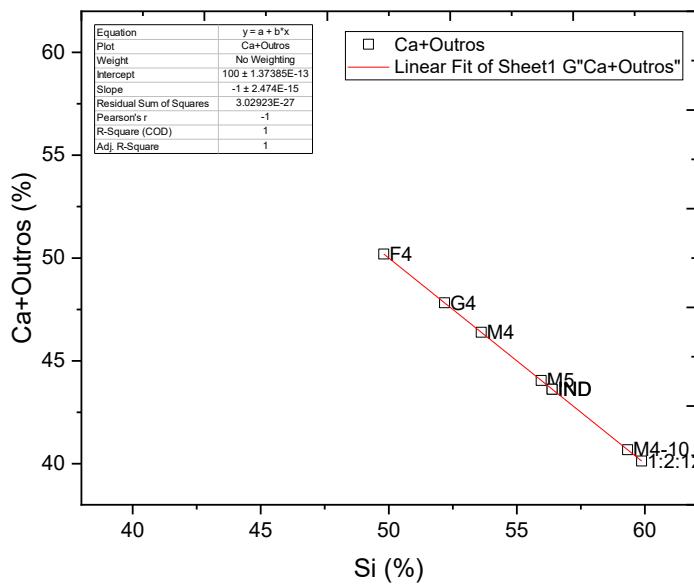


Figura 74- Relação entre o teor de cálcio + outros e de sílica das argamassas moldadas

Através do gráfico acima é possível verificar a relação linear existente entre o índice de Sí e o de (Ca+outros), de tal maneira que dentre as argamassas com traço 1:2:8, as que apresentam agregados com pior empacotamento apresentam maior índice de (Ca+outros). Além disso, verifica-se que a argamassa industrializada possui comportamento semelhante à argamassa M5.

O impacto da escolha de agregados com maior densidade de empacotamento no consumo de aglomerantes (pasta cimentícia) pode ser observado no gráfico a seguir.

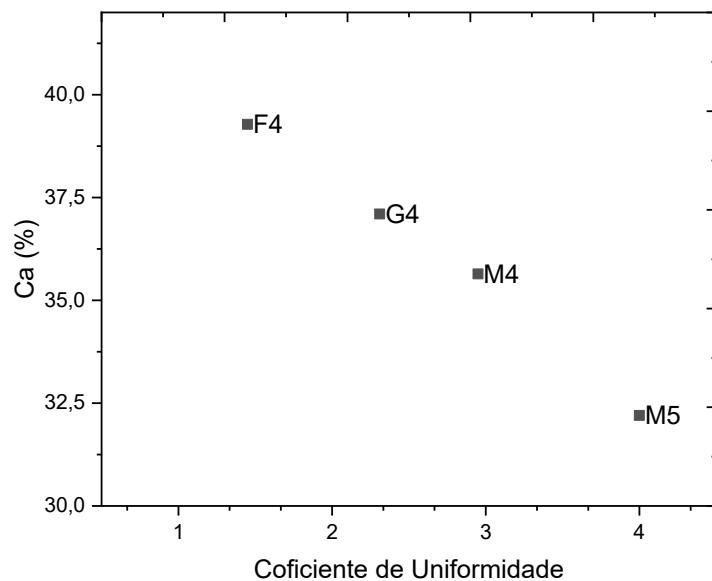


Figura 75- Correlação entre o coeficiente de uniformidade dos agregados utilizados nas argamassas moldadas com traço 1:2:8 e teor de pasta nas amostras (Ca)

A partir do gráfico acima, como era esperado, fica evidente que, entre as argamassas moldadas com o mesmo traço, aquelas que utilizam agregados com curvas granulométricas de maiores coeficientes de uniformidade — e, consequentemente, maiores densidades de empacotamento — apresentam um menor consumo de aglomerantes.

Corroborando os resultados apresentados acima, foi elaborada a figura abaixo correlacionando o teor de sílica das amostras com a relação aglomerante/agregado utilizados nas argamassas.

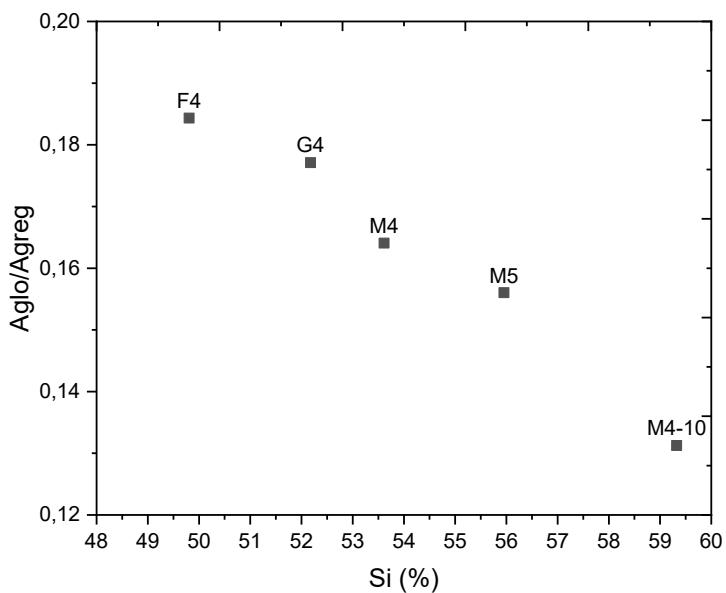


Figura 76- Correlação entre o teor de sílica e a relação entre aglomerante e agregado no peso

No gráfico acima, é possível observar que, entre as argamassas moldadas com o traço 1:2:8 (F4, M4, G4 e M5), aquelas que apresentaram maior teor de sílica — ou seja, aquelas com agregados de maior densidade de empacotamento — exibiram uma menor relação de consumo de aglomerante em relação aos agregados. Por outro lado, a argamassa confeccionada com o traço 1:2:10, por apresentar um maior volume de agregado e, consequentemente, uma maior quantidade de sílica, mostrou uma menor relação entre aglomerante e agregado.

A partir dos resultados de macrocaracterização das argamassas já apresentados neste trabalho e dos dados obtidos através do MAZE, foram elaborados gráficos que demonstram a correlação entre as propriedades das argamassas e os teores de sílica presentes nelas.

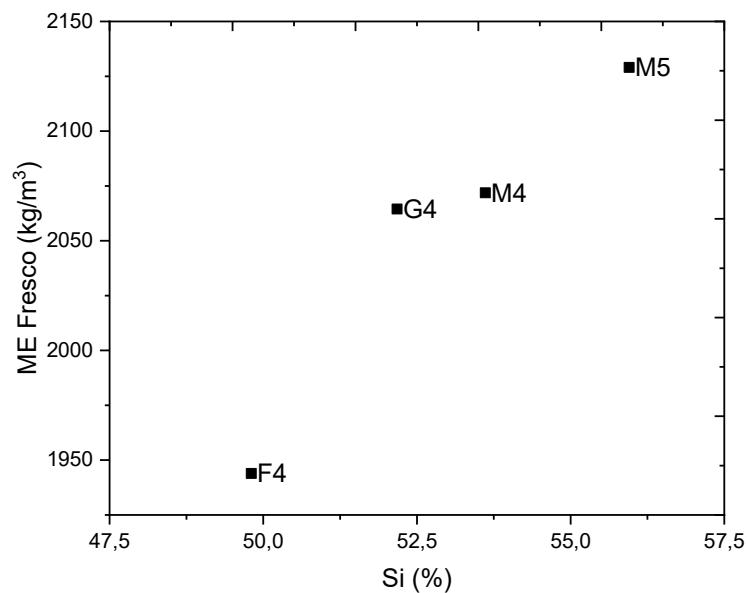


Figura 77- Correlação entre o teor de sílica das argamassas moldadas com traço 1:2:8 e a massa específica no estado fresco.

Como pode ser observado acima, as argamassas confeccionadas com traço 1:2:8 apresentam maior massa específica no estado fresco quando possuem maiores teores de sílica, o que indica o uso de agregados com maior densidade de empacotamento.

Já em relação entre o coeficiente de absorção de água por capilaridade e o teor sílica, foram constatados os resultados apresentados na Figura a seguir.

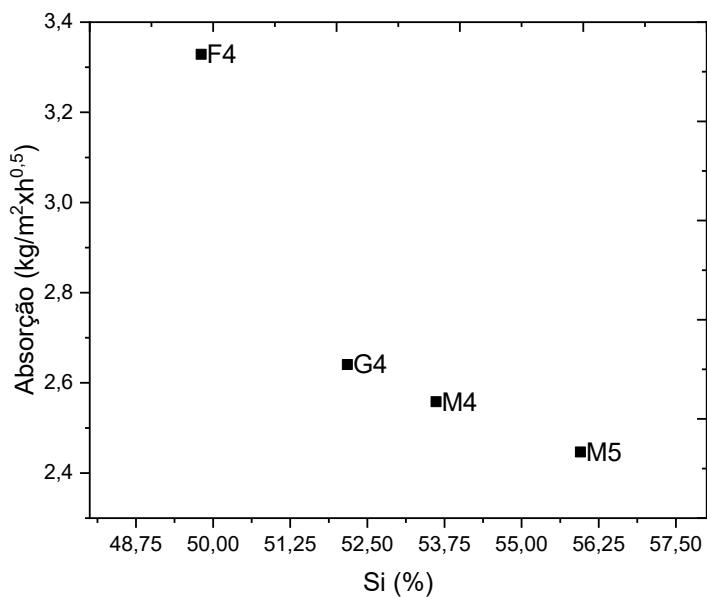


Figura 78- Correlação entre o teor de sílica das argamassas moldadas com traço 1:2:8 e o coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Observando o gráfico acima, destaca-se que as argamassas confeccionadas com traço 1:2:8 apresentam maior capilaridade quanto menor for o teor de sílica, indicando a necessidade da escolha correta do agregado na produção das argamassas, em especial as de revestimento.

4.5.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Para melhor ilustração da constituição química dos elementos que compõem as argamassas, serão apresentados a seguir resultados obtidos por meio de difração de raios x associada com método Rietveld, os quais encontram-se descritos na Tabela 19. Para fins de ilustração, a seguir será apresentado o difratômetro da argamassa F4. Os difratômetros das demais argamassas encontram-se no Anexo 02 deste trabalho.

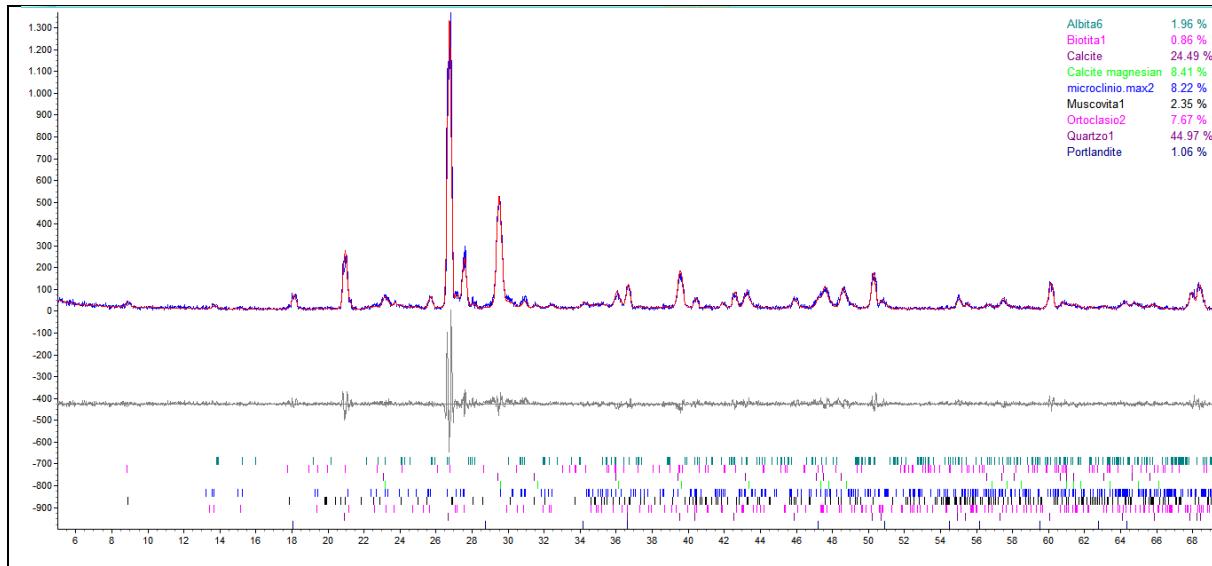


Figura 79- Difratômetro da Argamassa F4.

Tabela 19- Tabela com parâmetros das fases cristalinas obtidas por meio de DRX

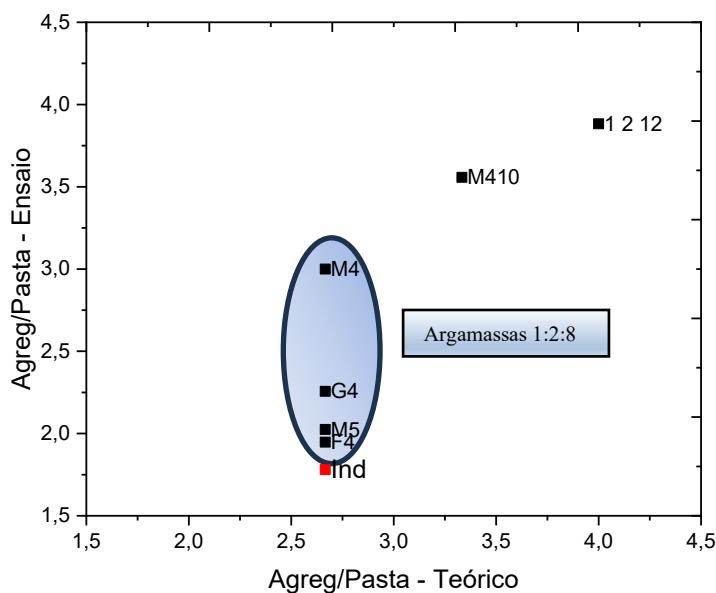
AMOSTRA	Fases Cristalinas						Total (%)
	Quartzo	Mica	Feldspato	Calcita	Calcita Mag	Portlandita	
M5	54,96	-	11,98	21,92	10,32	0,80	100,00
M410	70,54	-	7,47	15,22	6,39	0,32	99,99
M4	67,08	-	7,96	17,90	6,94	0,12	100,00
G4	62,29	-	7,05	23,33	6,76	0,57	100,00
F4	44,97	3,21	17,85	24,49	8,41	1,06	99,99
Ind	64,06	-	-	27,14	8,13	0,67	100,03
1:2:12	79,55	-	-	14,86	5,50	0,09	100,00

A partir da tabela acima, pode-se obter os quantitativos referentes às fases cristalinas oriundas do agregado (em verde) e da pasta cimentícia (em amarelo), através das quais se pode obter a proporção entre estes. A coluna em azul representa o percentual total das fases cristalinas. Como é de conhecimento os traços aplicados nas argamassas produzidas, com exceção da argamassa industrial para qual se adotou o traço teórico de 1:2:8, buscou-se comparar a proporção entre pasta cimentícia e agregado obtida por meio de DRX com a proporção esperada por meio do volume dos materiais aplicados. Os resultados obtidos encontram-se na tabela a seguir:

Tabela 20- Valores de proporção entre pasta cimentícia e agregados obtidos por meio da quantificação das fases cristalinas das amostras.

AMOSTRA	Traço cimentício : agregado	Agreg/Pasta teórico	MAT (Pasta)	MAT (AGREG)	Agreg/Pasta Ensaio
M5	1:2:8 (3:8)	2,67	33,06	66,94	2,02
M410	1:2:10 (3:10)	3,33	21,94	78,05	3,56
M4	1:2:8 (3:8)	2,67	24,96	75,04	3,00
G4	1:2:8 (3:8)	2,67	30,7	69,29	2,26
F4	1:2:8 (3:8)	2,67	33,93	66,07	1,95
Ind	1:2:8 (3:8)	2,67	35,96	64,03	1,78
1:2:12	1:2:12 (3:12)	4,00	20,48	79,51	3,88

A partir da Tabela acima foi elaborado o gráfico apresentado a seguir:



c

Figura 80- Relação entre teor de agregado por pasta de cimento teórica e obtida por meio do DRX.

Conforme evidenciado no gráfico, as argamassas com traço 1:2:8 apresentaram, no máximo, uma relação de 3 entre o teor de agregado e o teor de pasta, comportamento distinto das argamassas com traços 1:2:10 e 1:2:12.

Outro aspecto relevante é que a análise do teor de quartzo por difração de raios X (DRX) demonstrou-se insensível à variação da densidade de empacotamento dos agregados utilizados. Isso indica que o agregado adotado na argamassa de referência do SINAPI pode ser utilizado como um bom parâmetro comparativo para a quantificação de agregado por meio da análise química via DRX.

Embora o percentual da fase cristalina do quartzo seja pouco influenciado pela granulometria do agregado, observou-se que ele é sensível à variação do volume de agregado no traço. Assim, as argamassas com traços 1:2:10 e 1:2:12 apresentaram relações agregado/pasta cimentícia significativamente superiores às do traço 1:2:8.

Devido à baixa sensibilidade da análise de DRX à granulometria das areias utilizadas, a argamassa industrializada — cuja distribuição granulométrica é desconhecida — apresentou comportamento semelhante ao da argamassa com traço 1:2:8. Isso sugere que, em seu traço, não há mais do que oito partes de areia.

O próximo estudo realizado com os resultados obtidos por meio de DRX buscou tentar equalizar as diferenças obtidas na fração agregado/pasta cimentícia para as argamassas por meio da aplicação da densidade de empacotamento dos agregados, assim como da relação entre o teor de sólidos efetivamente utilizado nas amostras, descontando os vazios existentes. Os resultados obtidos encontram-se na tabela abaixo e no gráfico a seguir.

Tabela 21- Tabela com fatores agregado/pasta cimentícia ajustados pelo seu empacotamento

AMOSTRA	Agreg/Pasta Teórico Ajustado	Agreg/Pasta Ensaio Ajustado
M5	4,12	3,31
M410	6,12	6,11
M4	4,01	5,26
G4	3,73	4,20
F4	4,11	3,79

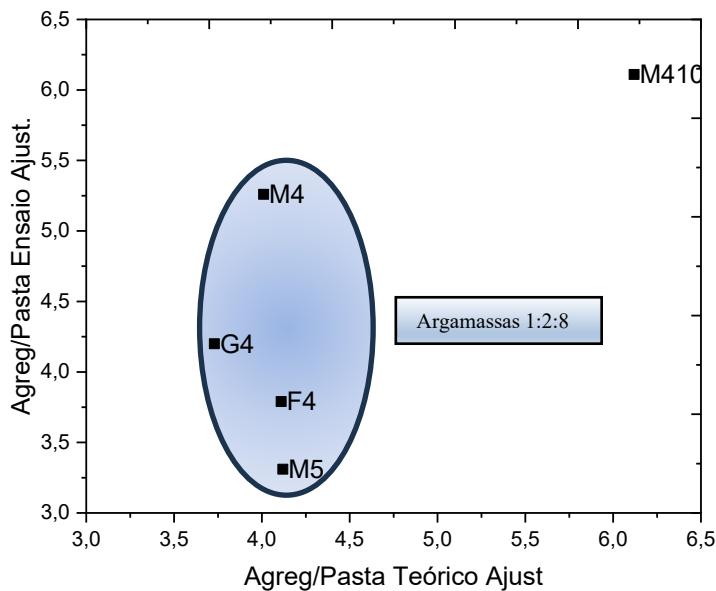


Figura 81- Gráfico com a correlação entre o teor de agregado/pasta teórico ajustado e o teor obtido por meio de ensaio com DRX

Através do gráfico acima, observa-se que mesmo com a correção dos fatores de relação entre agregado e pasta cimentícia das argamassas obtidas por meio do DRX, o comportamento de identificação do quartzo não levou em consideração a densidade de empacotamento dos agregados, uma vez que nesta análise ocorre a medição da fase cristalina do quartzo, em especial, onde ele estiver, inclusive quando presente na pasta cimentícia.

5. CONCLUSÕES

Por ocasião da realização dos estudos apresentados neste trabalho, foram analisados os principais parâmetros estruturais e microestruturais de argamassas mistas de revestimento mais frequentemente aplicadas em obras públicas, por meio de análises físico-químicas, com ênfase na vinculação entre os parâmetros analisados e quantificação dos particulados integrantes do compósito cimentício. A partir das constatações apontadas no decorrer deste estudo, verificou-se o comportamento da reologia e das propriedades mecânicas das argamassas mistas em função da variação dos particulados do compósito cimentício, bem como a possibilidade de reprodução de seus dos quantitativos

Além dos resultados supramencionados, algumas conclusões foram obtidas durante os estudos realizados, conforme consubstanciado nos itens a seguir:

a) Por meio deste estudo, ficou evidente que a abordagem estocástica permite a elaboração de diferentes traços de argamassa de revestimento 1:2:8 que, embora apresentem as mesmas propriedades, possuem custos variáveis. Isso indica que uma melhor caracterização dos materiais aplicados nas obras pode resultar em um significativo ganho financeiro na execução dos serviços. Adicionalmente, a análise das propriedades do conjunto de cem argamassas elaboradas demonstrou que a composição do serviço de argamassa mista com traço 1:2:8, conforme apresentada pelo SINAPI, constitui um sólido parâmetro de referência de custos.

b) Verificou-se que as densidades de empacotamento dos conjuntos granulares apresentaram uma relação sigmoidal uniforme com seus respectivos coeficientes de uniformidade. Adicionalmente, foi proposta uma equação para determinar a densidade de empacotamento em função do coeficiente de uniformidade, a partir de uma adaptação do modelo de De Larrard. Essa formulação possibilitou determinar a densidade de empacotamento de areias de mesma origem com maior precisão e praticidade em comparação com o modelo original.

c) A partir dos resultados das propriedades das argamassas mistas estudadas, constatou-se que a variação do agregado empregado nos compósitos, mantendo-se a mesma proporção em volume, implica na alteração de suas propriedades físicas e mecânicas. Dessa forma, a correta caracterização do agregado utilizado em sua confecção é de suma importância. Ademais, comprovou-se que as argamassas de mesmo traço, produzidas com agregados de maior densidade de empacotamento, demandam um menor consumo de cimento para a produção de um mesmo volume de argamassa, o que contribui para a diminuição do custo final e do impacto ambiental.

d) A análise da quantificação dos teores de Sílica e Cálcio por meio do MAZE, em conjunto com os resultados obtidos pelo MEV/EDS, possibilitou determinar o percentual máximo da presença de sílica, proveniente dos agregados para argamassas mistas com traço 1:2:8. Esta determinação foi possível mesmo com a variação na granulometria e no número de classes dos agregados. Constatou-se, ainda, que as argamassas com traços 1:2:10 e 1:2:12 apresentam um teor de sílica cerca de 13% maior em comparação com as argamassas produzidas com oito volumes de agregado. Já a análise mineralógica por meio do DRX revelou que as argamassas com traço 1:2:8 apresentaram uma relação máxima de 3 para 1 entre o teor de agregado e o teor de pasta cimentícia. Este comportamento, que se mostrou distinto nas

argamassas 1:2:10 e 1:2:12, configura-se como um bom indicador na tentativa de reprodução de traços de argamassas mistas existentes.

e) Este trabalho resultou na proposta de uma metodologia de ensaios, voltada à engenharia forense, para auxiliar na caracterização de argamassas mistas de revestimento em obras públicas. A metodologia permite, de forma precisa, aferir os quantitativos de particulados nos compósitos investigados. Conforme detalhado no Anexo 03, essa abordagem também pode ser utilizada em edificações históricas, facilitando a correta restauração de argamassas em patrimônios tombados.

Em suma, este estudo evidencia que o conhecimento das características físicas dos agregados é crucial para otimizar as propriedades das argamassas mistas, resultando em menor custo e impacto ambiental. A metodologia desenvolvida, baseada em microcaracterização, possibilita ainda a qualificação e quantificação dos materiais utilizados na produção de argamassas e outros compósitos

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

Associação Brasileira de Cimento Portland- ABCP- **Manual de revestimento de argamassa**. Associação Brasileira de Cimento Portland, 2022. Disponível em: www.comunidadedaconstrucao.com.br. Acessado em: 24/04/2024.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) **NBR 7200: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas -Procedimento**. Rio de Janeiro,1998.

_____. **NBR 7211-Agregados para Concreto**. Rio de Janeiro, ABNT,2022.

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

_____. **NBR 12.278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro,2005.

_____. **NBR 12.279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Determinação resistência à tração por flexão e à compressão**. Rio de Janeiro,2005.

_____. **NBR 15.259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Determinação da água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade** . Rio de Janeiro,2005.

_____. **NBR 12.277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da retenção de água**. Rio de Janeiro,2005.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto-especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

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

_____. **NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação**. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.

_____. **NBR 12.276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro,2016.

_____. **NBR 16967: Cimento Portland: Requisitos**. Rio de Janeiro,2018.

_____. **NBR 14.653-1: Avaliação de bens parte 1- Procedimentos gerais**. Rio de Janeiro,2019.

_____. **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – requisitos**. Rio de Janeiro,2023.

_____. **NORMAS MERCOSUL, 2000, Cimento, concreto e agregados – terminologia - lista de termos**. NBR NM 2.

_____. NORMAS MERCOSUL, 2003, **Determinação da composição granulométrica**. NBR NM 248.

Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção. ANEPAC,2022-Disponível em:<https://www.anepac.org.br/relacionamento/noticias/item/491-mercado-de-agregados-perspectivas-para-2022>. Consultado em 27/12/2024.

ADESINA, P.; O'SULLIVAN, C.; WANG, T. Understanding the interplay between particle shape, grading and sample density on the behaviour of granular assemblies: A DEM approach. **Granular Matter**, v. 26, n. 1, p. 1–20, 2024.

AGUIAR, B; MEDEIROS, J. Engenharia Legal. In: VELHO, J. et al.. (Org.). **Ciências Forenses: Uma introdução às principais áreas da Criminalística Moderna**. 4. ed. Campinas: Millennium, 2021, p. 331-354.

AIQIN, W.; CHENGZHI, Z.; NINGSHENG, Z. Theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 11, p. 1721–1726, 1999.

AGOSTINHO, C. S. A. **Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal áerea**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa- Abril, 2008.

ALMEIDA, A.N.F. **Análise quantitativa da influência dos constituintes menores na estrutura do clínquer do Cimento Portland pelo Método Rietveld**. dissertação (mestrado). Universidade Federal da Paraíba – João Pessoa, 2021.

ALMEIDA DIAS, I.; CARASEK, H. Avaliação da permeabilidade e da absorção de água de revestimentos de argamassa pelo método do cachimbo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V, São Paulo, 2003. **Anais** [...] São Paulo, EPUSP/ANTAC, 2003. p. 519-531.

Almeida, L.F.S. **Caracterização das argamassas da muralha Tardo-Romana de Olisipo**. Dissertação (Mestrado em Geologia Aplicada)-Universidade de Lisboa-Lisboa, 2015.

American Society for Testing and Materials (ASTM). **C33/C33m-Standard Specification for Concrete Aggregates**. ASTM, 2018. Disponível em: www.astm.org.

American Society for Testing and Materials (ASTM). **C125: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates**. Pennsylvania, 2018. 8 p.

ANGELIM, R.R.; ANGELIM, S. C M.; CARAZEK, H. Influência da distribuição granulométrica da areia no comportamento dos revestimentos de argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V., 2003. **Anais** [...] São Paulo, EPUSP/ANTAC, 2003.

ARAGÃO, R. F. Incêndios e Explosivos- Uma Introdução à Engenharia Forense . In: ARAGÃO, J. et al.. (Org.). **Incêndios e Explosivos- Uma Introdução à Engenharia Forense**. 2. ed. Campinas: Millennium, 2020, PP 06.

ARIZZI, A.; CULTRONE, G. The influence of aggregate texture, morphology and grading on the carbonation of non-hydraulic (aerial) lime-based mortars. **Quarterly Journal Of Engineering Geology SAnd Hydrogeology**, [s.l.], v. 46, n. 4, p.507-520, 31 out. 2013. Geological Society of London.

AZEVEDO FILHO, R.N. Fraudes em licitações e a Lei de Benford- aplicação em perícias de Engenharia Civil no DPF. *In: VIII Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2016. Anais [...]*. Maceió, 2016a. p. 13 a 21.

AZEVEDO FILHO, R.N. Obras de pavimentação urbana na operação G7-sequancia metodológica-preços reais. *In: VIII Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2016. Anais [...]*. Maceió, 2016b. p. 22 a 37.

AZEVEDO FILHO, R.N.; LIMA, B.S. Avaliação de imóvel urbano em capital do nordeste. *In: IX Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2018. Anais [...]*. Fortaleza, 2018. p. 82 a 95.

BAGHAEE MOGHADDAM, T.; BAAJ, H. Application of compressible packing model for optimization of asphalt concrete mix design. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 530–539, 2018.

BAÍA, L. L.; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimentos de argamassa**. Editora O Nome da Rosa - 4^a Edição, 2008.

BALTAZAR, L. G. et al.. Combined effect of superplasticizer, silica fume and temperature in the performance of natural hydraulic lime grouts. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 584–597, 2014.

BANURA, G. A. Otimização Da Distribuição Granulométrica Do Agregado Miúdo Para O Uso Em Revestimentos De Argamassa Na Cidade De Sant'Ana Do Livramento – Rs. p. 11, 2005. BETIOLI, A. M. et al.. Rheological characterization of cement paste: association of complementary techniques. **Ambiente Construíd**, v. 9, n. 4, p. 37–48, 2009.

BARBOSA, S.O. & ALBUQUERQUE, T. M. A deficiência na qualidade de obra de engenharia traduzida em valores monetários. *In: VIII Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2016. Anais [...]*. Maceió, 2016. P. 38 a 47.

BARBOSA, S.O.; SANTOS, P.C.V; SOUZA, L.M.; SOUZA, T.E.F. A perícia de Engenharia da Polícia Federal no caso do rompimento da barragem de Mariana. *In: IX Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2018. Anais [...]*. Fortaleza, 2018. p. 12 a 32

BARBOSA, S.O. **“Investigação sobre rompimento da barragem de rejeitos do Fundão, em Mariana/MG, a partir de uma abordagem multidisciplinar”**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal da Paraíba-João Pessoa, 2022.

BARBOSA, S.O. Ruptura de Barragens. In: WISSMANN, J. A. (Org.). **Engenharia Forense: Desabamentos e Soterramentos**. 1. ed. Campinas: Millennium, 2024, p. 225-256.

BARROS, F.; KUHNEN, B.; SERRA, M.C.; FERNANDES, C. M. S. Ciências Forenses: princípios éticos e viesses. **Revista Bioética**, vol 29., jan 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-80422021291446>.

BARROS, E. R. O. et al.. As potencialidades e limitações do uso do vant no monitoramento de faixas de domínio de rodovias federais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA. jun.2018. p. 1102-1106.

BATISTA, Laryssa Izabel de Araújo. **Ferramentas para análise de dados das perícias de Engenharia Legal da Polícia Federal no Estado da Paraíba**. 2022. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação e Engenharia Civil)-Universidade Federal da Paraíba-João Pessoa, 2022.

Bauer, Elton. **Revestimento de argamassas: características e peculiaridades**. Brasilia: LEM-UNB;Sinduscon, 2005.

BLUM, M.L; AZEVEDO FILHO, R.N.; MORAIS, C.M.M; SOUZA, T.E.F. (2018). GPR como ferramenta da engenharia forense. In: IX Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2018. **Anais** [...]. Fortaleza, 2018. p. 33 a 50.

BOGUE, R.H. Calculation of the compounds in Portland cement. Industrial and Engineering Chemistry. Vol. 1, p. 192–197, 1929.

BOLLORINO, H. E CINCOTTO, M.A. A influência do tipo de cimento nas argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, II,1997, Salvador. **Anais** [...]. Salvador, EPUSP/ANTAC, 1997.

BRANDSTETTER, M. C. G. O.; CARASEK, H.; SIQUEIRA, R. Analysing the logistics impact on the cost composition of a mechanised spraying process of rendering mortar. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 107-132, abr-jun.2018.

BRANDON, D., KAPLAN, W. D.– The Concept of Microstructure, in Microstructural Characterization of Materials, 2nd Edition. UK, UK: John Wiley and Sons Ltd., 2008

BRASIL. Decreto nº 23569 -Regula exercício das profissões de engenheiro, arquiteto e agrimensor. Rio de Janeiro, 1933.

_____. Lei 13.913/2019 DE 25 de novembro de 2019, que altera a Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, para assegurar o direito de permanência de edificações na faixa não edificável contígua às faixas de domínio público de rodovias e para possibilitar a redução da extensão dessa faixa não edificável por lei municipal ou distrital. Lei Federal. Brasília/DF.

_____. Lei 8.213/1991 de 24 de julho de 1991. O Planos de Benefícios da Previdência Social e dá outras providências. Lei Federal. Brasília/DF.

_____. Lei nº 10.524, de 25 de julho de 2002. Dispõe sobre as diretrizes para a elaboração da lei orçamentária de 2003 e dá outras providências. Lei Federal. Brasília/DF.

_____. **Rede de Controle da Gestão Pública**, 2009. Disponível em: <https://www.rededecontrole.gov.br/quem-somos/>. Acessado em 17 de jul. 2024.

_____. **Decreto nº 7983/13, de 08 de abril de 2013**. Estabelece regras e critérios para elaboração do orçamento de referência de obras e serviços de engenharia, contratados e executados com recursos dos orçamentos da união e dá outras providências. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2013/Decreto/D7983.htm. Acesso em: 30 jan. 2025.

_____. Instituto Nacional de Criminalística, Manual de Procedimentos Periciais-Perícias de Engenharia, Avaliação de Imóveis Urbanos, Brasília, 2015.

_____. Lei nº 13.303, de 30 junho de 2016. Dispõe sobre o estatuto jurídico da empresa pública, da sociedade de economia mista e de suas subsidiárias, no âmbito da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios. Lei Federal. Brasília/DF.

_____. Lei 14.133/2021 de 01 de abril de 2021. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Lei Federal. Brasília/DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14133.htm. Acessado em: 30 de abr. 2022.

_____. Instituto Nacional de Criminalística. Manual de Procedimento Pericial – Licitações de Obras e Serviços de Engenharia. Brasília: Instituto Nacional de Criminalística, 2022.

_____. Painel de Obras. <https://clusterqap2.economia.gov.br/extensions/painel-oberas/painel-oberas.html>. Acesso em: 05 de dez de 2023.

British Standards, B. S.-. **BS 882- Aggregates from natural sources for concrete.** British Standards Institution., BS, 1992.

BRITO, A. C.; VINHAS, G. M.; ALMEIDA, Y. M. B. de; WELLEN, R. M. R.; CANEDO, E. L.; RABELLO, M. S. Efeito da adição de PHB na cristalização a frio do PET. **Polímeros**, [s.l.], v. 22, n. 2, p.111-116, 13 mar. 2012.

BROUWERS, H. J. H.; RADIX, H. J. Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 11, p. 2116–2136, 2005.

BROUWERS, H. J. H. Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings. **Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, v. 74, n. 3, 2006.

BUENO, E.; **A coroa, a cruz e a espada**- Lei, ordem e corrupção no Brasil colônia- coleção Terra Brisilis- vol. 04-Editora Objetivo.

BUENO, G.M.; GONZALEZ, M.A.S; TUTIKIAN, B.F. BUENO, G.M.; GONZALEZ, M.A.S; TUTIKIAN, B.F. Verificação da influência da exposição às altas temperaturas na aderência do revestimento de argamassa de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos. **Revista Matéria**, v.27, n.1, 2022.

CAIXA. Coletânea de artigos de avaliação de imóveis da Caixa. Brasília, 2018. Disponível em < <https://www.ibape-sp.org.br/adm/upload/uploads/1622062218-1556386390-ebook-avaliacao-imoveis.pdf>>

CALAZANS C.H.; CALAZANS S.M. Ciência forense: das origens à ciência forense computacional [Internet]. In: XV Seminário Regional de Informática; 2005; Santo Ângelo. Anais [...]. Santo Ângelo: Universidade Regional Integrada; 2005.

CAMPELO, Valmir; CAVALCANTE, Rafael Jardim. **Obras Públicas: comentários à jurisprudência do TCU.** 3^a ed. Belo Horizonte: Editora Fórum, 2018.

CAMPITELI, V.; MASSARETTO, R.; RODRIGUES, P. T. Dosagem experimental de argamassas mistas a partir de cal virgem moída. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I, 1995, Goiana. **Anais** [...]. Goiana, EPUSP/ANTAC, 1995.

CAMPITELLI, M. V. **Medidas para evitar o superfaturamento decorrente dos “jogos de planilha” em obras públicas.** Dissertação (Mestrado)-Universidade de Brasília-Brasília, 2006.

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

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos-avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da USP – São Paulo, 1996.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, IV, 2001, Brasília. **Anais** [...]. Brasília: PECC / ANTAC, 2001.p43-67.

CARASEK, H. “**Argamassas**”. In: Isaia, G.C. (ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, São Paulo, IBRACON, p. 892-944, 2010.

CARASEK, H.; ARAÚJO, R. C.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista matéria**, v.21, n.3, pp. 714 –732, 2016.

CARDOSO, Fábio Alonso. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico.** Tese (doutorado). Escola Politécnica da USP - São Paulo, 2009.

CARNEIRO, Arnaldo Manoel Pereira. **Revestimento externo em argamassa de cimento, cal e areia- Sistemática das empresas de construção civil de Porto Alegre.** Dissertação Mestrado para Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1993.

CARNEIRO, A.; CINCOTTO, M. A.; JHON, V.M. Massa unitária da areia como parâmetro de análise das características das argamassas. **Revista ambientes construídos**, São Paulo, 1997.

CARNEIRO, A.M.P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas.** Tese (Doutorado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CARVALHO, F.V.M; HERCULANO, L.F.G.; SILVA, M. J. G. Análise de falha mecânica em acidente com plataforma hidráulica de transportes deficientes. In: VIII Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2016. Anais [...]. Maceió, 2016. p. 48 a 60.

CARVALHO, L.R.F.; PINI, M.S. **Elementos de Engenharia de custos: Desatando o nó para os agentes de obras públicas na formação do preço para a construção civil.** São Paulo: Pini, 2^a Ed.,2012

CARVALHO JR, A. N., **Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação ao sistema de aderência mecânica.** Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Minas Gerais- Belo Horizonte, 2005.

CHEMELLO, E. Ciência forense: impressões digitais. **Quimica Virtual**, dez 2006.

CHEN, X. e WU, S. Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 38, pp. 804-812, Out.,2012.

CHIODELLI, B.B; PAZ, V.M. Ecobatimetria com drones aquáticos. In: IX Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2018. Anais [...]. Fortaleza, 2018b. p. 51 a 68.

CHU, S. H.; KWAN, A. K. H. Mixture design of self-levelling ultra-high performance FRC. **Construction and Building Materials**, v. 228, p. 116761, dez. 2019.

CHU, S. H. et al.. Effect of natural and recycled aggregate packing on properties of concrete blocks. **Construction and Building Materials**, v. 278, 2021.

CINCOTTO, M. A., SILVA, M. A. C., CARASEK, H. **Argamassas de revestimento; Características, propriedades e métodos de ensaio** (Publicação IPT 2378). 1.ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 118p.

CINCOTTO, M. A; QUARCIANI, V. A; JOHN, V. M. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais:** Cal na Construção Civil. 2.ed. São Paulo: IBRACON, 2010. 1v. Cap. 22. p. 695-726.

CORREIA, L. S.; MATOS, W. B.; SANTOS, G.; DEZANET, A.; STRINGARI, D.; SCHACKOW, A.; SEGADÃES, M. A. Uso de análise de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura para caracterização de materiais de construção contendo rejeitos de tijolos. **Anais. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais.** Cuiabá, 2014.

COSTA, E. B. C.. **Análise de parâmetros influentes na aderência de matriz cimentícias.** Tese (Doutorado no Programa de Pós Graduação de Engenharia Civil). Escola Politécnica da USP- São Paulo, 2014.

COSTA, M. R. M. M.; MATTANA, A. Estudo da influência do tipo de cimento no comportamento reológico de argamassas de revestimento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VIII., 2009, Curitiba. **Anais** [...] Curitiba: ANTAC, 2009. p. 30-31.

COSTA, R. V. G. **Avaliação Micromecânica de Agregados Graúdos Sujeitos à Reação Álcali Agregado - RAA.** Tese (doutorado) UFPB- Universidade federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

COTOMÁCIO, A. C. **Manual prático de perícia criminal em acidentes de trabalho:**. Campinas, SP: Millennium Editora-2^a ed, 2021.

COUTO, C.F.V. **Identificação de possíveis redes de conluio em licitações públicas utilizando teoria dos grafos, clusterização e PSO.** Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal da Paraíba-João Pessoa, 2023.

CRUZ, N. T. C. C. **Estudo da influência da granulometria das areias no desempenho de rebocos de ligante hidráulico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of X-Ray Diffraction**, 3 ed, Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. 678 p.

DANTAS, R.A. **Engenharia de Avaliações: Uma introdução à metodologia científica.** São Paulo: Pini, 2^a Ed.,2005.

DA SILVA, R. F. A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais. **Revista Processos Químicos**, v. 14, n. 27, p. 73-82, 2020.

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

DE BONO, V. et al.. Methodology for formulating low-carbon printable mortar through particles packing optimization. **Cement and Concrete Research**, v. 176, p. 107403, fev. 2024.

Dedavid, B. A., Gomes, C. I., Machado, G. (2007). **Microscopia Eletrônica de Varredura - Aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores.** Porto Alegre, - EDIPUCRS. ISBN: 9788574307107

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

DE LA TORRE A.G.; LEON-REINA L.; ARANDA M. A. G. Rietveld Quantitative Phase Analysis of OPC Clinkers, Cements and Hydration Products. **Mineralogy & Geochemistry**, Vol. 74, p. 169-209, 2012.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**, 1999.

DENG, X. LI, J.; LU, Z.; CHEN J.; LUO, K.; NIU Y.; Effect of hydrated lime on structures and properties of decorative rendering mortar. **Construction and Building Materials**, v. 256, p. 119485, 2020.

DE MATOS, P. R. SAKATA, R.D.; FOIATO, M.; REPETTE, W.L.; GLEIZE, P.J. Workability maintenance of water-reducing admixtures in high-performance pastes produced with different types of Portland cement. **Revista Materia**, v. 26, n. 1, 2021.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Coordenação-Geral de de Custos de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes.** Brasília: 2017. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/manuais-de-custos-de-infraestrutura-de-transportes

DEUTCH, S.F. **Perícias de engenharia: a apuração dos fatos.** São Paulo: LEUD, 2011.
DIAS, Gilda Maria; PETER, Jeanine Cassini; PEREIRA, Marcelo. **Levantamento de limites de imóvel rural com uso de VANT, Eldorado do Sul-RS.** 2014. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto alegre, 2014.

DIAS, B.L.N. Aplicação da difração de Raios-x para caracterização mineralógica de meteoritos: conceitos físicos e processos experimentais. **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**, v. 8, n. 2, p. 01-15, Set. 2020.

DIAS HADDAD, L. et al.. Analysis of influence of the fine aggregate particle size in the mechanical properties and durability of coating mortar | Análise da influência da granulometria do agregado miúdo nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas de revestimento. **Ciencia y Engenharia/ Science and Engineering Journal**, n. August, 2016.

DIJK, T. V. Macrostructures. An Interdisciplinary Study of Global Structures in Discourse, Interaction, and Cognition. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1980.

DIÓGENES, D. G.; BERRTO, J.M.L; CÂNDIDO, L.F, FARIAS, L. G. A. T., LEITINHO, J. L Reuso de água em argamassa de revestimento: uma alternativa sustentável para regiões semiáridas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, XIII, 2019, Goiana. **Anais** [...] Goiania: ANTAC, 2019.

DROR, I. E. Biase in forensic experts. **Science**, 2018. vol.360, pp 243

DU, W.; LI, M.; PEI, Z., MA, C.;Performances of three models in predicting packing densities and optimal mixing fractions of mixtures of micropowders with different sizes. **Powder Technology**, v. 397, 2022.

DUARTE, L. D. C.; JUCHEM, P. L.; PULZ, G. M.; DE BRUM, T. M. M.; CHODUR, N.; LICCARDO, A.; FISCHER, A. C.; ACAUAN, R. B. Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros. **Pesquisas em Geociências**, v. 30, n. 2, p. 3–15, 2003.

DUARTE, G.L.. **O papel da ciência forense na investigação dos crimes de homicídio.** 2009. Dissertação (Mestrado)-Universidade de Coimbra-Coimbra,2009.

DUARTE, G. L. B.; SILVA, B.; MARTINS, B.R.; CASALI, J.M., BETIOLI, A.M.. Influence of river and crushing aggregates composition in self-compacting mortars. **Revista Materia**, v. 27, n. 2, 2022.

ESTEPHANE, P. GARBOCZI, E.J.; BULLARD, J.W.; WALLEVIK, O.H. Three-dimensional shape characterization of fine sands and the influence of particle shape on the packing and workability of mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 97, p. 125–142, mar. 2019.

ESTRADA, N. Effects of grain size distribution on the packing fraction and shear strength of frictionless disk packings. **Physical Review E**, v. 94, n. 6, p. 1–7, 2016.

European Standards, (EN). **EN 12620:2002 +A1:2008-Aggregates for concrete**., 2008.

European Standards (EN). **EN 1015-12 “Methods of test for mortar for masonry - part 12: determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates**, 2016.

FACHONE, P.; VELHO, L. Ciências Forense: Interseção justiça, ciência e tecnologia. **Revista Tecnologia e Sociedade**, 2007. vol.03

FAYET JUNIOR, N. **Dos acidentes de trabalho (sociedade de) risco, proteção dos trabalhadores e direito criminal**. 5 ed. Porto alegre: Aspas Editora, 2022

FENNIS, S. A. A. M. **Design of ecological concrete by particle packing optimization**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Delft University of Technology, Holanda, 2011.

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

FERREIRA, B. B. D. **Tipologia de patologias em revestimento argamassados**. Dissertação (Mestrado no Curso de Pós-Graduação em Construção Civil)-Universidade Federal de Minas Gerais, - Belo Horizonte, 2010.

FERREIRA, R. L. DA S.; BARROS, I.M.S; COSTA, T.C.S; MEDEIROS, M. DE SÁ, M.V.V.A.; CARNEIRO, A.M.P.. Efeitos do uso de areia de praia nas propriedades de argamassas mistas: análise da variação granulométrica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 2, 2019.

FERREIRA, R. L. S.; MEDEIROS, M.; PEREIRA, J.E.S.; HENRIQUE, G.F.; TAVARES, J.C, MARVILA, M.T.; AZEVEDO, A.R.G.. Effects of Particle Size Distribution of Standard Sands on the Physical-Mechanical Properties of Mortars. **Materials**, v. 16, n. 2, p. 844, 15 jan. 2023.

FERRER-ERES M.A., PERIS-VICENTE J., VALLE-ALGARRA F.M., GIMENO-ADELANTADO J.V., SÁNCHEZ-RAMOS S., SORIANO-PIÑOL M.D., Archaeopolymetallurgical study of materials from an Iberian culture site in Spain by scanning electron microscopy with X-ray microanalysis, chemometrics and image analysis, **Microchemical Journal**, v. 95, n. 2, pp. 298-305,ISSN 0026-265X, 2010.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos; estudos e procedimentos de execução**. 1.ed. São Paulo: Editora Pini, 1994. 29p.

FREITAS, Cleverson de. **Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da região metropolitana de Curitiba: propriedades no estado fresco e endurecido**,

Dissertação (Mestrado no Curso de Pós-Graduação em Construção Civil)- Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2010.

FULLER, W. B.; THOMPSON, S. E. The Laws of Proportioning Concrete. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 59, n. 2, p. 67–143, dez. 1907.

FUNK, J., DINGER, D. **Coal griding and particle size distribution studies for coal-waer slurries at high solids content**. New York, 1980.

GALINDO F.B.; TORALES-CARBONARI, B.M. Produção e aplicação de argamassas mistas em Londrina-PR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, III, 1999, Vitória. **Anais** [...] Vitória: ANTAC, 1999.

GALLEGOS, H.; CASABONNE, C. **Albañilería Estructural**. Peru: Fondo Editorial, 2005. Tercera Edición .427p.

GARRIDO, R. G.; GIOVANELLI, A. Criminalística: origens, evolução e descaminhos. **Caderno de Ciências Sociais Aplicada**, 2009. Vitória da Conquista.

GEPAD, Caixa Econômica Federal, Gerência Nacional Padronização e Normas Técnicas SINAPI. **Metodologias e Conceitos**. Brasília: 2019.

GEPAD, Caixa Econômica Federal, Gerência Nacional Padronização e Normas Técnicas SINAPI. **Caderno de Composições para Argamassas**. Brasília: 2019b

GIOVANELLI, Alexandre. Epistemologia da Ciência Forense e a construção de uma síntese teórica: desdobramentos práticos. **Revista Brasileira de Criminalística**, v. 13, n. 2, p. 33-44, 2024.

GOMES, A. O.; NEVES, C. M. M. Proposta de método de dosagem racional de argamassas contendo argilominerais. **Revista Ambiente Construído**. Volume 2, Pag. 13-30, Abr. 2002.

GOMINHO, M.S.L.A. **Caracaterização Microestrutural de Argamassas**. Dissertação (mestrado), IST- Instituto Técnico Lisboa, Lisboa, 2016.

GRANDES, F. A.; SAKANO, V. A.; REGO, A. C. A.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, F.G. Distribuição de pressão em argamassas durante o squeeze flow na configuração de volume constante. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, XIII, 2019, Goiana. **Anais** [...] Goiania: ANTAC, 2019.

GROSS, HANS. **Guia prático para intrução dos processos criminais**; Tradução João Gomes Alves de Sá – Campinas, SP: Editora Millennium, 2022.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal. Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil** 2^a ed. São Paulo: Pini, 2002. 341p.

GUTOWSKI, W. S. A. Termodynamic model of adhesive bond. **The Journal of Adhesion**, 22, p. 183-196, 1987

HAACH, V. G.; VASCONCELOS, G.; LOURENO, P. B. Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2980–2987, 2011.

HADDAD, L. D. DE O.; NEVES, R.R.; OLIVIEIRA, P.V.; SANDOS, W.J.; CARVALHO JUNIOR, A.N.. Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 9299–9314, jul. 2020.

HALES, T. C. A proof of the Kepler conjecture. **Annals of mathematics**, p. 1065–1185, 2005.

HAQUE, B.; TUHIN, I.A; FARID, M.S.S.. Effect of Aggregate Size Distribution on Concrete Compressive Strength 35 SUST. **Journal of Science and Technology**, v. 19, n. 5, p. 35–39, 2012.

HENRIQUES, G. F. **Caracterização da microestrutura de concretos estruturais antigos de barragem: estudo de caso da hidrelétrica de Paulo Afonso IV -PA IV**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

JENKINS, R.; SNYDER, R. L. **Introduction to X-Ray Powder Diffractometry**. New York: John Wiley & sons, Inc. 1996. 403 p. (Chemical Analysis, v.138).

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia (IBAPE). Disponível em: <http://ibape-rj.org.br/>.

Instituto Brasileiro De Auditoria De Obras Públicas (IBRAOP). Orientação técnica 004/2012. Disponível em: https://www.ibraop.org.br/wp-content/uploads/2013/04/OT_IBR0042012.pdf

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Editora IBRACON. 2 volumes. São Paulo. 2^a Edição. 2010.

JIANG, C.; JIN, C.; WANG, Y.; YAN, S.; CHEN, D. Effect of heat curing treatment on the drying shrinkage behavior and microstructure characteristics of mortar incorporating different content ground granulated blast-furnace slag. **Construction And Building Materials**, v. 186, p.379-387, out. 2018. Elsevier BV.

KAUSHIK, S. et al.. Optimisation of Mix Proportion of 3D Printable Mortar Based on Rheological Properties and Material Strength Using Factorial Design of Experiment. **Materials**, v. 16, n. 4, 2023.

KENNY, C., Construction, Corruption, and Developing Countries, World Bank, Washington, DC, 2007. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/571281468137721953/pdf/wps4271.pdf>. Acessado em 18 jul. 2023.

KIM, Y.; LEE, K.; BANG, J.; KWON, S. Effect of w/c ratio on durability and porosity in cement mortar with constant cement amount. **Advances in Material Science and Engineering**, Abril, 2014.

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

KRESCH, A. Reequilíbrio econômico-financeiro em favor da administração em caso de jogo de planilhas – Métodos atualmente utilizados e em desenvolvimento. In. XII SIMPÓSIO NACIONAL DE AUDITORIA DE OBRAS PÚBLICAS, 2008, Brasília. **Anais eletrônicos**, Brasília: Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas, 2008.

KWAN, A. K. H.; FUNG, W. W. S. Packing density measurement and modelling of fine aggregate and mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 6, p. 349–357, 2009.

LANGSTON, Craig; WONG, Francis K.W.; HUI, Eddie C.M. e SHEN, Li-Yin. Strategic assessment of building adaptive reuse opportunities in Hong Kong. **Building and Environment**. Vol. 43, Edição 10, Pag. 1709-1718, Out.2008.

LARA, D., NASCIMENTO, O.; MACEDO, A.; GALLO, G.; PEREIRA, L.; POTY, ESDRAS. Dosagem das argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I,1995, Goiana. **Anais** [...] Goiania: ANTAC, 1995.

LENG, Yang. **Materials characterization: introduction to microscopic and spectroscopic methods**. John Wiley & Sons, 2013.

LI, J.; HUANG, L.; HUANG, S. Optimisation of aggregate gradation of ultra-high-performance concrete based on the modified compressible packing model. **Magazine of Concrete Research**, v. 73, n. 20, p. 1025–1032, 2021.

LIMA, M. C. Comparação de custos referenciais do DNIT e licitações bem sucedidas. In. SIMPÓSIO NACIONAL DE AUDITORIA DE OBRAS PÚBLICAS, 13., 2010, Porto Alegre. **Anais eletrônicos**. Porto Alegre: Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas, 2010..

LIMA, M.C. **Deep Vacuity: Detecção e Classificação Automática de Padrões com Risco de Conluio em Dados Públicos de Licitações de Obras**. Dissertação (Mestrado)-Universidade de Brasília-Brasília, 2021.

LIU, Q.; JIA, D.; MIAO, J. Study of the linear and nonlinear packing model based on mixing of quartz sand. **Powder Technology**, v. 366, p. 382–394, 2020.

LIU, Y.; CHI, Y.; CHEN, S.; JIANG, Q.; MENG, X.; WU, K.; LLI, S... Research on influence laws of aggregate sizes on pore structures and mechanical characteristics of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 442, p. 137606, set. 2024.

LIU, Z.-R.; E, W.M., ZHANG, Z.; WANG, Q.; CHEN, Y..A nonlinear particle packing model for multi-sized granular soils. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 274–282, out. 2019.

LONDERO, C.; LENZ, L.A.; SANTOS, I.M.R, KLEIN, N.S.. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. **Cerâmica**, v. 63, n. 365, p. 22–33, mar. 2017.

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

LOPES, A. *et al.* Manual de Perícias de Engenharia: cálculo de superfaturamento e outros danos ao erário. In. XII SIMPÓSIO NACIONAL DE AUDITORIA DE OBRAS PÚBLICAS, 2008, Brasília. **Anais eletrônicos**, Brasília: Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas, 2008.

LOPES, A.O. **Superfaturamento de obras públicas**. 1a ed. São Paulo: Livro Pronto, 2011.

LOPES, A. O. O Efeito Pedagógico de Operações da Polícia Federal: Um Estudo de Caso da Operação "Caixa de Pandora". **Revista Brasileira de Ciências Policiais**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 67–85, 2015. DOI: 10.31412/rbcp.v6i1.332.

LOPES, A. O.; TRALDI, M.A.B.. Estudo da relação entre a competitividade e os descontos obtidos em processos licitatórios para a contratação de obras públicas no estado de Goiás. In. XVIII SIMPÓSIO NACIONAL DE AUDITORIA DE OBRAS PÚBLICAS, 2018, João Pessoa.

LOPES, A. O. Superfaturamento de Contratos Governamentais de Serviços de Engenharia de Construção – Estudo de Caso da Operação Caixa-Preta - 2009. **Revista Brasileira de Ciências Policiais**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 71–109, 2019.

LOPES, A.O. **Superfaturamento de obras públicas**- do Conceito à Lei nº 14.133/2021- Volume II. 1a ed. Columbia, EUA, 2022.

LOPES, A.O. Overbilling in Urban Pavement Works—A Case Study of a City in the Brazilian Amazon. **ASCE**, 2024.

LOPES JR., Mário .César. **Supercusto**: O lado oculto do superfaturamento de obras públicas. Maceió: Edição do autor, 2014.

LOPES, H. M. T.; PEÇANHA, A. C. C.; CASTRO, A. L. DE. Considerations on the efficiency of Portland cement concrete mixtures based on the particle packing concept. **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.

MAGRO, R.R., **Lavagem de dinheiro em obras públicas**: a casuística da operação lava jato. Artigo (Pós Graduação)-Universidade Federal de Lavras-Brasília, 2022.

MARTINS, A.F., DA CUNHA, B.R., HANLEY, Q.S. *et al.*. Universality of political corruption networks. **Scientific Reports**, v. 12, pp. 6858. 2022.

MARTINS, R.G.L. Fases de confecção de um laudo de exame de demarcação de terra. In: VI Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2012. **Anais** [...]. Brasília, 2012. p. 107 a 118.

MEDEIROS, F.A; ALONÇO, A.S.; BALESTRA, M.R; DIAS, V.O; LANDERHAL JR, M.L. Utilização de veículos aéreos não tripulados em atividades de imageamento georreferenciado. **Engenharia Rural**, nov 2008.

MEDEIROS, J.A. de D. M, PATRIOTRA, R.C; TORRES, S.M. Proposta de Uso de Drones na Realização de Perícias em Patrimônio Histórico: Abordagem Experimental nas Ruínas da Primeira Fábrica de Cimento Portland da América Latina. *Revista Brasileira de Ciências Policiais*, V.8, n.2, p. 205-211, jul, 2017.

MEDEIROS, J.A. de D.M. **Cimento Portland na Ilha Tiriri**: Histórico, Vestígios e Caracterização de Materiais. Tese (Doutorado em Pós-Graduação em Ciências de Materiais)- Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

MEDEIROS, J.A. de D. M, BARBOSA, S.O; ALBUQUERQUE, T.M.M.A. Perícia em engenharia civil e a cadeia de custódia. In: SAAD NETO. *et al.* (Org.). **Nulidades no Processo Penal e a Cadeia de Custódia**: Quebra da cadeia de custódia dos vestígios. 1. ed. São Paulo: Thomson Reuters, 2025, p. 309-323.

MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 78, . September, p. 120–131, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. McGraw-Hill, 4ed, 2013.

MELO, M.C. Laudo de Perícia Criminal Federal: Fraude no caráter competitivo em licitação- Indícios de conluio entre participantes de concorrência *In: VI Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2012. Anais* [...]. Brasília, 2012. p. 29 a 38.

MIRANDA, L. F. Unificando os conceitos de corrupção: uma abordagem através da nova metodologia dos conceitos. **Revista Brasileira de Ciência Política**, [S. l.], n. 25, 2018. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/rbcn/article/view/16400>.

MOLLER, H. Standardless quantitative phase analysis of portland cement clinkers. *World Cement*, p. 75-84, 1995.

MONTEZANO, L.; ALBUQUERQUE, T. M. M. de; MEDEIROS, J. A. D. M.; BARBOSA , S. de O. . Ambiente e resultados de uma inovação tecnológica forense premiada na Polícia Federal. **Revista Brasileira de Ciências Policiais**, Brasília, Brasil, v. 14, n. 11, p. 41–70, 2023.

MOREIRA, A.L. **Princípios de Engenharia de Avaliações**. São Paulo: Pini, 1994.

MORO, Sérgio. **Contra o sistema da corrupção**. 1^a edição. Rio de Janeiro: Primeira Pessoa / Sextante, 2021, 77 p.

MOTA, E.V. **Caracterização de Argamassas Históricas de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado em Pós Graduação em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOTHÉ FILHO, Heitor F., POLIVANOV, Helena, BARROSO, Emílio V.,MOTHÉ, Cheila G. Thermal and mechanical study from granite and marble industry reject. **Thermochimica Acta**. Volumes 392-393, Pag. 47-50, Set. 2002.

MUHADEER, Y. et al.. Optimization of asphalt mixture design based on the compressible packing model. **Frontiers in Materials**, v. 10, n. May, p. 1–13, 2023.

NAKARUA, E. H.; CINCOTTO, M. A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento.** BT/PCC/359 da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

NETO,C.S. **Agregados para concreto.** In:Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: Ibracon.2005.p.323-343.

NEU, D; EVERETT, J.; RAHAMAN, A.; Preventing corruption within government procurement: Constructiong the disciplined and ethical subject. **Journal Critical Perspectives on Accounting**, v 28, pp. 49-61. Mai. 2015.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

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

NGUYEN, V. M.; NGUYEN, T.T. GIOI, H.M.; PHAN, T.V.; SIDDIQUE, R.. Optimizing aggregate grading and residual mortar coefficient in low-cement concrete by using crushed coal mine waste rock as base layers for low-traffic roads. **Construction and Building Materials**, v. 449, p. 138468, out. 2024.

NITKA, M.; TEJCHMAN, J. Effects of aggregate crushing and strain rate on fracture in compressive concrete with a DEM-based breakage model. **Granular Matter**, v. 27, n. 1, p. 1–19, 2025.

NOGUEIRA, Diogo Aquino; **Caracterização de Argamassas Romanas do Sítio Arqueológico do Creiro, Arrábida**, Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova Lisboa, Lisboa, Portugal, 2021.

OLIVEIRA, I.R., STUDART, A.R., PILEGGI, R.G., PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas: Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico.** São Paulo, 2000 .

OLIVEIRA JR, P.S.. Jogo de planilhas em obras públicas: uma metodologia sob o ponto de vista criminal. concorrência *In:* VI Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2012. **Anais** [...]. Brasília, 2012. p. 51 a 70.

OLIVEIRA JR, P.S. **Colaboração da perícia criminal na detecção de fraudes em licitações públicas para execução de obras de engenharia.** Trabalho de conclusão de Curso (Pós-Graduação)-Universidade Federal de Lavras - Lavras, 2022.

OQUENDO-PATIÑO, W. F.; ESTRADA, N. Finding the grain size distribution that produces the densest arrangement in frictional sphere packings: Revisiting and rediscovering the century-

old Fuller and Thompson distribution. **Physical Review E**, v. 105, n. 6, p. 064901, 6 jun. 2022. Organization for Economic Co-Operation and Development, Report on tax fraud and money laundering vulnerabilis involving the real state sector. Disponível em <http://oecd.org/tax/exchange-of-tax-information/42223621.pdf>.

Organization for Economic Co-Operation and Development, Fighting Bid Rigging in IMSS Procurement: Impact of OECD Recommendations, 2018. Disponível em: <https://www.oecd.org/daf/competition/IMSS-procurement-impact-OECD-recommendations2018-ENG.pdf>

PADILHA A. F., AMBROZIO FILHO, F. **Técnicas de Análise Microestrutural.** 1.ed. São Paulo: Editora Hemus, 1985. 190p.

PADILHA, R.; TEOPHILO, A.; ANDALÓ, F.A.; VEJA-OLIVEIROS, D.; CARDENUTO, J.P; BERTOCCO, G.; NASCIMENTO, J.; YANG, J.; ROCHA, A. Inteligência artificial e os novos desafios da Ciência Forense. **Estudos Avançados**, 2021. vol.09., n. 11. DOI: 10.1590/s0103-4014.2021.35101.009.

PARRACHA, J.L., SILVA A.S., COTRIM, M., FARIA, P. Mineralogical and microstructural characterization of rammed earth and earthen mortars from 12th century Paderne Castle. **Journal of Cultural Heritage**, v. 42, pp. 226-239, 2020.,

PARTELI, E. J. R. et al.. Attractive particle interaction forces and packing density of fine glass powders. **Scientific Reports**, v. 4, p. 1–7, 2014.

PATRIOTA, R.C. Mapeamento de fachadas usando aeronave remotamente pilotada. In: IX Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2018. **Anais** [...]. Fortaleza, 2018a. p. 150 a 165.

PATRIOTA, R.C. Exame em obra de engenharia usando RPA: Canais Uganda, Sudão e Antônio Miranda-Paulista/PE. In: IX Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2018. **Anais** [...]. Fortaleza, 2018b. p. 166 a 178.

PEREIRA, G.P.C.. **O mercado da construção civil para obras públicas como instrumento de auditoria:** uma abordagem probabilística. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2002.

PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. Rheology and particle-size distribution of pumpable refractory castables. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 80, n. 10, p. 52–57, 2001.

POLÍCIA FEDERAL- Instrução Técnica nº 4/2006 – DITEC de 2006 - Dispõe sobre a padronização de procedimentos e exames no âmbito da perícia de Engenharia Legal (Engenharia Civil). Diretoria Técnico- Científica (DITEC).

POLÍCIA FEDERAL -Instrução Técnica nº 2/2010 – DITEC – Orientação técnica nº001-DITEC-ambas dispõe sobre a padronização de procedimentos e exames para análise de desvio

de recursos públicos em obras no âmbito da perícia de Engenharia Legal (Engenharia Civil). Diretoria Técnico- Científica (DITEC). Polícia Federal, 2010.

POWERS, T. C. **The properties of fresh concrete**. New yourk: [s.n.].

QUARCIANI, V.A.; CINCORRO, M. A.; CHOTOLI, F. F. Caracterização da composição de argamassas de assentamento e revestimento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, III, 1999, Vitória. **Anais** [...] Vitória: ANTAC, 1999.

QUARCIANI, V. A.; CHOTOLI, F.F.; ÂNGULO,S.C., GUILGE, M.S.; CAVANI, G.R.; CASTRO, A.L.; CINCOTTO, M.A.. Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 175–187, 2009.

RABELLO, E. **Curso de Criminalística**. Porto Alegre. Ed. Sagra Luzzato, 1996.

RANI, J. J. et al.. Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A microstructural and particle packing investigation. **Revista Materia**, v. 29, n. 3, p. 3–10, 2024.

RANKIN, B. W. J.; BOLTON-KING, R. **Crime Scene to CourtThe Essentials of Forensic Science**, Royal Society of Chemistry, p. 1–36, 5th ed., 2024.

RAO, G. A. Generalization of Abrams' law for cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 3, p. 495–502, 2001.

RAUPP, A. B., SIGNOR, R. O desempenho da obra como objeto de análise de dano ao erário. In: VII Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2014. **Anais** [...]. Brasília, 2014.

RECENA, F.A.P, **Conhecendo a Argamassa**, 2Ed. Porto Alegre: Editora Universitária Pucrs, 2017. 38p.

REGO, F.; CINCOTTO, M. A. A influência do tipo de cal hidratadas nas propriedades das pastas de cimento-cal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, II, 1997, Salvador. **Anais** [...] Salvador: ANTAC, 1997.

REISS, R. A. Os métodos Scientificos nos Inqueritos Judiciarios e Policiaes; Boletim Policial, 1^a ed, 1907, pp 16. Disponível em <https://memoria.bn.br/DocReader/docreader.aspx?bib=171379&pasta=ano%20190&pesq=a%20humanidade%20progride&pagfis=18>.

RIBAS, L. F. et al.. Improving mortar properties using traditional ceramic materials ground to precisely controlled sizes. **Heliyon**, v. 10, n. 20, p. e39614, 2024.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 4. ed. rev. Belo Horizonte: UFMG, 2015. 112 p.

RISTENBATT II, R.R.; HIETPAS, J.; DE FOREST, P.R.. Traceology, criminalistics, and forensic science. **Journal of Forensic Sciences**,. ago. 2021. DOI: 10.1111/1556-4029.14860.

ROMANO, R. C. O.; MENDES, T. M.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Efeito do tempo de mistura nas propriedades de argamassas com ar incorporado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VII, 2007, Recife. *Anais* [...]. Recife: ANTAC, 2007.

ROMANO, R. C. D. O.; TORRES, D. D. R.; PILEGGI, R. G. Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 219–226, 2015.

ROQUIER, G. The 4-parameter Compressible Packing Model (CPM) including a new theory about wall effect and loosening effect for spheres. **Powder Technology**, v. 302, p. 247–253, nov. 2016.

ROQUIER, G. The 4-parameter Compressible Packing Model (CPM) for crushed aggregate particles. **Powder Technology**, v. 320, p. 133–142, 2017.

ROQUIER, G. A Theoretical Packing Density Model (TPDM) for ordered and disordered packings. **Powder Technology**, v. 344, p. 343–362, 2019.

ROQUIER, G. Estimation of voids in a multi-sized mineral aggregate for asphalt mixture using the Theoretical Packing Density Model. **Construction and Building Materials**, v. 367, p. 130302, fev. 2023.

ROQUIER, G. A century of granular packing models. **Powder Technology**, v. 441, n. January, p. 119761, 2024a.

ROQUIER, G. Evaluation of three packing density models on reference particle-size distributions. **Granular Matter**, v. 26, n. 1, 2024b.

ROSEMANN, F. e AZEVEDO FILHO, R.N. Estudo de caso: comparação entre preços das tabelas de referência e preços reais de obra de recuperação de pavimento aeroviário. In: VI Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2012. *Anais* [...]. Brasília, 2012. p. 83 a 89.

ROUX, Claude; BUCHT, Rebekah; CRISPINO, Frank; DE FOREST, Peter; LENNARD, Chris; MARGOT, Pierre; MIRANDA, Marcia D.; NICDAEID, Niamh; RIBAUX, Olivier; ROSS, Annie; WILLIS, Sue. The Sydney declaration – Revisiting the essence of forensic science through its fundamental principles. **Forensic Science International**, v. 332, 2022.

SABBATINI, F. H. **Argamassas de Assentamento para Paredes de Alvenaria Resistente**; Estudo Técnico ET-91. 2.ed. São Paulo: ABCP, 1998. 44p.

SABIH, G.; TAREFDER, R. A.; JAMIL, S. M. Optimization of Gradation and Fineness Modulus of Naturally Fine Sands for Improved Performance as Fine Aggregate in Concrete. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 66–73, 2016.

SAFERSTEIN, RICHARD; **Criminalistics: An introduction to Forensic Science**. 10a ed. New Jersey: Prentice Hall, 2011.

SANTOS, A. M.; COSTA E SILVA, A.J; MOTA; J. M. F.: Influência da Adição de Cal Hidratada na Aderência do Preparo da Base Chapisco e Argamassa para Revestimento. **Revista Materia;** v.26, n.03, out. 2021.

SANTOS, W. J. **Argamassa de alto desempenho.** Dissertação (Mestrado) -Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

SANTOS, W. J. **Desenvolvimento de Metodologia de Dosagem de Argamassas de Revestimento e Assentamento.** Tese (Doutorado em Pós -Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

SANTOS, W. J.; ALVARENGA, R.C.S, PEDROTI, L.G.; SILVA, R.C.; FREIRE, A.S.; MORAES, B.A.; CARVALHO, C.C.. Proposta de método de dosagem para argamassas de revestimento com areia artificial de britagem. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 225–243, 2018.

SEBASTIANY, A.P.; PIZZATO, M.C; PINO, J.C; SALGADO, T.D.M. A utilização da ciência Forense e da Investigação Criminal como estratégia didática na compreensão de conceitos científicos. **Didáctica de la Química, Universiad Nacional Autónoma de Mexico.** nov. 2012.

SCHILLER, A. P. S.; PINZ, F.P.; KURZ, M.N et al. Análise comparativa de argamassas alternativas produzidas com diferentes tipologias de resíduos. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, p. e405111335668, 10 out. 2022.

SCHULZE, J. Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars .**Cement and Concrete Research.**, Mar., 1999.

SCRIVENER, L. K. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification. **Cement and Concrete Composites**, 26, p.935-945, 2004. SILVA, A. F. P. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana.** 1. ed. São Paulo: Pini, 1995.

SEAR, L. K. A.; DEWS, J.; KITE, B.; HARRIS, F. C.; TROY, J. F. Abrams law, air and high water-to-cement ratios. **Construction and Building Materials.**, 1996. Vol. 10, Nº 3, p. 221-226.

SEBSADJI, S. K. Determining concrete properties for different optimized combined concrete mixtures: Novel mathematical approach. **Powder Technology**, v. 409, p. 117756, set. 2022.

SELMO, S. M. S.; **Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento Externo de fachadas dos edifícios.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo,1989.

SELMO, S.M.S.; HELENE, P.R.L. – **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachada dos edifícios** – Escola Politécnica da USP – São Paulo, 1991.

SHAFIG, P.; ASADI, I.; AKHIANI, A. R. ; MAHYUDDIN, N. B.; HASHEMI, M. Thermal properties of cement mortar with different mix proportions. **Materiales de Construcción**, v. 70, n.339, p. e224, 2020.

SHAN, M.; CHAN, A. P. C.; Le, Y.; XIA, B.; HU, Y. (2015). "Measuring corruption in public construction projects in China." **J. Prof. Issues Eng. Educ.**, vol. 142, fev.2015

SHUTTER, G., POPPE, A.-M. "Quantification of the water demand of sand in mortar", **Construction and Building Materials**, v.18, pp.517-521, 2004.

SIGNOR, R. e GRIPP, W.G. A influência da localização das obras nos custos estimados em perícias de engenharia. *In: VIII Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2016. Anais [...]*. Maceió, 2016. p. 125 a 144.

SIGNOR, R. Método probabilístico para orçamento e detecção de sobrepreços em obras de engenharia. *In: VIII Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2016. Anais [...]*. Maceió, 2016.

SIGNOR, R.; LOVE, P.E.D; OLANTUNJI, O.A.; VALLIM, J.J.C.B.; RAUPP, A.B. Collusive bidding in Brazilian infrastructure projects. **Forensic Engineering**, vol 170 2017.

SIGNOR, R.; LOVE, P.E.D; BERLAMINO, A.T.N; OLANTUNJI, O.A.. Detection of Collusive Tenders in Infrastrucure Projects: learnign from Operation Car wash. **Journal of Construction, Engennering and Management** 2020a.

SIGNOR, R.; LOVE, P.E.D; AIKA, LAVAGNON. K. White Collar Crime: unerathing collusion in the procurement of infrastructure projects. **IEE Transaction on Engennering Management** 2020b.

SIGNOR, R.; LOVE, P.E.D; OLIVEIRA JR, A., LOPES, A.O; OLIVEIRA JR., P.S. Public Infrastructure Procurement: Detection collusion in capped firs-priced auctions. **Journal Of Infraestructure System**, 2020c.

SIGNOR, R.; BALLESTEROS-PEREZ, P.; LOVE, P.E.D;. Collusion Detection in Infraestructure Procurement: a modified order statisc method for uncapped auctions. **IEE Transaction on Engennering Management**, 2021.

SILVA, F. G. S. **Proposta de Metodologias Experimentais Auxiliares à Especificação e Controle das Propriedades Físico-Mecânicas dos Revestimentos em Argamassa.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

SILVA FILHO, L.O. Pericia em superfaturamento de obras públicas: o que não vai para o papel. *In. XII SIMPÓSIO NACIONAL DE AUDITORIA DE OBRAS PÚBLICAS*, Brasília. Anais eletrônicos, Brasília: Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas, 2008

SILVA FILHO, L.O, LIMA M.C., MACIEL R.G Efeito barganha e cotação: fenômenos que permitem a ocorrência de superfaturamento com preços inferiores às referências oficiais. **Revista Perícia Criminal**, a. 13, n 29, 2012

SILVA FILHO, L.O. Exames sem protocolos e complexidade numa perícia de engenharia sobre encheres. *In: VIII Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2016. Anais [...]*. Maceió, 2016. p. 181 a 201.

SILVA, G.M; NASCIMENTO, I.M. Dinâmica dos recentes desabamentos na cidade do Rio de Janeiro. **Interforensics 2021**, pp 72, nov. 2021

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC, 2022. Disponível em:<https://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=68>. Acesso em 12/06/2022.

SING, S.B.; MUNJAL, P.; THAMMEISHETTI, N., Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar. **Journal of Building Engineering**, Set., 2015.

SOGLIO, R.A.. A ciência a serviço da justiça: A criminalística como forma de auxílio no combate ao crime. **História da Ciência e Ensino**, vol. 12, 2015, p. 86-99.

SOTO, N. T. A; MACIOSK, G.; ARAÚJO, E.M.; HOPPE FILHO, J.. Measuring packing density and water demand of Portland cement and SCMs by the mixing energy method. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 16, n. 5, p. 1–14, 2023.

SOTO, N. T. A.; MACIOSKI, G.; HOPPE FILHO, J.; KLEIN, N.S.. Mix design of eco-efficient high-strength mortars optimized by the compressible packing model. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 17, n. 6, p. 1–18, 2024.

SOUZA, A.J; PINHEIRO, B.C.A E HOLANDA, J.N.F. Recycling of gneiss rock waste in the manufacture of vitrified floor tiles. **Journal of Environmental Management**. Volume 91, Edição3. Pag. 685-689, Fev., 2010.

SOUZA, M.T.; CESCONETO, F.R., ARCARO, S.; RAUPP-PEREIRA, F.; NOVAES DE OLIVEIRA, A.P., Caracterização de areias de quartzo do estado de Mato Grosso do sul para aplicações industriais). **Cerâmica**, 2014. V. 60 pp 569-574

SPONCHIADO, S.; CARVALHO, A.M. Características primárias e secundárias na precificação de imóveis *In: VIII Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2016. Anais [...]*. Maceió, 2016a. p. 218 a 222.

SPONCHIADO, S.; CARVALHO, A.M. Taxas de juros para avaliação de imóveis rurais obtidas com base no método da renda Agrosilvapastoril. *In: VIII Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2016b. Anais [...]*. Maceió, 2016b. p. 243 a 247.

SPÓSITO, F.A.: **Análises Não Destrutivas de Argamassas Mistas de Revestimento Com Incorporação de Resíduos de PET**. Dissertação (Mestrado em Pós Graduação Em Engenharia Civil)-Universidade Estadual Paulista, 2020.

STOLZ, C. M.; MASUERO, A. B. Influence of grains distribution on the rheological behavior of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 261–271, 2018.

STOVALL, T.; DE LARRARD, F.; BUIL, M. Linear packing density model of grain mixtures. **Powder Technology**, v. 48, n. 1, p. 1–12, set. 1986.

SUN, Y. et al.. A new mixture design methodology based on the Packing Density Theory for high performance concrete in bridge engineering. **Construction and Building Materials**, v. 182, n. September, p. 80–93, 2018.

TAHEREH, K, e HAMID, E.. Mechanical Properties and Microstructure Evaluation of Cement Mortar with Different Cement Strength Classes by Image Analysis. **Arabian Journal of Science and Engineering**, 22 sept. 2021.

THAMBOO, J.; JAYARATHNE, N. BANDARA, A., Characterisation and mix specification of commonly used masonry mortars. **Springer Nature Journal.**, Março, 2019.

TOKARSKI, R. B.; MATOSKI, A.; CECHIN, L.; WEBER, A.M.. Comportamento das argamassas de revestimento no estado fresco, compostas com areia de britagem de rocha calcária e areia natural. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, 2018.

Tribunal de Contas da União (TCU). **Obras Públicas: Recomendações básicas para contratação e fiscalização de Obras de Edificações Públicas**. 4^a ed., Brasília, 2014. Disponível em: https://portal.tcu.gov.br/data/files/1E/26/8A/06/23DEF610F5680BF6F18818A8/Obras_publicas_recomendacoes_basicas_contratacao_fiscalizacao_obra_edificacoes_publicas_4_edicao.PDF.

Tribunal de Contas da União (TCU). **FISCOBRAS 20 ANOS**, 2016. Disponível em: https://portal.tcu.gov.br/data/files/93/C4/3D/41/F6DEF610F5680BF6F18818A8/Fiscobras_20_anos.pdf.

Tribunal de Contas da União (TCU). **Roteiro de auditoria de Obras Públicas**. Secretaria Geral de Controle Externo-SEGECEX, 2014^a. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A8182A159B6EC170159B7A9382B0701>.

Tribunal de Contas da União (TCU). **Orientação para elaboração de planilhas orçamentárias de obras públicas**. Secretaria Geral de Controle Externo-SEGECEX, 2014b. Disponível em: https://portal.tcu.gov.br/data/files/BF/21/7F/EE/965EC710D79E7EB7F18818A8/Orientacoes_elaboracao_planilhas_orcamentarias_obra_publicas.PDF.

TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

TRISTÃO, F.A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

VALLIM, J. J. C. B.; **Engenharia Forense: Metodologias Aplicadas na Operação Lava Jato** – Curitiba: Juruá editora, 2018.

VALLIM, J.J.C.B . Estudo dos fenômenos econômicos nos preços de insumos em obras de grande porte: análise comparativa de preços de insumos verificados em obras investigadas na operação lava jato frente aos preços de referência oficial. In: IX Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal, 2018. **Anais** [...]. Fortaleza, 2018b. p. 251 a 267.

VALLIM, João José De Castro Baptista. **O uso do modelo de raciocínio baseado em casos de monitoramento de conluio em licitações de obras de pavimentação urbana.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal do Paraná-Curitiba, 2020. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/67329>.

Válek, J., Veiga, M.R. Characterisation of mechanical properties of historic mortars. In 9th International Conference on Structural Studies, repairs and Maintenance of Heritage Architecture, Malta. STREMAH, 2005.

VAZ, F.H.B., CARASEK, H., Resistência de aderência de revestimentos de argamassa-contribuição por meio de mapeamento e revisão sistemática de literatura para futuras pesquisas no tema, **Cerâmica**, v. 65, n. 374, p. 303-318, 2019.

VELHO, J. A; GEISER, G. C.; ESPINDULA, A. **Ciências Forenses:** Uma introdução às principais áreas da criminalística moderna. In: VELHO, J. et al.. (Org). 4. ed. Campinas: Millennium, 2021, 001-016.

VENKATARAMA REDDY, B. V.; GUPTA, A. Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil-cement block masonry. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 8, p. 1614–1623, 2008.

VIEIRA, M. E. M. ; SILVA, M. L. S. e .; OLIVEIRA, L. F. C. de; PERRONE, Ítalo T.; STEPHANI, R. . X-ray energy dispersive spectroscopy (EDS) coupled with scanning electron microscope (SEM): fundamentals and applications in dairy products. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. e262101018622, 2021.

VILHENA, P. **Corruption: Brazil's Everlasting Parasite.** 2018. Honors Undergraduate theses. Bachelor or Arts-B.A. College of Sciences. Political Science Departament. University of Central Florida. Orlando, FL, 70p United States. Em:<https://stars.library.ucf.edu/honortheses/320/>.

VLADIMIR, G. H., VASCONCELOS, G.; LORENÇO, P.B. Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and Hardened properties of mortars. **Construction and Building Materials**, jun. 2011, Volume 25, Issue 6, pp. 2980-2987.

WANG, E. e KO, Y. S. Comparison of mechanical and physical properties of SBR-polymer modified mortars using recycled waste materials. **Journal of Industry and Engineering Chemistry.**, Fev., 2008.

WEITZ, D. A. Packing in the Spheres. **Science**. n.303, p.968, fev. 2004.

WESTERHOLM, M. et al.. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 4, p. 274–282, 2008.

WIĄCEK, J.; STASIAK, M. Effect of the particle size ratio on the structural properties of granular mixtures with discrete particle size distribution. **Granular Matter**, v. 20, n. 2, p. 1–9, 2018.

WILL, G. Powder diffraction: the Rietveld method and two stage method to determine and refine crystal structures from powder diffraction data. Berlin: Springer, 2006. 224 p.

WISSMANN, Jorge Augusto; DIAS FILHO, Claudemir Rodrigues. **Engenharia Forense: desabamentos e soterramentos**. Campinas, SP. Millennium Editora, 2024.

WONG, V.; KWAN, A. K. H. A 3-parameter model for packing density prediction of ternary mixes of spherical particles. **Powder Technology**, v. 268, p. 357–367, dez. 2014.

WU, J. et al.. Effect of aggregate morphology characteristics on the voidage of aggregate loose packing based on 3D discrete element method. **Construction and Building Materials**, v. 348, p. 128598, set. 2022.

WU, Souheng. **Polymer interface and adhesion**. Routledge, 1982.

YOSHIDA, A. T. e BARROS, M.M.S.B. Caracterização das argamassas no estado fresco: peculiaridades na análise de argamassas industrializadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I, 1995, Goiana. **Anais** [...] Goiania: ANTAC, 1995.

YOOD, T. L. Factors Controlling Maximum and Minimum Densities of Sands. **ASTM Special Technical Publication**, n. January 1972, p. 98–112, 1972.

YU, A., STANDISH, N. Characterization of non-spherical particles from their packing behaviour. **Powder Technology**, v. 74, p. 205–213, 1993.

YU, A. B.; ZOU, R. P.; STANDISH, N. Modifying the Linear Packing Model for Predicting the Porosity of Nonspherical Particle Mixtures. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 35, n. 10, p. 3730–3741, 1 jan. 1996.

Zivica, V. Effects of the low water/cement ratio. **Construction and Buildings Materials**, v.23, Issue 12, dec., 2009.

ANEXOS

Anexo 01- Resultado do Ensaio MEV/EDS

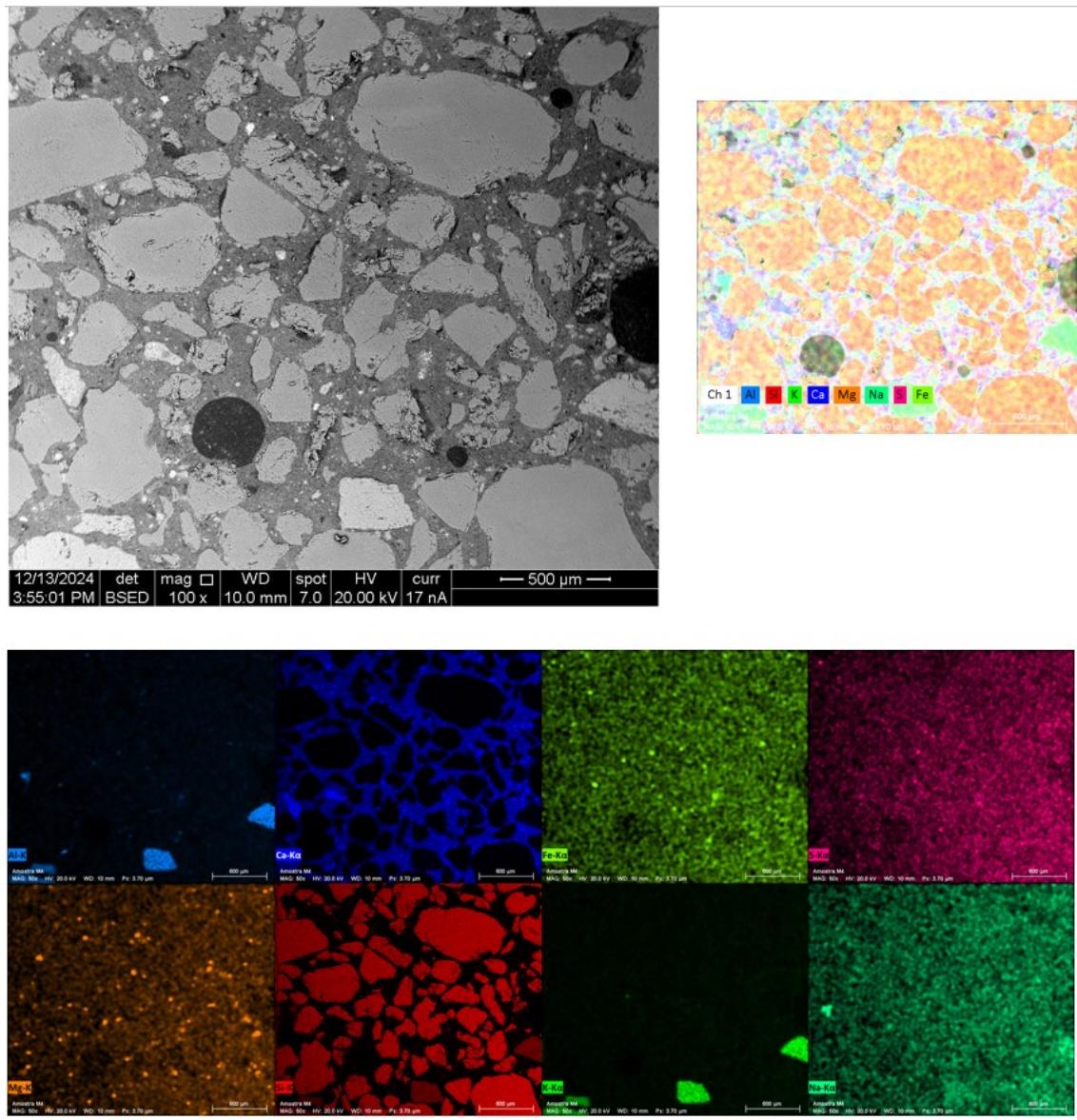


Figura 82- Imagem do EDS da argamassa M4.

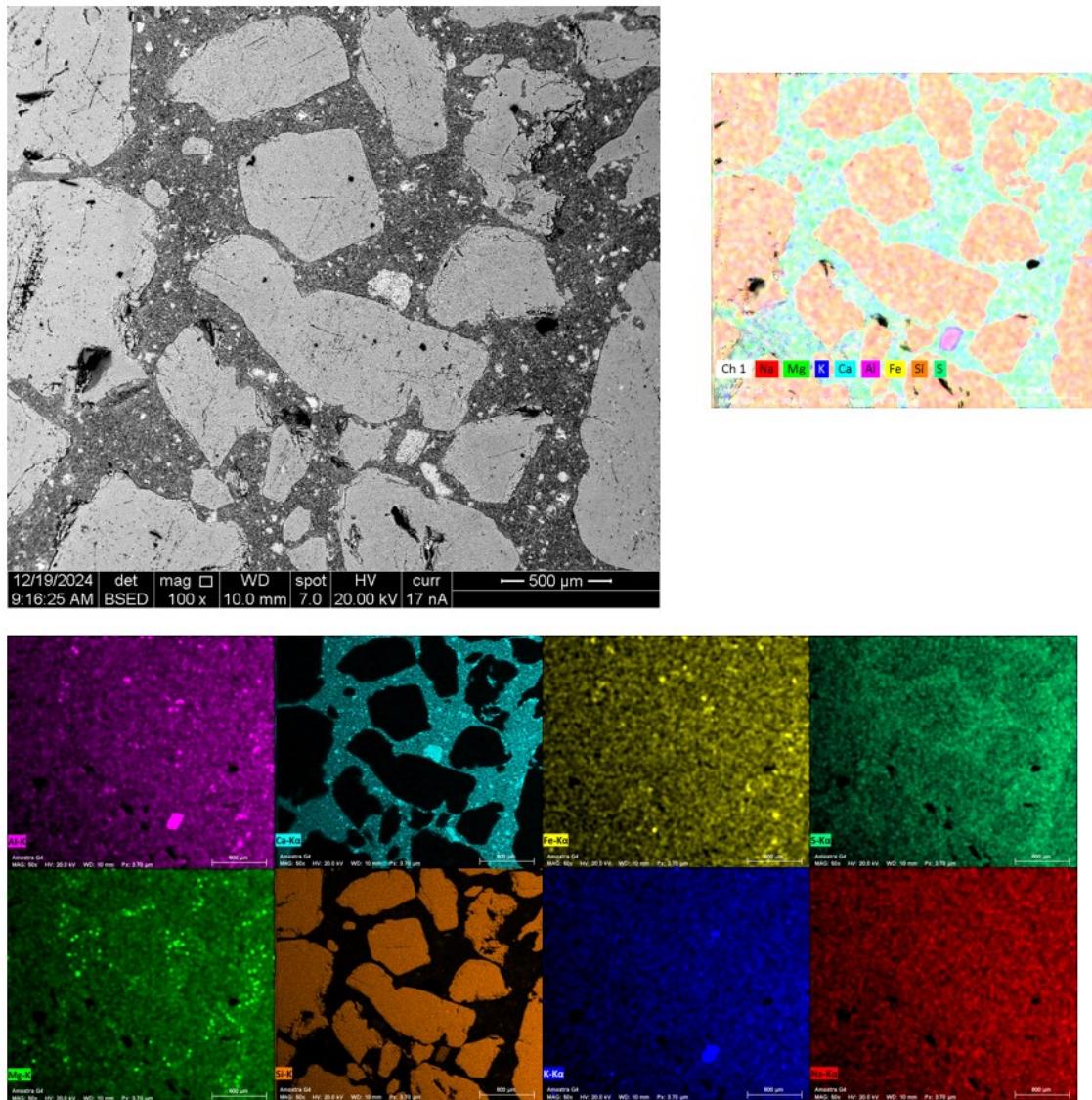


Figura 83- Imagem do EDS da argamassa G4.

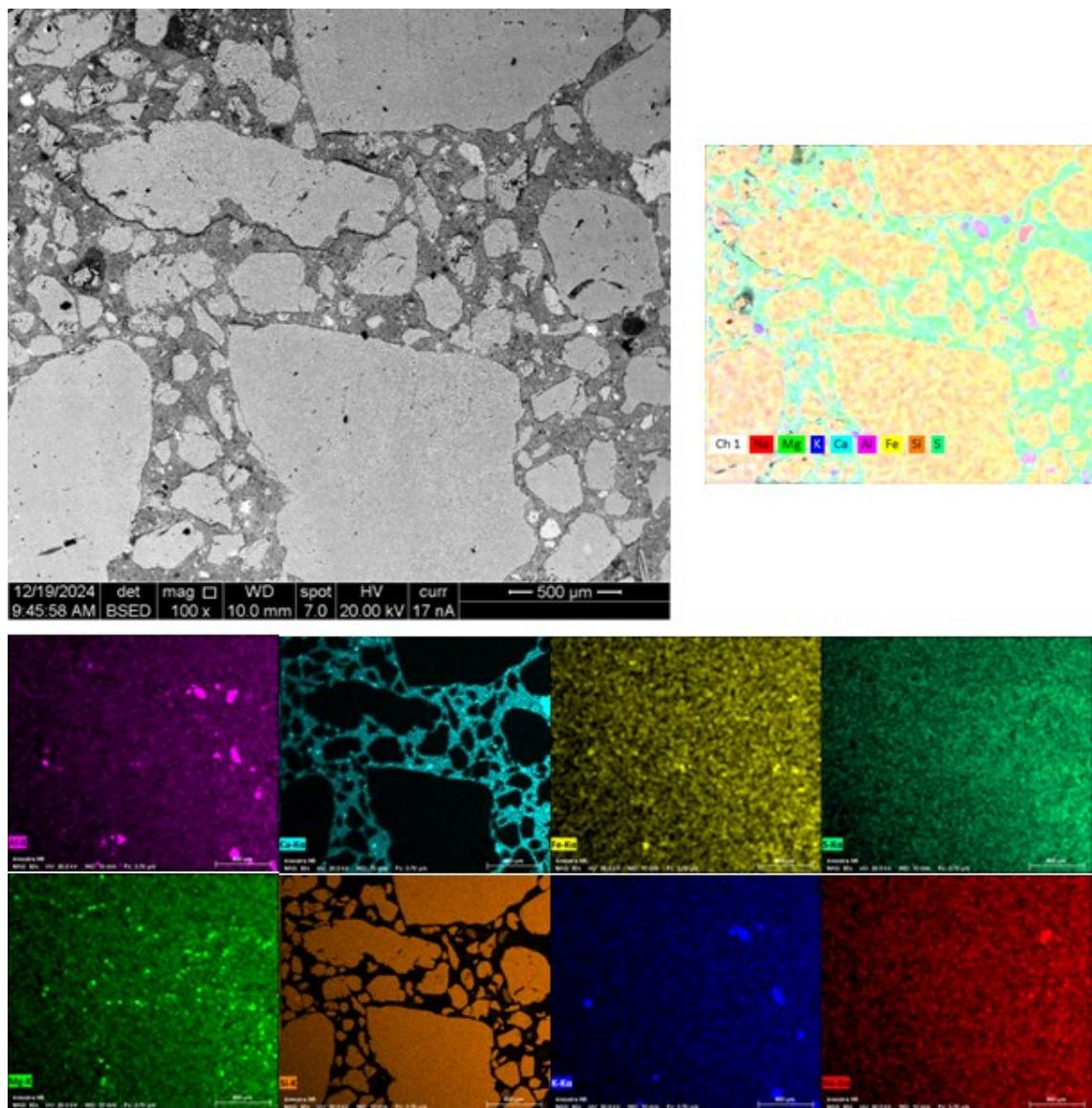


Figura 84- Imagem do EDS da argamassa M5.

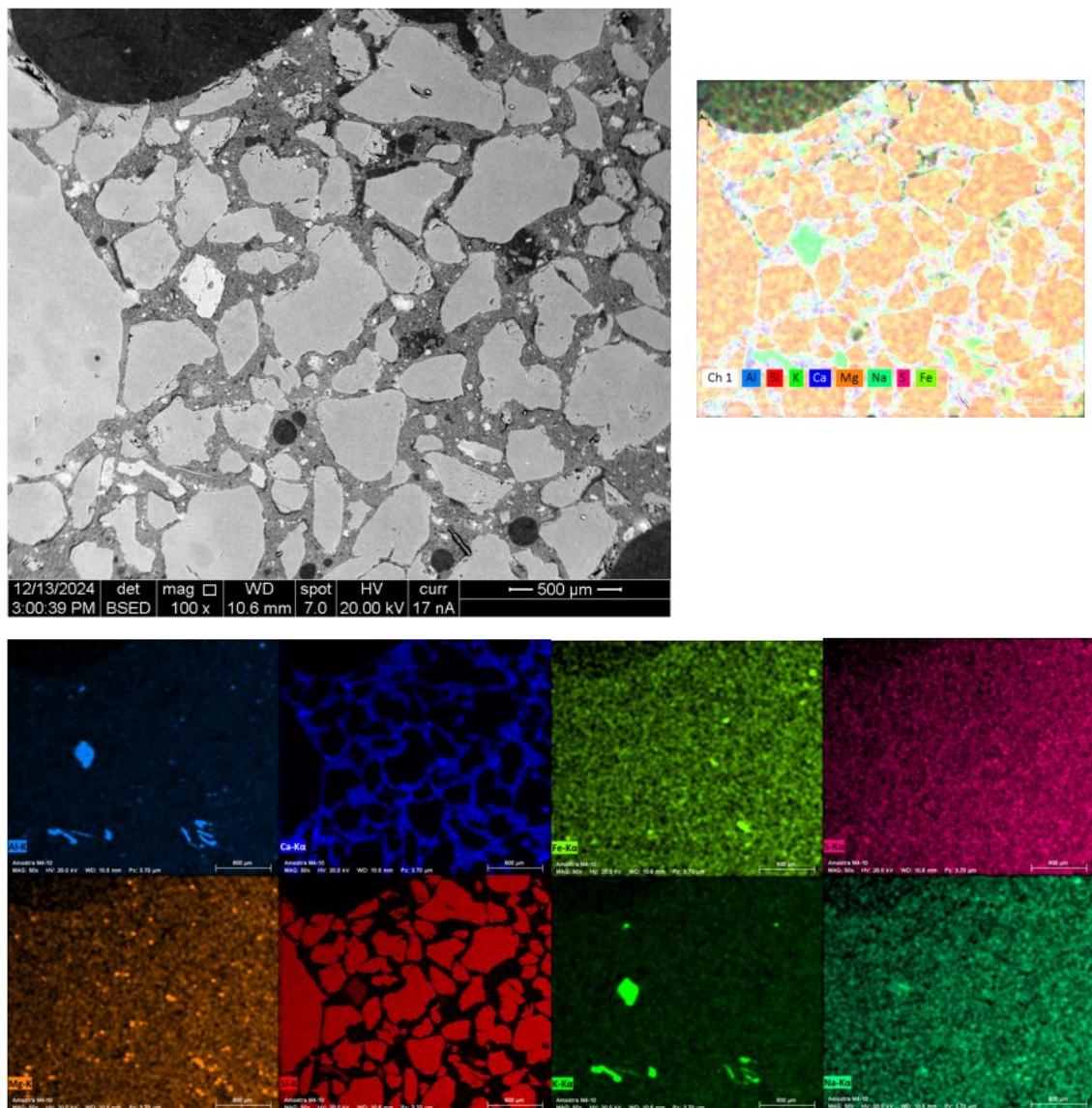


Figura 85- Imagem do EDS da argamassa M4-10.

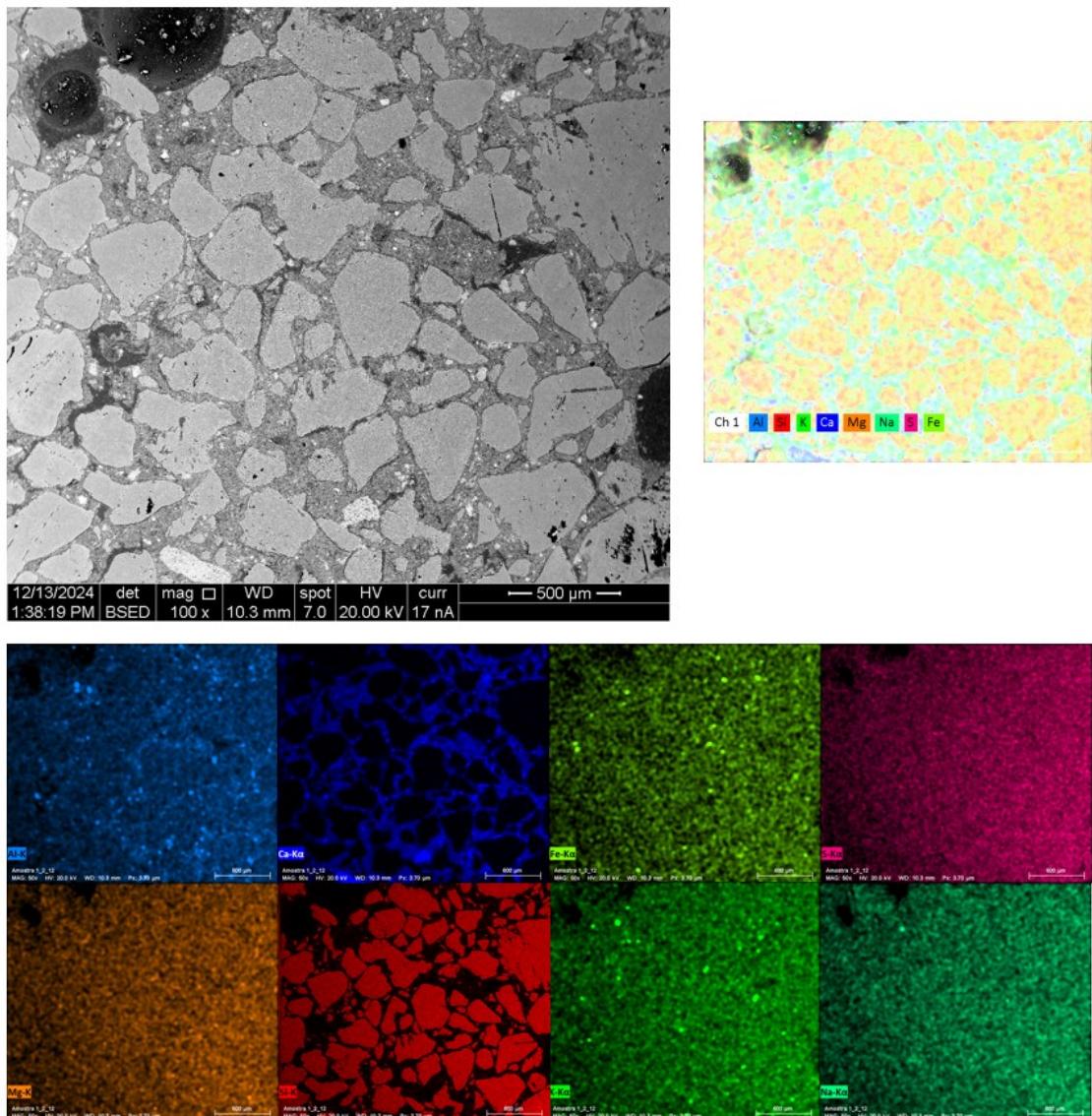


Figura 86- Imagem do EDS da argamassa 1:2:12

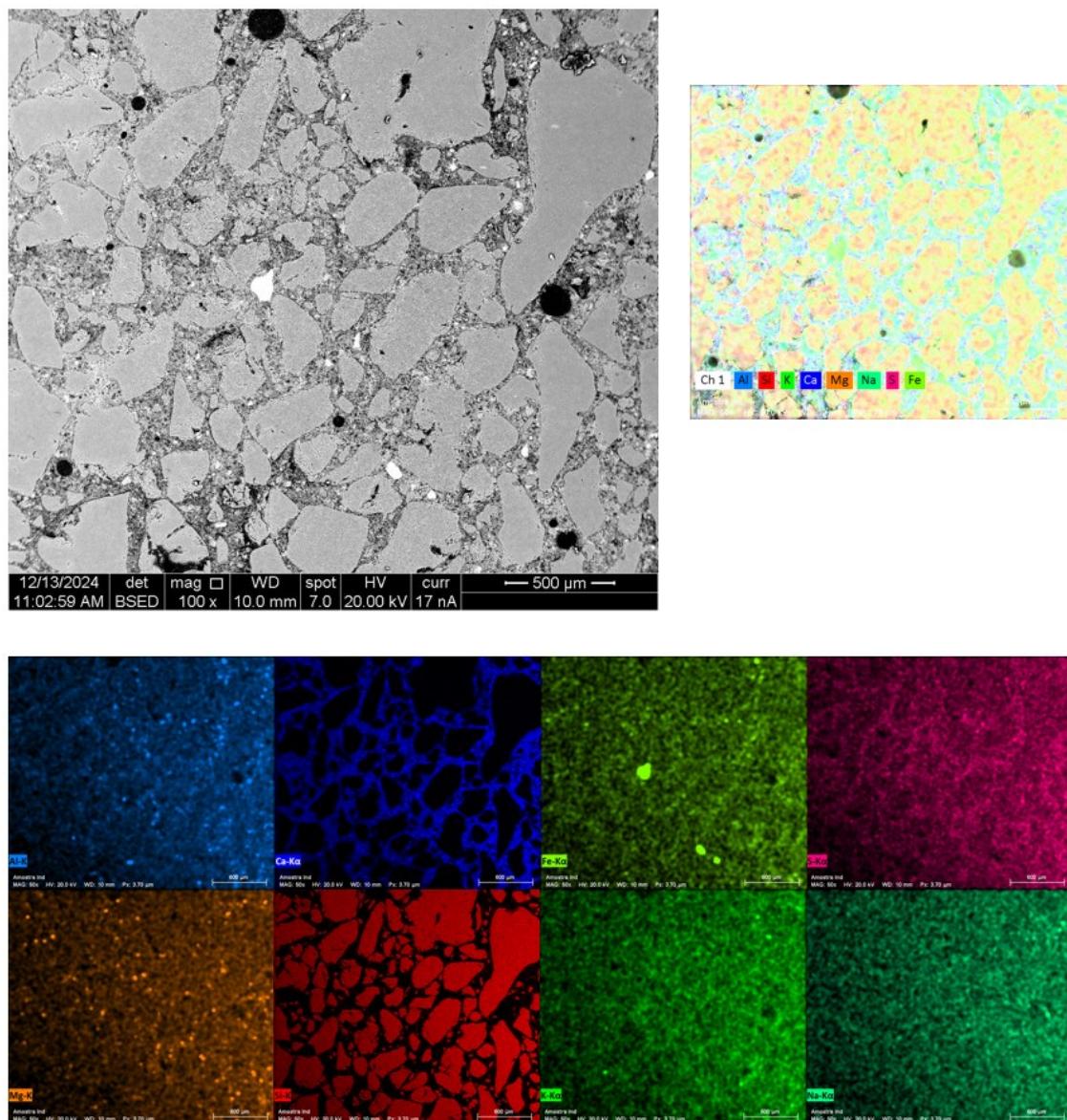


Figura 87- Imagem do EDS da argamassa Industrializada.

Anexo 02- Resultados do Ensaio DRX- Difratogramas

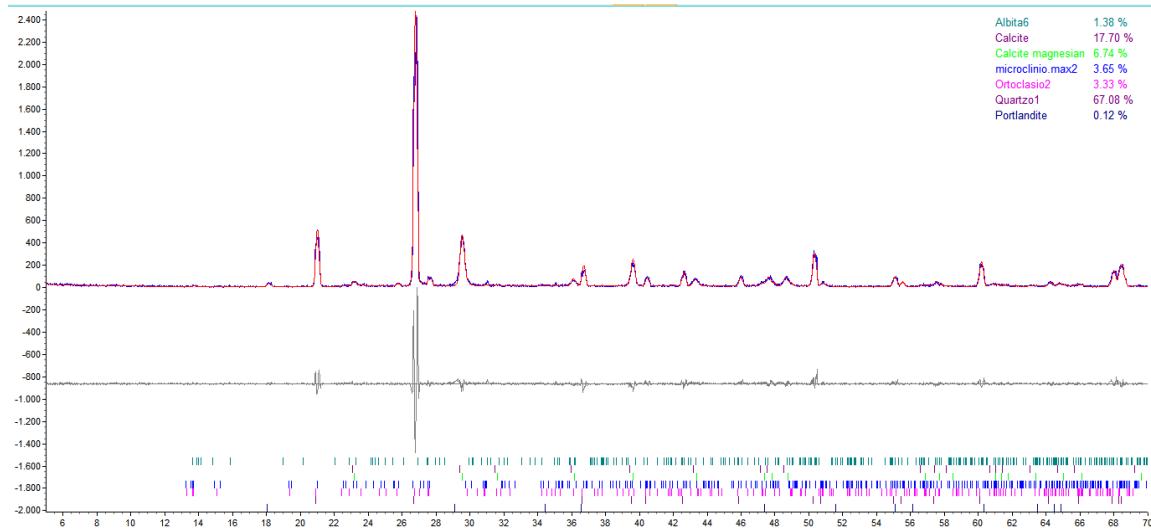


Figura 88- Difratograma da argamassa M4.

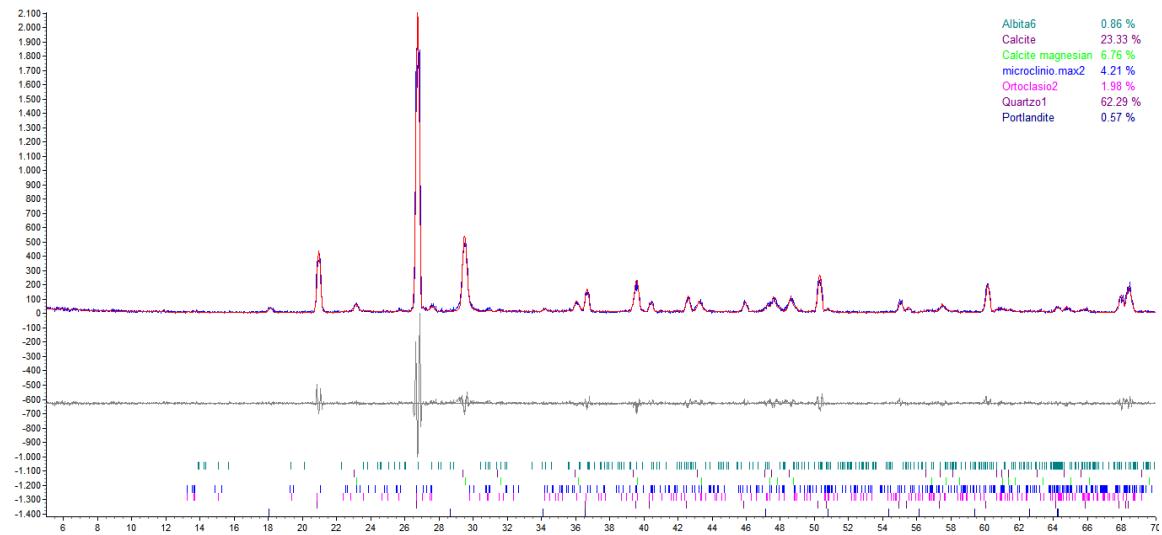


Figura 89- Difratograma da argamassa G4.

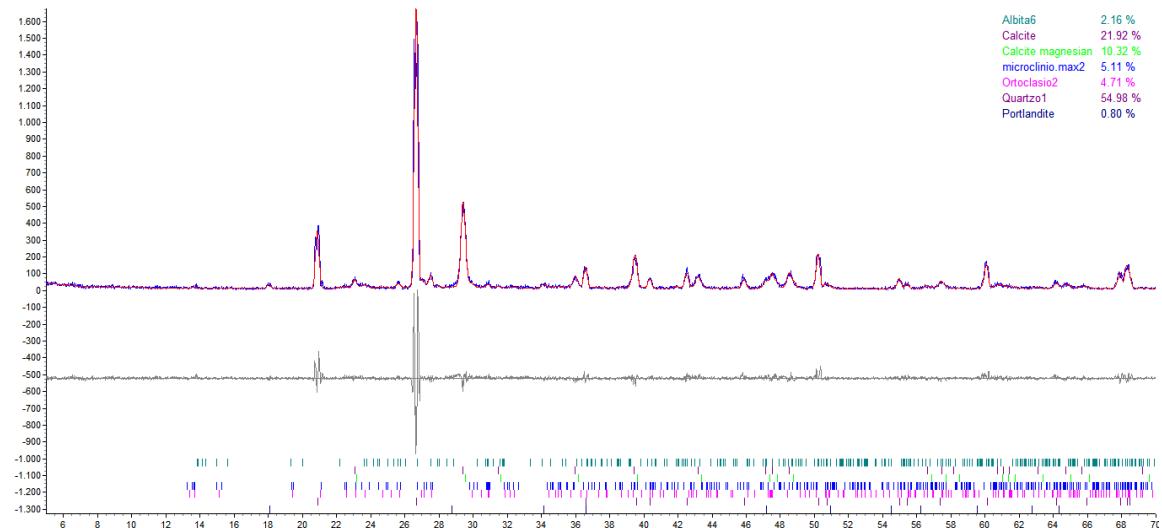


Figura 90- Difractograma da argamassa M5.

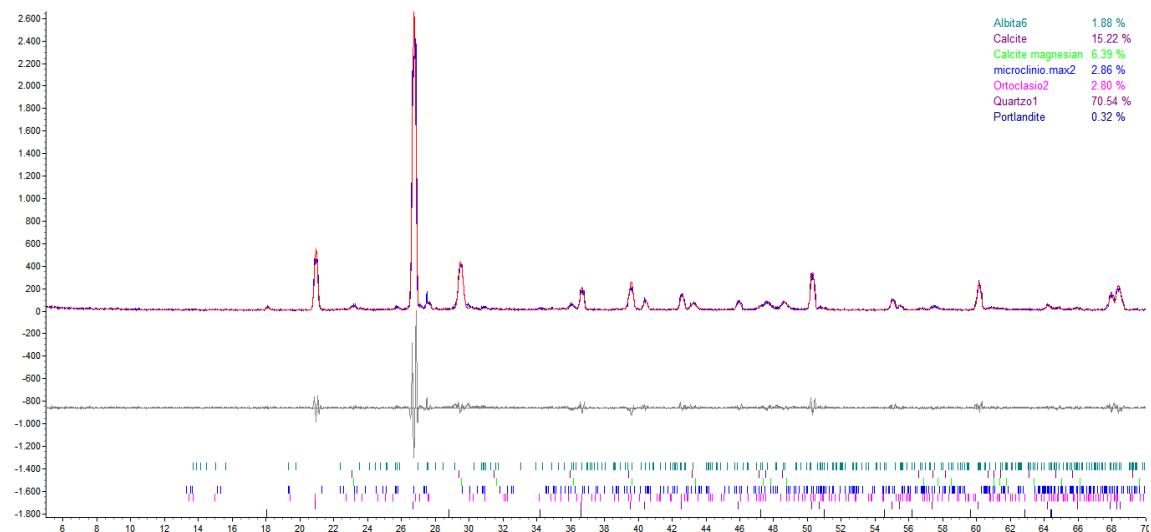


Figura 91- Difractograma da argamassa M4-10.

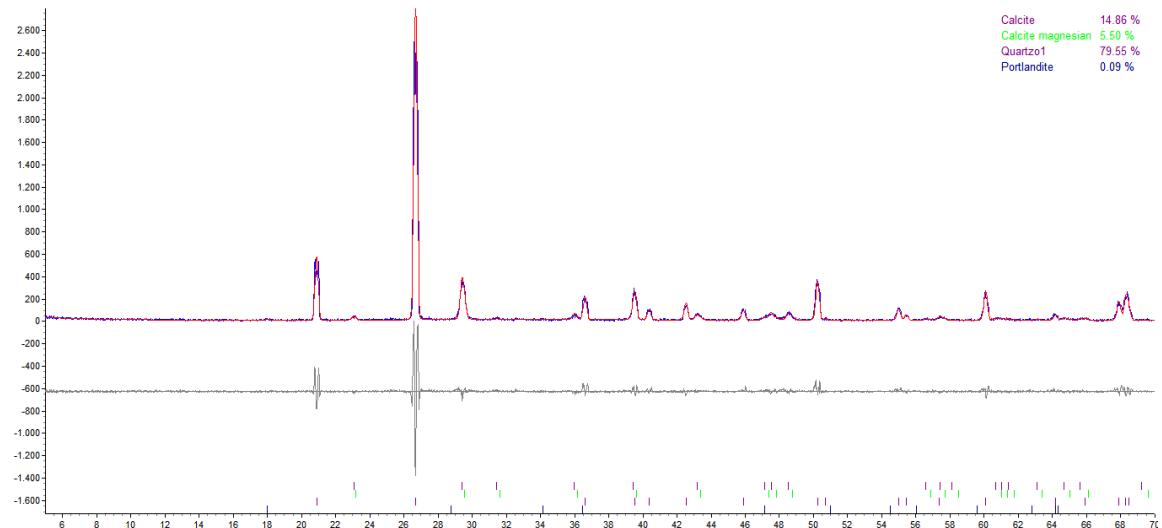


Figura 92- Difratograma da argamassa 1:2:12

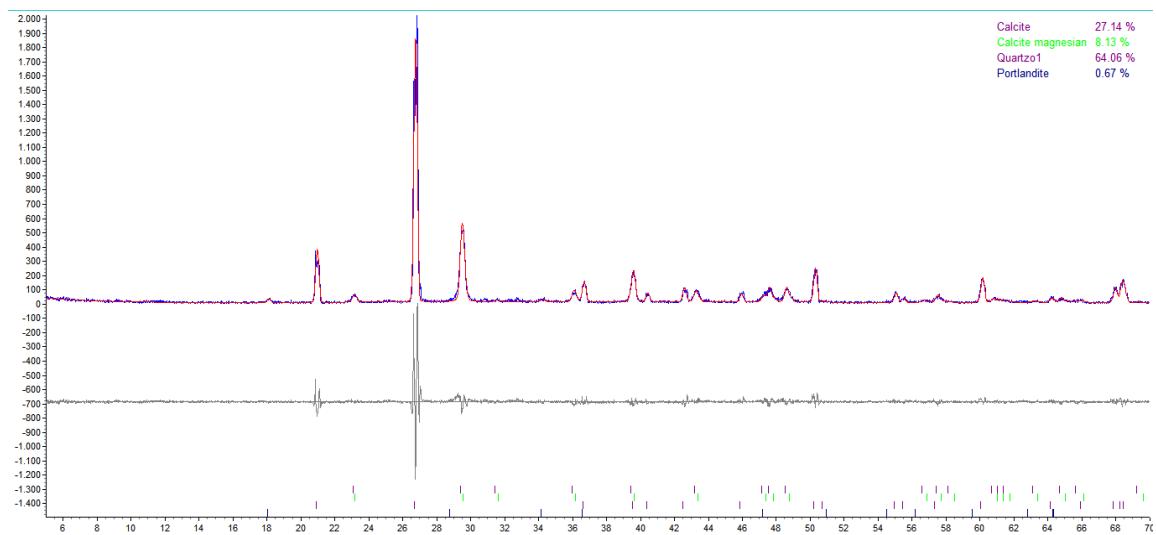


Figura 93- Difratograma da argamassa industrializada.

Anexo 03- Metodologia Proposta para Caracterização de Argamassas de Revestimento no Âmbito da Engenharia Forense.

Com base nos estudos realizados e apresentados neste trabalho, se propõe uma metodologia lastreada nos conceitos avançados de microcaracterização de argamassas mistas, por meio da combinação das técnicas mencionadas ao longo deste documento para aplicação na Engenharia Forense, em especial na análise qualitativa e quantitativa destes compósitos cimentícios.

O método consiste, inicialmente, na extração de corpos de prova da argamassa mista de revestimento sob questionamento, executada na edificação objeto da perícia. A extração é realizada com o uso de serra copo circular acoplada a uma furadeira. Cada corpo de prova deve apresentar diâmetro de 50 mm e espessura mínima de 20 mm. Devem ser coletadas, no mínimo, três amostras por parede investigada, de modo a preservar uma delas como contraprova. As amostras devem ser acondicionadas em embalagens de segurança, devidamente identificadas, e somente abertas no momento da realização dos exames em laboratório.

De posse das amostras, separando a contraprova, as 02 (duas) amostras restantes serão submetidas aos exames que terão duas vertentes, sendo uma por meio de imagens (levantamento físico-químico) e outra por meio de quantificação química dos elementos (análise mineralógica). Ressalta-se a importância da coleta de contraprova para fins de manutenção da cadeia de custódia. (MEDEIROS *et al.*, 2025).

Exames por imagem (Físico-Químico)

A amostra destinada aos exames de imagem deve ser devidamente preparada para análise em Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia (MEV/EDS), conforme descrito no subitem 3.3.2.2 deste trabalho. Essa preparação inclui a regularização da superfície, o polimento da amostra, a aplicação de resina a frio e a posterior metalização da superfície com ouro.

Com a amostra preparada, deve-se submetê-la à análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando uma magnificação de 100x e coletando três imagens de regiões distintas de cada amostra. Após a aquisição das imagens, estas devem ser processadas por meio de Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), com ênfase na identificação dos elementos químicos: Ca, Si, Fe, Al, K, Na, Mg e S.

Destaca-se que, na etapa seguinte da pesquisa, serão utilizadas apenas as imagens associadas à presença de Cálcio (Ca), representando a pasta, e de Silício (Si), representando o

agregado de origem natural. No entanto, é essencial investigar os demais elementos, pois concentrações elevadas destes podem indicar possíveis anomalias na composição da argamassa.

A etapa seguinte da análise consiste no processamento, por meio do software MAZE, das imagens obtidas via EDS, referentes aos elementos Cálcio (Ca) e Silício (Si), os quais representam, respectivamente, os teores de pasta e de agregados. Para cada uma das três imagens analisadas, determina-se o percentual de silício e cálcio presentes, e em seguida calcula-se a média aritmética dos valores obtidos.

Conforme demonstrado neste estudo, o teor de silício em argamassas com traço 1:2:8 (cimento:cal:areia) não deve ultrapassar 56,00%. Valores acima desse limite podem indicar que o traço utilizado não corresponde à proporção entre os insumos estabelecida contratualmente. Outro indicador que aponta para o não cumprimento do traço 1:2:8 é o teor de cálcio, que não deve ser inferior a 31,00%. Isso se justifica pelo fato de que, entre as amostras analisadas, a argamassa com menor concentração de cálcio apresentou um valor de 32,20%, servindo assim como referência mínima aceitável.

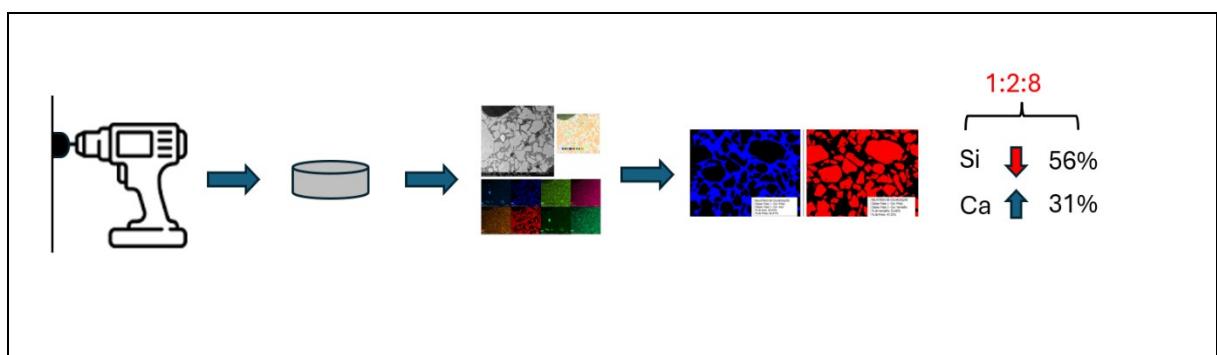


Figura 94- Desenho esquemático da análise físico-química em argamassas de revestimento objeto de perícia.

Exames de Análise mineralógica (quantificação química).

A segunda amostra coletada disponível, irá ser submetida a ensaios de Difração de Raios-X combinado com método de Rietveld (DRX-Rietveld) e para isso, conforme já demonstrado na metodologia, a amostra será destruída na preparação dos ensaios.

Após a realização da fragmentação e da desagregação já mencionadas neste trabalho, realiza-se o peneiramento utilizando uma malha formada pela peneira nº 635, o que permitiu utilizar, assim, um agitador de peneiras durante um ciclo de 30 segundos.

Em seguida a amostra será submetida ao equipamento de DRX e a identificação e quantificação das fases cristalinas das amostras foi feita através de Refinamento Rietveld dos dados da difração de raios X do pó utilizando o software TOPAS V4. Uma vez identificada e quantificada as fases, soma-se o montante de estruturas já conhecidas da pasta de cimento, caracterizando o montante de aglomerante presente na amostra, enquanto a quantificação do

quartzo representa o a fração de agregado da amostra. O estabelecimento desta proporção auxilia na reconstituição do traço da argamassa investigada. Conforme observado no presente trabalho, a maior proporção de agregado por pasta cimentícia obtida pelo DRX para argamassa com traço 1:2:8 foi de 3 vezes, de forma que valores superiores a estes são grandes indicativos de conter mais de 08 volumes de agregado no traço.

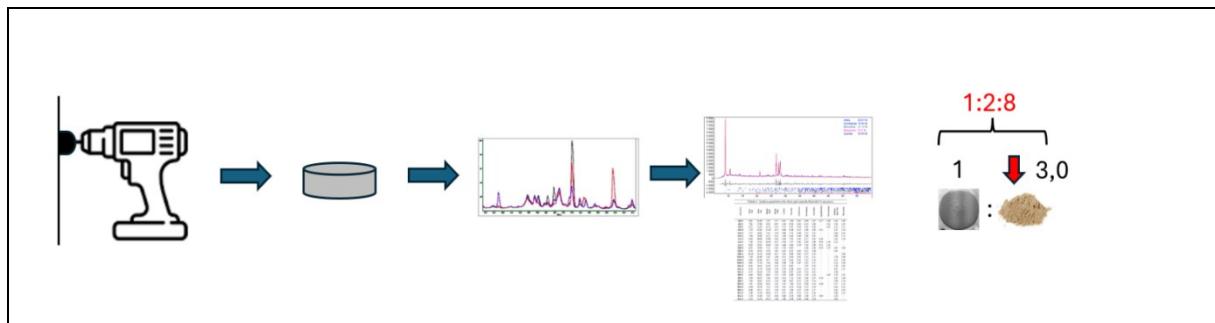


Figura 95- Desenho esquemático da análise mineralógica de argamassas de revestimento objeto de perícia.

A partir da combinação dessas duas quantificações, o perito pode estimar, com embasamento teórico, se a argamassa mista executada corresponde ao traço 1:2:8 (cimento:cal:areia), comumente especificado para revestimentos de paredes em obras públicas. Além disso, essa metodologia permite verificar se argamassas mistas industrializadas apresentam proporções entre agregados e aglomerantes compatíveis com as observadas nas argamassas com traço 1:2:8.

Um resumo esquemático da metodologia proposta pode ser vista a seguir.

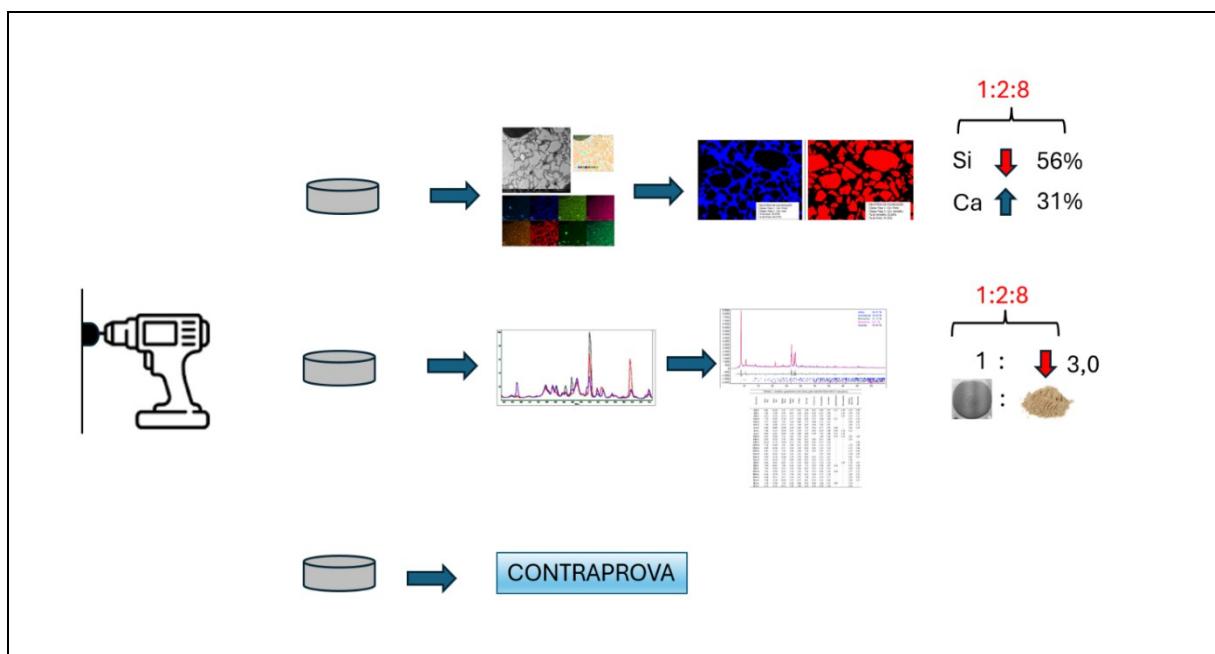


Figura 96- Desenho esquemático da metodologia proposta.