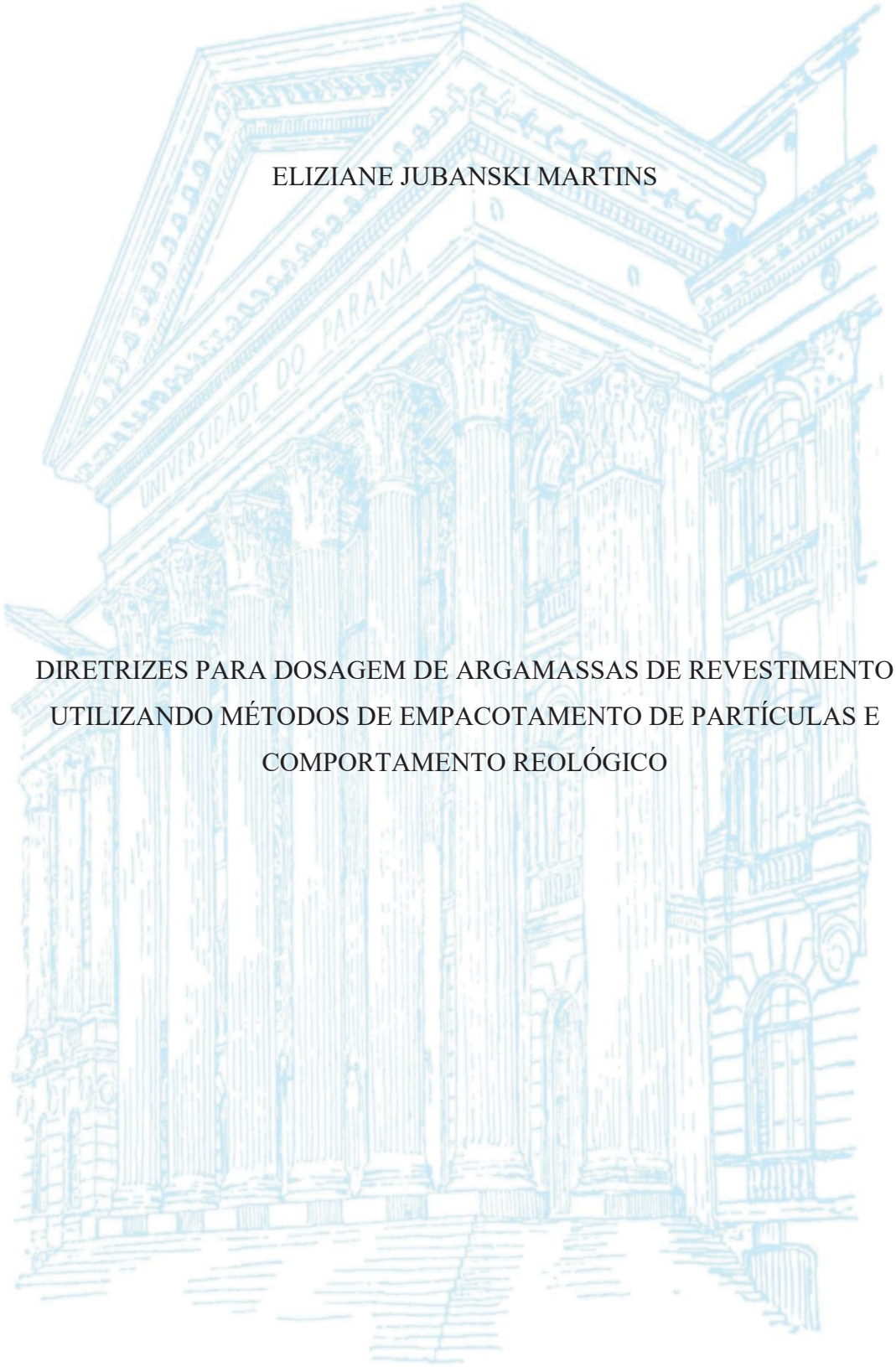
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ



ELIZIANE JUBANSKI MARTINS

DIRETRIZES PARA DOSAGEM DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO UTILIZANDO MÉTODOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS E COMPORTAMENTO REOLÓGICO

CURITIBA

2021

ELIZIANE JUBANSKI MARTINS

DIRETRIZES PARA DOSAGEM DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO UTILIZANDO MÉTODOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS E COMPORTAMENTO REOLÓGICO

Tese apresentada como requisito parcial a obtenção de grau de Doutora em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa
Coorientadora: Prof.ª Dr.ª Nayara Soares Klein

CURITIBA

2021

Catalogação na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

M386d Martins, Eliziane Jubanski

Diretrizes para dosagem de argamassas de revestimento utilizando métodos de empacotamento de partículas e comportamento reológico [recurso eletrônico] / Eliziane Jubanski Martins, 2021.

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

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa
Coorientadora: Prof.ª Dr.ª Nayara Soares Klein

1. Argamassa. 2. Revestimento. I. Costa, Marienne do Rocio de Mello Maron da. II. Klein, Nayara Soares. III. Universidade Federal do Paraná. IV.Título.

CDD 691.2

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL - 40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **ELIZIANE JUBANSKI MARTINS** intitulada: **DIRETRIZES PARA DOSAGEM DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO UTILIZANDO MÉTODOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS E COMPORTAMENTO REOLÓGICO**, sob orientação da Profa. Dra. MARIENNE DO
ROCIO DE MELLO MARON DA COSTA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.
A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Maio de 2021.

Assinatura Eletrônica
09/09/2021 10:43:17.0
MARIENNE DO ROCIO DE MELLO MARON DA COSTA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
09/09/2021 15:48:29.0
BERENICE MARTINS TORALLES
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
09/09/2021 14:17:14.0
JOSÉ MARQUES FILHO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
17/11/2021 02:30:03.0
ANGELA BORGES MASUERO
Avaliador Externo (UNIVER. FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

Para minha querida filha Manuela, que, sob enorme protesto, concedeu-me muito dos nossos momentos de diversão e brincadeiras para que eu pudesse me dedicar a essa pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi possível ser desenvolvido através da ajuda de diversas outras mãos. Aquelas mãos acolhidas, mãos alertas, mãos prudentes, mãos generosas, mãos sujas e machucadas, mãos revisoras, mãos multiplicadoras, mãos que se separaram por um tempo e se reencontraram com uma nova chance. Muito obrigada.

À prof.ª Dr.ª Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa que me estendeu a mão novamente nessa jornada da pesquisa, sempre disponível e generosa, oferecendo apoio e incentivo nessa longa caminhada de orientação. À professora Dr.ª Nayara Soares Klein os meus agradecimentos por todo conhecimento compartilhado, onde através dele me proporcionou a chance de melhorar e me debruçar genuinamente sempre um pouco mais na complexidade da pesquisa. Às quatro mãos ofereço a minha imensa gratidão.

A todos os mestres professores que ao longo dessa jornada de estudos, estiveram de alguma forma oferecendo muitas mãos, no esclarecimento de dúvidas, orientando ideias e questionamentos ao longo desse caminho. Meu agradecimento a esses mestres, que merecem respeito e carinho eterno.

As mãos carinhosas dos meus amigos, que deixaram essa caminhada mais leve e divertido. As amigas Esther e Louise, por esses 20 anos de fortes laços de amizade, onde somos quase imbatíveis. As minhas irmãs que a universidade me presenteou, Maria Clara, Sarah, Géssica e Aline, pelo grupo no WhatsApp "Filhas da Marienne" ter feito todo sentido. Aos meus colegas, Bruno Nenevê, Vitor Lorival, Waleska Barbosa, Betina Lepretti, Ana Capraro e Alécio Mattana. As minhas alunas de iniciação científica Alana Lassen e Giovanna Facundes pelas mãos fortes, jovens e esforçada. Minhas mãos juntas e agradecidas por vocês.

A todos os meus colegas de trabalho da Votorantim Cimentos, que se multiplicaram em infinitas mãos e que sem dúvida fizeram toda diferença ao logo desses anos de estudos. Ao Eng. Maurício Bianchini, pela mão gigante de ensinamentos, que foram do concreto/argamassas às tratativas humanas, sempre com sua paciência e generosidade invejável. Aos demais colegas pela mãozinha nos ensaios de laboratórios e nas interpretações de resultados, Airton Teodoro, Emanuel Costa, Leonardo Gil, Marco Antonio Fuliotti, Ana Carolina Dal Moro Costa Rosa, Viviani Meneghin, Maria Venyee, Eiji Fukui e Renan Ramalho de Paula e as minhas, a princípio colegas, que viraram mãos, ouvidos e coração, Jadna Fuchter, Larissa Cabral, e Diana

Lins. À minha amiga irmã Leidimara Kotoviezy , pelo apoio físico e mental, sujando suas mãos junto às minhas, inúmeras vezes ao longo desse trabalho. Muito obrigado time.

A minha família, em especial aos meus pais, que desde que me conheço por gente me incentivam na busca do conhecimento e da independência. Obrigada pelas mãos que ao longo dessa vida nunca fugiram do amparo, proteção, cuidado, afeto e amor! A minha querida ajudante "Neguitcha" (*in memoriam*), que cuidou lindamente da minha família, com suas mãos organizadas, delicadas e generosas, durante o desenvolvimento desse trabalho. A minha filha Manuela, por ser hoje e sempre o combustível que move todas as minhas batalhas. Obrigada minha filha, pela paciência ao longo desses cinco anos, resumidos de grandes renúncias do nosso cotidiano de passeios e brincadeiras, juntas, em prol desse trabalho. Ao meu marido, que experimentei intenso aprendizado com encontros e desencontros proporcionados pela vida, que resultou no nosso fortalecimento. Amo vocês.

“Sonhe com o que você quiser, vá para onde você queira ir. Seja o que você quer ser, porque você possui apenas uma vida e nela só temos uma chance de fazer aquilo que queremos. Tenha felicidade bastante para fazê-la doce, dificuldades para fazê-la forte, tristeza para fazê-la humana e esperança suficiente para fazê-la feliz." Clarice Lispector

RESUMO

A utilização da argamassa de revestimento é cada dia mais crescente, fato que impulsiona o meio técnico e acadêmico na busca de aperfeiçoamento de métodos e diretrizes criteriosos nas dosagens e aplicação das argamassas, objetivando selecionar adequados insumos e formulações que possibilitem aumentar o nível de qualidade e durabilidade do material às edificações e consequentemente, a diminuição de manifestações patológicas. Diante disso, busca-se a trabalhabilidade adequada para a aplicação, uma das propriedades fundamentais para se obter um material de fácil aplicabilidade, acabamento e qualidade. Atualmente, há um amplo investimento da comunidade técnica e científica para que essa propriedade, em grande parte pautada no empirismo, hoje em dia nos canteiros de obra, seja complementada e corroborada com os estudos de comportamento reológico. Por outro lado, a teoria de empacotamento de partículas se apresenta com ampla aplicabilidade no desenvolvimento de novos materiais e no ajuste racional de dosagens já existentes. Neste contexto, o objetivo dessa pesquisa é sugerir diretrizes para dosagem de argamassas de revestimento, utilizando conceitos de empacotamento de partículas e do comportamento reológico através do ensaio de *squeeze flow*. A pesquisa foi dividida em quatro etapas, sendo que cada uma delas evidencia um objetivo específico, porém com um propósito comum que é o estabelecimento de diretrizes para a dosagem. Na etapa I, foi desenvolvido um planejamento experimental com seis argamassas utilizadas na prática em obras, a fim de obter parâmetros reológicos que representassem a trabalhabilidade de argamassas aplicáveis, e das suas propriedades no estado endurecido. Como resultado, foi identificado uma amplitude dos limites numéricos encontrados no estudo das argamassas adquiridas em obras, assim buscou-se na literatura um complemento dessa avaliação que também resultou em uma ampla faixa de resultados. A etapa II compreendeu a eleição de dez formulações de argamassas de revestimento, tanto formulações indicadas em bibliografia quanto as tradicionais formuladas em obras, para o estudo do empacotamento de partículas. Dentro do programa experimental foi possível realizar e avaliar os testes dessas formulações com três agregados distintos, sendo dois naturais e um artificial, assim aplicando-se os métodos e modelos de empacotamento de partículas (DE LARRARD, 1999; FENNIS, 2011; WONG; KWAN, 2008), como forma de verificar quais dessas formulações tiveram maior impacto na densidade de empacotamento. Além disso, também houve uma proposta de otimizar a quantidade de água da mistura, chegando ao indicativo de água mínima necessária. Para a etapa III, foi desenvolvido um ajuste da proporção de água das formulações estudadas, a partir da água mínima proposta na etapa II, por meio dos ensaios de *squeeze flow*, com o acréscimo de pequenos volumes de água, de modo a alcançar uma trabalhabilidade adequada, esta adotada com base em recomendações já disponíveis na literatura. Como resultado, alcançou-se parâmetros reológicos, com a relação numérica das deformações do estágio II (Δdef.), que auxilia na análise do comportamento reológico de argamassas e direcionou para a facilidade de aplicação do produto e acabamento. Na etapa IV, foram salientados os resultados de todas as argamassas formuladas em laboratório, quando foi possível classificá-las por intermédio da NBR 13281 (ABNT, 2005). Por fim, foram ressaltadas as diretrizes propostas para que sejam utilizadas na dosagem das argamassas de laboratório e as principais correlações obtidas. No estado fresco, foi possível observar uma adequada correlação entre o parâmetro reológico Δdef. e o excesso de água das misturas. A relação água/aglomerantes teve bons coeficientes de determinação (R^2) em relação às propriedades mecânicas com na resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.

Palavras-chave: argamassa de revestimento, trabalhabilidade, reologia, empacotamento de partículas.

ABSTRACT

The use of rendering mortar is increasing every day, a fact that drives the technical and academic environment in the search for improvement of methods and judicious guidelines in the dosages and application of mortars, aiming to select adequate inputs and formulations that allow to increase the level of quality and durability of the material to buildings and, consequently, the reduction of pathological manifestations. In view of this, the search is made for the suitable workability for the application, one of the fundamental properties to obtain a material of easy applicability, finish, and quality. Currently, there is ample investment from the technical and academic community so that this property, largely based on empiricism, nowadays on construction sites, is complemented and corroborated with studies of rheological behavior. On the other hand, the particle packing theory is widely applicable in the development of new materials and in the rational adjustment of existing dosages. In this context, the objective of this research is to suggest guidelines for the dosing of rendering mortars, using concepts of particle packing and rheological behavior through the squeeze flow test. The research was divided into four stages, each of which highlights a specific objective, but with a common purpose, which is the establishment of dosage guidelines. In stage I, an experimental design was developed with six mortars used in practice in works, to obtain rheological parameters that represent the workability of applicable mortars, and their properties in the hardened state. As a result, an amplitude of the numerical limits found in the study of mortars acquired in works was identified, thus seeking in the literature a complement to this evaluation that also resulted in a wide range of results. Stage II comprised the selection of ten rendering mortar formulations, both formulations indicated in the bibliography and traditional formulations used in works, for the study of particle packing. Within the experimental program it was possible to carry out and evaluate the tests of these formulations with three different aggregates, two natural and one artificial, thus applying the methods and models of particle packing (DE LARRARD, 1999; FENNIS, 2011; WONG; KWAN, 2008), as a way of verifying which of these formulations had the greatest impact on the packing density. In addition, there was also a proposal to optimize the amount of water in the mixture, reaching the minimum required water level. For step III, an adjustment of the proportion of water of the studied formulations was developed, starting from the minimum water proposed in step II, through the squeeze flow tests, with the addition of small volumes of water to achieve an adequate workability, adopted based on recommendations already available in the literature. As a result, rheological parameters were achieved, with the numerical relationship of deformations of stage II (Δdef.), which helps in the analysis of the rheological behavior of mortars and directed towards the ease of application of the product and finish. In step IV, the results of all mortars formulated in the laboratory were highlighted, when it was possible to classify them through NBR 13281 (ABNT, 2005). Finally, the guidelines proposed to be used in the dosing of laboratory mortars and the main correlations obtained were highlighted. In the fresh state, it was possible to observe an adequate correlation between the rheological parameter Δdef. and excess water from the mixtures. The water / binder ratio had good coefficients of determination (R^2) in relation to the mechanical properties with respect to compressive strength, tensile strength in flexion and modulus of elasticity.

Keywords: rendering mortar, rheology, workability, and particle packing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CONSUMO DE CIMENTO NA FABRICAÇÃO DA ARGAMASSA (EM MILHÕES DE TONELADAS)..... 33

FIGURA 2 - DEMONSTRATIVO DO PRODUTO INTERNO BRUTO (PIB)..... 34

FIGURA 3 - PRODUÇÃO DE INSUMOS NA PRODUÇÃO DA ARGAMASSA (EM MILHÕES DE TONELADAS): (A) CIMENTO; (B) AGREGADO MIÚDO; (C) CAL..... 35

FIGURA 4 - ESTUDO CRONOLÓGICO DAS PRINCIPAIS PESQUISAS ENVOLVENDO PROPOSTAS DE DIRETRIZES DE DOSAGEM DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO..... 46

FIGURA 5 - COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE DOSAGEM DE ARGAMASSAS..... 51

FIGURA 6 - CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW*: (A) INÍCIO DO ENSAIO; (B) FINAL DO ENSAIO..... 68

FIGURA 7 - CURVA CARACTERÍSTICA DE UM FLUIDO DE BINGHAM..... 69

FIGURA 8 - O COMPORTAMENTO DAS CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E A RELAÇÃO DE VAZIOS..... 72

FIGURA 9 - MISTURA COM INTERAÇÃO: EFEITO AFASTAMENTO..... 75

FIGURA 10 - MISTURA COM INTERAÇÃO: EFEITO PAREDE..... 75

FIGURA 11 - GRANULOMETRIA A LASER DOS AGLOMERANTES..... 80

FIGURA 12 - AGREGADOS MIÚDO UTILIZADOS: (A) $AN_{1,87}$; (B) $AN_{2,69}$; (C) $AA_{2,04}$..... 82

FIGURA 13 - CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS MIÚDO DAS ARGAMASSAS DOSADAS EM LABORATÓRIO..... 83

FIGURA 14 - IMAGENS DO MICROSCÓPIO DIGITAL PARA OS AGREGADOS DAS ARGAMASSAS DOSADAS EM LABORATÓRIO..... 85
FIGURA 15 - EQUIPAMENTO CAMSIZER XT..... 86
FIGURA 16 - ESFERICIDADE MÉDIA DOS AGREGADOS POR FAIXA GRANULOMÉTRICA..... 87
FIGURA 17 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL..... 88
FIGURA 18 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS..... 90
FIGURA 19 - PREPARO PARA A EXECUÇÃO DO ENSAIO DE SQUEEZE FLOW (A) MOLDAGEM DO CORPO DE PROVA, (B) CORPO DE PROVA, (C) ENSAIO EM ANDAMENTO..... 92
FIGURA 20 - GRÁFICO OBTIDO NO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW*..... 92
FIGURA 21 - SUBDIVISÃO DOS ESTÁGIOS NAS CURVAS DE *SQUEEZE FLOW* DA ARGAMASSA MODELO..... 94
FIGURA 22 - ACESSÓRIOS PARA ENSAIOS DA ARGAMASSA DE OBRAS NO ESTADO ENDURECIDO; (A) FORMAS; (B) MOLDAGEM; (C) CORPOS DE PROVA MOLDADOS; (D) ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO; (E) ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO; (F) ENSAIO COM ULTRASSOM..... 95
FIGURA 23 - PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA A ETAPA II.... 96
FIGURA 24 - PROCEDIMENTO DE MISTURA PARA O CÁLCULO DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DOS MATERIAIS INDIVIDUAIS..... 98
FIGURA 25 - MOLDAGEM DA ARGAMASSA PARA ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW*: (A) ARGAMASSA MOLDADA COM ANEL DO GABARITO; (B) ARGAMASSA SEM A PRESENÇA DO ANEL DO GABARITO SEM

ESPALHAMENTO DO MATERIAL; (C) ARGAMASSA LOGO APÓS A RETIRADA DO GABARITO COM ESPALHAMENTO DO MATERIAL NO PRATO..... 100

FIGURA 26 - ENSAIOS MECÂNICOS: (A) RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO; (B) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO..... 103

FIGURA 27 - DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA ATRAVÉS DO EQUIPAMENTO PUNDIT..... 104

FIGURA 28 - DENSIDADE DE MASSA NO ESTADO FRESCO E TEOR DE AR INCORPORADO DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS..... 107

FIGURA 29 - ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS..... 107

FIGURA 30 - RESULTADOS DO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW* DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS..... 109

FIGURA 31 - LINHAS DE TENDÊNCIAS DAS CURVAS DO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW* DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS COM A INDICAÇÃO DO Δdef E DO Δ_F. 110

FIGURA 32 - VISCOSIDADE PLÁSTICA (A) E TENSÃO DE ESCOAMENTO (B) DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS NA DEFORMAÇÃO 2,5 mm..... 112

FIGURA 33 - RESULTADOS DO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW* DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRA OBTIDAS DA LITERATURA..... 114

FIGURA 34 - RESISTÊNCIA MECÂNICAS E MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRA..... 116

FIGURA 35 - CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS (Φ) E RELAÇÃO DE VAZIOS (υ) DO CP II F 32 E CAL HL II..... 118

FIGURA 36 - CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS (Φ) E RELAÇÃO DE VAZIOS (υ) DAS FORMULAÇÕES COM $AN_{1,87}$..... 120

FIGURA 37 - CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS (Φ) E RELAÇÃO DE VAZIOS (υ) DAS FORMULAÇÕES COM $AN_{2,69}$..... 123
FIGURA 38 - CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS (Φ) E RELAÇÃO DE VAZIOS (υ) DAS FORMULAÇÕES COM $AA_{2,04}$ 124
FIGURA 39 - COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS CIPM, CPM E MÉTODO EXPERIMENTAL PARA TODAS AS FORMULAÇÕES E AGREGADOS DA PESQUISA..... 126
FIGURA 40 - DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO ATRAVÉS DOS MÉTODOS CIPM, CPM E EXPERIMENTAL: (A) $AN_{1,87}$ E (B) $AN_{2,69}$ E (C) $AA_{2,04}$..... 127
FIGURA 41 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE *SQUEEZE FLOW* PARA $AN_{1,87}$: (A) 1:0,6:6; (B) 1:1:6; (C) 1:2:6 E (D) 1:2:9..... 130
FIGURA 42 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE *SQUEEZE FLOW* PARA $AN_{2,69}$:(A) 1:0,6:6; (B) 1:1:6; (C) 1:2:6 E (D) 1:2:9..... 132
FIGURA 43 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE *SQUEEZE FLOW* PARA $AA_{2,04}$: (A) 1:0,6:6; (B) 1:1:6; (C) 1:2:6 E (D) 1:2:9..... 134
FIGURA 44 - ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA PARA AS ARGAMASSAS COM AGREGADOS: (A) $AN_{1,87}$, (B) AN2,69, (C) $AA_{2,04}$..... 137
FIGURA 45 - VISCOSIDADE PLÁSTICA E TENSÃO DE ESCOAMENTO DAS FORMULAÇÕES PARA OS AGREGADOS: $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$ 138
FIGURA 46 - VOLUME DE ARGAMASSA SUBDIVIDIDO EM AGREGADO, EXCESSO DE PASTA E PASTA COMPACTADA PARA m³: (A) $AN_{1,87}$, (B) $AN_{2,69}$ E (C) $AA_{2,04}$..... 140
FIGURA 47 - RELAÇÃO ENTRE Δdef. E VOLUME DE EXCESSO DE PASTA..... 142
FIGURA 48 - RELAÇÃO ENTRE Δdef. E VOLUME DE EXCESSO DE PASTA DIVIDIDA POR TIPOS DE AGREGADOS..... 143
FIGURA 49 - RELAÇÃO ENTRE Δdef. E MPT..... 145
FIGURA 50 - RELAÇÃO ENTRE Δdef. E IPS..... 145

FIGURA 51 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E a/c PARA TODAS AS ARGAMASSAS PARA $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$.....

FIGURA 52 - RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO E A/C PARA AS ARGAMASSAS FORMULADAS EM LABORATÓRIO PARA $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$..... 150

FIGURA 53 - MÓDULO DE ELASTICIDADE E a/c PARA AS ARGAMASSAS FORMULADAS EM LABORATÓRIO PARA $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$..... 152

FIGURA 54 - DIAGRAMA COM AS CORRELAÇÕES DE ΔDEF. E PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS FORMULADAS EM LABORATÓRIO PARA $AN_{1,87}$..... 154

FIGURA 55 - DIAGRAMA COM AS CORRELAÇÕES DE ΔDEF. E PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS FORMULADAS EM LABORATÓRIO PARA $AN_{2,69}$..... 156

FIGURA 56 - DIAGRAMA COM AS CORRELAÇÕES DE ΔDEF. E PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS FORMULADAS EM LABORATÓRIO PARA $AA_{2,04}$..... 157

FIGURA 57 - GRÁFICO DE ADERÊNCIA OBTIDA ATRAVÉS DA REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA (Y_{FC}) 160

FIGURA 58 - GRÁFICO DE ADERÊNCIA OBTIDA ATRAVÉS DA REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA (Y_{FT}) 162

FIGURA 59 - GRÁFICO DE ADERÊNCIA OBTIDA ATRAVÉS DA REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA (Y_{E}) 164

FIGURA 60 - RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO X a/agl..... 170

FIGURA 61 - RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO X a/agl..... 170

FIGURA 62 - RELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE ELASTICIDADE X a/agl. 171

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - EIXOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA..... 37

TABELA 2 - ARTIGOS PESQUISADOS DIVIDIDOS POR BASE DE DADOS..... 38

TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS ATRAVÉS DO MÉTODO IO..... 40

TABELA 4 - REQUISITOS APRESENTADOS PELO PROJETISTA PARA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO..... 47

TABELA 5 - SÍNTESE DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM DE ARGAMASSAS E SEUS CONSTITUINTES A PARTIR DA REVISÃO SISTEMÁTICA..... 54

TABELA 6 - ESPECIFICAÇÕES DA NORMA FRANCESA..... 64

TABELA 7 - VALORES DE K PARA OS DIFERENTES PROTOCOLOS DE EMPACOTAMENTO..... 76

TABELA 8 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO CIMENTO CP II F 32 CONFORME NBR 16697 (ABNT, 2018)..... 79

TABELA 9 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DA CAL HIDRÁULICA..... 79

TABELA 10 - GRANULOMETRIA A LASER DOS AGLOMERANTES..... 81

TABELA 11 - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS..... 82

TABELA 12 - GRANULOMETRIA A LASER DOS AGREGADOS..... 83

TABELA 13 - MORFOLOGIA DOS AGREGADOS..... 87

TABELA 14 - CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRA..... 91

TABELA 15 - FORMULAÇÕES DAS ARGAMASSAS DOSADAS EM LABORATÓRIO..... 97

TABELA 16 - PONTOS DE MUDANÇA DE ESTÁGIO DAS ARGAMASSAS DE OBRA..... 110

TABELA 17 - VALORES DE $DP_{MÁX}$ DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS *IN LOCO* DA LITERATURA..... 114

TABELA 18 - DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO NA CONDIÇÃO SECA PARA OS AGREGADOS MIÚDOS..... 119
TABELA 19 - RESUMO DAS DENSIDADES DE EMPACOTAMENTO PARA TODOS OS AGREGADOS..... 125
TABELA 20 - ΔDEF. ATRAVÉS DO ENSAIO COM *SQUEEZE FLOW* PARA $AN_{1,87}$..... 129
TABELA 21 - ΔDEF. ATRAVÉS DO ENSAIO COM *SQUEEZE FLOW* PARA $AN_{2,69}$..... 132
TABELA 22 - ΔDEF. ATRAVÉS DO ENSAIO COM *SQUEEZE FLOW* PARA $AA_{2,04}$..... 134
TABELA 23 - RESULTADOS REFERENTE AO MAIOR Δdef. PARA TODAS AS FORMULAÇÃO. 136
TABELA 24 - APLICAÇÃO ANOVA PARA Δdef. ENTRE OS AGREGADOS UTILIZADOS..... 144
TABELA 25 - RESUMO DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS DOSADAS EM LABORATÓRIO..... 147
TABELA 26 - APLICAÇÃO ANOVA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS FORMULAÇÕES DAS ARGAMASSAS DE LABORATÓRIO..... 149
TABELA 27 - APLICAÇÃO ANOVA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS FORMULAÇÕES DAS ARGAMASSAS DE LABORATÓRIO 151
TABELA 28 - APLICAÇÃO ANOVA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS FORMULAÇÕES DAS ARGAMASSAS DE LABORATÓRIO... 152
TABELA 29 RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS VERSUS FAIXAS IDEAIS PARA AS ARGAMASSAS FORMULADAS COM $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$..... 158
TABELA 30 - RESUMO DOS DADOS ESTATÍSTICOS DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO DETERMINADA PARA O MODELO PROPOSTO PARA (Y_{FC})..... 161

TABELA 31 - RESUMO DOS DADOS ESTATÍSTICOS DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO DETERMINADA PARA O MODELO PROPOSTO PARA (Y_{FT})..... 163

TABELA 32 - RESUMO DOS DADOS ESTATÍSTICOS DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO DETERMINADA PARA O MODELO PROPOSTO PARA (Y_E)..... 164

LISTA DE NOTAÇÕES E SÍMBOLOS

SÍMBOLOS	DESCRIÇÃO	UNIDADE
τ	Tensão de Cisalhamento	N/m^2
λ	Taxa de Cisalhamento	s^{-1}
η	Viscosidade	Pa.s
F	Força	N
a/c	Relação água/cimento	-
a/ms	Relação água/materiais secos	-
a/agl	Relação água/aglomerante	
Ac	Absorção de água por capilaridade	g/cm^2
Ai	Absorção de água por imersão	%
$a_{ij,c}$	Coeficiente referente ao efeito de afastamento considerando o efeito de aglomeração	-
a_{ij}	Coeficiente referente ao efeito de afastamento	-
$b_{ij,c}$	Coeficiente referente ao efeito parede considerando o efeito de aglomeração	-
b_{ij}	Coeficiente referente ao efeito parede	-
C_a	Constante de compactação-interação relacionado ao efeito de afastamento aij,c	-
C_b	Constante de compactação-interação relacionado ao efeito parede $b_{ij,c}$	-
D	Diâmetro de partícula	µm
D_i	Diâmetro das partículas da classe *i*	µm
Dj	Diâmetro das partículas da classe j	µm
$D_{máx}$	Diâmetro da maior partícula do conjunto	µm
D_{min}	Diâmetro da menor partícula do conjunto	µm
$DE_{máx}$	Deformação elástica máxima	mm
$DP_{máx}$	Deformação plástica máxima	mm
E_d	Módulo de elasticidade dinâmico	kN/mm2
E_v	Índice de vazios do concreto	%
$FE_{máx}$	Força elástica máxima	N
$FP_{máx}$	Força plástica máxima	N
IPS	*Interparticle separation distance*	
K	Índice de compactação	-
K_a	Contribuição da adição para o índice de compactação *K*	-
K_b	Contribuição do aglomerante para o índice de compactação *K*	-
K_{cem}	Contribuição do cimento para o índice de compactação *K*	-
K_i	Índice de compactação parcial da classe *i*	-
M	Massa da pasta que ocupa o molde	kg
M_c	Massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água	g

MPT	*Maximum paste thickness*	-
R_{cal}	volume relativo de cal na pasta	-
R_{cim}	volume relativo de cimento na pasta	-
R_{α}	Relação volumétrica de α, respeito ao total de materiais cimentícios	-
R_{β}	Relação volumétrica de β, respeito ao total de materiais cimentícios	-
R_{γ}	Relação volumétrica de γ, respeito ao total de materiais cimentícios	-
U	Relação de vazios da pasta	-
U_{min}	Mínima relação de vazios	-
V_{ar}	volume de ar na argamassa	m³
V_{areia}	volume de areia na argamassa	m³
V_{cim}	volume de cimento na argamassa	m³
V_{cal}	volume de cal na argamassa	m³
V_{mc}	Volume sólido de materiais cimentícios	m³
V_{mol}	Volume do molde utilizado	m³
V_{pasta}	Volume de pasta na argamassa	m³
V_{pComp}	Volume de pasta compactada nos vazios da areia	m³
V_{pEx}	Volume de pasta que excede os vazios da areia	m³
V_w	Volume parcial de água	m3
v	Índice de vazios de um conjunto granular	%
$w_{0,a}$	Função para o máximo alcance do efeito de afastamento	-
$w_{0,b}$	Função para o máximo alcance do efeito parede	-
w_a	Constante denotando o máximo alcance do efeito de afastamento	-
Wb	Constante denotando o máximo alcance do efeito parede	-
y	Volume relativo de cada classe	-
y_a	Volume relativo da adição	-
y_c	Volume relativo do cimento	-
y_i	Volume relativo da classe *i*	-
y_j	Volume relativo da classe j	-
β_c	Densidade de empacotamento do cimento	-
B_i	Densidade de empacotamento da classe *i*	-
$\Delta def.$	Delta de deformação	(mm)
ΔF	Delta de força	(N)
γ	Densidade de empacotamento virtual da mistura	-
Γ_c	Densidade de empacotamento virtual para a classe de cimento	-
γ_i	Densidade de empacotamento virtual da mistura quando a classe *i* é dominante	-
ρ_{ag}	Massa específica do agregado	kg/m³
ρ_w	Massa específica da água	kg/m³
ρ_{α}	Massa específica do material α	kg/m³
ρ_{β}	Massa específica do material β	kg/m³

ρ_γ	Massa específica do material γ	kg/m³
φ	Densidade de empacotamento real	-
Φ_{exp}	Concentração de sólidos	-

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 24

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA 26

1.2 OBJETIVO 29

1.3 JUSTIFICATIVAS 30

1.3.1 Justificativa tecnológica e social 30

1.3.2 Justificativa econômica e ambiental 33

1.4 REVISÃO SISTEMÁTICA 36

1.5 ESTRUTURA DA TESE 41

2. DOSAGEM DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO 43

2.1 EVOLUÇÃO DOS ESTUDOS DE DOSAGEM DAS ARGAMASSAS 45

2.2 PARÂMETROS DE DOSAGEM PARA ARGAMASSAS 52

2.3 VISÃO GERAL DAS NORMAS BRASILEIRAS E INTERNACIONAIS 63

2.4 EVOLUÇÃO DOS MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO 65

2.5 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS 70

2.5.1 Métodos experimentais para determinação da densidade de empacotamento 71

2.5.2 Modelos de empacotamento de partículas 73

3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 78

3.1 MATERIAIS 78

3.1.1 Aglomerantes 78

3.1.2 Agregado Miúdo 81

3.2 MÉTODOS 88

3.2.1 ETAPA I - Caracterização das argamassas retiradas de obras 89

3.2.2 ETAPA II – Estudo do empacotamento de partículas 96

3.2.3 ETAPA III – Cálculo excesso de água 99

3.2.4 ETAPA IV – Caracterização no estado endurecido 102

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 106

4.1 ETAPA I: CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS 106

4.1.1 Caracterização das argamassas no estado fresco 106

4.1.2 Caracterização das argamassas no estado endurecido 115

4.2 ETAPA II: ESTUDO DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS 117
4.2.1 Densidade de empacotamento dos materiais individuais 117
4.2.2 Densidade de empacotamento dos conjuntos granulares 120
4.2.3 Comparação dos resultados experimentais com os modelos de previsão CPM e CIPM 126
4.3 ETAPA III – CÁLCULO DO EXCESSO DE ÁGUA 128
4.3.1 Análise do comportamento reológico por meio do ensaio de *Squeeze flow* 129
4.3.2 Estudo da influência do excesso de pasta no comportamento reológico das formulações 139
4.4 ETAPA IV – PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO 146
4.4.1 Aplicação do modelo estatístico de regressão múltipla 159
4.5 DIRETRIZES PARA A DOSAGEM DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO 165

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 171

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 174
REFERÊNCIAS 175
APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS 191
APÊNDICE B – EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS ATRAVÉS DO MÉTODO WONG E KAN (2008) DO CIMENTO E DA CAL 201
APÊNDICE C – ENSAIO EXPERIMENTAL WONG E KWAN (2008) PARA O EMPACOTAMENTO DO CONJUNTO GRANULAR 202
APÊNDICE D – RESULTADOS DOS MODELO DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS DO CONJUNTO GRANULAR CPM, CIPM E WONG E KWAN (2008) 204
APÊNDICE F – IMAGENS DOS CORPOS DE PROVA DAS ARGAMASSAS COM AGREGADO $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$ 206
APÊNDICE G – RESULTADO DOS CONSUMOS DE MATERIAIS 209

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento histórico da tecnologia das argamassas demonstra que, nos últimos anos, um significativo número de pesquisadores e técnicos tem investido seu tempo e recursos intelectuais na intenção de desenvolver formas de dosar as argamassas, visando ao aprimoramento das técnicas de produção e o entendimento da composição e da estrutura resultante das pastas, argamassas, misturas de cimentos e agregados (SELMO, 1989; LARA, *et al.,* 1995; CARNEIRO; CINCOTTO, 1995; GOMES; NEVES, 2002; CARDOSO, 2009 e SANTOS, 2014).

Observa-se que, no começo da década de 1950, teve início o processo de substituição da tecnologia tradicional na produção das argamassas pelas tecnologias modernas, exemplificadas pelas argamassas industrializadas, identificadas na Europa Central, nomeadamente na Alemanha, Benelux, Suíça, Áustria, França, Itália, Espanha e, em menor grau, na Escandinávia (MARTINS; DJANIKIAN, 1999). No Brasil, esse processo de industrialização ocorreu nos anos 90, com a disseminação das argamassas chamadas múltiplo uso, utilizadas nos serviços de alvenaria e grandes edifícios, advinda, tanto pelos investimentos oriundos das indústrias). Em contrapartida, o produto dominante em obras brasileiras ainda é a argamassa produzida em obra, que representa 98% do total produzido. O mercado brasileiro de argamassas cresce com o passar dos anos, com uma produção de cerca de 100 milhões de toneladas do material por ano (IDEIES, 2018). A aplicação da argamassa preparada em obra apresenta uma série de peculiaridades, como grande estoque de materiais, maior custo de transporte, maior número de processos a serem executados e a falta de um controle de qualidade adequado. Além disso, na maioria das vezes, o trabalho é executado por profissionais sem experiência, em uma formulação única, independente das características dos materiais componentes ou da região em que está sendo aplicada a argamassa.

Normas mundiais por muitos anos sugeriam determinadas formulações pré-estabelecidas no preparo das argamassas mistas voltadas ao revestimento (cimento:cal:areia). A NBR 7200 na versão de 1982, por exemplo, sugeria uma formulação em volume 1:2:(9 a 11) para as argamassas de revestimento de paredes internas e externas de fachada. Já a norma britânica BS 5262 (BSI, 1991), na época, recomendava argamassas de revestimento para fachadas de qualquer tipo de exposição e base, e a utilização da formulação em volume 1:1:(5 a 6) ou 1:2:(8 a 9). A ASTM (C926, 1987) ressalta a importância da absorção do substrato,

porém ainda indica uma formulação 1:2:9 para argamassas de reboco com substrato de elevada absorção. As normas citadas com suas revisões atuais não referenciam mais essas composições e sim propriedades que as argamassas devem apresentar para um desempenho satisfatório (HENDRICKX, 2009). Apesar da indicação das propriedades desejadas, no Brasil, as argamassas dosadas em obras estão sem regulamentação para desenvolvimento de formulações tanto na NBR 7200 (ABNT, 1998) quanto na NBR 8545 (ABNT, 1984), seja pela falta de consenso técnico, pelas grandes diversidades nacionais de areias de rio, cava e artificiais, bem como adições minerais plastificantes ou aditivos incorporadores de ar, que acabam substituindo a cal. Apesar do estado fresco refletir diretamente nas propriedades no estado endurecido das argamassas e na otimização de aplicação, a abordagem à formulações e a métodos de dosagem estão sempre focadas no estado endurecido, monitorando somente parâmetros como relação água/materiais, resistência à compressão e ensaios de aderência sem o devido cuidado com as propriedades no estado fresco (SELMO, 1989; GOMES; NEVES, 2002; SANTIAGO, 2007). O cuidado que se deve tomar com a argamassa em seu estado fresco é de grande importância, visto que é nessa condição que irá ocorrer o transporte, manuseio, aplicação e acabamento. Ao longo do tempo, o estudo do estado fresco da argamassa de revestimento com o intuito de avaliar sua trabalhabilidade sofreu alterações. O que no passado era somente uma proposta simples voltada a facilidade do operário em aplicar o produto, atualmente se enfatiza em seu comportamento reológico (CARDOSO, 2009a; CARDOSO *et al.,* 2014; SAKANO *et al.*, 2018; GRANDES *et al.,* 2018).

O conceito de empacotamento de partículas tem despertado interesse nos últimos anos, nas diversas áreas da engenharia, uma vez que grande parte dos materiais naturais e industriais utilizados apresentam partículas de diferentes formas e tamanhos, que interferem diretamente no comportamento da mistura de argamassas e concretos (DAMINELI, 2013; STROEVEN; STROEVEN, 1999). O estudo do empacotamento de partículas, simplificadamente, pode ser definido como a forma racional de dosar os materiais particulados componentes das misturas, de forma que os vazios deixados entre as partículas de maior tamanho sejam preenchidos com partículas menores e, assim, sucessivamente (OLIVEIRA *et al.,* 2000). Existem diversos modelos de empacotamento de partículas que podem ser usados no desenvolvimento de métodos de dosagem argamassas e concretos, os quais consideram conceitos de demanda de água, interação entre partículas e energia de compactação (FENNIS, 2011). A utilização destes modelos e técnicas na proposição de diretrizes e métodos de dosagem para argamassas de revestimento pode permitir uma avaliação lógica e completa do material, em seus estados fresco

e endurecido, colaborando para o avanço do conhecimento e da técnica para se obter uma dosagem racional das argamassas.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A dosagem de argamassas de revestimento requer o estabelecimento de proporções dos materiais constituintes da mistura, com base em conceitos e propriedades técnicas fundamentadas no tipo de uso da argamassa e nas características dos materiais constituintes (SANTOS *et al.*, 2019). Ao longo dos anos, muitas construtoras e empresas que executam a etapa de revestimento tentam substituir a dosagem e a mistura das argamassas produzidas em obras pelas industrializadas, porém essa prática ainda é pequena no Brasil. Segundo Ideies (2018), a argamassa produzida em obra tem um mercado de 98% quando comparada com as argamassas industrializadas.

A utilização de argamassas, onde a dosagem desenvolvida é no canteiro de obra, acaba desencadeando uma série de problemas que podem ser divididas em três vertentes: na falta da mão de obra qualificada, a inexistência de um método racional de dosagem adequada e na utilização de materiais inadequados, sem uma parametrização de algumas características.

Seguindo Gomes e Never (2008), nessa época a proporção dos materiais (formulação) para a produção de argamassas era executada pelo mestre da obra e ou pedreiros sem experiência e ainda com pouca participação da área técnica (técnicos e engenheiros). Técnicas empíricas eram adotadas na execução das formulações das argamassas que quando somada com a falta de programas específicos de inspeção, controle e manutenção dos sistemas de revestimento, acabava gerando uma série de manifestações patológicos, através de fissuras, pulverulências e descolamentos, tanto das camadas do revestimento quanto do revestimento cerâmico, que certamente acabam comprometendo a segurança dos usuários, além da estanqueidade e estética do edifício.

Esse problema ainda é recorrente nos anos de hoje, tanto quanto aos profissionais sem qualificação na dosagem da argamassa no canteiro, mas também quanto a lacuna a ser preenchida quanto aos métodos de dosagem (SANTOS et al., 2018; SANTOS et al., 2019; FIGUEIREDO *et al.,* 2019). Quanto aos métodos de dosagem, uma série de propostas relacionadas veem sendo publicadas, com o proposito quanto a evolução desse tema, entretanto, boa parte dessas pesquisas evidenciaram abordagens limitadoras, que acabavam interrompendo

o fluxo da metodologia com procedimentos ou insumos muito específicos. Campiteli *et al.* (1995) utilizaram a cal virgem em sua proposta, pois a argamassa branca acaba sendo essencial ao sucesso do método. Isso pode ser um problema, visto que, além do método utilizar a cal virgem como protagonista do estudo, ainda requer um processo de hidratação, que quando não desenvolvido adequadamente pode gerar problemas de saúde com a queima da cal ao operário da obra. Ademais, essa reação de hidratação da cal virgem quando não desenvolvida adequadamente também acaba desencadeando manifestações patológicas à argamassa aplicada. O tempo para completar o processo de hidratação da cal, pode ocorrer de 48 horas até duas semanas em processo de hidratação, e irá depender diretamente da qualidade da rocha, queima e condição de grãos (MATTANA, 2013).

Trabalhos mais recentes propõem metodologias com a ajuda de softwares, como é o caso de propostas de alguns autores (SANTOS, 2014; MARVILA *et al.*, 2019; BAHIENSE, *et al.,* 2008; DESTEFANI; HOLANDA, 2011). A metodologia *Simplex* é um modelo matemático que permite chegar em algumas propriedades das argamassas pré-definidas, tanto no estado fresco (consistência) quanto no endurecido (resistência e durabilidade), se baseando na utilização de um conjunto de formulações amostrais. Entretanto, a quantidade de água, por exemplo, continua sendo determinada por meio da bibliografia e, em alguns casos, por ensaios de consistência.

De um modo geral, o teor ideal de água utilizada na formulação ainda é um dos parâmetros que apresenta deficiência em se tratando de dosagem de argamassas produzidas em obras. O teor de água nesse caso não está só relacionado às propriedades no estado endurecido, mas também acaba sendo fundamental na avaliação de produtividade, aplicação e qualidade do material acabado. Entretanto, apesar dessa quantidade de água se apresentar na forma essencial para análise de vários quesitos técnicos, esse parâmetro não é preconizado pela norma e sim somente por recomendações em pesquisas acadêmicas.

Além dessas questões abordadas, ainda tem o fato da norma NBR 13281 (ABNT, 2005), que preconiza requisitos voltados à argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos não avalia todos os parâmetros requeridos na qualidade do material. O módulo de elasticidade, por exemplo, está diretamente ligado à capacidade de absorver deformações do revestimento argamassado, e não está contemplado nesse documento. Já a NBR 15575 (ABNT, 2013), auxilia projetistas e técnicos quanto a alguns critérios que a argamassa deve apresentar quanto ao desempenho térmico, acústico, de estanqueidade e durabilidade das edificações.

Entretanto, a avaliação foca na vida útil e no desempenho do material acabado, sem um detalhamento mais rigoroso quanto aos requisitos de qualidade do material a ser aplicado.

Por último, a última vertente a ser analisada é a falta de uma análise técnica com foco nas características e teores dos insumos visando quanto ao impacto destes na qualidade do produto acabado. Tendo em vista de que a argamassa é composta por insumos que são basicamente aglomerantes, agregado miúdo e água, cada um destes traduz uma argamassa com característica distinta. O agregado miúdo, que antigamente era visto somente como um material inerte e com função de enchimento e diminuição de custo, hoje é tratado como sendo um material chave na qualidade da argamassa. Pesquisadores avaliam o impacto de todas essas características, que pode ser exemplificados por características individuais ou combinadas, como módulo de finura, teor de material pulverulento, granulometria, formato de grão, empacotamento de partículas, entre outros e que consequentemente reflete em uma melhor performance às argamassas (HADDAD et al., 2016, CARASECK et al., 2016; SANTOS et al., 2018; CORRÊA, 2019).

Aliado a todas essas questões, ainda está a análise da argamassa, como sistema multifásico, visando suas propriedades no estado fresco e consequentemente no endurecido. A trabalhabilidade da argamassa quando adequada facilita a aplicação e o acabamento do operário. Entretanto a forma de avaliar essa propriedade, que por muito tempo foi desenvolvida por ensaios como de índice de consistência (*flow tabel)*, hoje requer uma análise mais refinada, não podendo ser avaliadas simplesmente pelas suas propriedades intrínsecas, mais também de acordo com seu comportamento reológico, como por exemplo o ensaio com *squeeze-flow*.

Os ensaios com o *squeeze flow* auxilia na análise da trabalhabilidade, consequentemente nas propriedades reológicas das argamassas, representadas pela relação entre o fluxo ou deformação e as forças a que são submetidas as misturas (CARDOSO, et. al., 2014; GRANDES et al., 2018). Entretanto mesmo esse ensaio sendo um avanço muito importante na análise da trabalhabilidade das argamassa, ainda assim requer estudos que parametrizam curvas e dê condições mais claras na comparação entre a trabalhabilidade das argamassas entre si. Como a argamassa é um material que apresenta suspensões heterogêneas multifásicas e concentradas de partículas (micro e macroscópicas), essa diferença no fluxo entre as fases sólida e líquida tende a ser mais proeminente. A variação na distribuição granulométrica do material graúdo pode desencadear na interrupção no fluxo que consequentemente leva a ocorrência do embricamento, ou também chamado de comportamento de endurecimento por deformação durante o fluxo de compressão (CARDOSO, et. al., 2014; POITOU, 2001; COLLOMB et al.,

2004). No instante em que ocorre essa mudança de estágio, numericamente mensurada tende a ser mais um avanço na interpretação dos resultados, visto que na prática ela também pode ocorrer e prejudicar as propriedades e o desempenho do produto final (KHELIFI, et al., 2013).

É possível ainda atrelar outra linha de pesquisa, como a dos conceitos de empacotamento de partículas, que além de ser empregado na diminuição dos impactos ambientais em termos de emissão de CO_2 na produção do cimento (CAMPOS et al., 2020), auxilia no impacto ocorrido através da distribuição do tamanho de partículas nas propriedades reológicas das argamassas (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009; LI, *et al*., 2014). A escolha de determinados métodos de empacotamento de partículas, permitem a otimização do material granular de concretos e consequentemente das argamassas, podendo otimizar o índice de vazios, logo, melhorando suas propriedades mecânicas (KLEIN et al., 2020).

Por todas essas questões que impactam diretamente na qualidade das argamassas de revestimento produzidas em obras, tendo em vista a forma, ainda empírica de dosagem de argamassas, a ineficiência na análise de insumos, como foco principal os teores de água e características do agregado miúdo questiona-se: quais são as diretrizes na dosagem de argamassas de revestimento, tendo em vista o foco em seu comportamento reológico?

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral desse trabalho é propor diretrizes para dosagem de argamassas de revestimento com base em métodos de empacotamento de partículas e de caracterização do comportamento reológico através do ensaio de *squeeze flow*.

Em paralelo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o comportamento reológico de argamassas de revestimento produzidas em obras distintas, na cidade de Curitiba, com o intuito de verificar a variação desse comportamento, com a intenção de obter parâmetros e correlações entre elas;
- Utilizar ferramentas de empacotamento de partículas na busca das melhores formulações, inclusive com a indicação da quantidade de água mínima necessária;
- Avaliar parâmetros obtidos por meio de diferentes características dos agregados, suas proporções e quais são os impactos causados nas propriedades

da argamassa com foco no estado fresco (*pelo ensaio squeeze flow*), bem como algumas das propriedades no estado endurecido (resistência a compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade).

1.3 JUSTIFICATIVAS

Inserida no conceito da edificação em geral, o revestimento argamassado pode ser entendido como o subsistema que recobre uma superfície porosa, com espessura uniforme resultando em uma face apta para receber acabamento. Como finalidade principal de proteger a base de ações diretas de agentes agressivos como vento, chuva etc., contribuir com o isolamento termoacústico, regularização, absorção de deformações da base sem fissurar, entre outros (RECENA, 2015). Entretanto, muitas dessas funções ficam comprometidas se a argamassa não atingir determinados requisitos de desempenho, tais como o surgimento de manifestações patológicas como, por exemplo, o descolamento e/ou desplacamento de camadas aplicadas sob o revestimento, fissuração, infiltração, umidade entre outras.

Para Sousa e Bauer (2002), a complexidade dos revestimentos de fachada quanto à formulação, função, desempenho, tipos de materiais e a falta de metodologias racionais, somada a significativa carência normativa e técnico-científica, torna a atividade de especificação, projeto e controle de qualidade dos revestimentos, uma atividade de grande especificidade, a qual foge até mesmo ao escopo da formação básica e atuação do engenheiro civil e do arquiteto. Os parâmetros de definição, avaliação e controle, no estágio atual, são ainda muito incipientes e, muitas vezes, insuficientes para as necessidades do dia a dia na execução dos revestimentos, resultando numa expressiva quantidade de manifestações patológicas associadas.

Mesmo que o tema referente à dosagem de argamassas de revestimento se apresente relevante em âmbito nacional e internacional, constata-se carência de informações a respeito. A seguir, serão descritas cada uma das justificativas elencadas: social, tecnológica, econômica e ambiental.

1.3.1 Justificativa tecnológica e social

A argamassa compõe a cadeia produtiva da indústria de materiais de construção, que por sua vez, é um dos elos da cadeia da construção civil, impactando na necessidade da

constantemente e crescente busca pela qualidade, tanto no meio técnico quanto para o cliente final do produto. Essa exigência pela qualidade acaba desencadeando um foco para normatização, procedimentos, mão de obra, insumos e outros quesitos que garantam um adequado produto final e cada vez mais alinhado com as necessidades de uso. No caso das argamassas básicas que englobam as argamassas de assentamento e revestimento, existe uma lacuna no tocante às normas, tanto pela diversidade de aplicações, variação na mão de obra e variáveis envolvidas quanto pela falta de requisitos mínimos, que influenciam diretamente o desempenho da argamassa. Esse universo de variáveis dentro da tecnologia das argamassas pode ser tanto no tipo de material e formulações adequadas, na mão de obra, no tipo da edificação a ser revestida, sua região ou outros.

A norma de desempenho NBR 15575-4 (ABNT, 2013) atualmente também auxilia quanto aos cumprimentos de certos quesitos relacionados ao revestimento nas construções. Entretanto, apesar da norma de desempenho apresentar um foco único no atendimento de requisitos aos usuários e não na prescrição de como os sistemas devem serem construídos, ainda assim, tem demonstrado uma contribuição quanto aos parâmetros que devem ser atendidos para projeto e execução da edificação em construção. Pode-se afirmar, que somente a aplicação da norma de desempenho não tem se mostrado suficiente para a garantia total da qualidade do material, sendo que a abrangência no âmbito da engenharia precisa ser completa abrangendo por exemplo materiais, procedimentos, execução e controle de qualidade durante a execução. A falta de se considerar tais elementos, mesmo que algumas vezes considerados irrelevantes pelos profissionais responsáveis pela execução, no que diz respeito à qualidade, ao projeto e à construção da fachada, pode afetar a imagem do edifício, em casos mais graves riscos como desplacamentos e, muitas vezes, tornar-se de difícil correção (COSTA, 2005).

Seguindo Ceotto *et al.,* 2005, no passado, as estruturas de concreto eram projetadas para edificações menores (vigas com vãos entre 3,5 m a 5m e pilares com até 16 pavimentos, em média) num prazo relativamente longo (24 a 30 meses), fazendo com que as tensões de tração e cisalhamento não fossem grandes o suficiente para provocar manifestações patológicas significativas. Já nos últimos anos essa exigência por edificações modernas, em que o custo-benefício é avaliado com mais detalhes (mais vagas de garagem, maiores resistências do concreto, novas tecnologias de materiais e a necessidade na produtividade). Assim, há um indicativo de que as manifestações patológicas no sistema de revestimento aumentaram, visto que esse acréscimo de resistência nos concretos e maior módulo de elasticidade possibilitaram estruturas de maiores dimensões e submetidos a maiores necessidades, responsabilidades e

adversidades para as argamassas de revestimento, Divergindo de tal evolução tecnológica do material concreto e suas normatizações, as argamassas não acompanharam tal evolução, observando-se uma incompatibilidade, por exemplo, entre os aumentos de necessidades às argamassas de revestimento devido aos maiores esforços impostos às mesmas por maiores deformações de edifícios de grande altura, também maior exposição ás intempéries como vento, chuva, sol, etc. Desencadeou-se uma divergência entre algumas das propriedades das argamassas de revestimento (como por exemplo em sua aderência ao substrato) com a tecnologia dos materiais voltados a estruturas e alvenaria das edificações. A partir das mudanças ocorridas no projeto estrutural, outras etapas da obra necessariamente precisam ser atualizadas como o caso da incorporação do projeto de revestimento e diretrizes na utilização dos materiais e dosagem das argamassas, que direciona o planejamento e a execução dessa etapa da obra com o objetivo de aumentar sua vida útil, diminuir custo, diretrizes de manutenção e até mesmo minimização de riscos de acidentes com desplacamentos, otimizar sua execução e mapear condições particulares de cada edificação: condições climáticas, altura da edificação, juntas de dilatação, materiais regionais entre outros (SABBATINI, 1990; NAKAMURA, 2004; CEOTTO *et al.,* 2005; COSTA, 2005).

Os projetos de fachada geralmente vão além dos acabamentos que a edificação irá receber, mas também examina as condições climáticas do local, todos os materiais que deverão compor esse revestimento, principalmente na especificação correta da argamassa que engloba a eleição adequada dos seus insumos, seja ele na qualidade dos agregados e da cal, tipos de aditivos, formulações adequadas que contemplam inclusive quanto ao teor de água (NAKAMURA, 2004). Conforme Rocha (2011), grande parte dos problemas que comumente afetam as fachadas acontecem por falhas na execução, porém, não necessariamente pela inexperiência do operário e sim pela falta de definição clara e objetiva dos procedimentos a serem desenvolvidos.

Nesse sentido, quando a argamassa está dentro desse projeto de revestimento, há grandes chances desse material apresentar-se com uma dosagem adequada da argamassa e aplicada corretamente tende a desencadear um sucesso na vida útil do revestimento como um todo. Os projetos de fachada geralmente vão além da eleição do tipo de acabamento que a edificação irá receber, mas também examina as condições especificais da edificação, que podem ser questões ambientais, materiais, mão de obra e até mesmo questões executivas que são fixas de cada região (NAKAMURA, 2004). Conforme Rocha (2011), grande parte dos problemas que

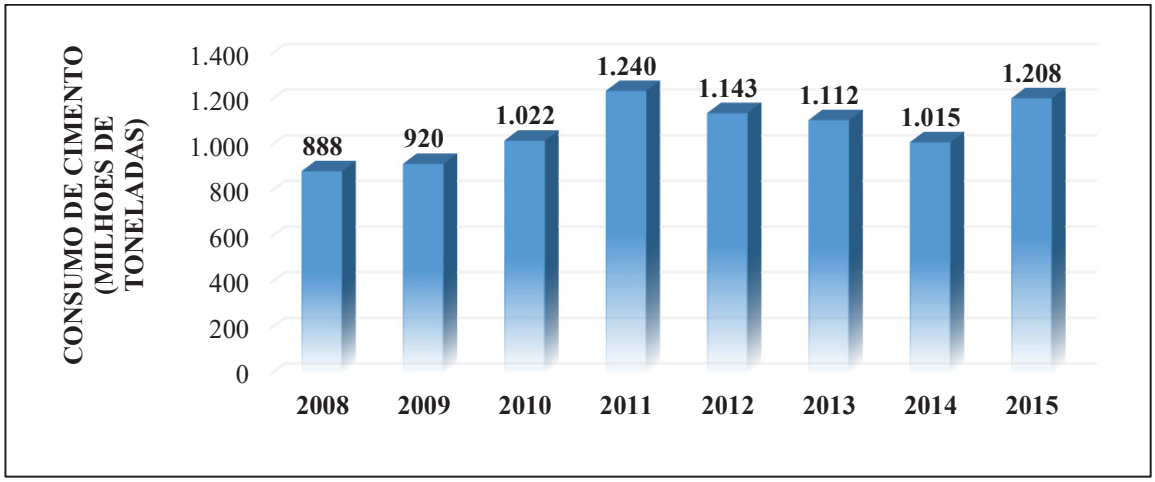
comumente afetam as fachadas acontecem por falhas na execução, porém, não necessariamente pela inexperiência do operário e sim pela falta de definição clara e objetiva dos procedimentos a serem desenvolvidos.

1.3.2 Justificativa econômica e ambiental

A construção civil é responsável pela geração de um volume expressivo de resíduos no planeta, sendo que 90% deles são classificados como inertes, porém, por serem heterogêneos, são apresentados em sua grande maioria como sendo resíduos perigosos (tintas, impermeabilizantes, amianto), que se destinados à aterros sanitários, pode reduzir sua vida útil, e quando depositados em locais impróprios degrada o meio ambiente urbano (PIMENTEL *et al*., 2018; NENO *et al.,* 2014).

Todos os materiais empregados na argamassa, podem gerar expressiva poluição ambiental, seja na produção (cimento e da cal), na extração (agregado miúdo) e utilização de material não renovável. Só na argamassa foi possível verificar, em 2015, um acréscimo de 15,9% na utilização do cimento, em comparação ao ano de 2014, conforme figura 1.

FIGURA 1 – CONSUMO DE CIMENTO NA FABRICAÇÃO DA ARGAMASSA (EM MILHÕES DE TONELADAS)



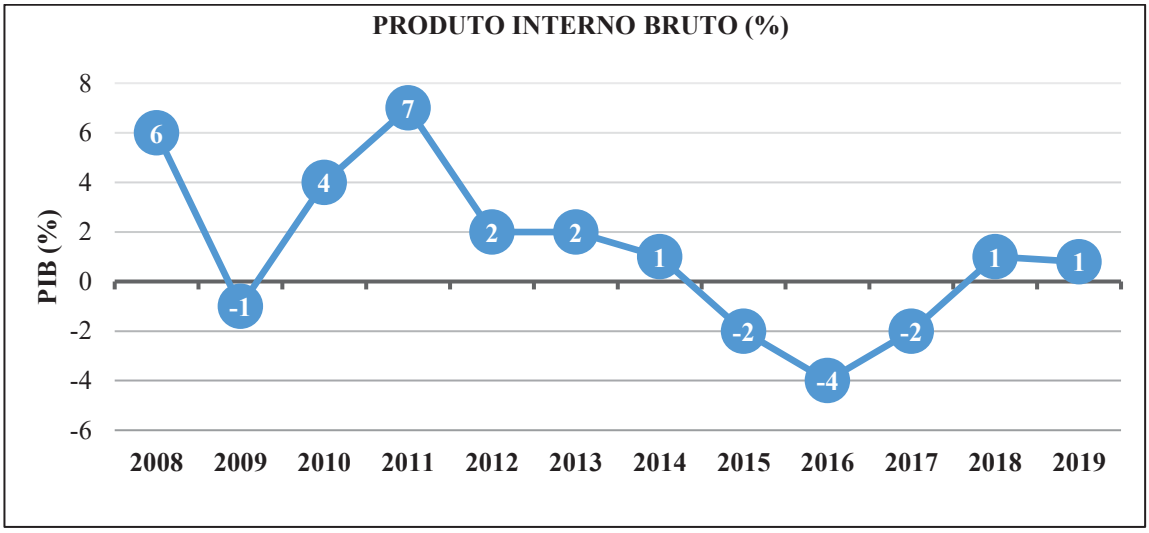
FONTE: IDEIES (2018).

Vale frisar que 2008 a 2011 ocorreu um acréscimo de 28,4% que, além de subentender um indicador de um maior movimento no setor das argamassas, pode ter sido ainda causa do desenvolvimento econômico significativo. Já a partir de 2011, quando passou a ser visualizado

o pico no consumo de cimento para a argamassa, começou um novo decréscimo que também pode ter sido justificado pela saúde econômica do país. Entretanto, esse consumo mostra uma retomada do setor em 2015 com um acréscimo de 15,9% de milhões de tonelada em comparação a 2014, como mostra a figura 1.

As justificativas desse decréscimo, a partir do ano de 2011, podem ter sido a desaceleração da economia que também começou no mesmo período, a partir dos dados do PIB, tendo uma leve tendência a retomada ano de 2016, como pode ser visualizado pela figura 2.

FIGURA 2 – DEMONSTRATIVO DO PRODUTO INTERNO BRUTO (PIB)

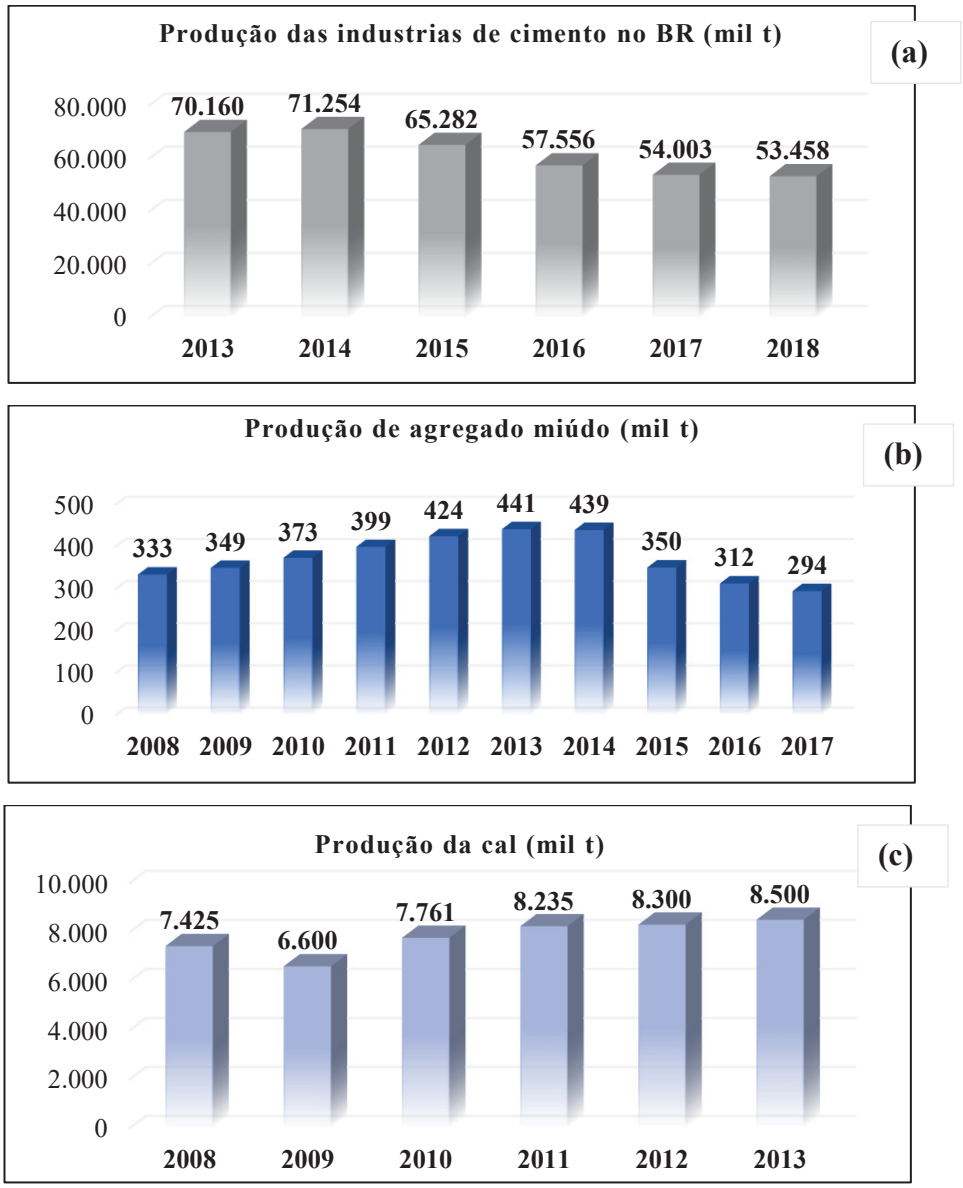


FONTE: IDEIES (2018).

O índice de Produto Interno Bruto (PIB) é utilizado para mensurar a saúde econômica de um país, sua evolução no tempo e compará-la com outros países. Ele representa a soma do valor de todos os bens e serviços produzidos, distribuídos e consumidos em uma região em um determinado período. Nota-se que, em 2016, o PIB apontou o pior índice em dez anos, confirmando uma grave recessão que levemente mostra uma tendência de um acréscimo até os dias de hoje.

Paralelamente ao cenário econômico, tem-se o apelo sustentável cada vez mais forte, que pode ser uma outra vertente desse decréscimo, que inclui também a estatística dos consumos dos insumos relacionados com a argamassa. Com insumos como o cimento, a cal e o agregado miúdo, são possível visualizar a desaceleração no consumo por meio da figura 3.

FIGURA 3 – PRODUÇÃO DE INSUMOS NA PRODUÇÃO DA ARGAMASSA (EM MILHÕES DE TONELADAS): (A) CIMENTO; (B) AGREGADO MIÚDO; (C) CAL



FONTE: (a) FINDES/IDEIES (2018); (b) ANEPAC (2020); (c) USGS (2021).

Os agregados, de forma geral, compõem aproximadamente 80% do volume total de concretos e argamassas, restando ao cimento, a cal e outros ligantes a participação entre 8 e 20%. O uso do agregado miúdo natural é regulamentado por lei em muitos países e totalmente proibido em outros, que é o caso do Japão. Alguns países como a Suécia, apelam para o uso da areia britada ao invés da areia natural sempre que possível. No Brasil, as restrições para obter as licenças também vêm aumentando, porém ainda segue a extração ilegal, já que a venda de areia é considerada uma maneira rápida de obter dinheiro com pouco investimento (METSO,

2020). No entanto, o grande impacto ambiental está relacionado ao clínquer incorporado, já que este responde por mais de 70% das emissões de NO_x (Óxido de Nitrogênio) – gases extremamente nocivos à saúde e em torno de 80% das emissões de CO_2 (Dióxido de Carbono) – gás do efeito estufa (DAMINELI, 2013).

Em 2018, há uma publicação da norma NBR 16697 (ABNT, 2018), seguindo a tendência mundial, que unifica oito normas correlacionadas aos tipos de cimentos. Além de algumas novidades para o setor industrial como, por exemplo, a retirada da obrigatoriedade dos sacos apresentarem 50kg por embalagem. Ela apresenta um apelo sustentável na substituição da quantidade de clínquer por filer calcário, em diferentes teores dependendo do tipo de cimento. Essa mudança ocorreu com a finalidade de um alinhamento com as normas internacionais e o atendimento das recomendações sugeridas pela Agência Internacional de Energia (AIE) e da Iniciativa pela Sustentabilidade do Cimento (CSI), que incentivam a adoção de alternativas que diminuam a emissão de CO_2/ton de cimento.

Ademais, é possível aliar outra linha de pesquisa, como a dos conceitos de empacotamento de partículas que, além de ser empregado na diminuição desses impactos ambientais em termos de emissão de CO_2 na produção do cimento (CAMPOS *et al.*, 2020), auxilia nas propriedades reológicas das argamassas e concretos que estão diretamente associadas pela distribuição dos tamanhos das partículas (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). Alguns métodos e modelos de empacotamento de partículas, por exemplo, estão permitindo uma otimização do material granular de concretos e argamassas, reduzindo o índice de vazios, logo, melhorando as propriedades mecânicas dos materiais (KLEIN *et al.*, 2020). No estado fresco dos materiais, a influência nos estudos de empacotamento de partículas também atua na distribuição de tamanho de partículas que flui positivamente nas propriedades reológicas do material durante o processo de mistura e no estado fresco (LI *et al.,* 2014).

1.4 REVISÃO SISTEMÁTICA

A revisão sistemática da literatura foi desenvolvida com o intuito de identificar literaturas relevantes no tema de estudo. A metodologia eleita foi o Methodi Ordinatio, proposta por Pagani e Resende (2015) que seleciona e classifica trabalhos científicos de acordo com sua relevância na concepção de um portfólio bibliográfico, considerando três aspectos: fator de impacto, número de citações e ano de publicação. Com essas três variáveis, é possível gerar um

índice chamado “InOrdinatio”, que indica a relevância científica dos artigos que compõem o portfólio, permitindo classificá-los. Para estabelecer esse índice, o método é composto por nove etapas a serem seguidas:

1. Estabelecimento da intenção de pesquisa;
2. Pesquisa preliminar nas bases de dados bibliográficos;
3. Definição das bases de dados a serem utilizados, voltado ao tema da pesquisa e das palavras-chave e combinações;
4. Busca das palavras-chave nas bases de dados e coleta;
5. Processo de filtragens;
6. Definição do fator de impacto e número de citações;
7. Cálculo do índice InOrdinatio;
8. Download dos artigos que compõem o portfólio;
9. Leitura sistemática e análise dos artigos.

As bases de dados eleitas foram *Science Direct, Scopus e Scielo*, que destacam basicamente artigos científicos publicados em periódicos e eventos científicos da área da pesquisa. A pesquisa foi dividida em 2 eixos com o incremento de palavras sinônimo, considerando as palavras no campo título/resumo/palavras-chave, conforme tabela 1.

TABELA 1 - EIXOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Eixos	Campo da pesquisa	Foco
1 -	TITLE-ABS-KEY ("coating mortar") OR TITLE-ABS-KEY ("lime mortar") OR TITLE-ABS-KEY ("rendering mortar") AND TITLE-ABS-KEY ("mix-design") OR TITLE-ABS-KEY (dosage) OR TITLE-ABS-KEY (proportioning) OR TITLE-ABS-KEY (optimization) OR TITLE-ABS-KEY (formulation).	Argamassa de revestimento e métodos de dosagem
2 -	TITLE-ABS-KEY ("coating mortar") OR TITLE-ABS-KEY ("lime mortar") OR TITLE-ABS-KEY ("redering mortar") AND TITLE-ABS-KEY (packing) OR TITLE-ABS-KEY ("particle size") OR TITLE-ABS-KEY (granulometry) OR TITLE-ABS-KEY ("aggregate gradation") OR TITLE-ABS-KEY (psd).	Argamassas de revestimento e influência do empacotamento de partículas e análise de agregados.

FONTE: A autora (2021).

Para o eixo 1, os critérios de seleção (inclusão) foram: artigos de todas as datas pesquisadas, artigos que identificaram as argamassas de revestimento e os típos de metodologia aplicada na dosagem e/ou formulações das argamassas. Para os critérios de inclusão do eixo 2, foi repetido o foco na argamassa de revestimento, porém dando ênfase em empacotamento de partículas e características das partículas dos agregados. Como critérios de exclusão foram adotados: artigos que se apresentaram em duplicidade (1º processo de exclusão) nos bancos de

dados, que não atendessem aos critérios de seleção, que tratassem somente de dosagem dos insumos das argamassas como, por exemplo, aditivos ou adições que são usualmente incorporados às argamassas (2º processo de exclusão).

Os resultados da aplicação do método foram divididos em mapeamento sistemático, pois há uma visão macro dos artigos selecionados, e levantamento das pesquisas, bem como há uma análise detalhada destes artigos que também será utilizada na revisão bibliográfica dessa pesquisa. A tabela 2 apresenta as frequências destas publicações de acordo com cada base de dados, com os resultados da etapa de filtragem. A revisão sistemática foi desenvolvida entre as datas de 23/09/2020 a 29/09/2020.

TABELA 2– ARTIGOS PESQUISADOS DIVIDIDOS POR BASE DE DADOS

Eixo	**Nº de artigos retornados pelas bases de dados**			**Total**	**Exclusão**		**Total de artigos analisados**
	SCIENCE DIRECT	**SCOPUS**	**SCIELO**		**1º**	**2º**	
EIXO 1	62	92	17	171	42	110	19
EIXO 2	22	58	01	81	24	48	08
TOTAL	**84**	**150**	**18**	**252**	**66**	**159**	**27**

FONTE: A autora (2021).

É possível observar que dentre as 252 pesquisas relacionadas ao todo, 66 foram excluídas por serem periódicos duplicados ou por não conterem o título aderido aos dois eixos de palavras aplicadas. Foi utilizado o *software* Mendeley como gerenciador de referência para a coleta e armazenamento dos dados. A segunda exclusão foram ao todo 159 artigos que não eram relevantes ao tema, quando foram avaliadas as afinidades do título e do resumo relevantes a pesquisa e resumidos a seguir:

- Análise exclusiva das propriedades no estado endurecido da argamassa - propriedades mecânicas e retração de secagem em argamassas;
- Pesquisas relacionadas à carbonatação das argamassa e MEV;
- Argamassas histórias;
- Ponderações do sistema do revestimento argamassado: textura do substrato na resistência à tração e ao cisalhamento;
- Materiais muito específicos acrescentados na argamassa como o cinza de fundo de combustão de biomassa, agregados reciclados de resíduos de construção e demolição,

aluminossilicatos amorfos como aditivo modificador, aditivos à base de biopolímero, entre outros.

Por meio do procedimento de filtragem realizado, restaram 27 artigos para compor o escopo da pesquisa, que serão discutidas na revisão bibliográfica desse estudo. O passo subsequente foi classificar os artigos usando a Equação InOrdinatio (1). O IF é o Fator de Impacto da revista; α= coeficiente de relevância do ano da pesquisa; RY= Ano da pesquisa; PY= Ano da publicação e o Ci= números de citações.

$$\text{InOrdinatio} = \left(\frac{\text{IF}}{1000}\right) + \left(\propto * \left(10\text{-}(\text{ResearchYear-PublishYear})\right)\right) + (\text{Ci}) \qquad (1)$$

A pesquisa foi realizada tendo como base o fator de impacto e número de citação, utilizando o gerenciador de referência *JabRef*, que gerou automaticamente uma lista de artigos com o nome dos autores, título do trabalho, nome da revista, ano de publicação, tipo de publicação e URL. O número de citações foi extraído manualmente por intermédio do *Google Scholar*. O fator de impacto também foi obtido manualmente por meio da lista fornecida pelo Scopus2.

Por fim, foi obtida a classificação dos artigos usando o In Ordinatio, com a identificação de parâmetros, no qual 27 artigos foram classificados do maior para o menor Índice Ordinatio (I.O) usando o coeficiente (α) de 10. O coeficiente (α) igual 10 representa que o ano de publicação do artigo é um fator relevante para a pesquisa (PAGANI *et al.*, 2015).

A partir do método *MethodiOrdinatio* (IO), foi possível classificar os artigos mais relevantes sobre o tema dessa pesquisa, que estão sendo demonstrados na tabela 3.

TABELA 3– CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS POR MEIO DO MÉTODO IO

	AUTORES	ARTIGO	ANO	IN ORDINATIO
EIXO 1				
1-	SOUZA, A. T.; CALDAS, R. B.; LUDVIG, P.; SANTOS, W. J.	The effects of mixture's components on the mechanical properties and durability indicators of mixed mortar using simplex network method.	2020	101,00
2-	SILVA, B.A., FERREIRA PINTO, A.P., GOMES, A., CANDEIAS, A.	Impact of a viscosity-modifying admixture on the properties of lime mortars.	2020	101,00
3-	GARIJO, L., ZHANG, X.X., RUIZ, G., ORTEGA, J.J.	The influence of dosage and production process on the physical and mechanical properties of air lime mortars.	2020	100,00
4-	GARIJO, L., ZHANG, X., RUIZ, G., ORTEGA, J.J., WU, Z.	The effects of dosage and production process on the mechanical and physical properties of natural hydraulic lime mortars	2018	93,00
5-	GIORDANI, C., MASUERO, A.B.	Blended mortars: Influence of the constituents and proportioning in the fresh state.	2019	92,00
6-	MACHADO, J. C; DOMIGUES, F. M.; SERPA V. C.; OLIVEIRA, A. L.; MURILLO, A. B.; CALÇADA, L. M. L.	Influence of cement type and water content on the fresh state properties of ready-mix mortar.	2018	87,00
7-	MACIEL, M. H.; BERNARDO, H. M.; SOARES, G. S.; ROMANO, R. C. O.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G.	Efeito da variação do consumo de cimento em argamassas de revestimento produzidas com base nos conceitos de mobilidade e empacotamento de partículas.	2018	87,00
8-	PIMENTEL, L. L.; PISSOLATO O. J.; JACINTHO, A. E. P. G.; MARTINS, H. L. S.	Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil – Avaliação de características físicas e mecânicas.	2018	82,00
9-	ROMANO, R. C. O.; TORRES, D. R.; PILEGGI, R. G.	Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars	2015	75,00
10-	KAZMIERCZAK, C. S.; ROSA, M.; ARNOLD, D. C. M.	Influência da adição de filer de areia de britagem nas propriedades de argamassas de revestimento.	2016	73,00
11-	HADDAD, L. D.; COSTA, C.M.; LOPES, P.H.P.; DE CARVALHO JÚNIOR, A.N.; DOS SANTOS, W.J.	Análise da influência da granumoletria do agregado miúdo nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas de revestimento.	2016	66,00
12-	ARIZZI, A.; CULTRONE, G.	Inadequacy of different methods of assessing the correct dosages during the preparation of air-hardening lime mortars.	2015	62,00
13-	INCE, C., DEROGAR, S.; MICHELITSCH, T.M.	Influence of supplementary cementitious materials on water transport kinetics and mechanical properties of hydrated lime and cement mortars.	2015	53,00
14-	ROMANO, R. C. O.; SEABRA, M. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G.	Caracterização reológica de suspensões cimentícias mistas com cales ou filitos.	2014	45,00
15-	LUCAS, S., SENFF, L.; FERREIRA, V.M.; BARROSO DE AGUIAR, J.L.; LABRINCHA, J.A.	Fresh state characterization of lime mortars with PCM additions	2019	21,00
16-	KACI, A., CHAOUCHE, M.; ANDRÉANI, P. A.; BROSSAS, H.	Rheological behaviour of render mortars	2009	10,00
17-	QUARCIONI, V.A.; CINCOTTO, M.A.	Optmization of calculation method for determination of composition of hardened mortars of Portland cement and hydrated lime made in laboratory	2006	-18,00
18-	Y. SÉBAÏBI, R. M. DHEILLY, M. QUÉNEUDEC	Study of the water-retention capacity of a lime–sand mortar: Influence of the physicochemical characteristics of the lime	2003	-20,99

19-	Y. SÉBAÏBI, R. M. DHEILLY, M. QUÉNEUDEC	A study of the viscosity of lime–cement paste: influence of the physico-chemical characteristics of lime	2004	-23,00
EIXO 2				
20-	NENO, C., BRITO, J.D., VEIGA, R.	Using fine recycled concrete aggregate for mortar production	2014	149,01
21-	HADDAD, L. D. O.; NEVES, R. R.; OLIVEIRA, P. V.; SANTOS W. J.	Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties.	2020	102,01
22-	SANTOS, A. R.; VEIGA, M. R.; SILVA, A. S.; BRITO J.; ALVAREZ, J. I.	Evolution of the microstructure of lime based mortars and influence on the mechanical behaviour: The role of the aggregates	2018 (a)	102,00
23-	VYŠVAŘIL, M., VOZÁK, R.	Effect of aggregate gradation on lime mortars rheology	2019	90,00
24-	FERREIRA, R.L.D.S.; BARROS, I.M.D.S.; COSTA, T.C.S.; MEDEIROS, M., DE SÁ, M.D.V.V.A.; CARNEIRO, A.M.P.	Efeitos do uso de areia de praia nas propriedades de argamassas mistas: análise da variação granulométrica	2019	90,00
25-	SANTOS, A.R., VEIGA, M.R., MATIAS, L., SANTOS SILVA, A., DE BRITO, J.	Durability and compatibility of lime-based mortars: The effect of aggregates	2018	82,00
26-	KALAGRII, A; KARATASIOSV. KILIKOGLOU	The effect of aggregate size and type of binder on microstructure and mechanical properties of NHL mortars.	2014	63,00
27-	PAVÍA, S., TOOMEY, B.	Influence of the aggregate quality on the physical properties of natural feebly hydraulic lime mortars.	2008	33,00

FONTE: A autora (2021).

Como pode ser visto, dentre os artigos eleitos que foram incluídos nos dois eixos das palavras-chave determinadas, 27 deles fazem referência ao tema proposto que é contribuição à dosagem de argamassas de revestimento. No eixo 1, as análises têm foco em pesquisas relacionadas aos métodos de dosagem de argamassas. Já no eixo 2, esse foco é direcionado às contribuições aos métodos de dosagem, buscando parâmetros que a influenciam. Assim, esses parâmetros fazem referência quanto à influência dos tipos e características dos agregados nas formulações e alguns métodos que padronizam e otimizam os consumos de materiais, principalmente quanto à utilização de métodos e modelos de empacotamento de partículas. As discussões dos artigos selecionados na revisão sistemática e demais periódicos relevantes, angariados de outras fontes científicas, estão sendo detalhados por meio da revisão bibliográfica (capítulo 2) dessa pesquisa.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

Está pesquisa está estruturada em seis capítulos cujos conteúdos são resumidos a seguir.

No capítulo 1, apresenta-se a introdução do tema com suas justificativas, objetivos, problema da pesquisa e uma revisão sistemática do tema proposto.

No capítulo 2, tem-se a fundamentação teórica do trabalho, sendo abordados assuntos pertinentes ao tema estudado como a dosagem de argamassas de revestimento, métodos já desenvolvidos, parâmetros relevantes na dosagem de argamassas e empacotamento de partículas.

No capítulo 3, foi demonstrado o programa experimental da pesquisa com materiais e métodos aplicados. Esse capítulo está sendo dividido em quatro etapas com o intuito de descrever as diretrizes de dosagem. Essas etapas foram:

- Etapa I - Caracterização das argamassas retiradas de obras;
- Etapa II - Estudo do empacotamento de partículas;
- Etapa III - Cálculo do excesso de água;
- Etapa IV - Propriedades no estado endurecido.

No capítulo 4, foi possível demonstrar os resultados e as discussões obtidos ao longo do estudo, dividido da mesma forma com o qual foi exposto no capítulo 3.

Por fim, no capítulo 5 foram abordadas as considerações finais da tese, as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2. DOSAGEM DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Até o início do século XIX, a formulação de argamassas era desenvolvida basicamente por métodos empíricos acumulados ao longo do tempo. Em 1828, o pesquisador *Vicat* iniciou as pesquisas sobre o impacto das proporções de agregado miúdo e cal na relação entre a compacidade e a resistência mecânica de argamassas. Assim, inicia-se a identificação dos benefícios de misturar areia fina com a grossa e perceber uma redução na quantidade de água de amassamento da mistura. René Feret, em 1892, foi quem estabeleceu uma metodologia que relaciona a resistência com a compacidade nas argamassas, que até hoje é válida (PINTO *et al., 2006*).

O estudo da dosagem de argamassas compreende um conjunto de procedimentos necessários para se obter uma proporção adequada de materiais, comumente conhecido como formulação. Entretanto, essa formulação para a produção de argamassas ainda é realizada por meio empírico que contém pouca interação, acompanhamento de engenheiros e tecnólogos. A falta de procedimentos e métodos adotados no desenvolvimento dessa proporção de constituintes da argamassa com a falta de programas específicos de inspeção, controle e manutenção dos sistemas de revestimento têm gerado manifestações patológicas como, por exemplo, fissuras e descolamento de revestimento cerâmico que acabam comprometendo a segurança dos usuários, além da estanqueidade e estética das edificações (SELMO; HELENE, 1991; CAMPITELI *et al.,* 1995; GOMES; NEVES, 2002; SANTOS, 2014; RECENA, 2015; BRANDSTETTER *et al.,* 2018).

As pesquisas relacionadas à dosagem de argamassas devem englobar a escolha adequada de constituintes disponíveis e que atendam a uma série de parâmetros voltados às propriedades do material no estado fresco e endurecido. Da mesma forma, uma mistura ideal que atenda a essas propriedades visando à qualidade, economia e durabilidade da argamassa. Esses constituintes que compõem a argamassa de revestimento são materiais comuns utilizados na construção civil, como o cimento Portland, agregado miúdo de diversas granulometrias, podendo ou não conter a cal, aditivos químicos e minerais, dependendo das propriedades e aplicações desejadas (RECENA, 2015).

A função principal das argamassas é atender exigências funcionais, tais como, proteger as paredes contra intempéries e ação dos meios externos (impermeabilizar), proporcionar regularização, acabamento às superfícies e dependendo da espessura e da quantidade de

camadas, proporcionar à edificação conforto acústico e térmico. Além da argamassa de revestimento atender aos requisitos funcionais da edificação, ela também será influenciada pelas condições da obra, do tipo do substrato, da fachada ser interna ou externa, entre outros (RECENA, 2015).

Considerar a importância das propriedades da argamassa como, por exemplo, a trabalhabilidade, adesão, aderência, deformabilidade entre outros, fazem com que se atenda uma grande parte da qualidade esperada desse material (HADDAD, 2016; SANTOS *et al.,* 2018a). A outra parcela deverá ser atendida ou adaptada de acordo com quesitos de aplicação do produto, respeitando fatores climáticos regionais, procedimentos de mistura, quantidades e espessuras de camadas, tipo do substrato para sua aplicação, entre outros (BAÍA; SABBATINI, 2000).

No Brasil, ainda não há um consenso entre pesquisadores da área sobre de que forma deve ser orientado um estudo de dosagem de argamassas, justamente por não haver norma brasileira específica que defina tais procedimentos e parâmetros de dosagem. Por consequência, vários pesquisadores têm proposto métodos e diretrizes próprias de dosagem que, muitas vezes, são confundidos com informativo da instituição para o qual trabalham. (SANTIAGO, 2007; CARASEK *et al.*, 2010).

Na Europa, o estudo de diretrizes e procedimentos quanto à dosagem de argamassas, tomaram outro direcionamento, em comparação ao Brasil, tendo em vista o acréscimo expressivo no processo industrial voltado à construção civil, durante o século XIX. Construtoras e funcionários da construção civil tiveram que transformar os trabalhos anteriormente desenvolvidos em pequena escala artesanal, em grandes produções que otimizavam tempo e qualidade dos materiais e dos serviços desenvolvidos. Na Suécia, por exemplo, no final de 1930 aumentaram também as reclamações sobre os danos em rebocos externos, levando aos técnicos um certo questionamento sobre a qualidade das argamassas artesanalmente produzidas em obra, principalmente sobre a falta de padrão na queima dos ligantes, na proporção dos materiais utilizados e também quanto à grande variedade nas características dos agregados utilizados (ERIKSSON *et al.,* 2016).

2.1 EVOLUÇÃO DOS ESTUDOS DE DOSAGEM DAS ARGAMASSAS

Ao longo do tempo, muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito do estabelecimento de métodos e procedimentos que possam ser replicados na dosagem de argamassas de revestimento em obras. Entretanto, inúmeros são os fatores que dificultam a padronização desses processos e que, consequentemente, levam as empresas a optarem pela substituição das argamassas dosadas *in loco*, pelas industrializadas (SANTOS *et al.,* 2018b). As propostas de métodos de dosagem disponíveis para argamassas de revestimento e assentamento apresentam abordagens incompletas que, muitas vezes, não fornecem a garantia de que o material terá um desempenho adequado quando aplicado ao substrato.

Pesquisas consagradas que tiveram como objetivo uma proposta de diretrizes de dosagem de argamassas de revestimento foram de grande valia ao meio técnico, tendo em vista que cada uma delas contribuiu com a análise de alguns parâmetros importantes a serem considerados (SANTOS, 2014; SANTOS *et al.,* 2019). Na figura 4, pode ser visualizado o levantamento das principais pesquisas relacionadas à parâmetros de dosagem de argamassa de revestimento, em ordem cronológica.

FIGURA 4 –ESTUDO CRONOLÓGICO DAS PRINCIPAIS PESQUISAS ENVOLVENDO PARÂMETROS DE DOSAGEM DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

FONTE: A autora (2021).

Selmo (1989) e Selmo e Helene (1991), que foram os precursores no tema da dosagem de argamassas, testaram o impacto do teor ótimo de materiais plastificantes (materiais finos exemplificados pela cal ou adições minerais como o saibro, filito ou pó de calcário) e do impacto que isso causaria no teor mínimo de água para fluidez adequada a argamassas.

Entretanto, esse teor de água levantado na análise foi adquirido por meio da experiência do profissional da obra e não avaliado por ensaio específico de análise no estado fresco. O foco na análise para a conclusão desse estudo foi baseado em parâmetros no estado endurecido, com ensaios de resistência à compressão e de aderência.

Na metodologia proposta por Campiteli *et al.* (1995) e Lara *et al.* (1995) também é possível observar a influência de um outro parâmetro importante nas argamassas, um outro material fino, consagrado na época e utilizado até os dais de hoje: a cal. A abordagem proposta por Lara *et al.* (1995) contempla procedimentos que discriminam uma metodologia de dosagem das argamassas voltada à produção delas *in loco*, utilizando cimento, cal, aglutinantes (materiais argilosos), areia, água e aditivos. O roteiro de cálculo é simples e detalha a importância da utilização dos aditivos químicos. Entretanto, quando há a necessidade de explorar as quantidades de areia e água nas formulações empregadas, o autor relata que devem ser calculadas a partir de projeto (relação agregado/aglomerante) e/ou experiência do profissional de obra. Propriedades no estado fresco e endurecido são propostas pelo projetista, que indicou algumas recomendações a serem cumpridas na proposta de dosagem que pode ser visualizado na tabela 4.

TABELA 4– REQUISITOS APRESENTADOS PELO PROJETISTA PARA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

Propriedades	Métodos	Limites
Consistência	*Flow table* (NBR 11508)	280 a 320mm
Retenção de Água	NBR 9287/8827	70 a 90%
Teor de Ar Incorporado	NBR 8490	8-15%
Aderência ao Substrato	NBR 8214	0,15MPa (mínimo) e 0,20MPa (média).
Resistência à Compressão	NBR 12041	1,5 a 3MPa
Diâmetro máximo agregado	NBR 7211	2,4mm
Módulo de Finura do Agregado	NBR 7211	1,7 a 2,2
Vida Útil	(PA -4) *Projeto de Argamassa	>30min
Eflorescência	(PA – 3) *Projeto de Argamassa	Isenta
Adesividade (aderência úmida)	(PA-2) *Projeto de Argamassa	Reflexão <30%
Fissuração	(PA – 6) *Projeto de Argamassa	5 fissuras/m² a cada 50m²

FONTE: LARA *et al.* (1995).

A metodologia salientada por Campiteli *et al.* (1995) utiliza uma proposta de dosagem com a cal virgem moída. A princípio, os autores fizeram uma pesquisa de campo com o objetivo

de identificar a realidade da produção da argamassa mista. Por meio de entrevistas com alguns profissionais envolvidos na produção de argamassas, constatou-se que, na maioria dos casos, as formulações eram determinadas por meio de baldes, latas de tinta, até mesmo com as pás. Em cada obra visitada, foram coletadas amostras das argamassas que serviram para a determinação de consistência e ensaios de resistência à compressão. A proposta foi dividida em dois critérios distintos de execução da dosagem experimental das argamassas. O primeiro refere-se à dosagem de argamassas de cal a partir da cal virgem e o segundo na dosagem da argamassa mista, contendo cimento e argamassa de cal já fabricada. Em ambas as propostas de dosagem de argamassas, tanto a areia quanto a água da mistura, foram ajustadas manualmente para o conhecimento da consistência ideal e aplicação da argamassa.

Carneiro e Cincotto (1999) destacaram estudos de dosagem de argamassa por meio de curvas granulométricas utilizando conceitos de empacotamento de partículas. A pesquisa se baseou em estudos de Fuller (1907), que determinam, a partir de dosagens experimentais, o perfil ideal de uma curva para se obter a máxima compactação do concreto ou argamassas, englobando a essa curva, o aglomerante e o agregado. Os resultados concluídos com essa pesquisa mostram que esses parâmetros relacionados comprovam a veracidade do método. Logo, conceitos como a influência na quantidade de finos estão diretamente relacionados com o maior consumo de aglomerantes foi demostrado. Por meio dos estudos que incorporam empacotamento de partículas, é possível analisar a influência do formato de grãos e a curva granulométrica do agregado miúdo do agregado de finos associado às propriedades da argamassa de revestimento. Assim, o agregado com granulometria grossa promove na aplicação da argamassa uma resistência ao espalhamento, reduzindo a adesão na fase fresca com a diminuição da coesão. Grãos grossos também promovem teores elevados de ar aprisionado, por conta dos vazios que se formam entre partículas, o que pode permitir um aumento da resistência à compressão, embora possa permitir a percolação de água e agentes agressivos ao compósito. Curvas granulométricas contínuas tentem a empacotar adequadamente os grãos gerando um bom desempenho nos revestimentos, consequentemente, contribuindo para a sua trabalhabilidade no estado fresco. Já quanto ao estado endurecido, a distribuição do tamanho e das partículas diminui a tendência na fissuração das argamassas de revestimento, analisados conforme parâmetros de resistência a tração na flexão e módulo de elasticidade.

Gomes e Neves (2002) propuseram uma metodologia baseada na adição de argilomineral, que é um caulim arenoso da região de Salvador-BA. Entretanto, mesmo com o

acréscimo de um material específico a proposta ajudou a estipular parâmetros normativos básicos como: teor máximo de finos (<0,075mm) de 7%, a máxima relação entre adição plastificante e total de agregado de 35%; o consumo de cimento especificado em projeto (tabelado), índice de consistência (*flow table*) de 260±10 mm, teor de ar incorporado entre 8% e 17% e retenção de água superior a 75%. Com esse estudo, houve um avanço quanto à importância desses parâmetros de dosagem apresentados e das propriedades da argamassa que deveriam serem atendidas, porém ainda com uma precariedade principalmente na análise da trabalhabilidade da argamassa.

Visto essa lacuna nas análises da trabalhabilidade das argamassas, Cardoso (2009) apresenta uma metodologia que avalia a argamassa não só pelas suas propriedades intrínsecas, mais também de acordo com seu comportamento reológico. Nesse contexto, vem sendo cada vez mais utilizado o ensaio que auxilia na análise do comportamento reológico das argamassas chamado *squeeze flow*, normatizado pela NBR 15.839 (ABNT, 2010), resultando como dado de resposta a relação entre o fluxo ou deformação e as forças a que são submetidas as misturas.

Pesquisas como as de Santos (2014) e Souza *et al.* (2020a) são as metodologias mais recentes voltadas aos métodos de dosagem de argamassas de revestimento. Já Recena (2015) apresenta em seu livro, princípios a serem seguidos de boas práticas de dosagem de argamassas mistas. Não chega no âmbito de metodologia de dosagem, entretanto direciona o profissional quanto à requisitos que deve ser atendido no desenvolvimento de uma argamassa em obra. Além disso, questões como a quantidade de água ideal e manifestações patológicas causadas pelas dosagens equivocadas são elencadas de forma efetiva durante todo o manuscrito.

Santos (2014) desenvolveu uma metodologia em função das propriedades no estado fresco (coesão e consistência) e no estado endurecido: resistências mecânicas (compressão, tração na flexão e potencial de aderência à tração) e indicadores de durabilidade (porosidade e absorção). A pesquisa foi dividida em duas etapas, sendo a primeira uma avaliação de todos os parâmetros já conhecidos de trabalhos técnicos-científicos que serviu de base para fixar alguns valores iniciais ajustados posteriormente como, por exemplo, o da quantidade de água arbitrada por meio do ensaio de índice de consistência (*flow table*). A segunda etapa faz referência à validação da metodologia de dosagem que consiste na aplicação da formulação com sua caracterização no estado fresco e endurecido. Um roteiro de atividades sequenciais e exequíveis que permite uma proporção adequada de materiais para as argamassas de revestimento e assentamento é a proposta do autor.

Por fim, Souza *et al.* (2020b) aliaram a utilização de alguns aditivos e a utilização do método Simplex na dosagem de argamassa de revestimento. Para isso, o método foi aplicado com o intuito de estabelecer diferentes combinações de aditivos: retentor de água, incorporador de ar e plastificante para o atendimento das propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas de revestimento. Em resumo, os aditivos químicos podem ou não influenciar diretamente algumas das propriedades das argamassas. Para se obter uma argamassa com propriedades adequadas utilizando os aditivos químicos, é necessário o estudo mais detalhado de cada aditivo separadamente e como ele afetará as propriedades limitantes. O método da rede *Simplex* mostrou-se eficiente nas análises visuais quanto ao efeito de cada aditivo e suas combinações e contribuiu para obter melhor proporção de aditivos se os limites de projeto das propriedades já são conhecidos como quando são especificados nas normas. O método rede *Simplex* corresponde a um modelo matemático que auxilia na obtenção das características desejadas na dosagem, sejam elas no estado fresco ou no estado endurecido. Pesquisas já foram utilizadas com esse intuito, como é o caso de Bahiense *et al.* (2008) que utilizaram o método *Simplex* no planejamento experimental para incorporação de resíduos na indústria cerâmica em argamassas e Destefani e Holanda (2011) para a incorporação de resíduo de rochas ornamentais com fíler na obtenção da máxima compacidade dos materiais. O método permite compreender toda gama experimental solicitada e identifica qual é o melhor proporcionalmente em questão.

Os métodos demonstrados no item anterior são diretrizes importantes para o desenvolvimento da tecnologia das argamassas. A figura 5 mostra o comparativo entre algumas diretrizes de dosagem de argamassas em análise.

FIGURA 5 – COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE DOSAGEM DE ARGAMASSAS

	SELMO (1989)	LARA et al. (1995)\	CAMPITELI et al. (1995)	CARNEIRO E CINCOTTO (1999)	GOMES E NEVES (2002)	CARDOSO (2009)	SANTOS (2014)	RECENA (2015)	SOUZA et al.(2020)
Análise visual do profissional da obra?	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Há variação nas características dos materiais?	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM
Quais as propriedades no estado fresco?	TAI	TAI	TAI	C	C E A.INC	DB; C E SF	C	C	C
Quais as propriedades no estado endurecido?	F; A; RC; AB e P	NÃO	NÃO	RC; RTF	NÃO	NÃO	RC; RTF; A; AB	RC; RTF.	RC; RTF; A; AB
Existe um protótipo para a tal aplicação?	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Foram desenvolvidas análises de custo?	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

Estado fresco: TAI – Trabalhabilidade com avaliação intuitiva; C – Consistência; A. INC – Ar Incorporado; DB – *Dopping Ball*; SF – *Squeeze flow*. Estado endurecido – F – Fissuração; A – Aderência; RC – Resistência à compressão; AB – Absorção; P – Permeabilidade; RTF – Resistência à tração na flexão, ME – Módulo de Elasticidade.

FONTE: A autora (2021).

A figura 5 demonstra determinados marcos importantes na evolução de critérios analisados. Carneiro e Cincotto (1999) marcaram o início da utilização do ensaio de consistência, para avaliar a trabalhabilidade, a partir dessa linha cronológica. Até então, não era comum a utilização de ensaios normalizados para a avaliação dessa propriedade nas argamassas, visto que a sensibilidade e a experiência dos mestres de obra eram utilizadas como parâmetro na avaliação da qualidade da argamassa, antes da sua aplicação. A NBR 13276 (ABNT, 2016) preconiza o método de ensaio para a determinação do índice de consistência das argamassas, porém não estabelece requisitos a serem atendidos.

Cardoso (2009) incorpora em seus estudos de dosagem de argamassas os ensaios com o *squeeze flow*, com uma proposta mais científica na busca de parâmetros de trabalhabilidade e no comparativo com os métodos mais antigos. A utilização do *squeeze flow* para a determinação com maior precisão das características reológicas começa a ser considerada como passo fundamental para a evolução da tecnologia de argamassas e concretos em todo mundo (FERRARIS; DE LARRARD, 1998; FERRARIS, 1999; ENGMANN *et al.,* 2005; GRANDES *et al.,* 2018).

Lara *et al. (*1995), Campiteli *et al.* (1995) e Gomes e Neves (2002) não deram continuidade na execução dos ensaios no estado endurecido, das respectivas propostas de métodos de dosagem, o que implica na dificuldade de validar essas metodologias, sem saber se

a argamassa terá o desempenho adequado após aplicada. Atualmente, a NBR 13281 (ABNT, 2005) estabelece requisitos exigíveis para a argamassa utilizada em assentamento e revestimento de paredes e tetos como: resistência à compressão, densidade de massa aparente no estado endurecido, resistência à tração na flexão, coeficiente de capilaridade, densidade de massa no estado fresco, retenção de água e resistência potencial de aderência, o que obriga as novas pesquisas o acréscimo desses parâmetros normalizados.

Outra particularidade apresentada pelas pesquisas publicadas sobre metodologias de dosagem é a utilização de materiais específicos das regiões em que foram estudadas. Gomes e Neves (2002), por exemplo, utilizaram o plastificante à base de argilas (materiais da região de Salvador – caulim e arenoso), como base do método e, consequentemente, todo planejamento experimental estava voltado a esse material. Campiteli *et al.* (1995) também incorporaram ao método a utilização da cal virgem, oriunda da decomposição térmica do calcário, dificilmente utilizada nas argamassas nos dias de hoje, pela falta de agilidade e segurança.

Segundo Ceotto *et al.* (2005), a recomendação é que esse painel experimental seja desenvolvido em todo canteiro de obra antes da aplicação da argamassa no revestimento, para que possam ser simuladas a maioria das condições previstas para execução do revestimento em escala real: tipo de substrato, processo de limpeza e preparação da base, tipo de argamassadeira, espessura da argamassa e tempo de mistura. Entretanto, mesmo com esse estudo na obra, as condições de caracterização do painel experimental ainda são bem melhores do que as condições reais, pois fatores como a qualidade da aplicação (tipo de mão de obra) e algumas condições climáticas (altura, trabalho em balancim, variação de espessura etc.) ainda permanecem interferindo na qualidade do produto aplicado.

2.2 PARÂMETROS DE DOSAGEM PARA ARGAMASSAS

Entende-se que, por meio de parâmetros a serem aplicados em um método de dosagem, é possível estabelecer um comparativo entre as características particulares de cada material empregado e sua proporção, com a finalidade de se obter propriedades que possam ser comparadas e padronizadas. Para as argamassas de revestimento, os parâmetros podem estar nas características específicas de cada material utilizado como constituintes (cimento e a cal como aglomerantes, o agregado miúdo, com uma ampla gama de características, aditivos e adições), mas também nas características da argamassa no estado fresco e/ou endurecido e, em

alguns casos, esses parâmetros estão relacionados também com o ambiente em que a argamassa é aplicada. Quando a argamassa é produzida industrialmente, esses critérios na escolha dos materiais e o método para dosá-los se torna padronizada, porém como em alguns países, como no Brasil, onde aproximadamente 98% das argamassas são produzidas em obras, há a necessidade de um foco mais criterioso nas particularidades e características que cada material apresenta e os impacto nas propriedades finais do produto acabado.

No Brasil, a NBR 13281 (ABNT, 2005) destaca alguns parâmetros e requisitos voltados para a argamassa de revestimento e assentamento. Entretanto, ainda são parâmetros que classificam a argamassa na maioria dos itens em seu estado endurecido. A densidade de massa no estado fresco é o único requisito especificado na norma para analisar a argamassa em seu estado fresco. Como reflexo dessa carência de parâmetros e requisitos normativos, há uma gama de critérios sendo adotados no meio técnico, visto que estes critérios têm grande importância, principalmente quanto às metodologias propostas(SANTOS *et al.,* 2018a).

Os parâmetros padronizados por Gomes e Neves (2002), por exemplo, foram em relação aos agregados, limitando em 7% o seu teor máximo de finos (retido na # 0,075 mm) e total de agregado de 35%. O consumo de cimento especificado em projeto foi tabelado conforme experiências dos autores e características da argamassa no estado fresco (índice de consistência de 260±10 mm, teor de ar incorporado entre 8% e 17% e retenção de água superior a 75%). Santos *et al.* (2018a) enfatizam o conhecimento de quatro parâmetros nos materiais utilizados para proposta de dosagem: massa específica real e unitária (solta e compactada), granulometria dos agregados miúdo, condições ambientais de exposição da argamassa de revestimento, condições normativas e técnicas a serem atendidas e o consumo de agregado a ser utilizado.

Por conseguinte, na tabela 5 apresenta-se uma síntese de alguns dos parâmetros utilizados nas dosagens das argamassas de revestimento. Os trabalhos foram selecionados a partir da revisão sistemática apresentada no item 1.6 do capítulo 1, bem como teses e demais trabalhos.

TABELA 5– SÍNTESE DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM DE ARGAMASSAS E SEUS CONSTITUINTES A PARTIR DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Pesquisas		Parâmetros relacionados à argamassa		Parâmetros relacionados aos constituintes
		Estado fresco	Estado endurecido	
1-	SOUZA *et al.* (2020). **The effects of mixture's components on the mechanical properties and durability indicators of mixed mortar using simplex network method**.	Teor de ar incorporado.	Resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, índice de absorção de água, porosidade, densidade de massa aparente.	Teor de água.
2-	SILVA *et al.* (2020). **Impact of a viscosity-modifying admixture on the properties of lime mortars.**	Comportamento reológico (reômetro), consistência, teor de ar incorporado.	Resistência à compressão, resistência à tração na flexão e porosidade.	Tamanho de partículas - Cal
3-	GARIJO *et al.* (2020). **The influence of dosage and production process on the physical and mechanical properties of air lime mortars.**	Consistência, densidade de massa.	Densidade de massa aparente, porosidade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.	Relação água/cal, granulometria do agregado e as condições de cura.
4-	GARIJO *et al.* (2018). **The effects of dosage and production process on the mechanical and physical properties of natural hydraulic lime mortars**.	Consistência, densidade de massa.	Densidade de massa aparente, porosidade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.	Relação água/cal, granulometria do agregado e as condições de cura.
5-	GIORDANI *et al.* (2019). **Blended mortars: Influence of the constituents and proportioning in the fresh state.**	Comportamento reológico (reômetro), consistência.	-	Formulação, a/agl, granulometria do agregado miúdo e tipos da cales.
6-	CASALI *et al.* (2018). **Influence of cement type and water content on the fresh state properties of ready-mix mortar**.	Consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e comportamento reológico (*squeeze flow*).	-	Teor de água e tipos de cimentos;
7-	MACIEL *et al.* (2018). **Efeito da variação do consumo de cimento em argamassas de revestimento produzidas com base nos conceitos de mobilidade e empacotamento de partículas**.	Teor de ar incorporado e comportamento reológico (*squeeze flow*).	Porosidade, resistência à tração na compressão diametral, resistência de aderência, permeabilidade ao ar e módulo de elasticidade.	Consumo de cimento e densidade de empacotamento das partículas;
8-	PIMENTEL *et al.* (2018). **Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil – Avaliação de características físicas e mecânicas**.	Consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água.	Resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção, densidade de massa aparente.	Composição granulométrica dos agregados.
9-	ROMANO *et al.* (2015). **Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars.**	Comportamento reológico (reômetro), teor de ar incorporado, densidade de massa e porosidade.	Resistência a tração na flexão, módulo de elasticidade, resistência ao pull-off, permeabilidade ao ar.	Composição granulométrica dos agregados.
10-	KAZMIERCZAK *et al.* (2016). **Influência da adição de filler de areia de britagem nas propriedades de argamassas de revestimento**.	Consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado, retenção	Resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção, coeficiente de	Composição granulométrica dos agregados.

		de água e comportamento reológico (*squeeze flow*).	capilaridade, módulo de elasticidade, densidade de massa aparente.	
11-	HADDAD *et al.* (2016). **Análise da influência da granulometria do agregado miúdo nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas de revestimento.**	Consistência; densidade de massa e teor de ar incorporado.	Resistências à compressão, à tração na flexão, aderência, módulo de elasticidade, porosidade superficial, absorção de água.	Composição granulométrica e densidade de empacotamento dos agregados.
12-	ARIZZI; CULTRONE (2015) **Inadequacy of different methods of assessing the correct dosages during the preparation of air-hardening lime mortars**.	Consistência; densidade de massa e teor de ar incorporado.	Resistência à compressão	-
13-	INCE *et al.* (2015). **Influence of supplementary cementitious materials on water transport kinetics and mechanical properties of hydrated lime and cement mortars.**	Consistência	Resistência à compressão.	Análise Cal.
14-	ROMANO *et al.* (2014). **Caracterização reológica de suspensões cimentícias mistas com cales ou filitos**.	Comportamento reológico (reômetro).	-	Análise Filito.
15-	LUCAS *et al.* (2010). **Fresh state characterization of lime mortars with PCM additions.**	Comportamento reológico (reômetro).	Resistências à compressão, porosidade superficial e densidade de massa aparente.	Análise de PCM na argamassa.
16-	KACI *et al.* (2009). **Rheological behaviour of render mortars.**	Comportamento reológico (reômetro).	-	Teor de água
17-	QUARCIONI E CINCOTTO (2006). **Optmization of calculation method for determination of composition of hardened mortars of Portland cement and hydrated lime made in laboratory**.	-	-	Determinação das proporções das argamassas por meio da sua composição química.
18-	SÉBAÏBI *et al.* (2003). **Study of the water-retention capacity of a lime–sand mortar: Influence of the physicochemical characteristics of the lime.**	-	-	Análises químicas quanto à influência do teor de cal.
19-	SÉBAÏBI *et al.* (2004). **A study of the viscosity of lime–cement paste: influence of the physico-chemical characteristics of lime**.	Comportamento reológico (viscosímetro).	-	Influência do teor de cal.
20-	NENO *et al.* (2014). **Using fine recycled concrete aggregate for mortar production**.	Consistência, densidade de massa, retenção de água.	Resistências à compressão, à tração na flexão, aderência, módulo de elasticidade, permeabilidade de água.	Composição granulométrica dos agregados.
21-	HADDAD *et al.* (2020). **Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties**.	Consistência, densidade de massa.	Teor de ar incorporado, absorção de água, resistência ao pull-off, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.	Composição granulométrica e densidade de empacotamento dos agregados.
22-	SANTOS *et al.* (2018). **Evolution of the microstructure of lime-based mortars and influence on the mechanical behaviour: The role of the aggregates**.	-	Resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.	Composição granulométrica e mineralógica dos agregados.

23-	VYŠVAŘIL e VOZÁK (2019). **Effect of aggregate gradation on lime mortars rheology**.	Comportamento reológico (reômetro).	-	Composição granulométrica dos agregados.
24-	FERREIRA *et al.* (2019). **Efeitos do uso de areia de praia nas propriedades de argamassas mistas: análise da variação granulométrica.**	Consistência, densidade de massa.	Coeficiente de capilaridade, resistência à compressão e resistência à tração na flexão.	Composição granulométrica dos agregados.
25-	SANTOS *et al.* (2018). **Durability and compatibility of lime-based mortars: The effect of aggregates**.	Consistência, densidade de massa.	Argamassa aplicada no substrato – Intemperismo acelerado sob condições definidas.	Composição granulométrica e mineralógica dos agregados.
26-	KALAGRII e KARATASIOSV (2014). **The effect of aggregate size and type of binder on microstructure and mechanical properties of NHL mortars**	Consistência.	Porosidade, análise térmica (diferencial e termogravimétrica), resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.	Composição granulométrica e densidade de empacotamento dos agregados. Tipo de aglomerantes.
27-	PAVÍA e TOOMEY (2008). **Influence of the aggregate quality on the physical properties of natural feebly hydraulic lime mortars**.	Consistência.	Resistência à compressão, resistência à tração na flexão, densidade de massa aparente, porosidade, secção capilar e absorção de água.	Composição granulométrica e mineralógica dos agregados.

FONTE: A autora (2021).

A partir dos resultados obtidos por meio dos trabalhos selecionados na revisão sistemática é possível visualizar os parâmetros mais utilizados quando se tem um objetivo na dosagem da argamassa, seja ela na proposta de um método de dosagem, mais também nas demais pesquisas que focam as suas propriedades. Assim, os parâmetros citados pela maioria das pesquisas foram:

- Parâmetros da argamassa no estado fresco: observa-se a consistência (ensaio de índice de consistência) foi obtida em praticamente todos os estudos relacionados, seja ela para a análise da trabalhabilidade direta da argamassa, mais também quando era necessário um ajuste de água;
- Parâmetros da argamassa no estado endurecido: resistências mecânicas (resistência a compressão, resistência a tração na flexão e módulo de elasticidade);
- Parâmetros dos constituintes das argamassas: para essa seleção, a influência na caracterização do agregado miúdo foi identificada, sendo abrangente as análises de empacotamento de partículas (tamanho de grãos e formato), influência na mineralogia das rochas e influência na quantidade de finos (módulo de finura). O teor de água e da cal também pode ser observada na pesquisa.

Além dos parâmetros conhecidos que estão diretamente relacionados às argamassas, como é o caso das propriedades mecânicas e comportamento reológico, estão as propriedades relacionadas aos constituintes como mostrou o estudo, estas serão descritas nos itens a seguir.

2.2.1.1 Parâmetros influenciados pelos aglomerantes

Os aglomerantes que geralmente são utilizados na argamassa de revestimento são o cimento, a cal ou ambos. O cimento é classificado conforme norma NBR 16697 (ABNT, 2018) em seis tipos, conforme suas adições e propriedades. Em argamassas de revestimento, não há uma recomendação do tipo de cimento em específico a ser utilizado, entretanto é requerido uma regularidade de características quando expedido. Já a cal precisa ser utilizada com cautela, visto que esse material irá impactar na qualidade da argamassa através de múltiplos fatores: tipo de jazida onde o material é extraído (calcária ou dolomita), processo fabril (britagem, calcinação e moagem), até mesmo como ela será comercializada (cal virgem ou hidratada).

Segundo Sébaibi et al., (2003) a cal tem sido usada como aglomerante há muitos anos graças a sua facilidade de fabricação e execução na construção civil. Os vestígios mais antigos da sua utilização datam em 10.000 a.C. Nessa época, a cal era vista como um material que elevava as resistências e a impermeabilidade das argamassas. Em meados XIX, as cales foram desaparecendo do mercado por conta da chegada do cimento no mercado e ao início da aceleração da produção industrial. Com o crescimento expressivo na produção do cimento no início do século XX, as propriedades desse elemento se tornaram mais atrativas em razão das edificações começarem a ser desenvolvidas com prédios cada vez mais altos, obrigando os materiais a elevarem suas resistências. Nas últimas décadas, uniu-se a questão do meio ambiente e dos recursos energéticos com a chegada de um mercado voltado a restauração e manutenção de edifícios históricos, que gerou um novo interesse na utilização da cal. As argamassas mistas, compostas por uma mistura de cal e cimento despertam interesse com relação à proporção do cimento e da cal, visto que esta proporção acaba alterando propriedades como as resistências mecânicas das argamassas. A introdução da cal em uma argamassa de revestimento acaba proporcionando a esse material uma grande capacidade de retenção de água que, consequentemente, garante a estabilidade de volume trazida pela baixa retração e contribuindo na baixa ocorrência de fissuração por retração, principalmente quando a argamassa é destinada ao revestimento (RECENA, 2015; SRIBOONLUE; WALLO, 1990; IZZO *et al.,* 2001).

Os tipos de cales utilizadas nas argamassas de revestimento podem ser as aeréas ou as hidráulicas. Em países da Europa e EUA, as cales hidráulicas estão cada vez mais sendo utilizadas, visto como um material com potencial menor de emissões de CO_2 devido ao seu processo de fabricação. A queima do calcário ($CaCO_3$) puro com pequenas impurezas (cerca de 5% de argilas ou outras) dá origem ao óxido de cálcio que constitui a cal aérea. Já a queima do calcário margoso com porcentagens diferenciadas de argila da origem à cal hidráulica e ao próprio cimento (APOSTOLOPOULOU *et al.,* 2019). Destaca-se a seguir um comparativo entre o processo produtivo de cales demontrado pelas equações (2) a (5).

$$CaCO_3 \xrightarrow[\text{FORNO}]{800/900^{o}C} CaO + CO_2 \quad \text{(ÓXIDO DE CÁLCIO + GÁS CARBÔNICO)} \tag{2}$$

$$CaCO_3 \text{ - com impurezas de até 5% (argila, etc.)} \xrightarrow{850^{o}C} \text{CAL AÉREA} \tag{3}$$

$$CaCO_3 \text{ - argila 8-20\%} \xrightarrow{1.000^{o}C} \text{Cal HIDRÁULICA} \tag{4}$$

$$CaCO_3 \text{ - argila 20-40\%} \xrightarrow{1.050\text{-}1.300^{o}C} \text{CIMENTO} \tag{5}$$

Quando o calcário ($CaCO_3$) com um teor de argila de 8 a 20% é queimado a 1000ºC, dá origem a cal hidráulica que é um produto que endurece tanto na água quanto no ar. A cal hidráulica é constituída por silicatos (SiO_2 . 2CaO) e aluminatos de cálcio (Al_2O_3 . CaO) que, quando hidratados, endurecem na água ou ao ar e também por óxido de cálcio (CaO). Sendo assim, sua cura ocorre por meio de processos de hidratação e carbonatação, levando à formação de compostos hidráulicos e de calcita, respectivamente. Para Cho *et al.* (2017), bem como Velosa e Cachim (2009), por conta das às temperaturas de calcinação relativamente baixas requeridas, é considerado um material ecologicamente correto, quando comparado ao cimento. Ademais, no caso da cal hidráulica, durante o endurecimento parte do CO_2 emitido pela calcinação do calcário é consumido durante o processo de carbonatação, diminuindo ainda mais o impacto ambiental total associado aos gases de efeito estufa.

A cal hidráulica aplicada nas argamassas apresenta características intermediárias entre as argamassas de cimento com cal aérea (PENAS, 2008), com relação ao desempenho. Sua incorporação na argamassa, igualmente visualizada nas argamassas compostas por cal aérea, também aumenta a tendência na retenção de água, mesmo aplicada em um substrato com elevada taxa de absorção. O elevado valor na retenção de água associado às suas características

reológicas, evita a segregação da argamassa, possibilitando a obtenção de superfícies sem fissuras, uma vez que se tornam suficientemente elásticas, com capacidade de suportarem pequenas tensões que possivelmente ocorrerão (BOTELHO, 2003). Já para os parâmetros no estado endurecido, as cales hidráulicas também proporcionam um decréscimo nas resistências mecânicas, apesar de suficientes nas solicitações de choque, punção ou atrito.

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de demonstrar qual é o limite da substituição da cal pelo cimento, visando às propriedades adequadas da argamassa para aplicação e durabilidade do material. Sabaibi *et al.* (2003) e Giordani *et al.* (2019) publicaram estudos que demonstram essa substituição e seus impactos nas propriedades das argamassas. Em ambos os estudos, há um comparativo entre as cales calcíticas ($Ca(OH)_2$) e dolomíticas ($Mg(OH)_2$). Garijo *et al.* (2018) direcionam seus estudos com argamassas somente à base de cal hidráulica, voltada à restauração de prédios antigos, utilizando uma metodologia de dosagem que relaciona a razão entre aglomerante e agregado por volume aparente. Alguns parâmetros como relação água/cal foram fixadados (a/cal de 0,9), o que proporcionou um índice de consistência entre 140 mm e 200 mm. O agregado miúdo de origem calcária foi triturado com a finalidade de padronizar o tamanho de grãos em 4 mm. As demais formulações obtiveram variação na relação água/cal entre 0,8 – 1,1 e tamanho de grãos em 2mm. Como resultado quanto à influência na relação a/cal, obtêm-se que, quanto maior for essa relação maior será o indice de consistência apresentado. Entretanto, quanto às propriedades no estado endurecido, observa-se que maiores relações água/cal produzem um enfraquecimento da estrutura do material pelo aumento da porosidade aberta.

2.2.1.2 Parâmetros influenciados pelo agregado miúdo

O agregado miúdo na argamassa pode ser definido como sendo o esqueleto do sistema de revestimento, interferindo diretamente em suas propriedades tanto no estado fresco como no endurecido (CARASEK *et al.,* 2001; SAHMARAN *et al.,* 2009). Além disso, o agregado auxilia determinadas resistências internas na argamassa de revestimento a suportar o surgimento das tensões internas em função das alterações volumétricas, na secagem do material, sendo responsável pela resistência à fissuração proveniente da retração hidráulica (SANTOS, 2014).

As propriedades obtidas nas argamassas estão diretamente relacionadas às particularidades nas caraterísticas que os agregados apresentam. Como visto na revisão

sistemática desenvolvida dos 27 artigos pesquisados sob os 2 eixos de pesquisa, 62% deles está relacionado com a influência das propriedades dos agregados na argamassa. Dentre esses parâmetros estão: origem de rocha, formato de grãos, teores de finos granulometria e empacotamento das partículas entre outros.

Conforme Pavía e Toomey (2008), a origem de rocha que compõe o agregado miúdo está ligado a sua qualidade, influenciando diretamente as propriedades no estado fresco e endurecido da argamassa. Agregados (calcários) bem graduados tiveram tendência no aumento das resistências mecânicas e na densidade aparente das argamassas de cal, reduzindo simultaneamente sua porosidade, absorção de água e sucção capilar. O mesmo foi visualizado na pesquisa de Vysvaril e Vozák (2019), visto que o agregado calcário deu origem à argamassas mais resistentes do que as de quartzo, que pode ter sido devido à semelhança entre a matriz ligante calcítica e o agregado e devido à sua angularidade.

Outro parâmetro relevante quanto às características dos agregados é a questão da sua natureza: natural e artificial. Para Carasek *et al.* (2016), a areia natural sofre com o esgotamento de jazidas, bem como impactos ambientais gerados por essa extração. Assim, há uma crescente na utilização das areias de britagem, que apresentam menos variabilidade das propriedades e características, como granulometria, formato de grão e, ainda, pequenas porcentagens no teor de impurezas (matéria orgânica e presença de argila em torrões). No entanto, seu formato de grão anguloso (lamelar) de suas partículas e sua elevada quantidade de finos podem impactar negativamente no acréscimo de consumo de cimento e demanda d'água da argamassa. Ademais, essas propriedades podem impactar também no comportamento reológico do material. Para Kazmierczak *et al.* (2016), há um impacto significativo na trabalhabilidade da argamassa analisada por meio do *squeeze flow* quando a argamassa é confeccionada com areia de rio e agregado britado. O estudo mostra que as curvas apresentadas com argamassas confeccionadas com agregado de rio tiveram um comportamento plástico, adequado para a aplicação do material. Em contrapartida, as argamassas confeccionadas com areia de britagem inicial no estágio plástico e por meio de uma pequena deformação evidenciam uma mudança no comportamento de enrijecimento por deformação, pois há um aumento substancial da carga necessária para continuar a deformação da argamassa, que resulta em dificuldades nas atividades de aplicação e acabamento do revestimento.

O comportamento reológico das argamassas também pode ser influenciado pelo empacotamento das partículas dos grãos da mistura. A densidade de empacotamento é a razão

entre o volume de sólidos e a relação a uma unidade de volumes total, e quando associada ao índice de vazios tem grande relevância nos estudos do empacotamento de agregados para a produção de argamassas (BENEZET *et al.,* 2007; FUNG *et al.,* 2009). A densidade de empacotamento sofre influência direta de algumas das características dos agregados: distribuição granulométrica e morfologia das partículas (KWAN; MORA, 2001). Na distribuição granulométrica, quando uma curva é considerada contínua (bem graduada) é tida como uma amplitude de grãos. Vale frisar também a relevância de frações pequenas em quantidade suficiente para preencher os espaços vazios entre as partículas maiores, consequentemente, diminuindo o volume de vazios e aumentando a densidade de empacotamento. Já no formato de grãos, a influência ocorre na acomodação das partículas entre si, ou seja, quanto mais distantes da forma esférica forem os grãos, maior será o espaço vazio entre as partículas, resultando na diminuição da densidade de empacotamento (KWAN; MORA, 2001; XU *et al.,* 2013; LONDERO *et al.,* 2017).

Nas argamassas, a análise do empacotamento de partículas teve início com uma das pesquisas precursoras de Carneiro e Cincotto (1999), quando foi possível analisar a influência do formato de grãos e a curva granulométrica do agregado miúdo do agregado de finos associados às propriedades da argamassa de revestimento. Assim, o agregado com granulometria grossa promove na aplicação da argamassa uma resistência ao espalhamento, reduzindo a adesão na fase fresca com a diminuição da coesão. Grãos grossos também promovem teores elevados de ar aprisionado, por conta dos vazios encontrados entre essas partículas, o que pode permitir um aumento da resistência à carbonatação, embora possa permitir a percolação de água e agentes agressivos ao compósito. Curvas granulométricas contínuas tendem a empacotar adequadamente os grãos gerando um bom desempenho nos revestimentos, consequentemente, aumentando sua trabalhabilidade no estado fresco. Já quanto ao estado endurecido, a distribuição do tamanho e das partículas diminui a tendência na fissuração das argamassas de revestimento, analisados conforme parâmetros de resistência a tração na flexão e módulo de elasticidade.

Haddad *et al.* (2016) complementam a metodologia de Cincotto *et al.* (1995) adicionado o método de empacotamento de partículas proposto por Reed (1995) em sua pesquisa. O método destaca que o fator de empacotamento máximo das partículas depende do empacotamento das partículas grossas, médias e finas, conforme equação (6).

$$PF_{máx} = PF_c + (1\text{-}PF_c)PF_m + (1\text{-}PF_c)(1\text{-}PF_m)PF_f \quad (6)$$

Onde o $PF_{máx}$ é a fração de empacotamento máximo; PF_c a fração de empacotamento de partículas grossas; PF_m é a fração de empacotamento de partículas médias; PF_f é fração de empacotamento de partículas finas. O empacotamento das partículas é mensurado por meio da massa unitária solta das faixas granulométricas da ABNT NBR 248:2003 e de cada peneira individualmente. Após essa análise, seguem as avaliações das propriedades da argamassa no estado endurecido (resistências à compressão, à tração na flexão e potencial de aderência à tração e módulo de elasticidade dinâmico) e de indicadores de durabilidade (massa unitária aparente; consistência; densidade de massa e teor de ar incorporado no estado fresco; porosidade superficial; absorção de água por imersão e por capilaridade e imagens de microestrutura). Como conclusão, foi salientada, mais uma vez, a influência significativa da distribuição granulométrica dos agregados nas propriedades citadas e devem ser levadas em conta durante o processo de dosagem e especificação.

Kalagri *et al.* (2014) ressaltam que a aplicação dos métodos de empacotamento de partículas que compõem a argamassa, em especial a dos agregados, com o conhecimento da microestrutura do ligante figuram como os parâmetros que dominam o desempenho das argamassas, portanto, devem ser levados em conta durante as aplicações de campo. Em resumo, parâmetros no estado fresco e endurecido estão diretamente influenciados pela densidade de empacotamento. A carência de partículas grossas desencadeia um aumento na porosidade e a degradação das propriedades mecânicas, por conta da necessidade de incremento na demanda d´água quando se quer fixar a consistência. Em contrapartida, o excesso do grão grosso pode aumentar a quantidade de vazios, consequentemente, reduzindo a coesão da argamassa em seu estado fresco e resultados de resistência mecânica. O incremento de partículas finas desencadeia um aumento no empacotamento e dispersão de partículas, aprimorando o comportamento reológico da mistura e reduzindo teores de água na mistura. (DAMINELI, 2013; MACIEL *et al.,* 2018). Esse aprimoramento no comportamento reológico das misturas com a incorporação de finos, ocorre por conta da redução nos valores de viscosidade e tensão de escoamento na mistura, quando mantida a demanda d´água na mistura, um aumento na compactação da matriz, por meio de um refinamento dos poros, derivando na diminuição da zona de transição dos materiais nas argamassas e, consequentemente, aumentando sua resistência, até o limite do empacotamento das partículas (HO *et al.,* 2002; SADEK *et al.,* 2016; SINGH *et al.,* 2016).

A incorporação dos finos na argamassa também é uma linha de pesquisa de interesse no meio científico. O filler calcário é um exemplo de material fino que se estuda até os dias de

hoje como adição nas argamassas de revestimento. Ele atua tanto na substituição de cimento quanto na análise do comportamento reológico do material (KAZMIERCZAK *et al.,* 2016; GUINDANI, 2018; SEQUEIRA; GHISLENI, 2020). Segundo Sequeneira e Ghisleni (2020), o filler calcário é um material oriundo da britagem da rocha calcária de origem calcítica ou dolomítica, de granulometria fina, com um crescimento significativo tanto na composição do cimento quanto em concretos e argamassas básicas e argamassas estabilizadas. Uma das vantagens em sua utilização está em seu apelo sustentável, por se tratar de um resíduo do processo de britagem, e ainda em muitos casos pela sua substituição direta do cimento (DESTEFANI; HOLANDA, 2011).

2.3 VISÃO GERAL DAS NORMAS BRASILEIRAS E INTERNACIONAIS

A especificação de requisitos exigíveis para a argamassa utilizada em assentamento e revestimento de paredes e tetos está descrita na norma NBR 13.281 (ABNT, 2005). No entanto, tiveram duas revisões significativas que valem ser discutidas, principalmente por terem sofrido impactos nas propriedades modificadas. A versão de 1995 da NBR 13281 estabelecia exigências somente para a resistência à compressão (MPa) aos 28 dias, capacidade de retenção de água (%) e no teor de ar incorporado (%). Outro problema era quanto às faixas de valores a serem consideradas como, por exemplo, a resistência à compressão (f_c) aceitável era a partir de 0,1MPa, valor esse que remetia aos grandes problemas de aderência e fissuração se aplicada como revestimento.

Já a revisão do ano de 2001, apesar de permanecer com uma série de lacunas, ainda a serem sanadas, apresentou-se com uma visão atualizada levando em conta a influência de novos materiais que eram incrementados nas formulações das argamassas: aditivos e adições. Outra alteração importante foi quanto aos requisitos de desempenho, visto que as argamassas eram tidas como múltiplo uso, sem levar em conta as diferentes condições de aplicação e uso. Um exemplo disso era a falta de distinção entre a argamassa industrializada e a preparada em obra que, nas versões anteriores, não levavam em conta fatores como as tratativas do procedimento de mistura e aditivos incorporadores de ar de ambos os tipos de argamassas.

A norma que permanece em vigor, revisada no ano de 2005, se apresenta com significativos acréscimos no âmbito técnico. Os tipos de argamassas passam a ser divididos conforme sua utilização (argamassas para revestimento interno, externo, uso geral, reboco e decorativa). Ademais, os requisitos passam a ser classificados conforme: densidade de massa

aparente no estado endurecido, resistência à tração na flexão, coeficiente de capilaridade, densidade no estado fresco, retenção de água e resistência potencial de aderência à tração.

Em países como a França, que possui uma ampla experiência na área de argamassas industrializadas, certificando a qualidade de mais de 200 tipos produzidos, a norma que preconiza os requisitos para as argamassas de revestimento é semelhante à NBR 13281 (ABNT, 2005) vigente, visto que a revisão ocorrida na norma brasileira foi baseada em muitos critérios da norma francesa, a MERUC do CSTB, *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*, cujo nome é composto das iniciais de cinco propriedades, conforme tabela 6.

TABELA 6 – ESPECIFICAÇÕES DA NORMA FRANCESA

MERUC		
M	*Masse volumique apparente de l'enduit* durci (kg/m³).	Densidade no estado endurecido.
E	*Module d'élasticité (MPa).*	Módulo de deformação.
R	*Résistance à la traction (MPa).*	Resistência à tração na flexão.
U	Rétention d'eau (Humidification - %).	Retenção de água no estado fresco.
C	*Capillarité* - $g/dm^2 .min^{1/2}$	Coeficiente de capilaridade.

FONTE: A autora (2021).

Cada uma dessas propriedades apresentadas é subdividida em seis classes, publicadas no CSTB 2669-49 - Modalités d'essais. Em países da Europa, a norma que fornece as regras gerais para construções em alvenaria normal e reforçada, incluindo os requisitos básicos da argamassa é a EN 1996-1-1(2005) ou *Eurocode 6*. Os requisitos se diferenciam de acordo com o tipo de argamassa: argamassa industrializadas devem cumprir a EN 998-2 (2016), enquanto as argamassas produzidas em obra estão referenciadas em itens separados, do art. 6.3.2 da mesma norma. A classificação pode ser baseada na resistência do projeto (categoria M1 a M15) ou na composição em partes de volume cimento: cal: areia. Qualquer argamassa de uso geral deve ter no mínimo a resistência de uma argamassa M1. Sobre a trabalhabilidade das argamassas, não há exigência, exceto que a consistência da argamassa deve ser apropriada para o tipo de necessidade (HENDRICKX, 2009). Com relação aos métodos de ensaio, como no Brasil, também há uma norma para cada tipo de ensaio a ser executado: testes de consistência (EN 1015-3:1999), densidade (EN 1015-6:1999), incorporação de ar (EN 10157-1998), trabalhabilidade (EN 1015-9:1999), resistência a compressão (EN 1015-11:1999) entre outras.

A norma americana que trata de assuntos relacionados à aplicação de revestimentos de argamassa é a ASTM C 926-06 (2006): *Standard Specification for Application of Portland Cement Based Plaster.* Apesar da norma, enfatizar as argamassas de gesso com adição de

cimento Portland, não utilizado amplamente no Brasil, é um parâmetro importante no detalhamento de alguns requisitos que descreve desde a recomendação de formulações, até itens detalhados de procedimentos de cura, espessuras de camadas, influência de condições climáticas na edificação, entre outros.

No ano de 2000, a construção civil voltada para habitação popular, ganhou uma norma, a NBR 15.575 (ABNT, 2013), que avalia o desempenho de determinados itens das edificações, que auxilia profissionais da área da construção civil no estabelecimento de critérios embasados para a produção da construção civil. Contudo, a norma de desempenho vem trazendo para o desenvolvimento dos empreendimentos residenciais preocupações com a expectativa de vida útil das edificações, seu desempenho, sua eficiência, a sustentabilidade e a manutenção dessas. Assim, é inserido o fator qualidade das edificações comercializadas.

A norma é dividida em cinco partes e uma delas refere-se aos requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas, ou seja, as argamassas começam obrigatoriamente a ter sua vida útil bem definida. Isso significa o aperfeiçoamento cada vez maior das suas propriedades, características bem definidas, ensaios obrigatoriamente executados e um material aplicado à edificação com a mínima garantia de qualidade.

Esse desempenho atualmente obrigatório dos revestimentos quanto à sua função, depende das propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido. Visto que a correta análise dessas propriedades no estado fresco permitirá que o revestimento cumpra as funções específicas no estado endurecido.

2.4 EVOLUÇÃO DOS MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

A trabalhabilidade é uma das propriedades mais relevantes das argamassas, no estado fresco, resulta da conjunção de outras propriedades importantes como consistência, plasticidade, retenção e exsudação de água, coesão interna, tixotropia, adesão, massa específica e retenção de consistência (RILEM, 1982; OATES, 1998; ASTM C270, 2004). Além disso, ela influenciará diretamente as propriedades no estado endurecido, como porosidade, resistências mecânicas e aderência, parâmetros importantes que promovem maior durabilidade e conforto das edificações (CARDOSO *et al.,* 2009). Para Rilem (1982), a trabalhabilidade tinha como proposta principal no passado somente a facilidade do operário em trabalhar com a argamassa em sua aplicação. Logo, a forma de caracterização das argamassas era basicamente

desenvolvida por ensaios do tipo monoponto, como o ensaio de determinação do índice de consistência (*flow table*) e o *dropping-ball*, por exemplo, e que acabavam não levando em conta as solicitações extremas de cisalhamento que o material requer na prática (HOPPE *et al.,* 2007). Esses métodos de ensaios empregados não medem efetivamente a trabalhabilidade, mas seus resultados podem ser ponderados apenas como valores indicativos desta propriedade (SANTOS *et al.,* 2018a). Essa deficiência de parâmetros na análise da trabalhabilidade da argamassa obrigava o pedreiro a ajustar a consistência do material baseado em sua experiência e/ou numa avaliação visual do material no momento da aplicação.

A reologia é ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria quando submetida a uma determinada tensão (STEIN, 1986). Esses estudos vêm auxiliando pesquisadores a medir o comportamento reológico das argamassas, assim padronizando suas propriedades. Cardoso (2009) destaca que o comportamento reológico do material é determinado a partir da força ao qual este é submetido e o seu fluxo de deslocamento. Chama-se de viscosidade (η) o valor da constante que relaciona a tensão de cisalhamento (τ) com a taxa de deformação (γ), demostrada a partir da equação (7).

$$\eta = \frac{\tau\ (\mathrm{Pa})}{\gamma\ (\mathrm{s}^{-1})} \tag{7}$$

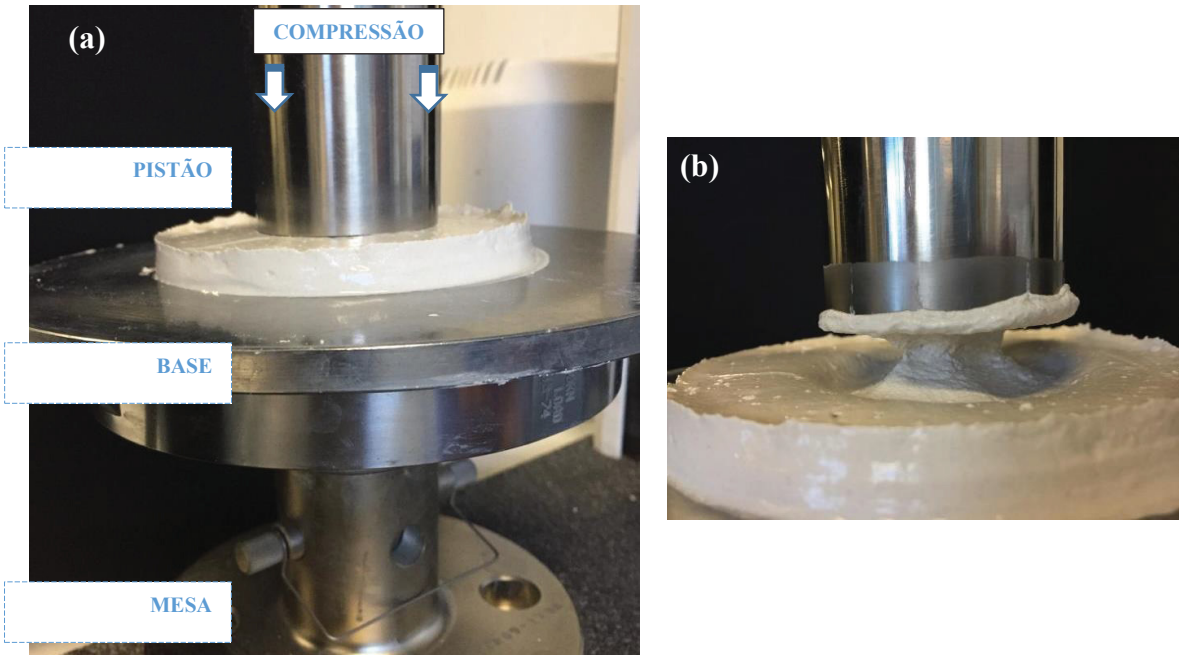
As argamassas, como são materiais que apresentam alta concentração de partículas sólidas em meio líquido evidenciam um fenômeno no qual as partículas sólidas perturbam as linhas do fluxo, aumentando a resistência do sistema ao escoamento, consequentemente, aumentando a viscosidade (OLIVEIRA *et al.,* 2000). A importância de medir parâmetros reológicos na argamassa é que ela irá demonstrar numericamente a viscosidade suficiente para permitir o manuseio e a aplicação do operário ao substrato e a tensão limite de escoamento, ao qual permita que ela, após a aplicação, permaneça em contato ao substrato, sem desplacamento e/ou escorregamento (BAUER *et al.*, 2005).

As técnicas que podem ser empregadas na análise do comportamento reológico da argamassa podem serem realizados por meio de ensaios de reometria. Castro (2007) destaca a existência de diferentes técnicas experimentais que podem ser utilizados, dependendo do material a ser empregado. Nas últimas décadas, diferentes tipos de equipamentos têm sido utilizados para medir o comportamento reológico no escoamento de uma mistura no estado fresco. Entretanto, esses equipamentos que se baseiam na reometria rotacional têm elevado custo-benefício, dificultando seu uso. Outros modelos têm sido desenvolvidos para a dosagem

de misturas de argamassas, como é o caso do ensaio de *squeeze flow*. O ensaio consiste em um método que mede o esforço necessário para comprimir uma suspensão entre duas placas paralelas que fornecem informações sobre as características reológicas da mistura e seu processo de consolidação. Além de ser utilizado em um equipamento universal que permite a fácil e rápida adaptação para diversos níveis de cargas e geometrias também, pode ser utilizado para diversas classes de materiais (ENGMANN *et al.,* 2005). Sua configuração promove uma facilidade na análise de materiais, mesmo para aqueles que se apresentam com dificuldades no emprego de outros tipos de ensaios reológicos, como a utilização de materiais fibrosos que entopem os vasos capilares dos reômetros ou aqueles que causam uma certa aglomeração de partículas, impossibilitando o ensaio (GRANDES *et al.,* 2018). Contudo, mesmo com uma possível ocorrência de escorregamento ou de atrito entre a amostra e a placa não extingue os resultados obtidos. Por conta dessas vantagens, o ensaio de *squeeze flow* tem sido cada vez mais utilizado visando à caracterização reológica de materiais cimentícios, incluindo argamassas de diferentes tipos como, por exemplo: pastas de cimento (MIN *et al.,* 1994 *apud* CARDOSO, 2009); pastas de concreto autoadensável (PHAN; CHAOUCHE*,* 2005); argamassas de revestimento (CARDOSO, 2009; CARDOSO *et al.,* 2005); argamassas colantes (BETIOLI, 2007) e argamassas com fibras (CHALENCON *et al.,* 2009).

A execução do ensaio se inicia definindo uma velocidade constante de deslocamento (h_0) para a punção, que associado a uma célula de carga, comprime a amostra. A célula de carga tem como leitura a reação desse material ao seu deslocamento final ($h<h_0$), conforme figura 6.

FIGURA 6 – CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW*: (A) INÍCIO DO ENSAIO; (B) FINAL DO ENSAIO

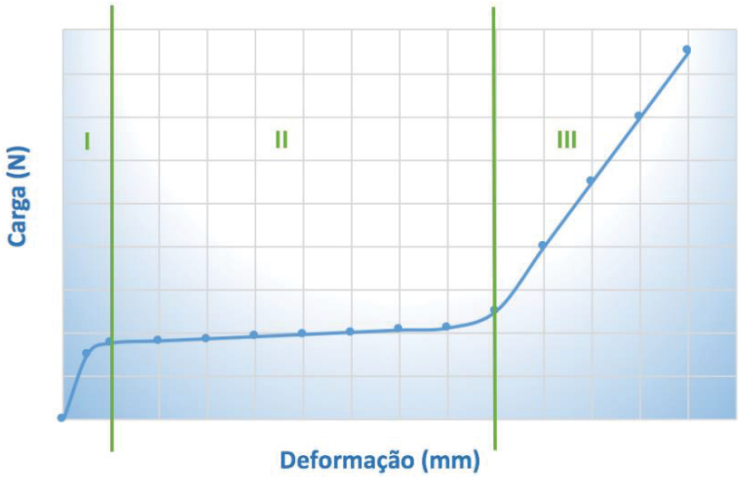


FONTE: Adaptado de CARDOSO *et al.* (2009).

O ensaio normalizado de acordo com a NBR 15.839 (ABNT, 2010) é bastante difundido para determinar o escoamento de pastas e argamassas, já que esse teste supera alguns dos problemas mais comuns da reometria, como o escorregamento, rompimento de materiais plásticos e a dificuldade de carregar materiais de elevada espessura. O ensaio está fundamentado a partir da compressão controlada e pela taxa de deslocamento das duas placas cilíndricas paralelas, gerando deformação por cisalhamento e deformação elongacional (MEETEN, 2000).

Para Cardoso (2009), o método de *squeeze flow* demonstra eficiência na caracterização das argamassas, principalmente pelo fato de simular as etapas da aplicação do material, como o espalhamento, nivelamento e sarrafeamento. A utilização pode ser mais difundida, pois o ensaio em argamassas pode representar resultados satisfatórios para concretos, já que a argamassa presente no concreto é tensionada pelo cisalhamento e à compressão entre os agregados. O método pode ser representado por três etapas da utilização das argamassas e pastas, elencando por um perfil habitual na forma de curva de carga por deformação, como pode ser observado pela figura 7 (CARDOSO *et al.,* 2007).

FIGURA 7 – CURVA CARACTERÍSTICA DE UM FLUIDO DE BINGHAM



FONTE: CAMPANELLA; PELEG (1987); MIN *et al.* (1994) *apud* CARDOSO *et al.,* (2005).

Onde os estágios são definidos como:

- Estágio I ou estágio elástico – o material se comporta como sólido em pequenas deformações, associado à tensão de escoamento e a deformação elástica;
- Estágio II ou estágio plástico – grandes deformações com pouco aumento da carga, associado à deformação radial elongacional, tensão de cisalhamento e a deformação plástica e fluxo viscoso;
- Estágio III ou estágio de embricamento – grandes cargas para aumentar pouco a deformação, associado a forças que restringem o fluxo pela proximidade das partículas e ao enrijecimento por deformação.

Cardoso *et al.* (2005) ressaltam que os resultados obtidos a partir dos ensaios de *squeeze flow,* em termos de carga e deslocamento, também contribuem com informações importantes sobre as características de fluxo de diversos tipos de materiais, quando submetidos às diferentes solicitações. A técnica aplicada permite a determinação de parâmetros reológicos como, por exemplo, viscosidade, tensão de escoamento e taxa de deformação que o material é submetido. Para a determinação da viscosidade, deve-se assumir que o modelo tem características deslizantes (viscosidade elongacional) ou confinado (viscosidade cisalhante).

Uma das metodologias aplicadas no cálculo da viscosidade das argamassas (η), também obtida pelo ensaio de *squeeze flow* foi proposta por Covey e Satanmore (1981) *apud* Meeten (2000), dada pela equação (8), onde F (N) é a carga de compressão, t (s) é o tempo de

descolamento dos pratos, h (m) é a altura da amostra, h_o (m) é a altura inicial da amostra e D (m) é o diâmetro da amostra.

Uma das metodologias aplicadas no cálculo da viscosidade das argamassas (η), também obtida pelo ensaio de *squeeze flow* está sendo proposta por Covey e Satanmore (1981) *apud* Meeten (2000), dada pela equação (8), onde F (N) é a carga de compressão, t (s) é o tempo de descolamento dos pratos, h (m) é a altura da amostra, h_o (m) é a altura inicial da amostra e D (m) é o diâmetro da amostra.

$$\eta = \frac{64Ft}{3\pi(h^{-2}-h_0^{-2})D^4} \tag{8}$$

Já a tensão de escoamento é demonstrada pela equação (9) proposta por Lee *et al.* (2003) *apud* Meeten (2000).

$$\tau_0 = \frac{12hF}{\pi D^3} \tag{9}$$

2.5 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Os estudos da densidade de empacotamento de uma mistura granular são de extrema importância para materiais cerâmicos, como os concretos e argamassas, visto que estes são constituídos por inclusões granulares incorporadas na matriz de ligação, que combinam os grãos para diminuir ao máximo a porosidade do sistema granular, o que permite uma economia da pasta cimentícia (OLIVEIRA *et al.,* 2000).

Nos estudos com empacotamento de partículas, a forma com que as partículas se movimentam é proporcional ao afastamento dos grãos por um fluido em fase contínua. A inexistência desse fluido no sistema, faz com que essas partículas percam a mobilidade e apresentem vazios intragranulares. O acréscimo gradativo do fluido no sistema granular, faz com que a área superficial do grão seja coberta por esse fluido que, posteriormente, vai preenchendo os vazios entre grãos e, finalmente, quando se tornam fase contínua, passa a afastá-los criando uma distância de separação que permite a sua movimentação. Na hipótese de a área superficial dos grãos evidenciar grandes valores e o volume de vazios entre eles também, será necessária uma grande quantidade de fluido para dar início a movimentação de partículas.

Sendo assim, a proposta do empacotamento de partículas busca diminuir esses vazios ao máximo, fazendo com que se permita a mobilidade com menor teor de fluido possível (DAMINELI, 2013).

2.5.1 Métodos experimentais para determinação da densidade de empacotamento

Em se tratando de materiais finos, os métodos para determinar a densidade de empacotamento de partículas podem ser classificados em métodos diretos, que determinam a densidade de empacotamento diretamente a partir da densidade a seco, e métodos indiretos que determinam a densidade de empacotamento por testes de consistência (WONG; KWAN, 2008a). Os métodos diretos que determinam a densidade de empacotamento a seco não levam em conta o efeito da presença da água na mistura e, com isso, eliminam a eficácia que os aditivos apresentam nessa etapa. Outra desvantagem do método seco é a aglomeração das partículas finas que também interferem no empacotamento das partículas, quando seco (YU *et al.,* 2003; LI; KWAN, 2013). Desse modo, o uso de métodos que levem em conta a presença de água no momento da medição é de grande importância.

A densidade de empacotamento dos agregados (β) é calculada segundo equação (10), em que IV é o índice de vazios do conjunto de grãos, determinado por meio da massa específica e da massa unitária, conforme procedimentos descritos pelas normas NBR NM 52 (ABNT, 2009), NBR NM 53 (ANBT, 2009) e NBR NM 45 (ABNT, 2006).

$$\beta = 1\text{-IV} \tag{10}$$

O método determina a densidade de empacotamento para materiais finos na presença de água, dado que esta altera a carga superficial das partículas e a condição de aglomeração dos materiais finos. O ensaio consiste em produzir as misturas com diferentes volumes de água em sua composição e determinar a densidade aparente de cada mistura produzida. A partir da densidade aparente, pode-se calcular a relação de vazios e a concentração de sólidos das misturas, conforme equações (11) a (13), sendo a densidade de empacotamento equivalente à máxima concentração de sólidos encontrada.

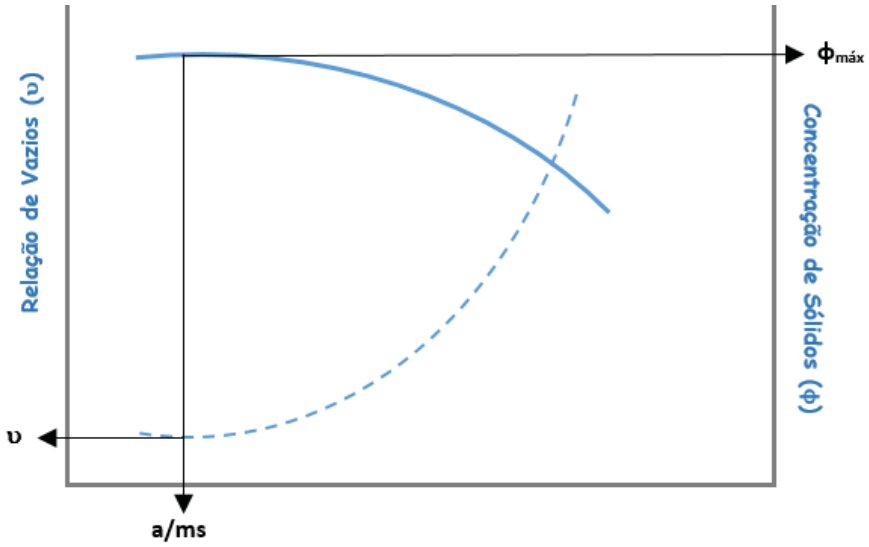
$$V_S = \frac{M}{\rho_w \times u_w + \rho_a \times R_a + \rho_b \times R_b + \rho_c \times R_c} \tag{11}$$

$$\upsilon = \frac{(V - V_S)}{V_S} \tag{12}$$

$$\Phi = \frac{V_S}{V} \tag{13}$$

Onde V_S é o volume de sólidos na argamassa, M é a massa de argamassa que ocupa o molde utilizado no ensaio, ρ_w é a densidade da água, ρa, ρb, ρc, são as densidades dos sólidos a, b e c, u_w é a relação água/materiais secos (em volume), R_a R_b R_c são as relações volumétricas entre os materiais a, b, e c e o total de sólidos, *V* é o volume do molde utilizado no ensaio, υ é a relação de vazios e Φ é a concentração de sólidos da mistura. A figura 8 representa um gráfico que plota as curvas obtidas da concentração de sólidos (*φ*) e da relação de vazios (υ) relacionadas ao fator a/ms (em volume).

FIGURA 8 – O COMPORTAMENTO DAS CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E A RELAÇÃO DE VAZIOS



FONTE: Adaptado de Wong e Kwan (2008a).

Nota-se que, quando há um aumento na relação de água/materiais secos (a/ms), há um aumento na relação de vazios, isso ocorre por conta do acréscimo de água que faz com que as partículas sólidas se separam. Logo ocorre o inverso com a concentração de sólidos, ou seja, ela diminui com o aumento na a/ms. Quando a quantidade de água diminui, as partículas se

aproximam, diminuindo também a proporção de vazios. Esse processo ocorre até que o ponto crítico tenha sido alcançado, quando há um ponto máximo de sólidos e mínimo de vazios. A partir disso, caso ocorra uma nova diminuição na a relação a/ms não haverá água necessária na mistura havendo uma quebra entre as pontes de partículas de água que, consequentemente, irão se afastar diminuindo a concentração de sólidos e aumentando a relação de vazios (KLEIN, 2012; LI; KWAN, 2014; HERMANN *et al.,* 2016).

2.5.2 Modelos de empacotamento de partículas

Os modelos de empacotamento de partículas são basicamente equações matemáticas que buscam prever como as partículas de diferentes tamanhos interagem geometricamente entre si. Os modelos podem ser de dois tipos, os baseados em curvas granulométricas ideais, e aqueles que calculam a densidade de empacotamento teórica de uma mistura dividindo-a em classes de tamanho de partículas. Estes últimos são chamados de modelos analíticos por alguns autores (FENNIS, 2011).

Dentre os modelos baseados em curvas granulométricas ideais, destacam-se os modelos de Füller e Thompson (1907), Andreasen e Andersen (1930) e Funk e Dinger (1994), conhecido como modelo de Alfred. Já os modelos analíticos, por sua vez, calculam a densidade de empacotamento de um conjunto granular baseado em equações matemáticas. Conforme Fennis (2011), dentre os modelos analíticos estão: Westman e Hugill (1930), Le Goff (1967), Toufar *et al*. (1976), Stovall *et al.* (1986) e De Larrard (1999), entre outros. Apresenta-se na sequência informações mais detalhadas dos modelos analíticos propostos por De Larrard (1999) e Fennis (2011), pois estes serão usados no presente trabalho.

2.5.2.1 Modelo de CPM (De Larrard, 1999)

O CPM é um modelo de densidade de empacotamento que tem como objetivo combinar grãos de diferentes tamanhos para minimizar a porosidade do conjunto granular, o que permite a utilização da menor quantidade possível de aglomerante em argamassas e concretos. Três parâmetros principais definem a densidade de empacotamento de uma mistura de grãos polidispersos: o tamanho dos grãos, a morfologia das partículas e o método de execução do empacotamento de partículas (método de compactação).

O modelo parte do cálculo da densidade de empacotamento virtual (γ), segundo equação (14), que é a máxima densidade de empacotamento do conjunto granular quando as partículas são colocadas uma a uma no espaço, mantendo seu formato original. Neste cálculo, β_i e β_j são as densidades de empacotamento de cada classe de tamanho de grãos (pode-se adotar quantas classes se deseje, porém é como estabelecer classes equivalentes às peneiras usadas na distribuição granulométrica dos agregados), y_j é o volume de material de cada classe, a_{ij} refere-se ao efeito afastamento, equação (15) e o b_{ij} o efeito parede, equação (16), onde d_i e d_j são os diâmetros das partículas da classe i e j respectivamente.

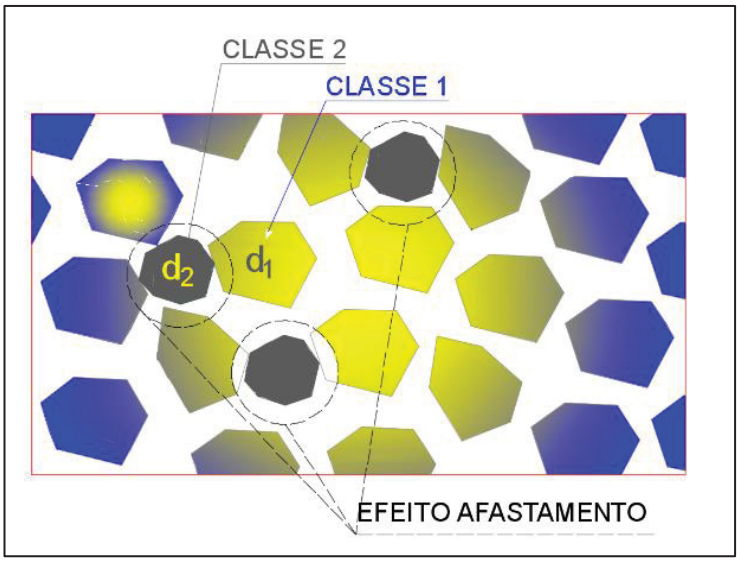
$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1-\sum_{j=1}^{i-1}[1-\beta_i+b_{ij}(1-\frac{1}{\beta_j})]yi-\sum_{j=i+1}^{n}[1-\frac{aij.\beta_i}{\beta_j}]y_j} \quad (14)$$

$$a_{ij} = \sqrt{1-(1-\frac{d_j}{d_j})^{1,02}} \quad (15)$$

$$b_{ij} = 1-(1-\frac{d_i}{d_j})^{1,50} \quad (16)$$

O efeito de afastamento ocorre quando as partículas, mesmo finas, são grandes demais para se encaixarem nos vazios entre as partículas maiores, promovendo o afastamento destes grãos maiores, consequentemente, provocando o aumento da porosidade e diminuição do empacotamento. A figura 9 demonstra tal efeito.

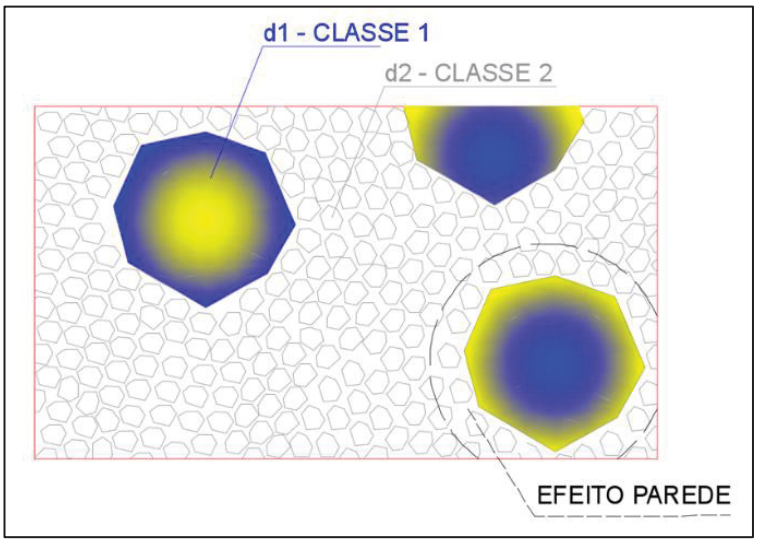
FIGURA 9 – MISTURA COM INTERAÇÃO: EFEITO AFASTAMENTO



FONTE: Adaptado de Oliveira *et al.* (2000).

Já o efeito parede, demostrado na figura 10, é exercido pelos grãos maiores sob os grãos menores, causam um aumento na porosidade da mistura, consequentemente, diminuindo seu empacotamento. O efeito parede só deixa de ser levando em conta quando a razão entre os diâmetros dos grãos for superior a 1 (OLIVEIRA *et al.,* 2000).

FIGURA 10 – MISTURA COM INTERAÇÃO: EFEITO PAREDE



FONTE: Adaptado de OLIVEIRA *et al.,* 2000

Após o cálculo da densidade de empacotamento virtual, o efeito da compactação é considerado no cálculo da densidade de empacotamento real dos conjuntos granulares, em que

o índice de compactação K representa a energia de compactação aplicada à mistura, já que isso influencia diretamente na disposição dos grãos. Na equação (17), n é o número de classes da mistura; β_i é a densidade de empacotamento da classe i; γ_i é a densidade de empacotamento virtual quando a classe i é dominante; y_i é o volume relativo da classe i e ϕ é a densidade de empacotamento real.

$$K = \sum_{i=1}^{n} k_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\gamma_i}} \tag{17}$$

O índice de compactação K assume diferentes valores, a depender do tipo de compactação utilizada no processamento da mistura, conforme indicado na tabela 7, sendo estes valores resultados de experimentos.

TABELA 7 - VALORES DE K PARA OS DIFERENTES PROTOCOLOS DE EMPACOTAMENTO

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

FONTE: De Larrard (1999).

2.5.2.2 Modelo de CIPM (Fennis, 2011)

O modelo CIPM (do inglês *Compaction-Interaction Packing Model*), proposto por Fennis (2011), difere do modelo CPM de Larrard (1999) pelo fato de levar em conta a aglomeração entre partículas finas como efeito de interação entre as partículas. Essa aglomeração é causada principalmente pelas forças coesivas, exemplificadas pelas forças de Van der Waals, cargas eletrostáticas e ligações químicas. Quanto menores forem as partículas, maior é a influência da aglomeração entre elas. Por isso, a aplicação do modelo CIPM limita em 25 μm o diâmetro das partículas para a ocorrência de interação.

A aplicação do modelo CIPM ocorre com cálculos de densidade de empacotamento virtual (γ) e real (ϕ) igualmente ao visto anteriormente no modelo de Larrard (1999). Contudo,

a diferença básica se concentra nos coeficientes referente ao efeito afastamento ($a_{ij,c}$) e ao efeito parede ($b_{ij,c}$), os quais passam a ponderar o coeficiente de aglomeração que pode ocorrer em classes com partículas com tamanhos inferiores a 25 µm, conforme equações (18) e (19).

$$aij,c = \begin{cases} 1 - \dfrac{\log\left(\frac{di}{dj}\right)}{wo,a} & \log\left(\frac{di}{dj}\right) < w0,a \\ 0 & \log\left(\frac{di}{dj}\right) \geq w0,a \end{cases}$$

$$wo,a = wa.Ca\ se\ di < 25\mu m\ e\ wo,a = wa, se\ dj \geq 25\mu m \tag{18}$$

$$bij,c = \begin{cases} 1 - \dfrac{\log\left(\frac{dj}{di}\right)}{wo,b} & \log\left(\frac{dj}{di}\right) < w0,b \\ 0 & \log\left(\frac{dj}{di}\right) \geq w0,b \end{cases}$$

$$wo,b = wb.Cb\ se\ di < 25\mu m\ e\ wo,b = wb, se\ di \geq 25\mu m \tag{19}$$

Sendo:

$a_{ij,c}$: efeito afastamento pelo método CIPM;

$b_{ij,c}$: efeito parede pelo método CIPM;

di: menor dimensão;

dj: dimensão seguinte de di;

w0,a: máxima interação do efeito afastamento;

w0,b: máxima interação do efeito parede;

wa, Ca, wb, Cb: coeficientes do método.

3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, é ressaltado o planejamento experimental da pesquisa, com a caracterização dos materiais utilizados e os métodos empregados. O planejamento experimental foi fundamentado em quatro etapas, onde cada uma delas, será demonstrada nos itens a seguir.

3.1 MATERIAIS

A eleição dos materiais utilizados na pesquisa proposta foi baseada nos materiais usualmente utilizados nas argamassas para revestimento utilizadas nas obras dos estados da região sul do país, sendo eles o cimento, cal, agregado miúdo e água. Optou-se pela não utilização do incorporador de ar nas argamassas desenvolvidas, justificada pelo fato desse material não estar sendo comumente utilizado nas argamassas produzidas em obra da região. Para Carasek (2010), os incorporadores de ar figuram como os aditivos mais indicados na fabricação das argamassas de revestimento, pois quando adicionados em quantidades adequadas acarretam benefícios para a trabalhabilidade do material e redução no consumo de água de amassamento ajudando a reduzir o risco de fissuração.

3.1.1 Aglomerantes

O cimento utilizado foi o CP II F 32, usual na região do estudo e em conformidade com os requisitos da norma NBR16697 (ABNT, 2018). A massa unitária do cimento Portland CP II F 32 é de 1.420kg/m³ obtida por meio do ensaio determinado na Norma NM45 (ABNT, 2006). O ensaio de massa unitária desenvolvido em materiais secos salienta grande sensibilidade em razão de fatores como o tipo de compactação e aglomeração das partículas. Por se tratar do ensaio executados na condição seca, sem a presença de água, esses fatores podem influenciar significativamente no coeficiente final do estudo (YU *et al*., 2003; LI; KWAN, 2013). A tabela 8 contempla algumas das características físicas e químicas do cimento utilizado.

TABELA 8 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO CIMENTO CP II F 32 CONFORME NBR 16697 (ABNT, 2018)

Características Físicas		
	CP II F-32	**Limite de Norma NBR 16697 (2018)**
Massa Específica (g/cm³)	3,06	-
Tempo de Pega Início (min.)	04:11	≥ 60
Tempo de Pega Fim (min.)	04:57	≤ 600
Blaine (cm^2/g)	3720	≥ 2600
Resistência à Compressão (MPa) – R1	13,5	N/A
Resistência à Compressão (MPa) – R3	28,1	≥ 10
Resistência à Compressão (MPa) – R7	34,2	≥ 20
Resistência à Compressão (MPa) – R28	42	≥ 32 ≤ 49
Características Químicas		
Al_2O_3	4,23	-
SiO_2	18,65	-
Fe_2O_3	2,68	-
CaO	60,94	-
MgO	4,03	N/A
SO_3	2,73	≤ 4,5
Perda de Fogo	4,92	≤ 12,5
CaO livre	0,59	-

FONTE: Fabricante (2019).

A cal utilizada foi a cal hidráulica HL II, utilizada em argamassas produzidas em centrais, fornecidas pelo fabricante, com requisitos de acordo com a tabela 9. Já a massa unitária é de 720kg/m³, de acordo com o mesmo procedimento desenvolvido para o cimento. A norma brasileira ainda não prescreve requisitos quanto as cales hidráulicas, sendo assim, utiliza-se como referência as normas ASTM C141:2009, que trata especificamente dos requisitos para as cales hidráulicas e a europeia EN 459-1:2015, que aborda todas as cales utilizadas na construção, incluindo cales vivas, cales hidratadas e cales hidráulicas. A área superficial foi calculada por meio da norma NBR 16372 (ABNT, 2015) resultando em 623m²/kg.

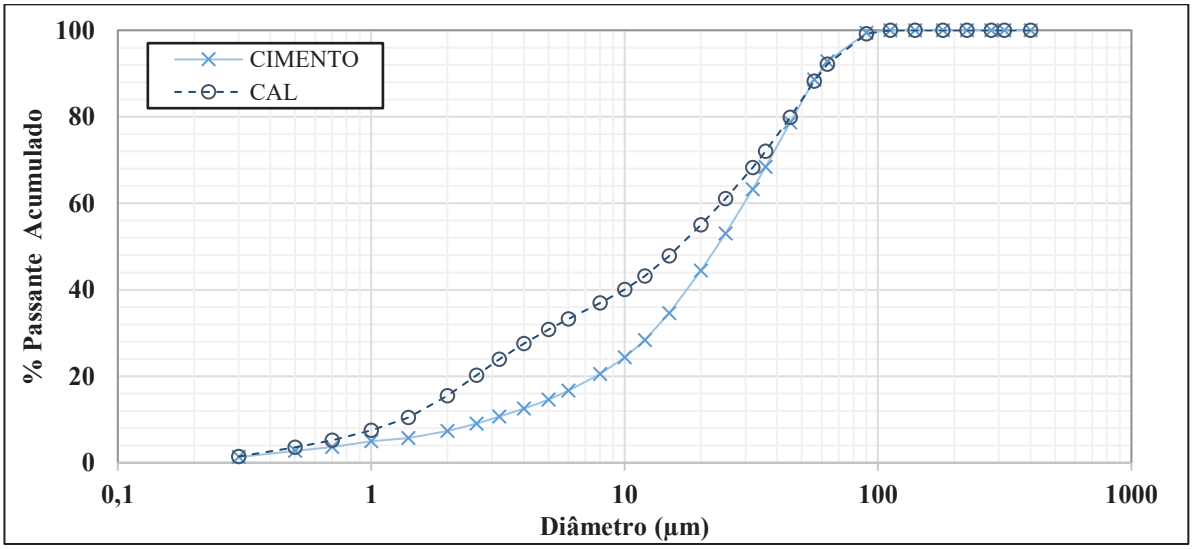
TABELA 9 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DA CAL HIDRÁULICA

Propriedades	**HL II**
Massa Específica (g/cm³)	2,455
Granulometria # 70 (%)	≤ 5
Granulometria #140 (%)	≤ 15
Resíduo Insolúvel (%)	≥ 35
Óxidos (%)	≤10
CO2 (%)	≤ 5
Composição	Hidróxido de cálcio e magnésio, silicatos e aluminatos de cálcio.

FONTE: Fabricante (2019).

Por meio da granulometria a laser, foi possível obter a caracterização granulométrica dos aglomerantes e determinar parâmetros imprescindíveis na geração dos modelos de empacotamento de partículas. A técnica de análise de tamanho de partículas por difração de laser é um método pelo qual as partículas são dispersas num fluído em movimento causando descontinuidades no fluxo do fluído, que são detectadas por uma luz incidente e correlacionadas com o tamanho de partícula. O equipamento utilizado foi o CILAS 920, com faixa de análise entre 0,3 a 400 µm. As amostras pulverizadas e secas foram dispersas em água destilada por 1 min, antes de ser realizada a medida. A partir da suspensão homogênea obtida, por meio do software específico, The Particle Expert® (versão 5.12, Cilas, Marseille, França), o diâmetro médio e a distribuição de tamanho das micropartículas foram determinados. Por intermédio da figura 11, está sendo destacada a curva granulométrica, gerada a partir do ensaio de granulometria a laser dos aglomerantes em questão.

FIGURA 11 – GRANULOMETRIA A LASER DOS AGLOMERANTES



FONTE: A autora (2021).

Nota-se que a cal hidráulica HL II se apresenta com partículas menores do que as do cimento, como era esperado. Essa afirmação também pode ser observada na tabela 10, em que estão detalhados os diâmetros D10, D50 e D90 (diâmetros pelos quais passam 10, 50 e 90% das partículas respectivamente).

TABELA 10 – GRANULOMETRIA A LASER DOS AGLOMERANTES

Granulometria a laser	CAL HL II	CP II F 32
D10 (μm)	1,33	2,94
D50 (μm)	16,39	23,12
D90 (μm)	59,11	58,23
Média (μm)	24,20	27,97

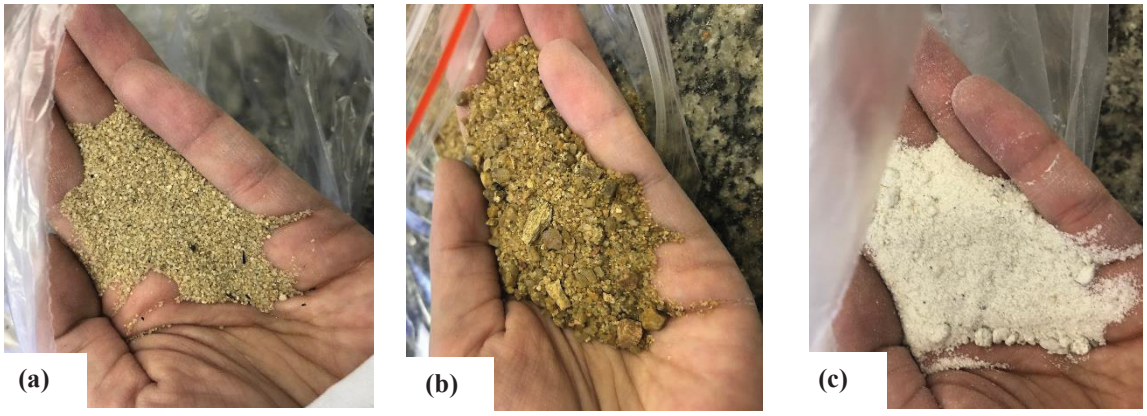
FONTE: A autora (2021).

Nota-se que a cal permaneceu com resultados semelhantes quanto ao D50 e D90 em comparação ao cimento, mesmo sendo um material mais fino. Isso pode ter ocorrido pelo fato da cal ter sofrido algum tipo de aglomeração em suas partículas que resultou nos valores apresentados. Essa distorção entre os resultados com a granulometria a laser dos cimentos e das cales também já foi identificado em outras pesquisas da área. Giordani e Masuero (2019) propuseram três tempos de aplicação do ultrassom para o ensaio de granulometria a laser (60s, 120s e 180s) com o objetivo de analisar o efeito da velocidade do ensaio sobre a dispersão das partículas na análise dos aglomerantes do estudo. Assim é possivel observar que quanto maior o tempo de aplicação do ultrassom, mais fina se tornam as amostras. Visto isso, alguns cuidados podem evitar que partículas sejam ensaiadas aglomeradas, como por exemplo, a utilização de amostras com data de fabricação muito próximas a data de execução do ensaio, e do armazenamento correto da amostra a ser ensaiada.

3.1.2 Agregado Miúdo

Foram utilizados três tipos de agregados miúdos, utilizados em separado nas argamassas, todos eles facilmente encontrados no mercado local da cidade de Curitiba/PR. A figura 12 mostra os agregados utilizados, tendo sido nominados segundo a origem (AN para agregado natural e AA para agregado artificial) e o módulo de finura (valor numérico que segue subscrito ao lado das letras maiúsculas). Os agregados naturais são chamados de $AN_{1,87}$ e $AN_{2,69}$ e o agregado artificial lavado de $AA_{2,04}$.

FIGURA 12 – AGREGADOS MIÚDO UTILIZADOS: (A) $AN_{1,87}$; (B) $AN_{2,69}$; (C) $AA_{2,04}$



FONTE: A autora (2021).

Os ensaios de caracterização dos três agregados estão evidenciados na tabela 11. Todos os ensaios de caracterização foram repetidos três vezes, obtendo a média como resultado final.

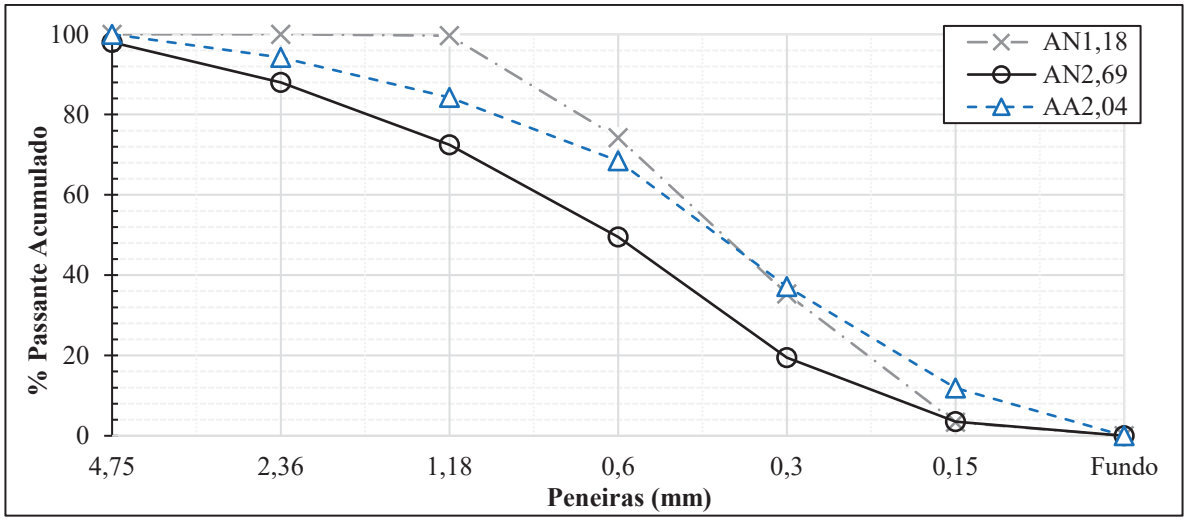
TABELA 11 – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Propriedades	**Norma**	**$AN_{1,87}$**	**$AN_{2,69}$**	**$AA_{2,04}$**
Massa específica (g/cm³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,51	2,63	2,53
Absorção (%)	NBR NM 30 (ABNT, 2000)	0,90	0,01	1,27
Massa unitária (g/cm³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,55	1,57	1,45
Índice de vazios (%)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	38,2	40,3	42,7
Finos # 100 (%)	Baseado na NBR NM 46 (ABNT, 2006).	3,64	3,44	13,18
Material pulverulento # 200 (%)	NBR NM 46 (ABNT, 2006)	1,16	1,33	3,86
Módulo de finura (-)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,87	2,69	2,04
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,18	4,75	4,75
Área superficial (m²/kg)	Teoria fractal (Araujo, *et al.,* 2003)	7,64	4,10	8,52

FONTE: A autora (2021).

Nota-se que o agregado $AA_{2,04}$, apesar de artificial, tem aproximadamente o dobro de material pulverulento, em comparação aos demais agregados naturais. O fato desse agregado ser um artificial lavado pode ser a justificativa para tal valor. A área superficial foi calculada por meio da teoria fractal para todos os agregados utilizados na pesquisa. A geometria fractal é uma ferramenta matemática dentro da geometria que calcula a forma de um objeto que não possui uma tipologia ideal e regular (ARAÚJO *et al.,* 2003). As curvas granulométricas dos três agregados, construídas segundo procedimentos da norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), estão destacadas na figura 13.

FIGURA 13 – CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS MIÚDO DAS ARGAMASSAS DOSADAS EM LABORATÓRIO



FONTE: A autora (2021).

Ao analisar a curva granulométrica das areias estudadas, nota-se que os agregados $AA_{2,04}$ e $AN_{2,69}$ possuem retas com menor ângulo de inclinação, sugerindo, a princípio, que suas composições possuem melhor distribuição de grãos. Tal fato pode ser confirmado por meio do coeficiente de uniformidade (C_{un}) oriundo da mecânica dos solos e definido pela relação entre os diâmetros D60 e D10, conforme mostrado na equação 20, resultante da granulometria a laser desenvolvida nos agregados.

$$C_{un} = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{20}$$

Os resultados obtidos no ensaio de granulometria a laser e o coeficiente de uniformidade para todos os agregados estão expostos na tabela 12.

TABELA 12 – GRANULOMETRIA A LASER DOS AGREGADOS

Granulometria a Laser	$AN_{1,87}$	$AN_{2,69}$	$AA_{2,04}$
D10 (µm)	181	211	127
D50 (µm)	413	613	423
D60 ((µm)	490	865	519
D90 (µm)	960	2.838	1.861
C_{un} (-)	2,71	4,09	4,08

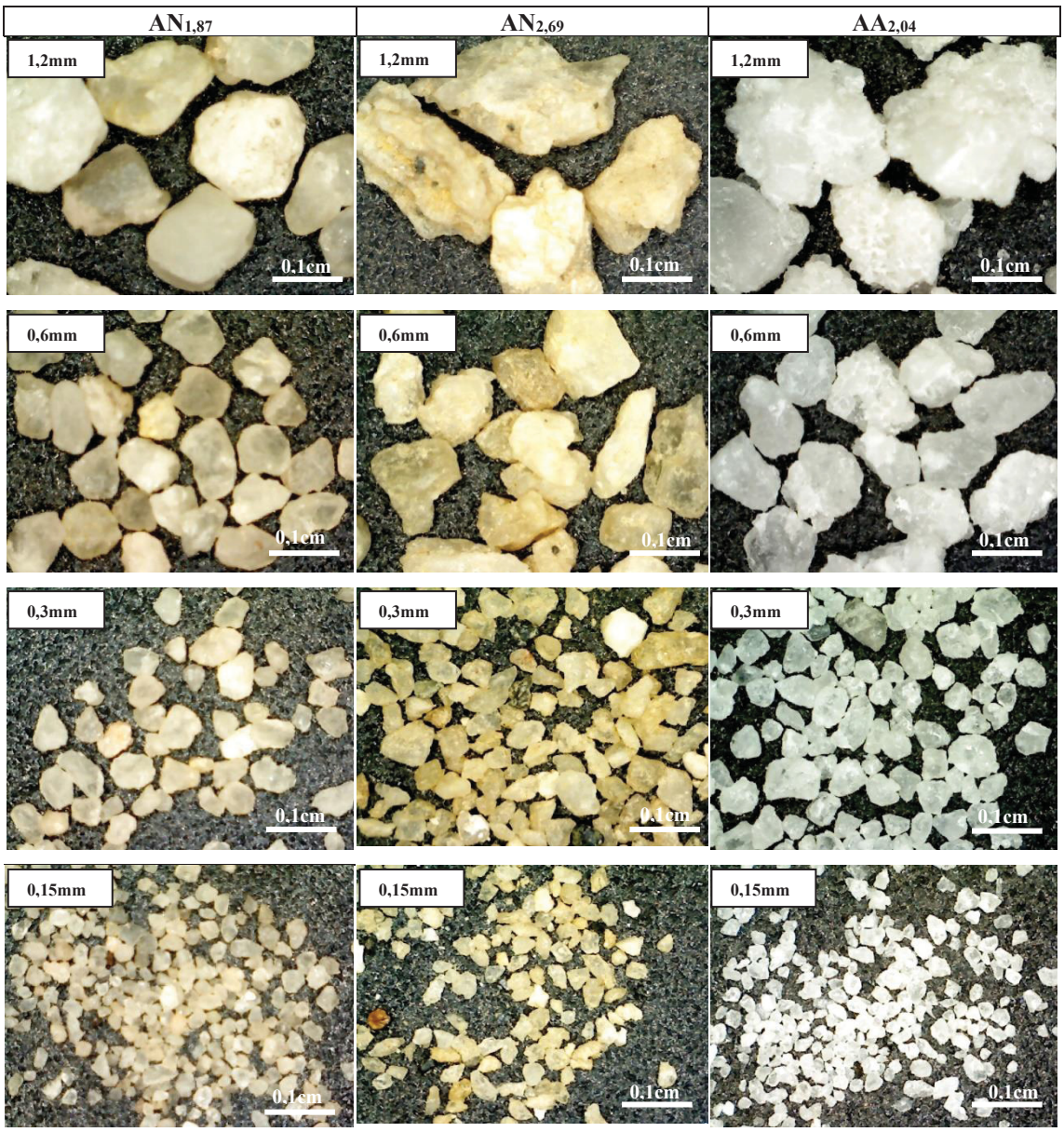
FONTE: A autora (2021).

Os agregados estudados podem ser classificados com base no coeficiente de uniformidade como sendo muito uniformes, segundo a classificação indicada por estudos anteriores (CARNEIRO *et al.*, 1999; SCHUTTER *et al.,* 2004; STOLZ, *et al.,* 2018; FERREIRA *et al.,* 2019). Visto isso, os agregados $AN_{2,69}$ e $AA_{2,04}$ foram os que tiveram maiores coeficientes de uniformidade e, portanto, possuem melhor distribuição dos grãos (isto é, distribuição mais contínua). Já o $AN_{1,87}$ foi o agregado com o menor coeficiente de uniformidade, quando comparado com os demais agregados.

Realizou-se também análise da morfologia das partículas, já que partículas irregulares elevam o consumo de água e, consequentemente, de cimento para que se atinja o comportamento reológico adequado, tanto para aplicação desse material no substrato quanto pela sua qualidade pós-aplicação. Grãos lamelares pioram tanto a trabalhabilidade (PILEGGI, 2001) das argamassas quanto a resiliência (elasticidade). Todavia, grãos mais arredondados, com menor superfície específica tendem a melhorar a trabalhabilidade como um todo (SABBATINI, 1990).

Um microscópio digital ProScope HR foi utilizado para caracterizar visualmente a morfologia das partículas dos agregados, com lente 50x e gerador de imagens Aptina e resolução de 1280x1024. A figura 14 mostra as imagens dos agregados $AN_{1,87}$, $AA_{2,04}$ e $AN_{2,69}$, classificados conforme tamanho de grãos, ou seja, material retido nas peneiras #1,2mm, 0,6mm, 0,3mm e 0,15mm.

FIGURA 14 – IMAGENS DO MICROSCÓPIO DIGITAL PARA OS AGREGADOS DAS ARGAMASSAS DOSADAS EM LABORATÓRIO DA ESQUERDA PARA A DIREITA, $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$



FONTE: A autora (2021).

A partir da avaliação visual das imagens é possível verificar que os três agregados exibem forma de grãos bem semelhantes, mesmo quando comparados ao $AA_{2,04}$, que por ser um agregado artificial seria provável ser mais angular. Em contrapartida, o agregado artificial se apresenta com superfície rugosa, se diferenciando dos agregados naturais, onde, possivelmente se deve através do processo de britagem (FREITAS, 2010; HADDAD *et al.,* 2016; SOUZA *et al.,* 2020a). Essa análise visual pode ser reforçada pelo resultado demonstrado

pelo CAMSIZER, onde a diferença da maior ($AN_{2,69}$) esfericidade para a menor ($AA_{2,04}$) foi de apenas 0,048. A morfologia das partículas foi determinada por meio do CAMSIZER XT, que é um equipamento óptico-eletrônico que mede tamanho e forma de partícula por meio da análise dinâmica de imagens, conforme figura 15.

FIGURA 15 – EQUIPAMENTO CAMSIZER XT

FONTE: A autora (2021).

Através do sistema de análise de imagens dinâmica, o material, onde a quantidade de amostra é em torno de 50g, passa por uma área onde existe uma fonte de luz LED e duas câmeras que captam simultaneamente imagens que são processadas por um software de análise de imagens. O equipamento CAMSIZER XT que foi utilizado, operou para esse caso com material seco e tem alcance de 1 µm a 3 mm. A distribuição de tamanhos de partículas é demonstrada conforme as séries de peneiras Tyler ou ASTM, sendo que as faixas podendo serem definidas pelo usuário em até 50 classes (HAWLITSHEK, 2014). Os resultados podem ser expressos em termos de diferentes parâmetros de tamanho, tais como: diâmetro mínimo (x_min), área equivalente (x_área) e diâmetro de Ferret máximo (Fe_max), entre outros; sendo o "x_min" o que mais se aproxima do peneiramento.

A análise das imagens possibilita também a determinação de diversos aspectos relativos à morfologia das partículas, sendo o mais utilizado a esfericidade (equação 21). A relação de aspecto (b/l) é de fácil visualização, tendo em vista que quanto menores os valores de b/l mais alongadas serão as partículas, conforme equação 22. Já a interpretação do parâmetro esfericidade, não é tão simples sua interpretação; da maneira como é calculada, representa a

angulosidade da partícula, ou seja, a irregularidade do seu perímetro projetado. Portanto, quanto mais próximo de 1, mais uniforme será uma superfície e quanto mais próximo de 0, mais irregular.

$$\text{Esfericidade} = (4\pi.\text{Área})/(\text{Perímetro})^2 \quad (21)$$

$$\text{Relação Aspecto (b/l)} = (x_min)/(Fe_max) \quad (22)$$

A tabela 13 evidencia os resultados da morfologia de todos os agregados utilizados no estudo.

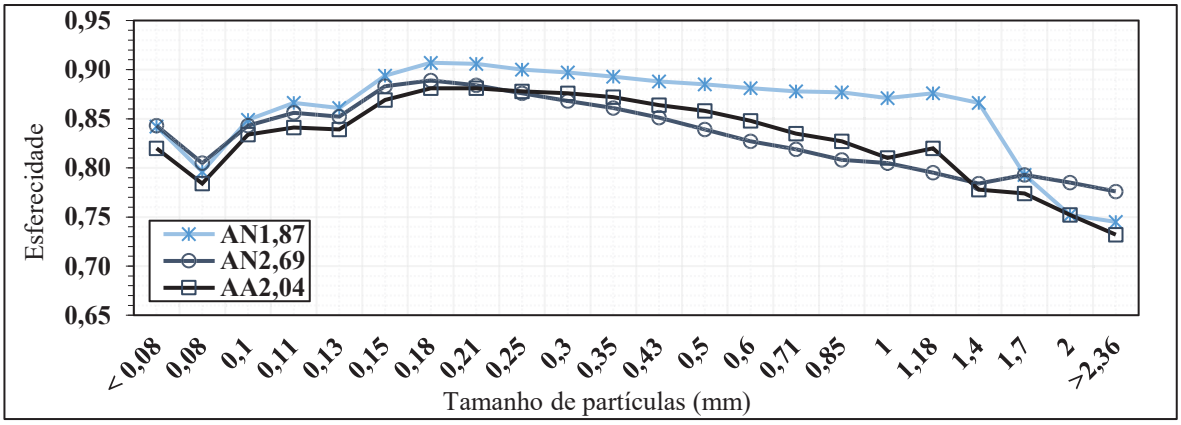
TABELA 13 –MORFOLOGIA DOS AGREGADOS

Agregado	Esfericidade	Relação de Aspecto
$AN_{1,87}$	0,875	0,740
$AN_{2,69}$	0,827	0,690
$AA_{2,04}$	0,828	0,718

FONTE: A autora (2021).

Nota-se, na tabela 13, que o agregado $AN_{1,87}$ mostrou esfericidade levemente superior aos demais, ainda que os valores sejam bastante próximos. Já quanto à relação de aspecto, o agregado $AN_{2,69}$ apresentou o menor valor, sendo o agregado mais alongado quando comparado aos demais. Ainda assim, os valores são também bastante próximos. A figura 16 mostra a esfericidade por faixa granulométrica.

FIGURA 16 – ESFERICIDADE MÉDIA DOS AGREGADOS POR FAIXA GRANULOMÉTRICA



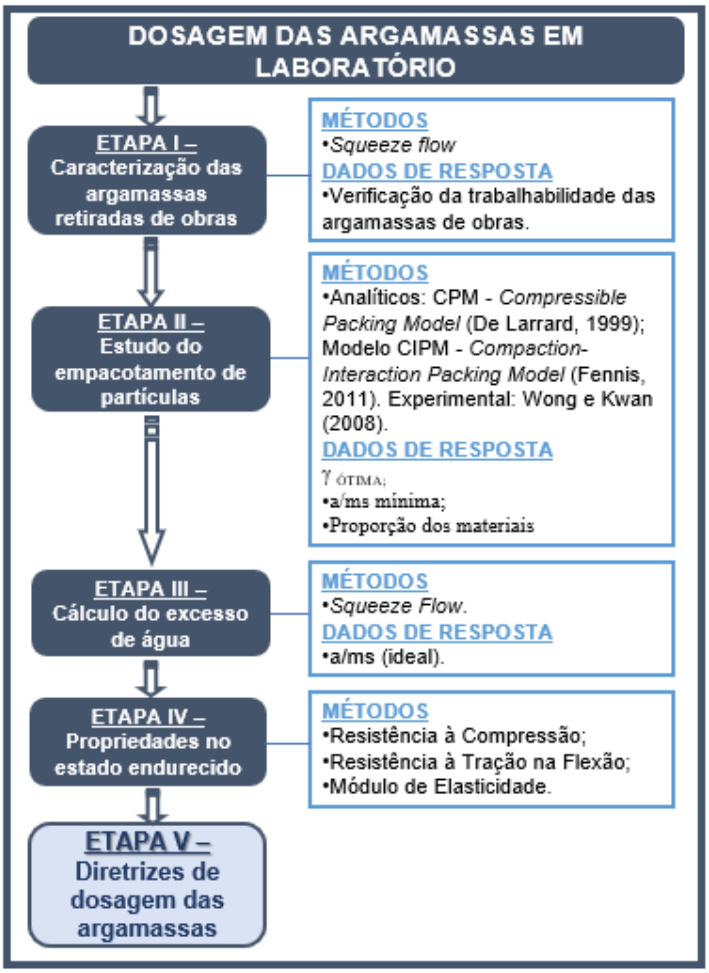
FONTE: A autora (2021).

Pode ser observado que a amostra $AN_{1,87}$ resulta com esfericidade maior que os demais agregados, na maioria das peneiras. Na fração granulométrica #0,21mm, o $AN_{1,87}$ está com 0,906 de esfericidade, sendo esse valor o mais próximo da esfera perfeita (HAWLITSCHEK, 2014). Todavia, entre as frações mais grossas (#0,21mm e #1,7mm), apesar de que o agregado $AN_{1,87}$ apresentou-se com esfericidade mais baixa, ainda assim mostrou-se muito acima dos demais agregados, chegando a ser 10,5% superior à areia $AN_{2,69}$ na fração #1,4mm.

3.2 MÉTODOS

O planejamento experimental foi dividido em quatro etapas, em que cada uma delas apresenta um objetivo em específico como dados de resposta. A figura 17 mostra o fluxograma do programa experimental a ser desenvolvido nesse estudo.

FIGURA 17 – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL



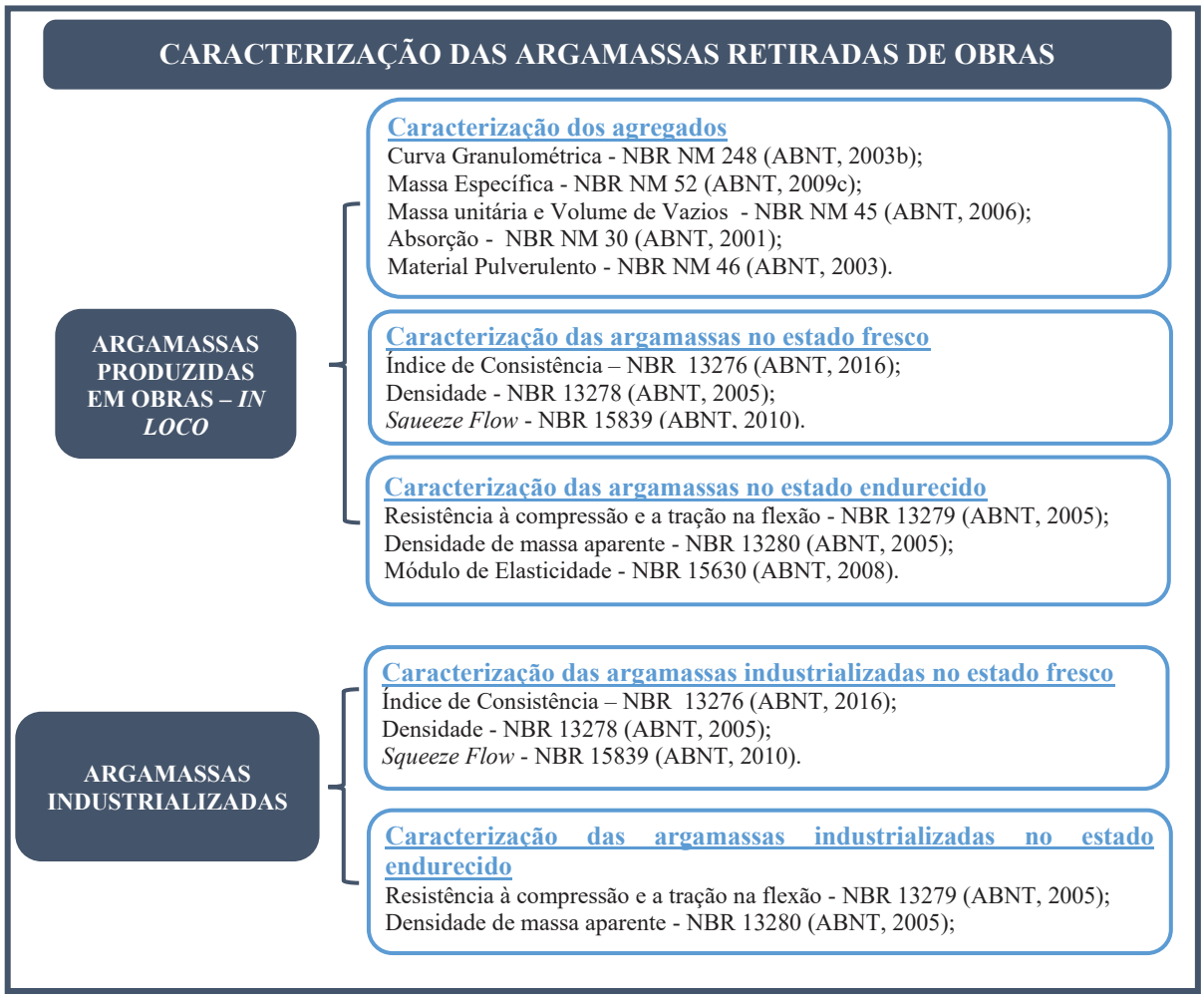
FONTE: A autora (2021).

A etapa I refere-se à caracterização em laboratório das argamassas de revestimento retiradas de obras regionais e, também a pesquisa bibliográfica em busca de dados sobre caracterizações reológicas de argamassas de revestimento no estado fresco. A caracterização das argamassas retiradas de obras contou com um estudo de campo em obras da região de Curitiba/PR, e eleitas as construtoras que aceitaram fornecer as informações detalhadas referentes à produção das argamassas de revestimento. Os dados da bibliografia contribuíram para ampliar as informações sobre o comportamento reológico de argamassas e, desta forma, contribuir com os parâmetros de trabalhabilidade. Na etapa II, por meio da eleição de determinadas formulações, foram aplicados modelos e métodos de empacotamento de partículas com o objetivo de obter a máxima densidade de empacotamento de cada formulação eleita. Como as argamassas de revestimento não atingem uma trabalhabilidade adequada para aplicação, quando considerado somente o teor de água mínima e a densidade máxima de empacotamento de partículas, foi necessário propor uma metodologia com o objetivo de conhecer o excesso de água (*over flow*) que se faz necessário (Etapa III) para permitir a aplicabilidade. O ensaio de *squeeze flow foi* adotado como referência para o cálculo desse excesso de água. Todas as argamassas ensaiadas na etapa III foram submetidas aos ensaios de caracterização no estado endurecido (etapa IV), que contempla, a resistência a compressão, densidade, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade, de acordo com a NBR 13281. Os resultados obtidos no estado endurecido irão complementar as análises de parâmetros requeridos na argamassa. Por fim, com o resultado de todas as etapas, foi possível descrever um passo a passo das diretrizes propostas para a dosagem das argamassas ensaiadas em laboratório. Todas essas etapas serão detalhadas nos itens a seguir.

3.2.1 ETAPA I - Caracterização das argamassas retiradas de obras

A figura 18 demonstra o planejamento experimental detalhado da etapa I, que tem como finalidade o conhecimento das propriedades das argamassas formuladas em obras e misturadas em laboratório, por meio da sua caracterização tanto no estado fresco como no endurecido.

FIGURA 18 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS



FONTE: A autora (2021).

Ao todo foram caracterizadas seis argamassas retiradas de obras, reproduzidas em laboratório, três delas foram classificadas como argamassas produzidas em obras (*in loco*), e três argamassas industrializadas, sendo que uma delas é argamassa estabilizada e duas industrializadas anidras, conforme tabela 14.

TABELA 14 – CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS

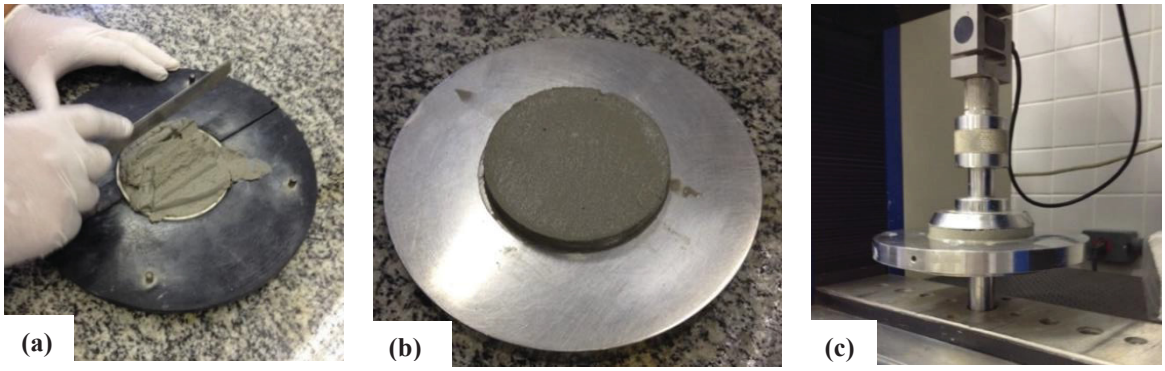
Argamassas retiradas de Obras	Tipo	Formulações em massa (cimento : cal : areia)	Teor de água/materiais secos (%)
O1	Dosadas *in loco* (viradas em obra)	1: 0,9: 9,8	11
O2	Dosadas *in loco* (viradas em obra)	1: 1,8: 9,5	18
O3*	Dosadas *in loco* (viradas em obra)	1: 8,76	23
I4**	Industrializada - Estabilizada	Desconhecida	-
I5**	Industrializada - Anidra	Desconhecida	16
I6**	Industrializada - Anidra	Desconhecida	14

* A formulação referente a O3 é cimento*:* argamassa branca.
**As argamassas I4, I5 e I6 têm sua formulação desconhecida por serem argamassas industrializadas.
FONTE: A autora (2021).

Para as argamassas que eram dosadas no canteiro de obras, (*in loco*), , houve a coleta dos agregados para que pudessem ser caracterizadas em laboratório. Após um estudo quanto à formulação, procedimento de mistura (das argamassas produzidas em obras) e demais particularidades cedidas pelas construtoras, cada uma das formulações foi reproduzida e caracterizada em laboratório nos estados fresco e endurecido, com argamassadeira e procedimento de mistura indicado pelas construtoras em específico. As argamassas industrializadas foram caracterizadas também em estados fresco e endurecido.

As argamassas no estado fresco foram submetidas ao ensaio de índice de consistência (ABNT NBR 13276, 2016), determinação da densidade de massa fresca e teor de ar incorporado (ABNT NBR 13278, 2005) e ensaiadas com relação ao seu comportamento reológico pelo método de *squeeze flow* (ABNT NBR 15.839, 2010). O ensaio de *squeeze flow* foi realizado em uma prensa EMIC utilizando-se uma célula de carga de 30 kN, com velocidade de deslocamento de 1 mm/s, conforme prescreve a norma NBR 15839 (ABNT, 2010). O corpo de prova apresentava 101 mm de diâmetro (D) e 10 mm de altura (h). A figura 19 mostra um dos corpos de prova ensaiados e alguns detalhes do ensaio.

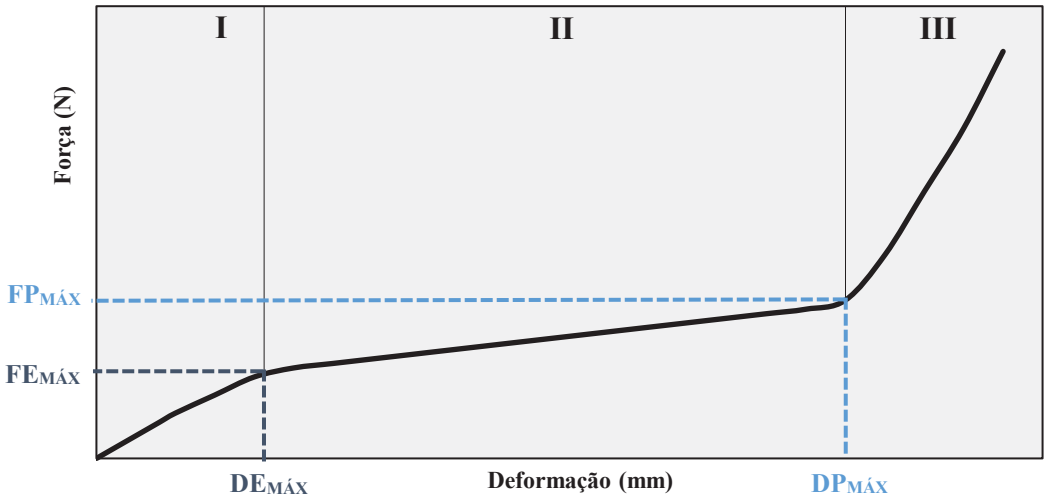
FIGURA 19 – PREPARO PARA A EXECUÇÃO DO ENSAIO DE SQUEEZE FLOW (A) MOLDAGEM DO CORPO DE PROVA, (B) CORPO DE PROVA, (C) ENSAIO EM ANDAMENTO



FONTE: A autora (2021).

Para os materiais a base de cimento, como as argamassas de revestimento, o ensaio de *squeeze flow* é análogo às condições de esforços aplicados durante o processo de aplicação das argamassas em obra. Em termos de trabalhabilidade, é desejável que uma argamassa permaneça no estágio II durante grande parte do ensaio apresentando deformações elevadas associadas a baixas cargas aplicadas, pois assim terá mais facilidade ao espalhamento sobre o substrato, sem demandar grandes esforços por parte do operário da obra (CARDOSO, 2009). A partir dos resultados obtidos nos ensaios de *squeeze flow*, foi possível determinar os pontos de mudança de estágio, tanto do estágio elástico para o plástico da carga (FE_{max}) e da deformação (DE_{max}), quanto do estágio plástico para o embricamento (FP_{max} e DP_{max}), conforme figura 20.

FIGURA 20 – GRÁFICO OBTIDO NO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW*

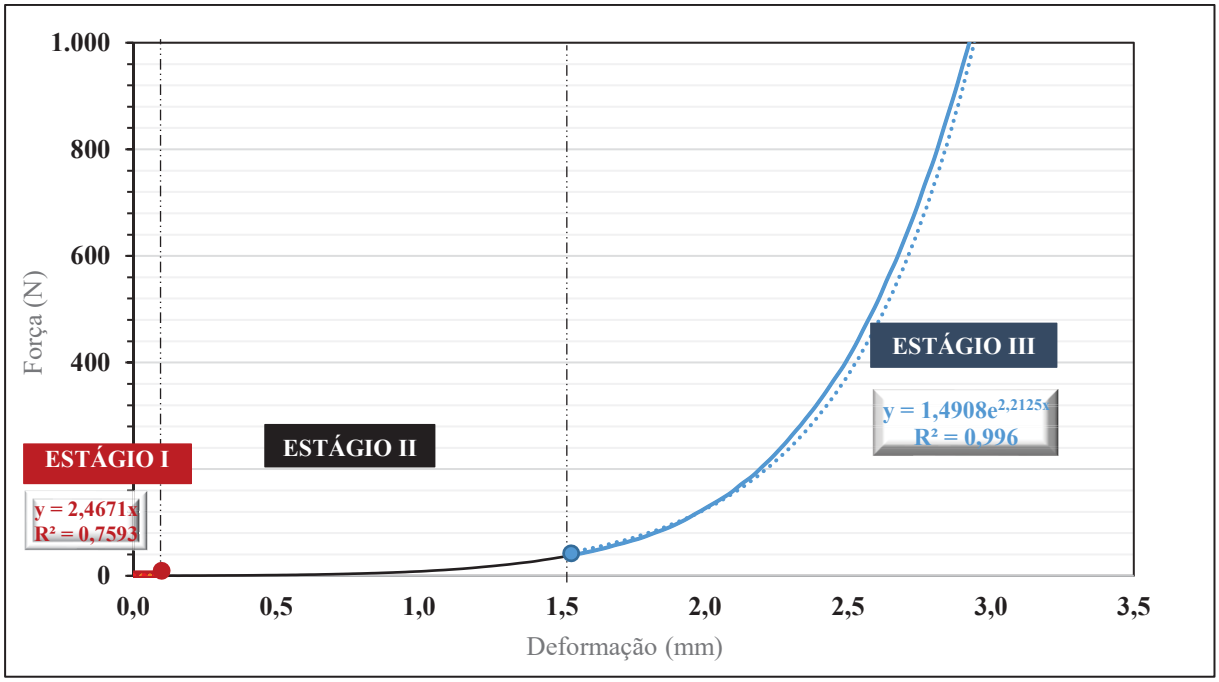


FONTE: Adaptado de CARDOSO *et al.* (2005).

O Limite de escoamento ($DE_{máx}$), também chamado tensão de limite elástico, ou tensão de escoamento, é a tensão máxima que o material suporta ainda no regime elástico de deformação. Caso ainda haja algum acréscimo de tensão, o material deixa de seguir a lei de Hooke e começa a sofrer deformação plástica (deformação definitiva). O $DE_{máx}$ foi calculado matematicamente com o auxílio do software Excel, com base em uma reta, partindo do ponto zero ao ponto de mudança de comportamento, obtendo assim a reta que melhor represente este comportamento, buscando o melhor ajuste, pois o coeficiente de determinação R^2 será o mais próximo de 1 possível da série em análise.

Já a definição do ponto de transição do regime plástico para o embricamento ($DP_{máx}$) foi determinado a partir de Cardoso (2009), pois no terceiro estágio há um aumento expressivo de carga necessário para obter deformações. Esse comportamento é representado por uma curva exponencial (tracejada) que buscou determinar, com o auxílio do software Excel, a equação matemática de uma curva exponencial com melhor ajuste matemático, ou seja, coeficiente de determinação R^2 o mais próximo de 1 possível. Dessa forma, traça-se uma curva exponencial do último ponto da curva obtido (estágio III) até o limite máximo R^2, sendo este o valor correspondente ao ponto que caracteriza o início do estágio de embricamento, o $DP_{máx}$. A figura 21 mostra a curva obtida por intermédio do *squeeze flow* de uma argamassa modelo sendo subdividida entre os estágios.

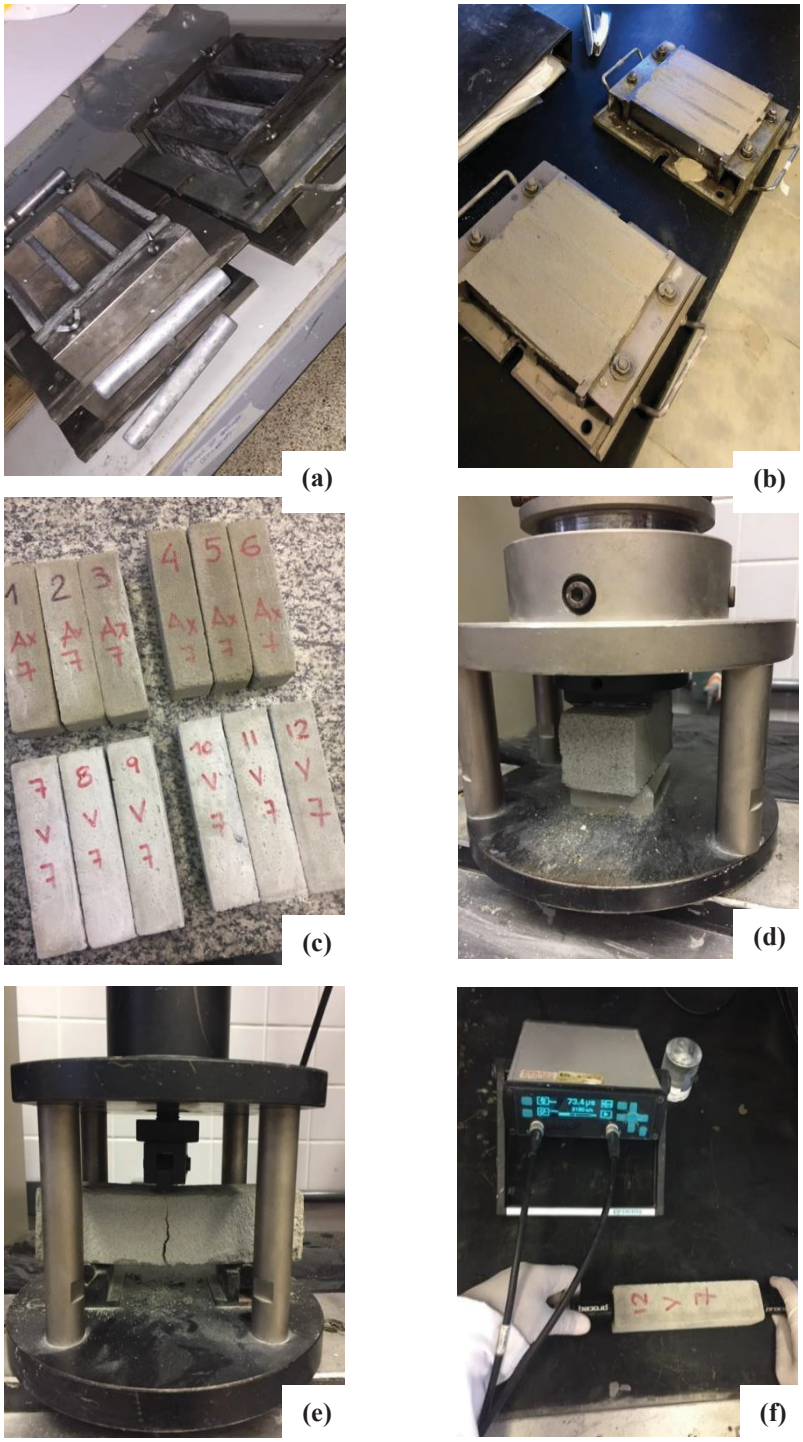
FIGURA 21 – SUBDIVISÃO DOS ESTÁGIOS NAS CURVAS DE *SQUEEZE FLOW* DA ARGAMASSA MODELO



FONTE: A autora (2021).

No estado endurecido, as argamassas foram caracterizadas conforme ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão (NBR 13279, ABNT 2005), módulo de elasticidade (NBR 15630, ABNT 2008) e densidade de massa aparente (NBR 13280, ABNT 2005). Os corpos de prova para esses ensaios foram os prismáticos com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm . Na figura 22, estão sendo mostrados alguns acessórios dos ensaios no estado endurecido.

FIGURA 22 – ACESSÓRIOS PARA ENSAIOS DA ARGAMASSA DE OBRAS NO ESTADO ENDURECIDO; (A) FORMAS; (B) MOLDAGEM; (C) CORPOS DE PROVA MOLDADOS; (D) ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO; (E) ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO; (F) ENSAIO COM ULTRASSOM



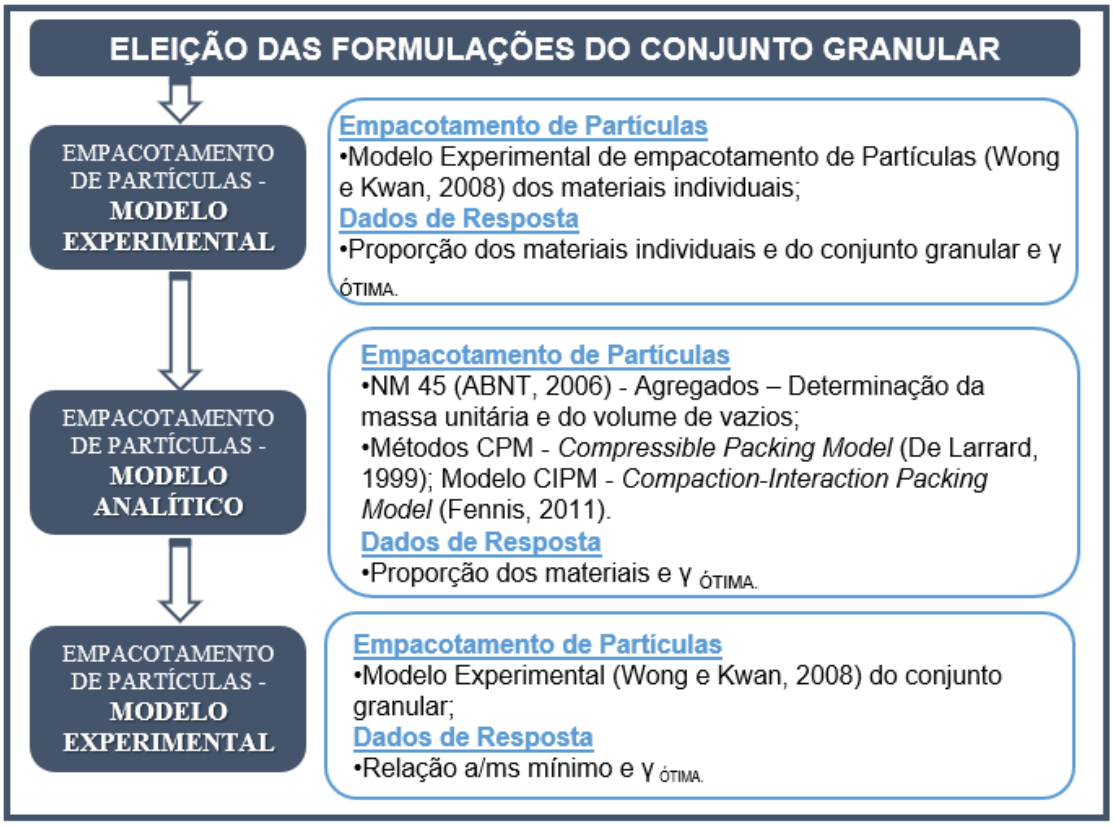
FONTE: A autora (2021).

A caracterização dos materiais utilizados na confecção de cada uma das argamassas está sendo demonstrados no Apêndice A.

3.2.2 ETAPA II – Estudo do empacotamento de partículas

Na figura 23 está apresentado o planejamento experimental detalhado da Etapa II, que tem como dados de resposta os valores de densidade de empacotamento dos materiais individuais, densidade de empacotamento das formulações (conjunto granular) e da água mínima requerida.

FIGURA 23– PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DA ETAPA II.



FONTE: A autora (2021).

Para a aplicação dos modelos de empacotamento de partículas, foi eleito um conjunto de formulações de argamassas usuais de obras, com base na prática de obras, outras vindas de literatura e outras oriundas de normas antigas, com indicativo de formulações (CARASEK, 2010; NBR 7200, ABNT, 1982; HENDRICKX, 2009; BSI-5628 (2005); GOMES; NEVES, 2002). A tabela 15 ressalta todas as formulações utilizadas e suas referências de aplicação.

TABELA 15 – FORMULAÇÕES DAS ARGAMASSAS DOSADAS EM LABORATÓRIO.

Referência das formulações	$AN_{1,87}$		$AN_{2,69}$		$AA_{2,04}$	
	Volume	**Massa**	**Volume**	**Massa**	**Volume**	**Massa**
F1- Obras	1:0,6:6	1:0,31:6,5	1:0,6:6	1:0,31:6,6	1:0,6:6	1:0,3:6,1
F2- GOMES e NEVES (2002); HENDRICKX (2009); BSI-5628; CARASEK (2010)	1:1:6	1:0,51:6,5	1:1:6	1:0,51:6,6	1:1:6	1:0,5:6,1
F3- CARASEK (2010)	1:2:6	1:1,02:6,5	1:2:6	1:1,02:6,6	1:2:6	1:1:6,1
F4- Formulação teste	1:2:7	1:1,02:7,6	-	-	-	
F5- BSI-5628 (2005); Obras	1:2:8	1:1,02:8,7	-	-	-	-
F6- CARASEK (2010); NBR 7200 (ABNT, 1982); HENDRICKX (2009); BSI-5628; Obras	1:2:9	1:1,02:9,8	1:2:9	1: 1,02:9,9	1:2:9	1:1,02:9,2
F7- CARASEK (2010)	1:2:10	1:1,02:10, 9	-	-	-	-
F8- CARASEK (2010)	1:2:11	1:1,02:12	-	-	-	-
F9- Obras	1:3:10	1:1,53:10, 9	-	-	-	-
F10- Teste	1:3:11	1:1,53:12	-	-	-	-

FONTE: A autora (2021).

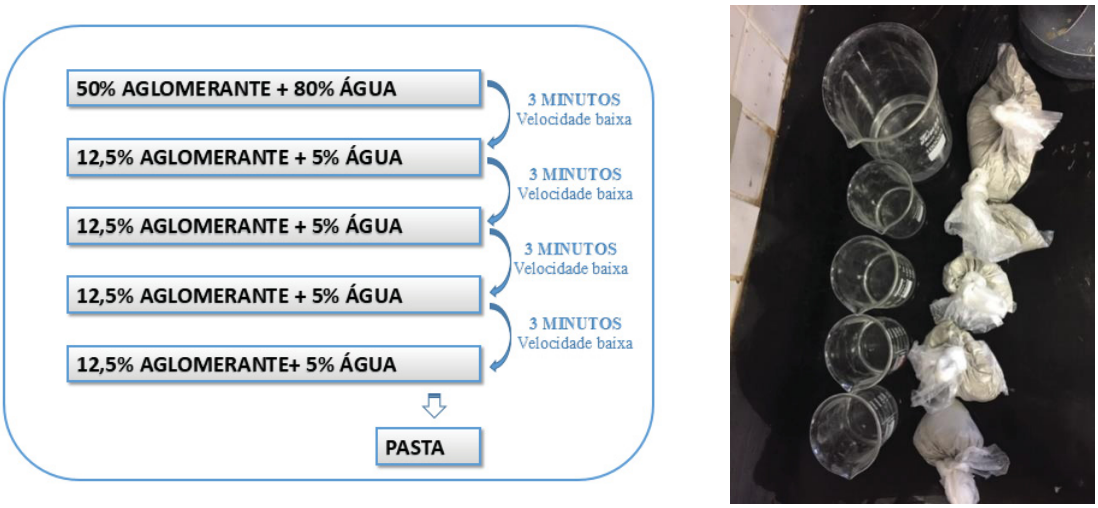
A aplicação dos modelos de empacotamento de partículas para as formulações descritas foi baseada em dois tipos: modelos analíticos de empacotamento de partículas e um método experimental. Os modelos analíticos foram: o modelo de empacotamento compressível (CPM - *Compressible Packing Model*) desenvolvido por De Larrard (1999) e o modelo de empacotamento compressível com interação – CIPM (do inglês *Compaction-Interaction Packing Model*), proposto por Fennis (2011). Os modelos se diferem pelo fato do modelo CIPM considerar aglomeração como efeito de interação entre as partículas, porém ambos determinam a densidade de empacotamento de materiais granulares. Todavia, como os métodos CPM e CIPM são modelos analíticos que calculam as densidades de empacotamento por meio de fórmulas matemáticas, em que são definidas variáveis de entrada para cálculo de uma ou mais variáveis de saída, optou-se pela verificação de ambos os métodos a partir do método experimental proposto por Wong e Kwan (2008a), que permite medir a densidade de empacotamento na presença de água, condição verificada nas misturas de argamassa. Com base no método Wong e Kwan (2008a), além de ser possível a identificação da densidade de empacotamento dos materiais individuais e das formulações, também há a possibilidade de obtenção da água mínima proposta.

Para o cimento, foi realizado o ensaio variando-se a relação água/materiais secos de 0,80 a 0,20 com intervalo a cada 0,10. No caso da cal, a variação de a/ms foi de 0,75 a 0,45 com intervalo a cada 0,05. Esses intervalos de a/ms tanto do cimento quanto da cal foram obtidos a partir de tentativas preliminares em laboratório. No caso dos agregados, a densidade de empacotamento (β) dos foi calculada, a partir do índice de vazios (IV), conforme equação 23, determinado segundo recomendações da norma NBR NM 45 (ABNT, 2006). O procedimento é justificado, pois, os agregados têm tamanhos de partículas grandes o suficiente para que forças gravitacionais predominem sobre as forças entre partículas, fato que ocorre para grãos com dimensões superiores a 100 µm (LEE *et al.,* 2003)

$$\beta_{agregado} = 1\text{-IV}(\%) \tag{23}$$

O procedimento de mistura que foi aplicado para cada material ensaiado individualmente, tendo sido adaptado do procedimento proposto por Wong e Kwan (2008a) e pode ser visualizado na figura 24.

FIGURA 24 – PROCEDIMENTO DE MISTURA PARA O CÁLCULO DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DOS MATERIAIS INDIVIDUAIS



FONTE: Adaptado Wong e Kwan (2008).

Nota-se que no procedimento de mistura original proposto por Wong e Kwan (2008a), o acréscimo de água é feito 100% na primeira etapa de mistura. Optou-se pela divisão de água,

igualmente proposta com o aglomerante para facilitar a mistura dos materiais evitando supostas aglomerações.

Para adquirir a densidade de empacotamento do conjunto granular e, consequentemente, da água mínima, optou-se pela mesma metodologia aplicada aos materiais de maneira individual. No entanto, acrescenta-se a etapa da mistura de todos os materiais secos: cimento, cal e agregado miúdo, antes da variação da a/ms. Para a aplicação do método Wong e Kwan (2008a) no conjunto granular das argamassas, tanto para o cálculo da densidade de empacotamento quanto para a quantidade de água mínima, foram necessários os seguintes dados de entrada:

A variação da relação água/materiais secos para as argamassas desenvolvidas com o agregado $AN_{1,87}$ foi de 0,08 a 0,20. Já para as argamassas com os agregados $AN_{2,69}$ e $AA_{2,04}$ a relação a/ms variou de 0,11 a 0,23. Para todos os agregados a variação foi de 0,03.

3.2.3 ETAPA III – Cálculo excesso de água

Para a etapa III desse estudo foi feito o cálculo do excesso de água com base nos resultados obtidos no ensaio de *squeeze flow,* que apresentará como dados de resposta as curvas com as análises reológicas das formulações para cada teor de água, a partir dos valores adquiridos de densidade de empacotamento por meio de Wong Kwan (2008a), quando foram obtidas as formulações com a máxima concentração de sólidos, mínimo índice de vazios e o teor mínimo de água necessário para a lubrificação das partículas. Partindo dos teores mínimos de água para cada formulação, foram acrescentados esses teores com intervalos de a/ms: 0,03, até que o ensaio de *squeeze flow* não pudesse mais ser desenvolvido. Assim, o ponto máximo de água obtido é representado pela impossibilidade da retirada do anel usado para moldar o corpo de prova de argamassa no ensaio sem o espalhamento da amostra no gabarito do ensaio, conforme figura 25. A técnica do ensaio de *squeeze flow* só é válida quando o material apresenta tensão de escoamento suficiente para manter sua forma após desmoldado (CARDOSO, 2009).

FIGURA 25 – MOLDAGEM DA ARGAMASSA PARA ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW*: (A) ARGAMASSA MOLDADA COM ANEL DO GABARITO; (B) ARGAMASSA SEM A PRESENÇA DO ANEL DO GABARITO SEM ESPALHAMENTO DO MATERIAL; (C) ARGAMASSA LOGO APÓS A RETIRADA DO GABARITO COM ESPALHAMENTO DO MATERIAL NO PRATO

FONTE: A autora (2021).

Além do ensaio de *squeeze flow,* também foram executados ensaios referentes à mesa de consistência (*flow table*) e a densidade de massa no estado fresco. Com base nas equações (8) e (9), destacadas no capítulo 2, também foi possível o cálculo da viscosidade e da tensão de escoamento respectivamente. O excesso de água foi desenvolvido acrescentando pequenos volumes de água, a partir da água mínima até que não fosse mais possível o desenvolvimento do ensaio. O objetivo desse incremento de água é fazer com que a argamassa tenha um teor de água ideal que favoreça propriedades no estado fresco, como no caso a trabalhabilidade.

O ensaio de *squeeze flow* foi realizado de acordo com a norma NBR 15839 (ABNT, 2010). As configurações do equipamento estão descritas na sequência:

- As amostras foram desenvolvidas com 10mm de altura e 101mm de diâmetro;
- Utilizou-se no equipamento uma célula de carga de 5kNA;
- A velocidade de descolamento foi considerada em 1mm/s. De acordo com Cardoso (2009), a velocidade recomendada para esse ensaio pode variar de 0,1mm/s a 3mm/s, já que essa faixa atua dentro dos fenômenos práticos que ocorrem na aplicação da argamassa de revestimento ao substrato. No entanto, esse intervalo de velocidades também é indicado por ser facilmente realizado pela grande maioria dos equipamentos que executam o referido tipo de ensaio.
- Foram desenvolvidas 3 repetições de CP, sendo que o intervalo de ensaios era desenvolvido com a argamassadeira coberta por um pano úmido, evitando a evaporação de água na mistura.

Paralelamente ao cálculo do excesso de água foi desenvolvida uma metodologia para o cálculo de volume de pasta (V_{pasta}), juntamente com o volume de excesso de pasta ($V_{pEx.}$) e volume de pasta compactada ($V_{pComp.}$), conforme equações 24, 25 e 26.

$$V_{pasta} = V_{cim} + V_{cal} + V_{água} + V_{ag.pass\#100} \quad (24)$$

$$V_{pComp} = (1-\beta_i)\ x\ V_{ag.pass\#100} \quad (25)$$

$$V_{pEx.} = V_{pasta} - V_{pComp.} \quad (26)$$

No cálculo do volume de pasta há a inclusão dos finos do agregado miúdo, passante na #100, além dos aglomerantes e água. Onde:

V_{pasta}: volume de pasta na argamassa (m^3);

$V_{pComp.}$: volume de pasta compactada nos vazios da areia (m^3);

$V_{pEx.}$: volume de pasta que excede os vazios da areia (m^3);

$V_{cim.}$: volume de cimento na argamassa (m^3);

$V_{cal.}$: volume de cal na argamassa (m^3);

$V_{ag.pass\#100.}$: volume de areia (finos) passante na #100 na argamassa (m^3);

βi: densidade de empacotamento do conjunto granular obtida por meio do modelo Wong e Kwan (2008);

De forma complementar, calculou-se também através do parâmetro de espessura máxima de agregados e da pasta, o MPT e o IPS. O MPT (*Maximum Paste Thickness*) é a distância de separação entre partículas grossas, como os agregados miúdo e graúdo (concreto) e representada pela equação 27 (POWERS, 1968 *apud* Cardoso (2009); HU; LARRARD, 1995). De forma similar há o cálculo do IPS (*Interparticle Separation Distance*), que considera o efeito entre a distribuição granulométrica e, ainda, o efeito que das partículas em contato quando o teor de líquido for menor que o volume de poros do sistema (PILEGGI, 2001), sendo expressa conforme equação 28 (FUNK; DINGER,1994).

$$MPT = \frac{2}{VSA_g} x \left[\frac{1}{V_{Sg}} - \left(\frac{1}{1-P_{ofg}}\right)\right] \quad (27)$$

$$IPS = \frac{2}{VSA} x \left[\frac{1}{V_S} - \left(\frac{1}{1-P_{of}}\right)\right] \quad (28)$$

Onde:

VSA: área superficial volumétrica (m²/cm³), calculada a partir do produto entre a densidade real e a área superficial específica;

VSAg : a área superficial volumétrica do agregado graúdo (m²/cm³);

VS é a fração volumétrica de sólidos;

VSg é a fração volumétrica do agregado graúdo do sistema;

Pofg: porosidade da distribuição das partículas do agregado graúdo nas argamassas.

Pof : fração de poros no sistema quando todas as partículas estão em contato na condição de máximo empacotamento.

3.2.4 ETAPA IV – Caracterização no estado endurecido

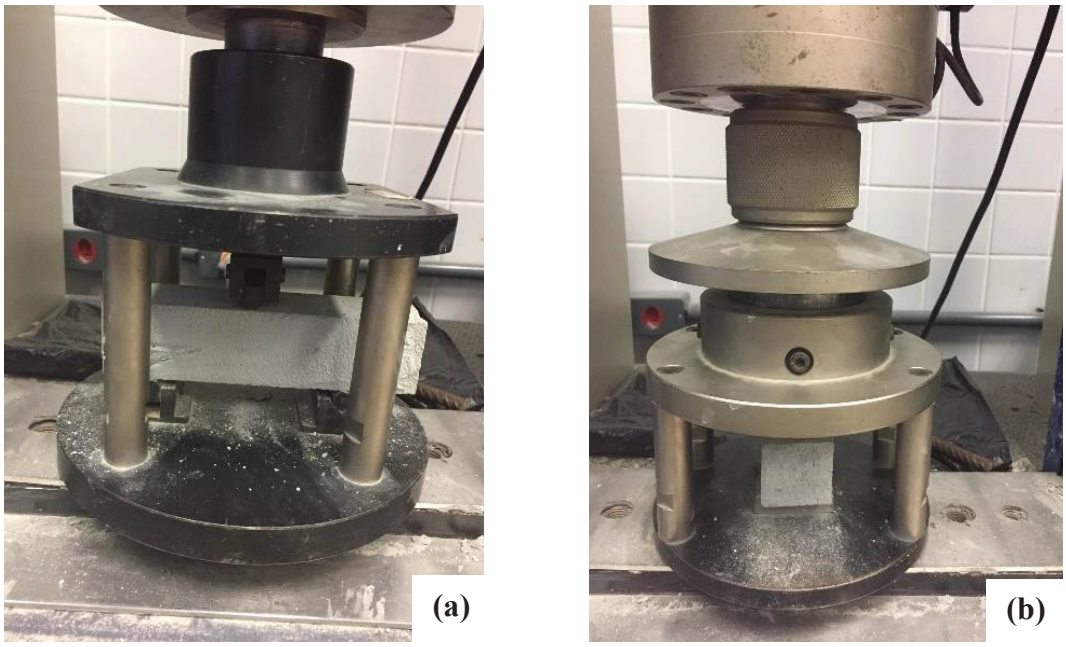
Por fim, optou-se pela análise de algumas das propriedades da argamassa no estado endurecido. Os ensaios executados foram: resistência à compressão e à tração na flexão (NBR 13279:2005), módulo de elasticidade (NBR 15630:2008) e densidade de massa aparente (NBR 13280:2005).

Para todos os ensaios propostos nessa etapa da pesquisa, foram necessárias as moldagens de três corpos de prova, para cada formulação a ser analisada, na idade de 28 dias. As moldagens foram desenvolvidas nos corpos de prova com dimensão de 40 x 40 x 160 mm, conforme procedimentos descritos na norma NBR 13280 (ABNT, 2005). Os corpos-de-prova, moldados segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005), foram desmoldados após 24 horas e permaneceram em sala climatizada com temperatura de (21±2)ºC.

A resistência à compressão das argamassas de revestimento não necessariamente poderá ser elevada, visto que o aumento dessa propriedade eleva também o módulo de elasticidade, responsável pela absorção da deformação existente no material. Contudo, a norma NBR 13.281 (ABNT, 2005), revisada em 2005, altera um dos requisitos considerados na norma de 2001 quanto às resistências da argamassa, que era tida como aceitável a partir de 0,1Mpa e hoje se inicia a partir de 2MPa.

A execução dos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão, foi determinada por intermédio da prensa EMIC utilizando uma célula de carga de 30 kN, conforme ilustra a figura 26.

FIGURA 26 – ENSAIOS MECÂNICOS: (A) RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO; (B) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

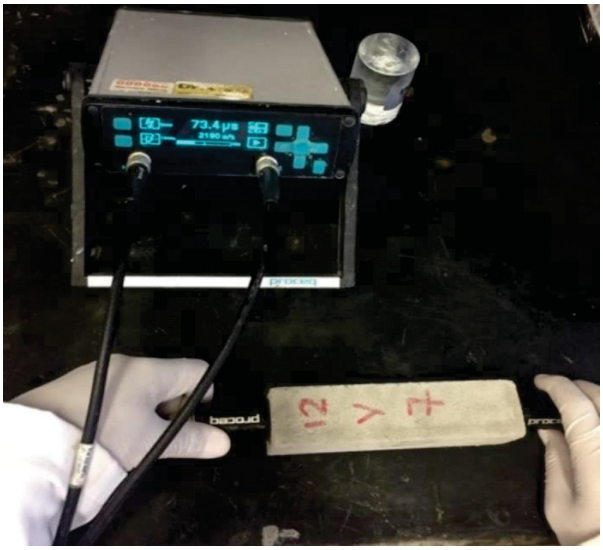


FONTE: A autora (2021).

A utilização do ensaio de tração na flexão proposto pela NBR 13279 (ABNT, 2005) mostra-se como um parâmetro importante de correlação com a resistência de aderência das argamassas de revestimento. No entanto, essa tendência de correlação entre a resistência à tração na flexão e a resistência de aderência não é direta, uma vez que há outros fatores relevantes que devem der estudados, como formulação, granulometria dos agregados, comportamento reológico, tipos de substratos, qualidade de aplicação, entre outros.

Com relação ao ensaio para a obtenção do módulo de elasticidade (Ed), é a norma NBR 15630 (ABNT, 2008) que preconiza os procedimentos de ensaio por meio da propagação de onda ultrassônica, por meio do equipamento chamado PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*), conforme figura 27:

FIGURA 27 – DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA ATRAVÉS DO EQUIPAMENTO PUNDIT



FONTE: A autora (2021).

O módulo de elasticidade é calculado com base na equação 29, sendo que ρ é densidade de massa no estado endurecido (kg/m³); V é a velocidade que a onda ultrassônica leva para percorrer o corpo-de-prova no sentido longitudinal (km/s) e v = coeficiente de Poisson que, de acordo com Callister (2002), é a razão entre a deformação transversal e longitudinal quando um corpo de prova é submetido a uma carga de compressão axial. O coeficiente de Poisson para as argamassas varia em torno de 0,10 a 0,20, sendo tanto menor quanto menor for a capacidade de deformação da argamassa (CARNEIRO, 1999). Para o estudo proposto, foi adotado um valor v de 0,20.

$$E_d = \gamma . V^2 . \frac{(1+v).(1-2v)}{1-v} \tag{29}$$

A velocidade da onda (V) ultrassônica foi obtida utilizando a equação 30, sendo que d é a altura do corpo de prova (km) e t é o tempo (s).

$$V = \frac{d}{t} \tag{30}$$

Os tratamentos estatísticos basicamente ocorreram por meio do método de Chauvenet, ANOVA e modelo de regressão múltipla, a partir do *software TS-Sisreg*. O *Chauvenet* foi

utilizado para remover dados discrepantes em relação à média amostral. Primeiro, é calculado o módulo da diferença entre a leitura aferida e a média amostral. Caso esse valor seja superior ao produto entre o desvio padrão amostral e um coeficiente tabelado (τ), que leva em consideração o número de elementos na amostra, a leitura é interpretada como um *outlier*, ou seja, um dado discrepante em comparação aos demais. Posteriormente, foi feita a análise de variância com o ANOVA que analisa os dados a partir das hipóteses H0 (hipótese nula) e H1 (hipótese alternativa), de forma que se for aceita a H0, entende-se que as médias dos grupos não se diferem de maneira estatisticamente significativa. Em contrapartida, se H0 for rejeitada, verifica-se que pelo menos uma das médias difere das demais, garantindo a influência exercida pela variável analisada. A condição das hipóteses é avaliada por intermédio do P-valor ou probabilidade de significância. Cada uma das hipóteses é testada a um nível de significância α que, para a pesquisa proposta, foi estabelecido em 5% (α=0,05), sendo que, dessa forma, o nível da confiança do teste é de 95%. Já modelo de regressão múltipla, a partir do *software TS-Sisreg,* foi aplicado na avaliação de mais de uma variável independente, gerando uma correlação ente elas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão ressaltados os resultados e discussões do programa experimental subdividido em cinco tópicos: caracterização das argamassas retiradas de obras, estudo do empacotamento de partículas, cálculo do excesso de água e propriedades no estado endurecido, conforme descrito no capítulo 3 e, com base nas análises dos dados, a proposição de diretrizes para dosagem de argamassas. Utilizou-se para o tratamento de alguns dados o método de análise de variância (ANOVA) e o modelo de regressão múltipla por meio do *software TS-Sisreg*. O ANOVA foi utilizado com o intuito de se comparar todas as médias em um único teste e identificar a significância de dados entre eles, de modo a garantir a confiabilidade dos resultados em 95%. Já o modelo de regressão múltipla foi utilizado no exame das formulações, com diferentes tipos de variáveis dependentes e independentes para análise tanto no estado fresco quanto endurecido.

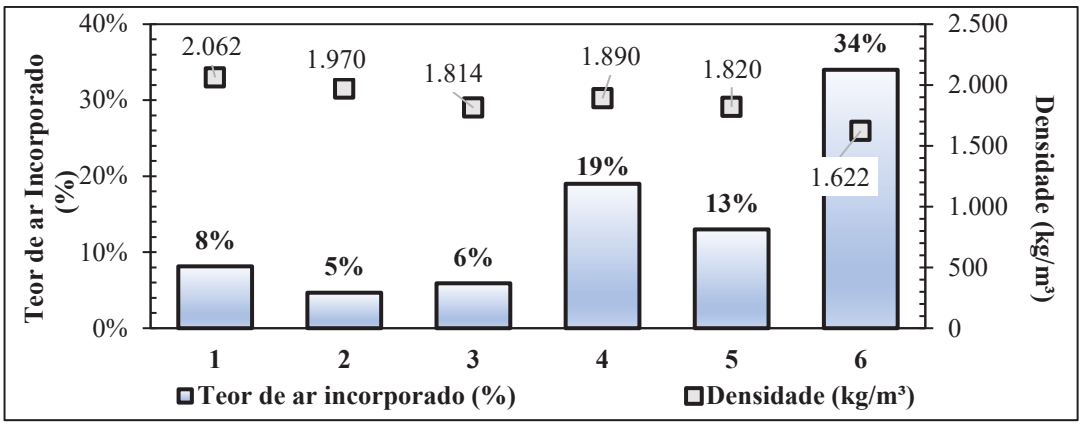
4.1 ETAPA I: CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS

Nesta etapa de análise, serão salientadas as discussões de resultados obtidos no estado fresco e endurecido das sete argamassas retiradas de obras estudadas. Com o objetivo de ampliar as discussões do comportamento reológico das argamassas, foram eleitas também algumas argamassas produzidas em obras (viradas em obra), indicadas na literatura, como descrito no capítulo 2.

4.1.1 Caracterização das argamassas no estado fresco

A figura 28 destaca os resultados de densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado das argamassas de obra, obtidos por meio da norma NBR 13278 (ABNT, 2005).

FIGURA 28 – DENSIDADE DE MASSA NO ESTADO FRESCO E TEOR DE AR INCORPORADO DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS

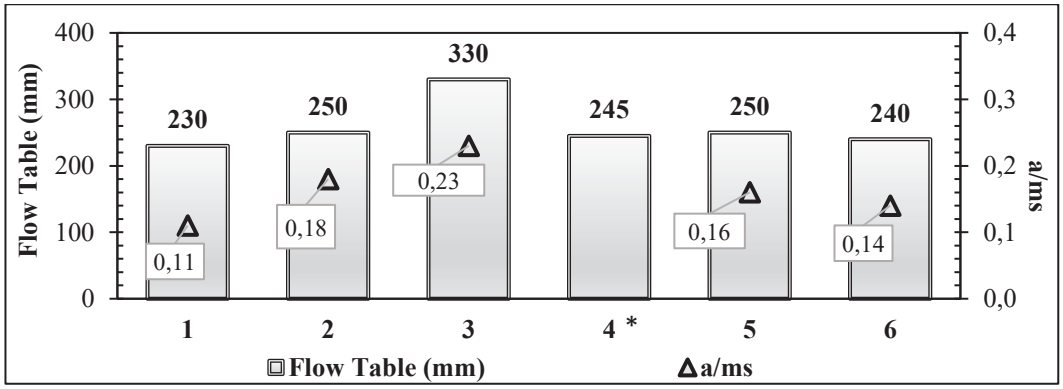


FONTE: A autora (2021).

Quanto às densidades de massa no estado fresco, as argamassas estudadas tiveram densidade entre 1622 e 2062 kg/m³, sendo que cinco delas são classificadas como D4 (1600 kg/m³ a 2000 kg/m³), conforme NBR 13281 (ABNT, 2005). Somente a argamassa O1 apresenta-se com classificação D5 (1800 kg/m³ a 2200 kg/m³). Como era esperado, as argamassas industrializadas, por possuírem maior teor de ar incorporado, devido à adição de aditivos, evidenciam densidade no estado fresco em média 9,6% menor que as argamassas produzidas em obra. Para Carasek (2010), argamassas contendo massa específica menor que 1400 kg/m³ são classificadas como argamassas leves, já as argamassas convencionais têm massa específica entre 1400 e 2300 kg/m³.

Na figura 29, estão os resultados do ensaio de determinação do índice de consistência (*flow table*) de cada argamassa de obra com seus respectivos teores de água/materiais secos (a/ms).

FIGURA 29 – ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS



*I4: argamassa estabilizada sem a informação da relação a/ms

FONTE: A autora (2021).

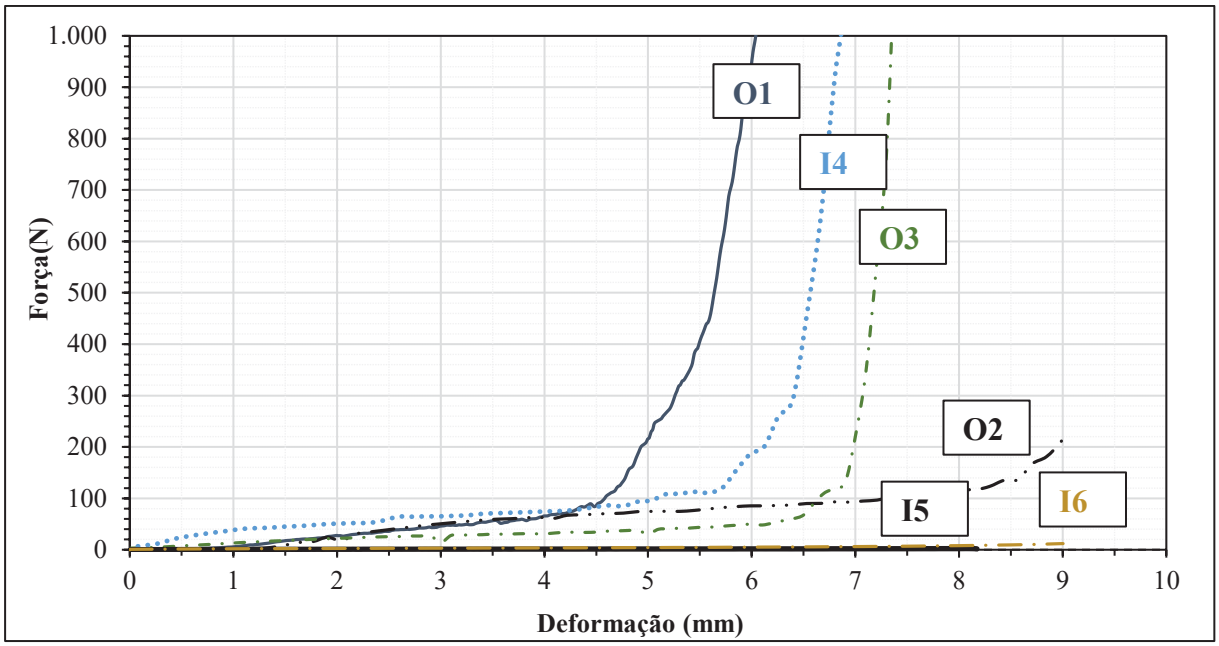
De acordo com a Figura 29, nota-se que o índice de consistência das argamassas retiradas de obras se apresentaram entre 230 e 330 mm. Com a exceção da O3, as demais argamassas, tanto as produzidas em obras quanto as industrializadas, tiveram em média o índice de consistência de 240 ± 10 mm. Para a argamassa I4, não foi possível a obtenção do teor de água, pois se trata de uma argamassa estabilizada, que é disponibilizada úmida, com o teor de água fixado pelo fornecedor.

A NBR 16541 (ABNT, 2016) recomenda que as argamassas industrializadas evidenciem um índice de consistência de 260 mm ± 5 mm, quando o teor de água não é especificado pelo fornecedor. As argamassas produzidas em obra não têm nenhum parâmetro normativo que recomende o índice de consistência e, na bibliografia, não há um consenso quanto ao índice a ser adotado. Conforme Formosa *et al.* (2011), uma consistência de 190 ± 10 mm garante as funcionalidades necessárias para a argamassa de revestimento. Gomes e Neves (2002) indicam índices de consistência de 260 ± 10 mm, Silva (2011) e Lara (1995) recomendam 280 ± 10 mm a 320 ± 10 mm e Stolz (2015) recomenda 240 ± 10 mm. Internacionalmente, esse parâmetro também sofre divergência, visto que os materiais são locais e se apresentam distintos em sua caracterização. Hendrickx (2009) cita a utilização de um índice de consistência de 155 ± 10 mm na Bélgica. Neno *et al.* (2014), utilizando materiais portugueses, destacam um índice de consistência de 175 ± 10 mm. Observa-se que os valores variam bastante segundo as recomendações dos pesquisadores, que pode ser justificado pela variedade de insumos disponíveis dentre os países citados.

O índice de consistência por muito tempo foi considerado como a única forma de mensurar a trabalhabilidade das argamassas, porém os resultados obtidos são plotados por meio do índice de consistência ou porcentagem de espalhamento e não em termos de unidades reológicas (viscosidade e tensão de escoamento).

A caracterização reológica das argamassas retiradas de obras foi avaliada a partir do método de *squeeze flow*, de acordo com a NBR 15839 (ABNT, 2010), e os resultados estão destacados na figura 30.

FIGURA 30 – ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW* DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS



FONTE: A autora (2021).

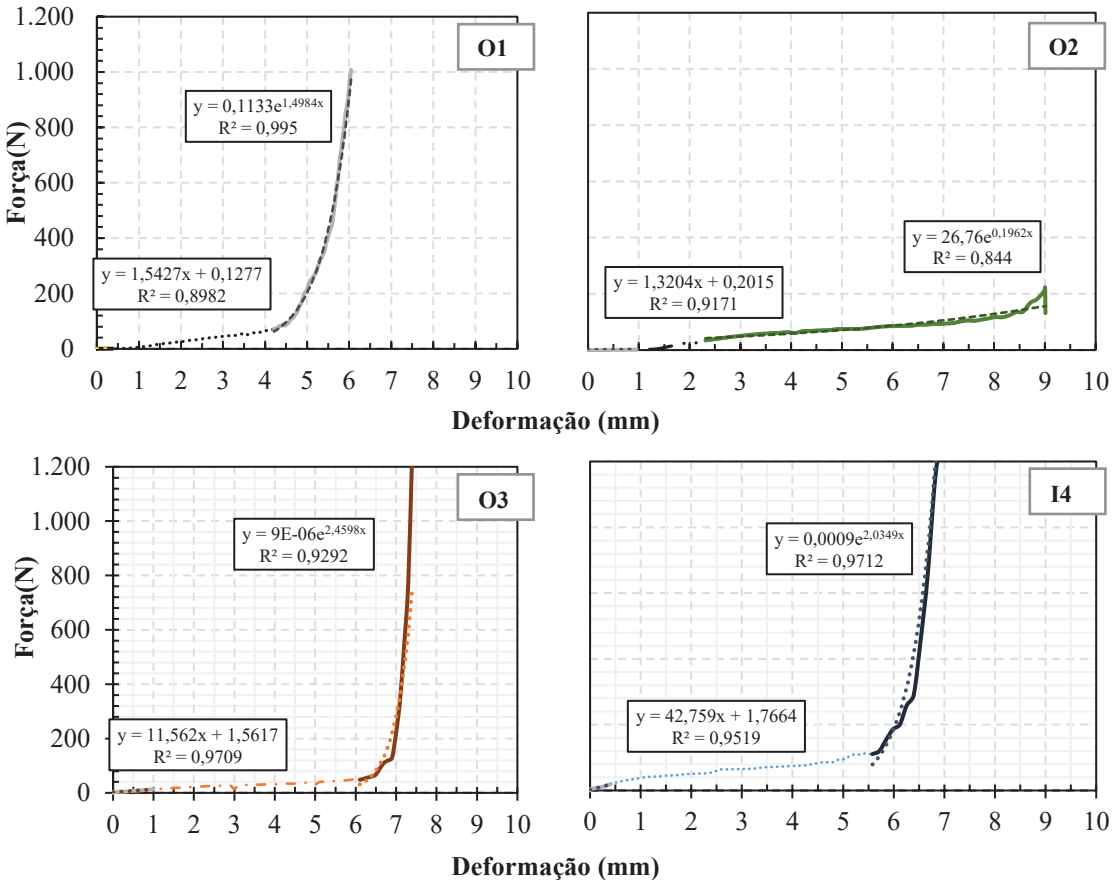
A partir das curvas obtidas com os ensaios de *squeeze flow* (figura 30), foi possível determinar a deformação (mm) e a força (N) nos pontos de mudança do estágio elástico para o plástico, correspondente à deformação elástica máxima ($DE_{máx}$) e à força elástica máxima ($FE_{máx}$). Isso foi feito nos pontos de mudança do estágio plástico para o embricamento correspondente à deformação plástica máxima ($DP_{máx}$), e à força plástica máxima ($FP_{máx}$), conforme Tabela 16. As variações da deformação (Δ_{def}) e da força ($\Delta_{força}$) são apresentadas e definidas a partir das equações (31) e (32). Quando comparadas as curvas resultantes do ensaio de *squeeze flow* para a análise reológica das argamassas, quanto maior é o Δdef., portanto mais extenso o estágio plástico (estágio II), melhor será o desempenho à aplicação das argamassas de revestimento. A capacidade de deformar-se, então, indica uma argamassa que poderia ser mais facilmente espalhada, especialmente se associada a uma força mais baixa, indicando um menor esforço requerido do operário de obra que realiza o serviço.

$$\Delta def = DP_{máx} - DE_{máx} \quad (31)$$

$$\Delta F = FP_{máx} - FE_{máx} \quad (32)$$

A figura 31 mostra as curvas resultantes do ensaio de *squeeze flow*, com suas respectivas linhas de tendências representadas pela equação de uma reta, na mudança de fase do estágio I para o II (DE_{max}), e pela equação exponencial, na mudança de fase do estágio II para o III (DP_{max}). Os resultados numéricos estão ressaltados na tabela 16.

FIGURA 31 – LINHAS DE TENDÊNCIAS DAS CURVAS DO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW* DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS COM A INDICAÇÃO DO Δ_{DEF} E DO Δ_F



FONTE: A autora (2021).

TABELA 16 – PONTOS DE MUDANÇA DE ESTÁGIO DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS

Arg.	DE_{max}		Equação linear de tendência	R^2	DP_{max}		Equação exponencial de tendência	R^2	Δdef. (mm)	ΔF (mm)
	Deformação (mm)	Força (N)			Deformação (mm)	Força (N)				
O1	0,38	0,8	y = 1,5427x + 0,1277	0,8982	4,2	71,3	$y = 0,1133e^{1,4984x}$	0,9942	3,8	70,5
O2	1,00	1,5	y = 1,3204x + 0,2015	0,9171	2,3	34,4	$y = 26,76e^{0,1962x}$	0,9201	1,3	32,9
O3	1,00	13,1	y = 11,562x + 1,5617	0,9709	6,1	48,1	$y = 9E\text{-}06e^{2,4598x}$	0,9169	5,1	35
I4	0,40	20,2	y = 42,759x + 1,7664	0,9519	5,6	110,8	$y = 0,0009e^{2,0349x}$	0,9695	5,2	90,6

FONTE: A autora (2021).

A partir da tabela 16, nota-se que os valores de DE_{max} e DP_{max} variaram consideravelmente entre as argamassas retiradas de obras estudadas. Para as argamassas

industrializadas I5 e I6, não foi possível a obtenção do Δdef., devido a ambas permaneceram no estágio II até o final do ensaio, como mostrado nas curvas de *squeeze flow* (ver figura 31). A presença de aditivos faz com que o comportamento das argamassas industrializadas no estado fresco se torne bastante complexo, visto que, além da natureza reativa, elas sofrem interferências das ações mecânicas da mistura (energia de mistura) que são necessárias na ativação química desses aditivos. Ademais, a presença de aditivo incorporador de ar no sistema, fato comum nesses tipos de argamassas, por exemplo, faz com que sejam reduzidas de maneira considerável as cargas necessárias para o material se deformar, tornando o comportamento do material predominantemente plástico. As bolhas de ar aumentam o volume ocupado pela pasta reduzindo sua resistência e, consequentemente, promovendo facilidade do fluxo da pasta e o escorregamento dos agregados (CARDOSO, 2009). A argamassa I4, apesar de ser uma argamassa industrializada, apresentando aditivos entre os seus insumos, ainda assim foi possível a obtenção do ponto de mudança de estágio entre o plástico para o embricamento, conforme demonstrado através da figura 30.

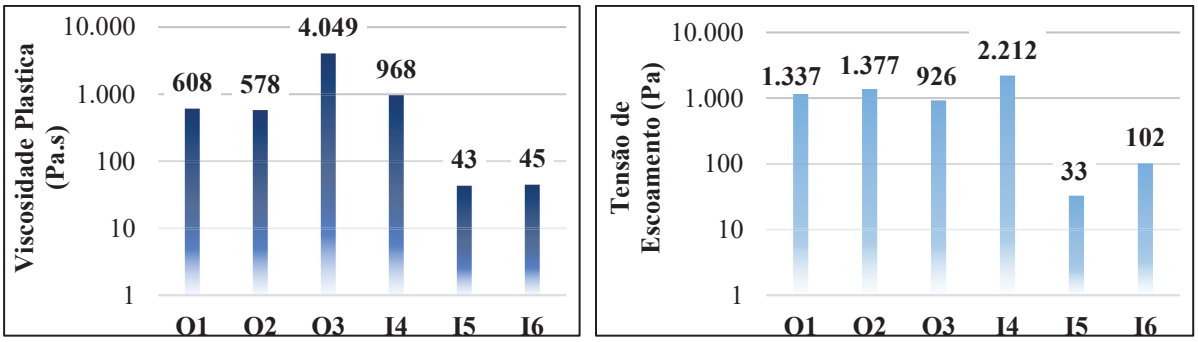
A variação da deformação (Δ_{def}) entre as argamassas retiradas de obras estudadas ficou entre 1,3 e 5,2 mm. Apesar da variação nos resultados, é importante ressaltar que todas as argamassas foram utilizadas pelos operários das obras, tidas como trabalháveis e de fácil aplicação. As argamassas O3 e O4 apresentaram os maiores valores de Δ_{def} (5,1 e 5,2 mm, respectivamente), o que significa na prática que ambas são aparentemente mais trabalháveis, quando comparadas com as demais, indicando a necessidade de esforço inferior de aplicação pelo operário. Por fim, as argamassas O1 e O2 apresentaram os menores valores de Δ_{def}, indicando um comportamento mais coeso e viscoso do material, em relação às demais argamassas. Ressalta-se que, ainda assim, foram levadas em conta argamassas trabalháveis pelos operários das obras correspondentes.

Como era previsto, não foi visualizado um ΔF expressivo nas argamassas que se apresentam no estágio II, tendo em vista de que esse valor só tomará uma grande proporção quando a argamassa passar do estágio plástico para o embricamento. A força aplicada no ensaio de *squeeze flow* está diretamente ligada a aproximação das partículas ou de outros constituintes de um sistema quando submetido a grandes deformações. Assim, pode ocorrer de um acréscimo dessa força em um ponto do gráfico de resultados, justificado através da maior interação de partículas, que pode ser por embricamento ou entrelaçamento das unidades móveis do sistema

multifásico que a argamassa se apresenta, onde as forças de atrito acabam sendo predominantes (ENGMANN *et al.,* 2005).

Tendo em vista os resultados obtidos no ensaio de *squeeze flow,* aplicou-se a metodologia de Meeten (2000) para determinar a viscosidade plástica (η) e a tensão de escoamento (σ_o) das argamassas retiradas de obras, a partir das equações (8) e (9) demonstradas no capítulo 2. Esta metodologia recomenda um valor fixo de deformação para a obtenção de ambos os parâmetros. Para esse caso, a deformação foi fixada em 2,50 mm, igualmente arbitrada por alguns trabalhos bibliográficos (CARDOSO *et al.*, 2005; CARDOSO, 2009, SILVA, 2011; KUDLANVEC, 2017). Os resultados estão expostos na figura 32.

FIGURA 32 –VISCOSIDADE PLÁSTICA (A) E TENSÃO DE ESCOAMENTO (B) DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS NA DEFORMAÇÃO 2,5 MM



FONTE: A autora (2021).

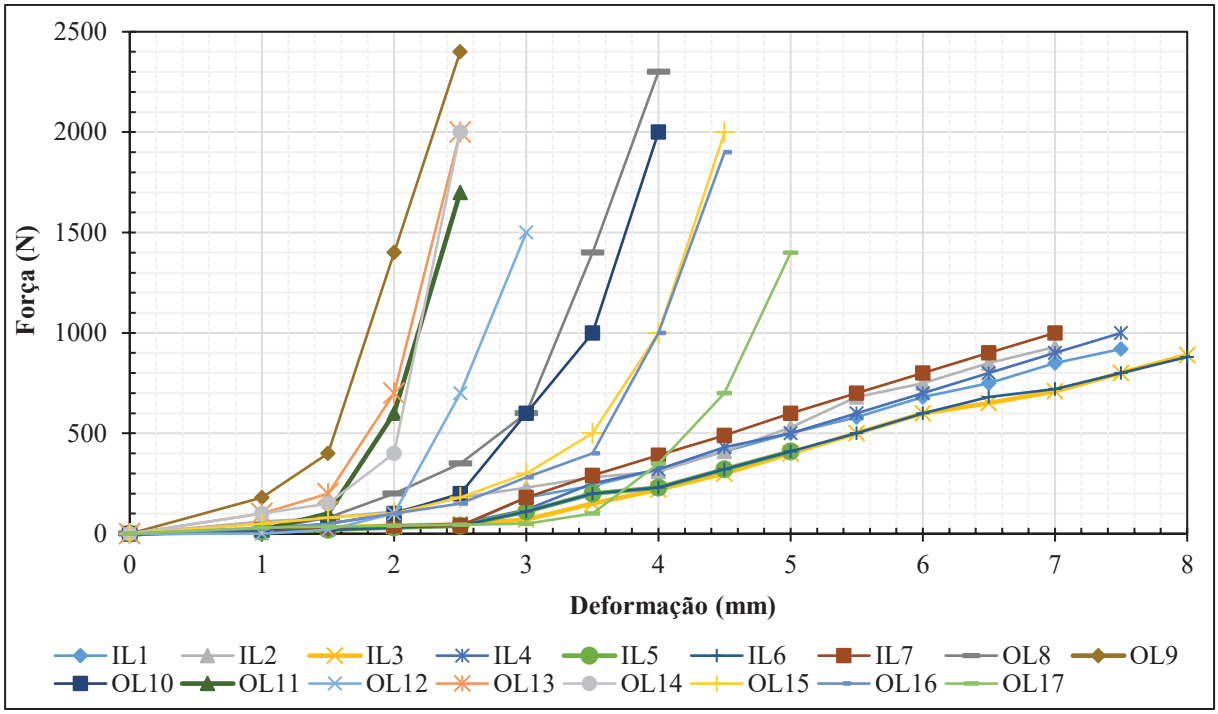
Os resultados de viscosidade plástica e de tensão de escoamento podem ser divididos em três grupos: argamassas produzidas em obras (O1, O2 e O3), argamassa estabilizada (I4) e as argamassas industrializadas anidras (I5 e I6). O primeiro grupo é composto por argamassas produzidas em obras que tiveram um comportamento semelhante, exceto a O3 que se destacou por se apresentar com viscosidade bem mais elevada em comparação as demais. A argamassa I4 (estabilizada) é uma argamassa úmida, que se estende por até 72 horas, cuja sua trabalhabilidade é garantida por meio do processo de estabilização que depende de um controle rigoroso nos parâmetros de dosagem, sobretudo nos teores de aditivos como o ar incorporado e os estabilizadores, que permitem a manutenção da trabalhabilidade das argamassas ao longo do tempo (GUINDANI, 2018). Essa tecnologia faz com que a argamassa I4 apresente valores de viscosidade e tensão de escoamento diferentes tanto das argamassas produzidas em sua totalidade em obra e das industrializadas. No caso das argamassas anidras, há uma similaridade

tanto na viscosidade quanto na tensão de escoamento por se tratar de argamassas com um maior controle tecnológico e argamassas industriais.

Vale ressaltar que, tanto a viscosidade quanto a tensão de escoamento, foram calculadas na deformação 2,5 mm, o que não representa de forma completa o comportamento reológico de cada uma das argamassas. É possível observar que não há uma compatibilização de dados entre Δdef. e os cálculos de viscosidade e tensão de escoamento. As argamassas O3 e O4, por exemplo, tiveram maiores Δdef., ou seja, argamassas com pouco coesas, o que não foi possível visualizar nos seus resultados de viscosidade e tensão de escoamento. No cálculo da viscosidade, é necessário assumir um tipo de solicitação, que pode ser elongacional ou cisalhamento. Assim, para a aplicação do modelo de fluxo, faz-se necessário os dados de carga, altura inicial e instantânea da amostra e taxa de descolamento (CARDOSO, JOHN; PILEGGI, 2009) que, nesse caso, foi de 2,5 mm. Os modelos de solicitação têm validade para fluxo homogêneo, o que não ocorre no comportamento das argamassas em sua totalidade.

Tendo em vista a amplitude de resultados apresentados no ensaio de *squeeze flow* para as argamassas retiradas de obras e buscando definir parâmetros reológicos que representem argamassas trabalháveis, desenvolveu-se uma busca na literatura sobre argamassas produzidas em obras e caracterizadas por meio do ensaio de *squeeze flow*. Ao todo, foram encontradas dezessete argamassas, divididas entre argamassas industrializadas (IL: a letra I indica industrializada e a letra L que os resultados de caracterização foram obtidos da literatura) e argamassas produzidas *in loco* em obras (OL: a letra O indica argamassas produzidas em obras e L indica que os resultados de caracterização foram obtidos da literatura). As argamassas estão divididas de acordo com a sua referência bibliográfica, sendo IL1 a IL7 (CARDOSO, 2009); OL8 a OL10 (FREITAS *et al.,* 2010); OL11 e OL12 (SILVA, 2011); OL13 a OL15 (STOLZ, 2015) e OL16 E OL17 (FUKUI *et al.,* 2018), tal como na figura 33. Os valores de $DP_{máx}$ estão na tabela 17.

FIGURA 33 – RESULTADOS DO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW DAS* ARGAMASSAS PRODUZIDAS EM OBRAS OBTIDAS DA LITERATURA



FONTE: A autora (2021).

TABELA 17 – VALORES DE $DP_{MÁX}$ DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS *IN LOCO* DE OBRAS DA LITERATURA

Argamassas	DP_{max}	
	Deformação (mm)	Força (N)
O8	2,0	200
O9	1,5	180
O10	2,0	100
O11	1,5	100
O12	2,0	270
O13	1,5	200
O14	1,5	150
O15	2,0	100
O16	2,5	150
O17	3,0	50

FONTE: A autora (2021).

Com base na tabela 17, verifica-se que não foi possível a obtenção do $DP_{máx}$ das argamassas industrializadas da literatura, tendo em vista que, por se apresentarem bem plásticas (estágio II), não entraram no estágio III da curva do ensaio de *squeeze flow,* através da metodologia já apresentada, tendo em vista de que as curvas permanecem no estágio II sem a

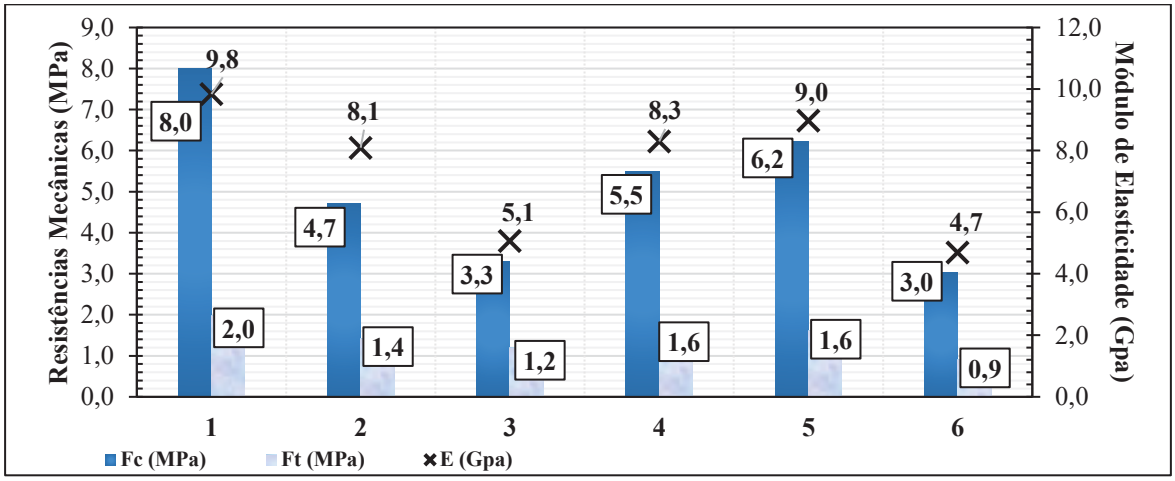
mudança exponencial para o estágio III. Já a partir da figura 33, observou-se uma grande variedade de comportamentos para as argamassas, quanto é possível visualizar desde argamassas com maiores deformações e baixas cargas até mesmo algumas que entram no estágio III muito rapidamente. Independente do comportamento observado para estas argamassas obtidas da literatura, ressalta-se a diferença entre estas e as argamassas retiradas de obras, estudadas no trabalho proposto, mostradas previamente na figura 33. Observa-se que dentre as argamassas de obras estudadas (exceto as argamassas industrializadas), todas obtiveram como resultado de força, inferior a 270 N (tabela 17 e figura 33) para atingir o comportamento em estágio III . Entretanto mesmo com uma diferença significativa entre as argamassas produzidas em obras, todas foram tidas como adequadas para aplicação em revestimentos, tanto com resultados baseados na literatura quanto pela verificação da aplicação em obra (caso das seis argamassas de obra estudadas).

Diante desta variação encontrada nos resultados, verifica-se uma limitação quanto a definição numérica desses limites aplicada aos parâmetros reológicos (argamassas trabalháveis), onde se confirma uma das dificuldades do estudo que consiste na busca numérica para se avaliar a trabalhabilidade desse material. Como alternativa, seguem-se as recomendações já disponíveis na literatura (MIN *et al.*, 1994; CARDOSO *et al.,* 2009; CARDOSO *et al.,* 2014), optando por argamassas que apresentem deformações mais elevadas no estágio II, associadas às forças baixas, já que durante a aplicação das argamassas estes fatores colaboram para menor esforço no desempeno e acabamento da argamassa de revestimento.

4.1.2 Caracterização das argamassas no estado endurecido

A figura 34 apresenta os resultados de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade das argamassas retiradas de obras, aos 28 dias.

FIGURA 34 – RESISTÊNCIA MECÂNICAS E MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS



FONTE: A autora (2021).

Observa-se, pela figura 34, que as sete argamassas apresentaram comportamentos com uma ampla faixa de resultados, tanto nas resistências mecânicas quanto no módulo de elasticidade. Essas diferenças relativas na resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade foram de 62,5%, 55% e 52,0%, respectivamente.

Por intermédio da classificação da norma NBR 13281 (ABNT, 2005), essas argamassas também ficam classificadas em quatro faixas distintas na resistência a compressão: P8 (O1), P4 (O2, I4 e I5), P3 (O3) e P2 (I6), o que também sugere uma ampla faixa de resultados. A resistência à compressão, apesar de não ser um indicativo único e fundamental na análise das argamassas de revestimento, é um elemento de controle na avaliação da qualidade do produto acabado e, por conta disso, não deve ser deixado de ser analisado (RECENA, 2015).

Já quando se faz a análise seguindo a mesma norma para a resistência à tração na flexão, são destacadas duas faixas classificatórias: R1 (baixa resistente) em O2, O3 e I6 e R2 (média resistente) em O1, I4 e I5, demonstrando um alerta quanto às dosagens desenvolvidas para essas argamassas retiradas de obras, tendo em vista que em nenhuma foi possível visualizar argamassas com nível satisfatório de resistências.

Com relação aos resultados do módulo de elasticidade que, de acordo com Silva e Campiteli (2008), é uma expressão da rigidez da argamassa no estado endurecido, a diferença ficou entre 9,8 e 4,7 GPa. Assim, o parâmetro relacionado ao módulo de elasticidade não é estabelecido pela norma NBR 13281 (ABNT, 2005), porém, há um critério de avaliação de

susceptibilidade à fissuração de revestimento de argamassa (CSTB, 1982) que cita faixas desse elemento a ser considerado. Essa faixa prevê baixa susceptibilidade de ocorrência de fissuras em argamassas com módulos de elasticidade abaixo de 7 GPa, média susceptibilidade entre 7 a 12 GPa e susceptibilidade alta em módulos de elasticidade cima de 12 GPa.

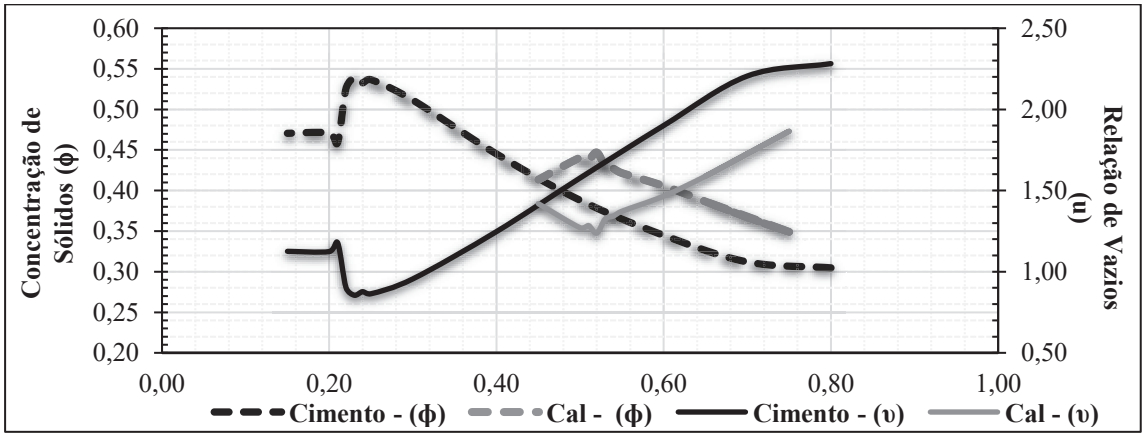
Por fim, quando se observam os resultados das argamassas industrializadas, apesar de serem materiais com controle rigoroso em seus materiais e formulação, ainda assim apresentam uma variação de média relativa de 51,6% na resistência a compressão, o que mostra a sensibilidade do material.

4.2 ETAPA II: ESTUDO DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

4.2.1 Densidade de empacotamento dos materiais individuais

A determinação da densidade de empacotamento de partículas do cimento e da cal seguiu o método proposto por Wong e Kwan (2008), ensaio este realizado na condição úmida. Esse ensaio foi desenvolvido na condição úmida pelo fato de representar a realidade do material. Para o cimento, foi realizado o ensaio variando a relação a/ms de 0,80 a 0,20, com intervalo a cada 0,10, tal como descrito no capítulo 3. Para a cal, a variação da relação a/ms foi de 0,75 a 0,45 com intervalo a cada 0,05. A partir dos resultados obtidos, houve a necessidade da execução do ensaio com relações a/ms com intervalos menores, proximamente ao valor de máxima concentração de sólidos, para ambos os materiais. O resultado referente à densidade de empacotamento do cimento e da cal estão apresentados na figura 35.

FIGURA 35 –CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS (Φ) E RELAÇÃO DE VAZIOS (U) DO CP II F 32 E CAL HL II



FONTE: A autora (2021).

Com base na figura 35, observa-se que a máxima concentração de sólidos para o cimento CP II F 32 é de 0,572, correspondendo a uma relação de vazios igual a 0,855. Este valor de máxima concentração de sólidos corresponde à densidade de empacotamento para o cimento, na condição úmida, tendo sido necessária uma relação a/ms igual a 0,23 para se alcançar a densidade de empacotamento. Ressalta-se que, quando as misturas são realizadas com uma relação a/ms elevada, há água suficiente no sistema para separar as partículas umas das outras. À medida que se reduz a relação a/ms as partículas se aproximam, até o momento em que entram em contato umas com as outras, representando a máxima concentração de sólidos possível de se obter, que equivale à densidade de empacotamento do material. Nesta situação, a quantidade de água presente é apenas o suficiente para envolver os grãos, e estes são mantidos unidos pela força de tensão capilar que se forma nos poros do sistema. A partir desta condição, se a relação a/ms for novamente reduzida, não haverá água suficiente para envolver completamente os grãos, de modo que a água estará localizada apenas nos pontos de contato entre partículas. Nesta situação, a tensão superficial da água atuará distanciando os grãos uns dos outros, dado o pequeno tamanho e peso de cada partícula individual (IVESON *et al.,* 2001; FENNIS, 2011; KLEIN *et al.*, 2016; CAMPOS *et al.,* 2020). Para a cal, a máxima concentração de sólidos é de 0,447, o que corresponde a relação de vazios igual a 1,238. A relação a/ms correspondente à máxima concentração de sólidos é de 0,52. Nota-se que a densidade de empacotamento obtida para a cal é menor que a obtida para o cimento. Isso se deve a maior finura da cal em relação ao cimento (figura 35), já que partículas mais finas sofrem mais

fortemente os efeitos de aglomeração devido à maior relação entre área superficial e volume (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009; HERMANN *et al.,* 2016). Consequentemente, a maior aglomeração atua reduzindo a densidade de empacotamento e aumentando o volume de ar no interior da mistura, o que justifica também a maior relação de vazios apresentada pela cal em comparação ao cimento. Observa-se também que a cal necessitou de uma maior relação a/ms para alcançar a densidade de empacotamento, em comparação ao cimento, o que se deve também à finura dos materiais. A mistura com a cal demandou mais água, pois esta é mais fina que o cimento.

Para os três agregados miúdos utilizados no estudo, $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ e $AA_{2,04}$, a densidade de empacotamento individual foi determinada em seco, segundo o método descrito no capítulo 3, que se baseia na norma NBR NM 45 (ABNT, 2006). Os resultados são demonstrados na Tabela 18.

TABELA 18 –DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO NA CONDIÇÃO SECA PARA OS AGREGADOS MIÚDOS

Agregados	γ_{esp} (kg/m³)	MU (kg/m³)	D50 (μm)	IV (-)	Densidade de empacotamento (-)
$AN_{1,87}$	2.515	1.550	413	0,590	0,629
$AN_{2,69}$	2.630	1.570	613	0,517	0,659
$AA_{2,04}$	2.528	1.453	423	0,533	0,652

FONTE: A autora (2021).

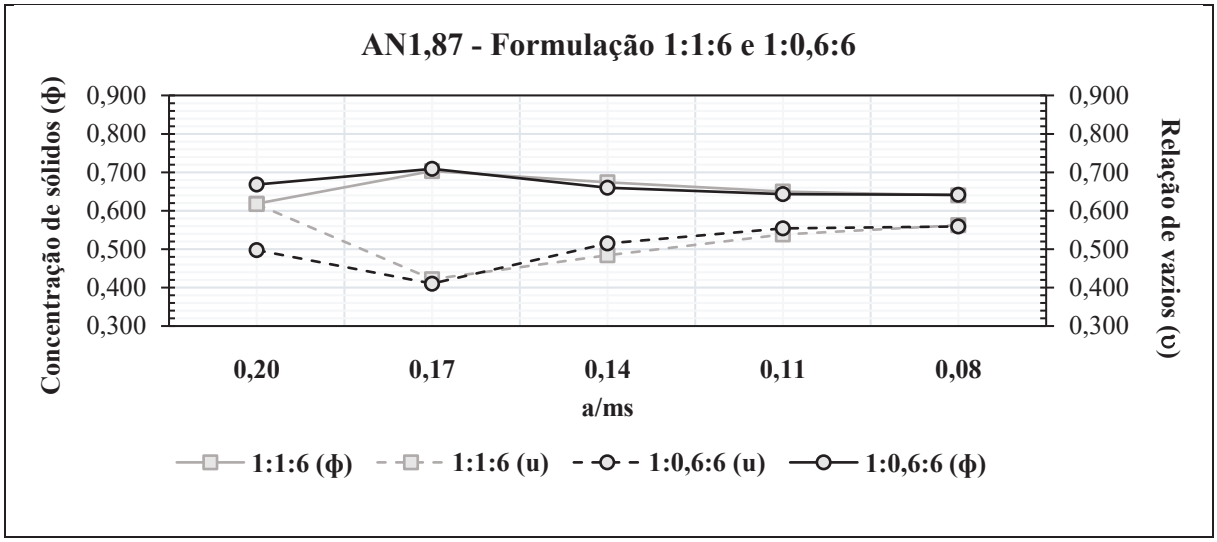
Ao analisar a densidade de empacotamento dos agregados miúdos, observa-se que a maior densidade de empacotamento se refere ao $AN_{2,69}$. No entanto, são intervalos muito pequenos, com diferença máxima absoluta de 3%. Para Kwan e Mora (2001), a densidade de empacotamento está diretamente ligada a algumas das características dos agregados como, por exemplo, sua distribuição granulométrica, tamanho e formato de grãos. Os agregados que apresentam uma curva contínua, em que há pequenas frações em quantidades suficientes para preencher os espacos vazios entre as maiores partículas, tendem à redução do volume de vazios e aumento da densidade de empacotamento (MARK; MINDESS, 2005). Assim, na análise dos valores de densidade de empacotamento dos agregados $AN_{2,69}$ e $AA_{2,04}$, é possível visualizar uma leve tendência à continuidade tanto na curva granulométrica (figura 13) quanto no coeficente de uniformidade (tabela 12, descrito no capítulo 3). Já quanto à morfologia dos grãos, também é possível observar valores próximos, com leve tendência ao formato esférico em

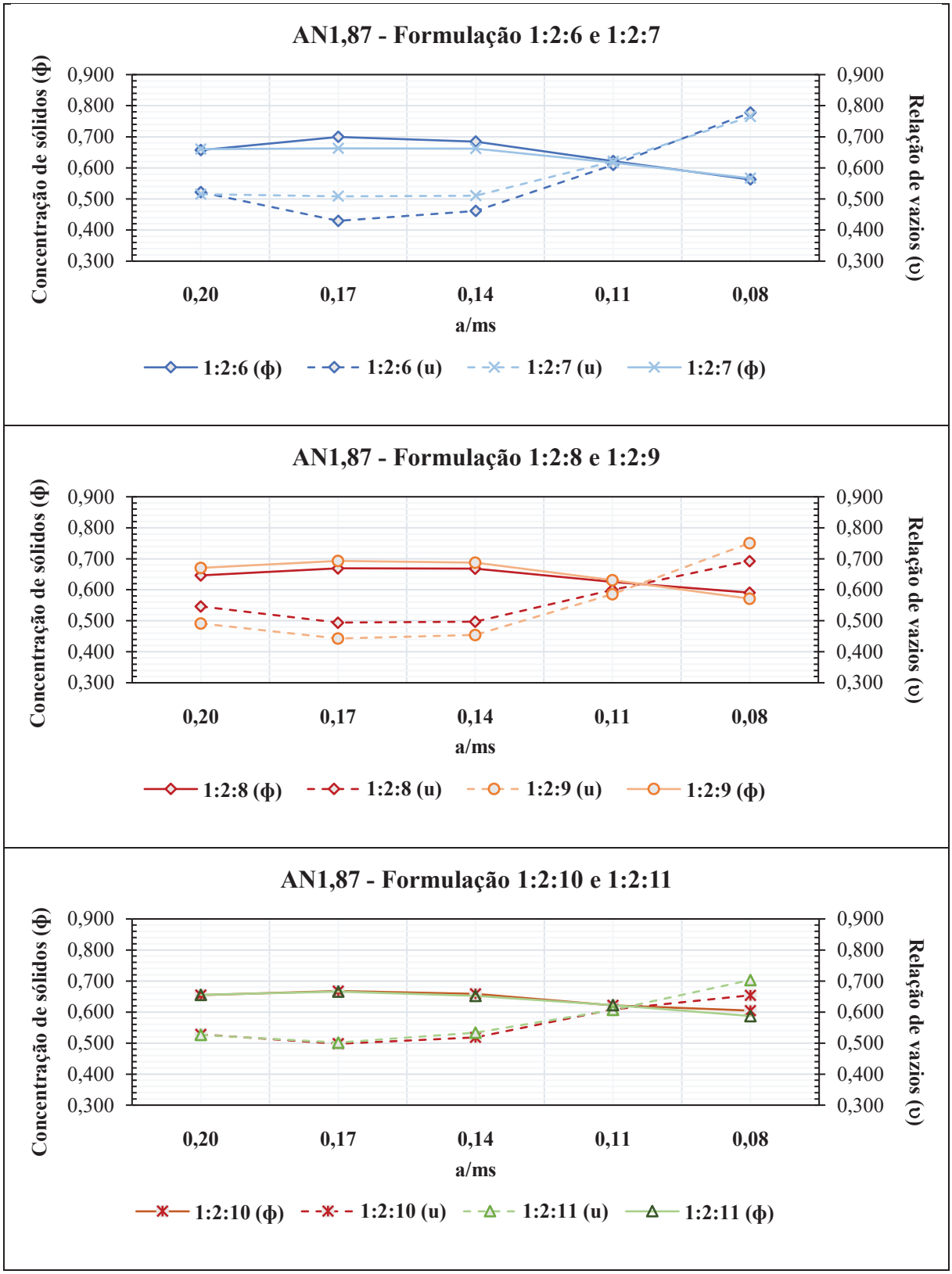
$AN_{1,87}$. A forma dos grãos, por sua vez, influencia na acomodação das partículas, uma em relação às outras. Quanto mais distante da forma esférica os grãos se apresentarem, maior será o espaço vazio entre as partículas, resultando na diminuição da densidade de empacotamento (XU; CHEN, 2013).

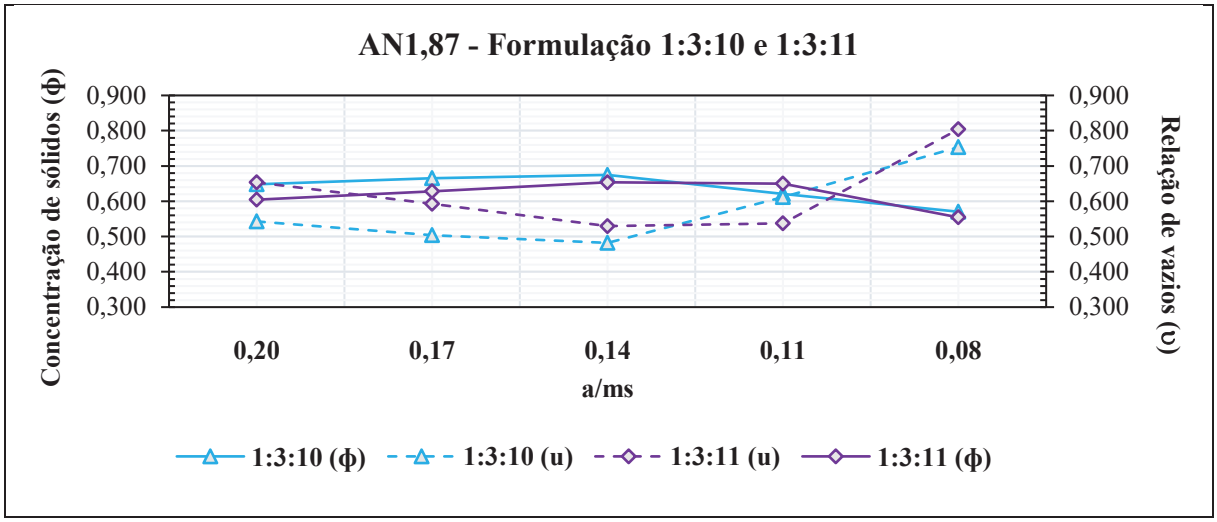
4.2.2 Densidade de empacotamento dos conjuntos granulares

A densidade de empacotamento dos conjuntos granulares correspondentes às formulações de argamassas descritas no capítulo 3 foi determinada por meio do método experimental na condição úmida, proposta por Wong e Kwan (2008). A concentração de sólidos e a relação de vazios dos conjuntos granulares, para o agregado $AN_{1,87}$, são evidenciados na figura 36 e a tabela detalhada no Apêndice C, (Tabela C1).

FIGURA 36 –CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E RELAÇÃO DE VAZIOS DAS FORMULAÇÕES COM $AN_{1,87}$




AN1,87 - Formulação 1:2:6 e 1:2:7
Concentração de sólidos (Φ)
Relação de vazios (υ)
0,900
0,800
0,700
0,600
0,500
0,400
0,300
0,20
0,17
0,14
0,11
0,08
a/ms
1:2:6 (ϕ)
1:2:6 (u)
1:2:7 (u)
1:2:7 (ϕ)
AN1,87 - Formulação 1:2:8 e 1:2:9
Concentração de sólidos (Φ)
Relação de vazios (υ)
a/ms
1:2:8 (ϕ)
1:2:8 (u)
1:2:9 (u)
1:2:9 (ϕ)
AN1,87 - Formulação 1:2:10 e 1:2:11
Concentração de sólidos (Φ)
Relação de vazios (υ)
a/ms
1:2:10 (ϕ)
1:2:10 (u)
1:2:11 (u)
1:2:11 (ϕ)



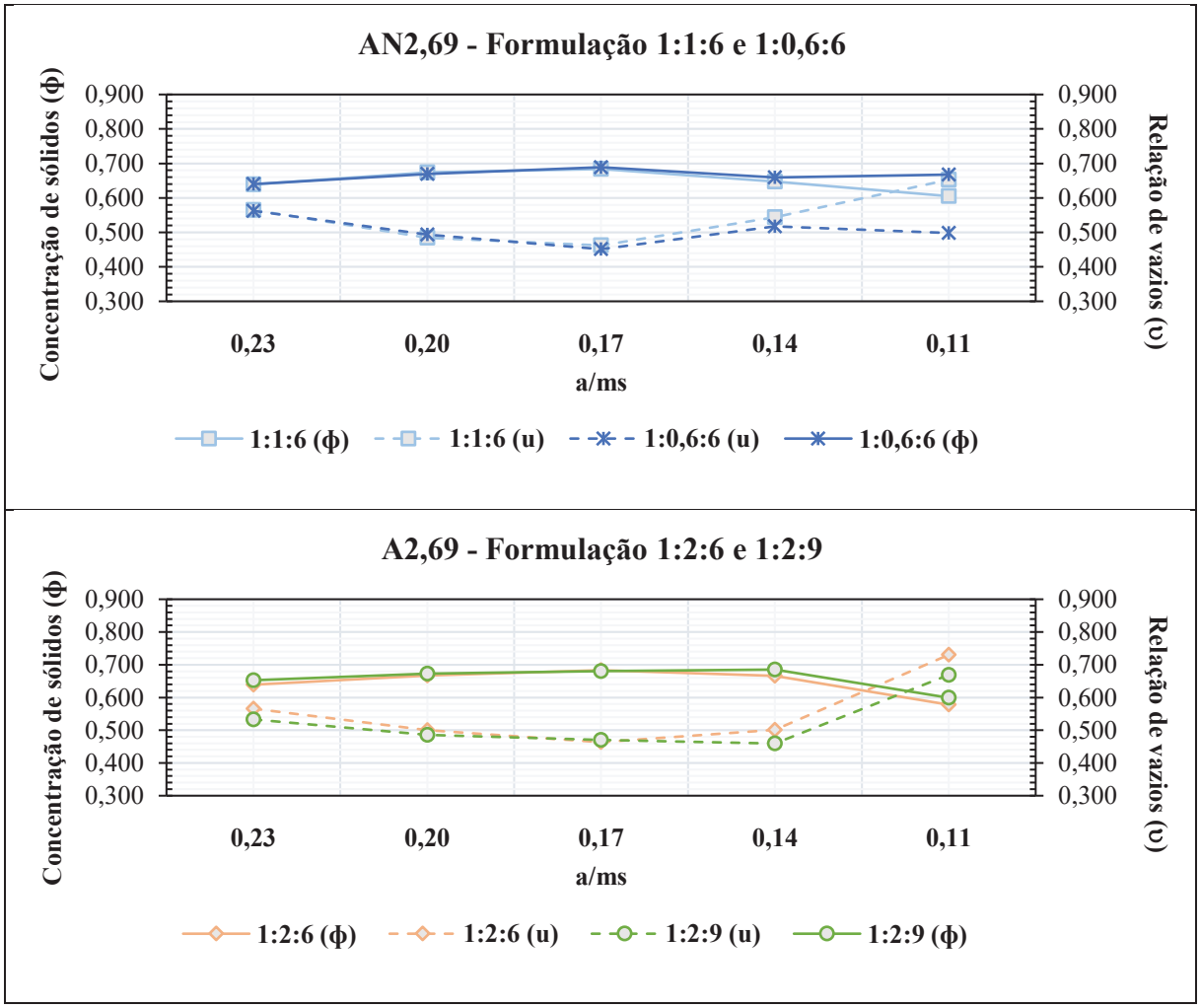
FONTE: A autora (2021).

A partir da figura 36, observa-se que as densidades de empacotamento dos conjuntos granulares encontram-se no intervalo que varia de 0,654 a 0,709 e para o índice de vazios de 0,410 a 0,530. Como era esperado, nota-se a mesma relação inversa, para todas as formulações ensaiadas, entre a densidade de empacotamento e o índice de vazios, igualmente identificado nos materiais individuais. Todavia, quando se analisam os resultados médios para cada formulação não é possível observar uma diferença tão expressiva. Logo, a diferença absoluta entre o maior e menor valor de densidade de empacotamento encontrados é igual a 5,5%. Em termos relativos, a diferença seria de 7,8%, sendo ainda uma diferença pequena. Estes valores de densidade de empacotamento foram obtidos quando a relação a/ms foi igual a 0,17 para maioria das formulações, exceto para as formulações 1:3:10 e 1:3:11, em que a relação a/ms foi igual a 0,14. A maior quantidade de cal nestas formulações, em comparação aos demais, pode ter ocasionado essa diferença na demanda de água, já que a cal é o material mais fino componente das misturas.

Dada a pequena variação na densidade de empacotamento encontrada para as diferentes formulações de argamassa, optou-se por reduzir o número de formulações estudadas, dando continuidade somente com as formulações que obtiveram as maiores densidades de empacotamento. Ou seja, para os agregados $AN_{2,69}$ e $AA_{2,04}$, foram estudadas apenas as formulações 1:0,6:6, 1:1:6, 1:2:6 e 1:2:9.

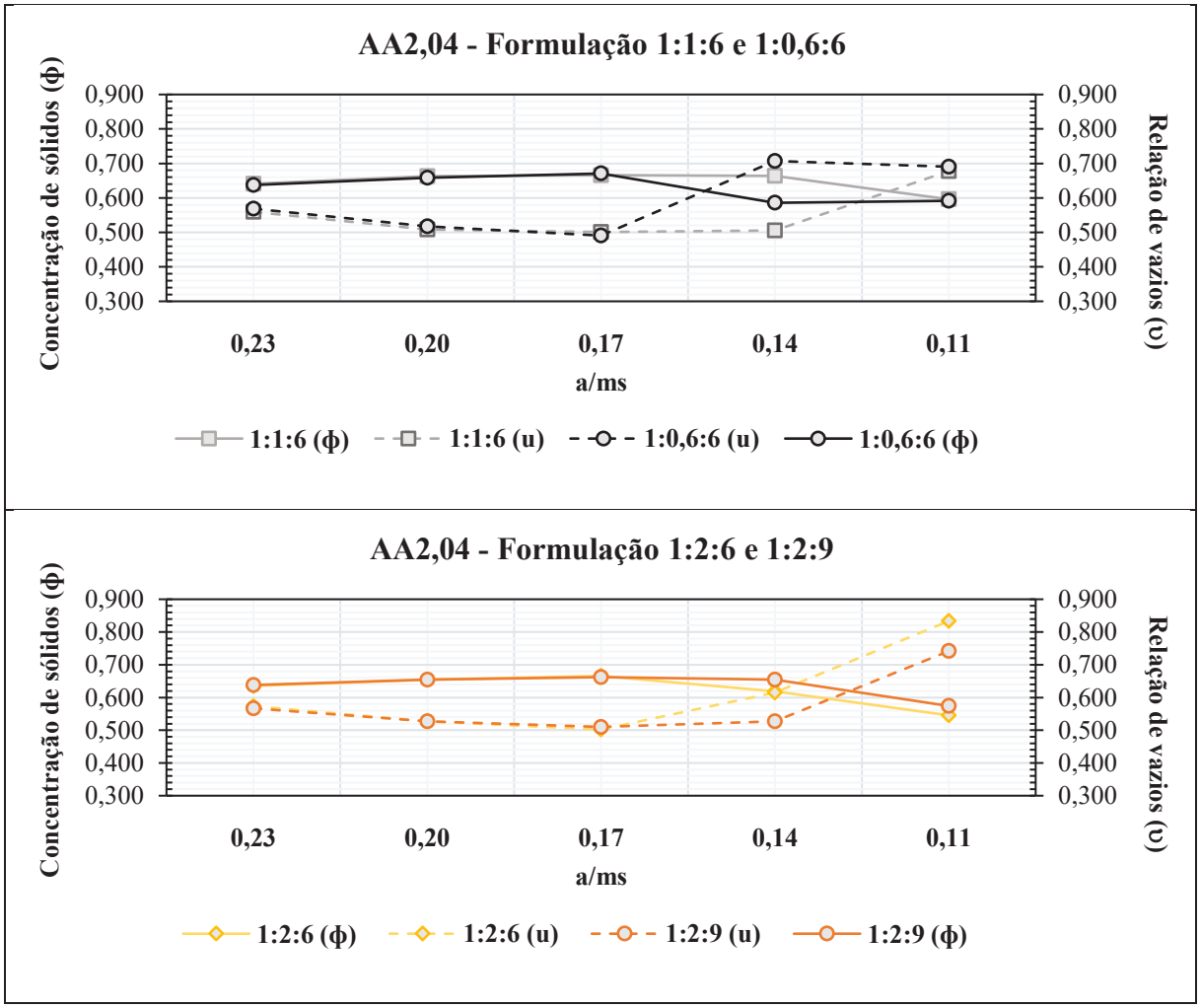
A concentração de sólidos e a relação de vazios dos conjuntos granulares, para os agregados $AN_{2,69}$ e $AA_{2,04}$ são ressaltados nas figuras 37 e 38 e a planilha detalhada no Apêndice C (Tabela C2).

FIGURA 37 – CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS (Φ) E RELAÇÃO DE VAZIOS (U) DAS FORMULAÇÕES COM $AN_{2,69}$



FONTE: A autora (2021).

FIGURA 38 –CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS (Φ) E RELAÇÃO DE VAZIOS (U) DAS FORMULAÇÕES COM $AA_{2,04}$



FONTE: A autora (2021).

Observa-se, a partir das figuras 37 e 38, que as médias entre as formulações das densidades de empacotamento obtidas em $AN_{2,69}$ e $AA_{2,04}$ foram menores que as encontradas em $AN_{1,87}$. As faixas encontradas em $AN_{2,69}$ para a densidade de empacotamento ficaram entre 0,671 e 0,662, ou seja, uma diferença absoluta de 0,86% e relativa de 1,28%. Já para as argamassas produzidas com $AA_{2,04,}$ a faixa de resultados de densidade de empacotamento ficou entre 0,689 a 0,683, com diferença absoluta de 0,57% e relativa de 0,836%.

A Tabela 19 mostra o resumo das densidades de empacotamento e a relação a/ms mínima encontrada para cada conjunto de formulações, com base em Wong e Kwan (2008a).

TABELA 19 –RESUMO DAS DENSIDADES DE EMPACOTAMENTO PARA TODOS OS AGREGADOS.

	$AN_{1,87}$		$AN_{2,69}$		$AA_{2,04}$	
Formulação	**a/ms**	**Densidade de Empacotamento (-)**	**a/ms**	**Densidade de Empacotamento (-)**	**a/ms**	**Densidade de Empacotamento (-)**
1:0,6:6	0,17	0,709	0,17	0,689	0,17	0,671
1:1:6	0,17	0,703	0,17	0,684	0,17	0,666
1:2:6	0,17	0,700	0,17	0,683	0,17	0,666
1:2:9	0,17	0,693	0,14	0,685	0,17	0,662

FONTE: A autora (2021).

Quando a análise dá ênfase entre as formulações (tabela 19), a maior densidade de empacotamento aparece na formulação 1:0,6:6 para os três agregados analisados, o que mostra que essa combinação de grãos atingiu a máxima quantidade de sólidos e a mínima relação de vazios, independente das características enfatizadas para todos os agregados analisados. Apesar do $AA_{2,04}$ ter características artificiais, ele é um agregado lavado com quantidade baixa de material pulverulento (3,86%), o que pode ter justificado sua densidade de empacotamento ter sido próxima com os demais agregados no estudo. Por outro lado, quando se analisa a menor densidade de empacotamento entre os agregados, nota-se que a formulação 1:2:9 se apresenta nesse cenário, para os agregados $AN_{1,87}$ e $AA_{2,04}$. Para o $AN_{2,69}$ as médias entre as formulações 1:2:6, 1:2:9 e 1:0,6:6 têm diferença absoluta de 0,2%, sendo difícil sua classificação.

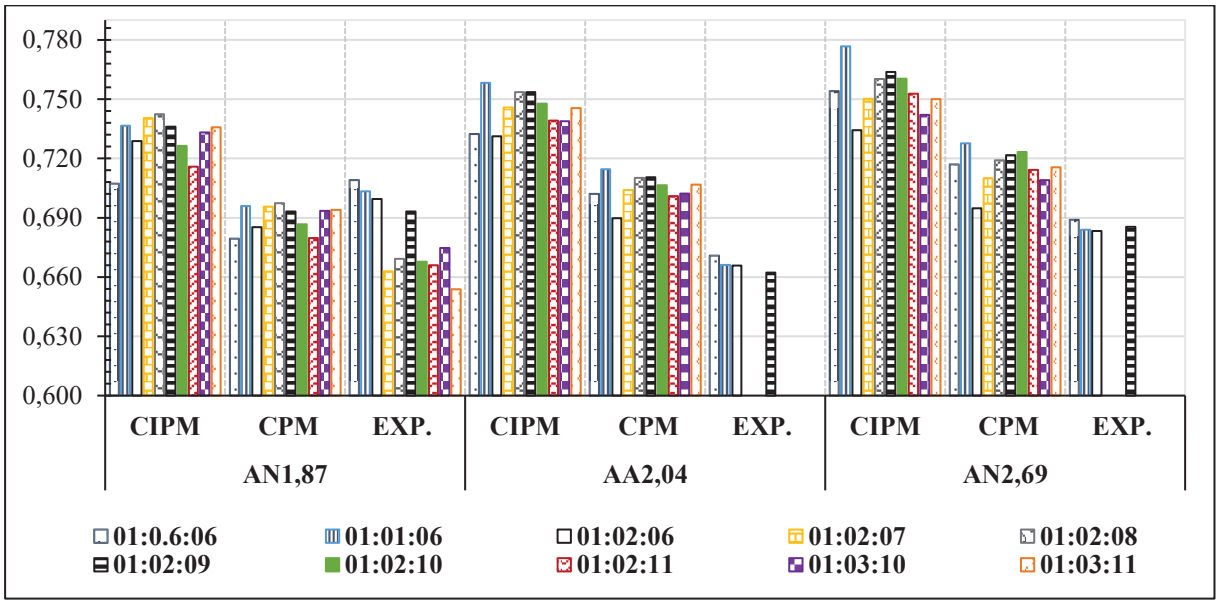
Ressalta-se também que a quantidade de aglomerantes pode ter influenciado na densidade de empacotamento, ou seja, quando a quantidade de aglomerante (em volume) aumenta há uma tendência na diminuição nos valores da densidade de empacotamento. Visto isso, os aglomerantes, que se apresentam com os menores grãos da composição, estão suscetíveis às aglomerações, sejam elas do contato desse material com a água em razão da força de atração interpartículas como as forças de van der Waals, forças eletrostáticas entre posições de sítios com cargas opostas e grande interação, ou ligações que envolvem as moléculas de água ou hidratos (AITCIN *et al.,* 1994). Essa aglomeração facilmente visualizada nas partículas finas, permanentes ou não, influenciam na microestrutura do material, que pode ser tanto na reologia das suspensões de partículas quanto no próprio empacotamento delas (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). Dessa forma, é possível que as formulações com maior quantidade de cimento e cal podem ter sofrido aglomeração.

4.2.3 Comparação dos resultados experimentais com os modelos de previsão CPM e CIPM

Com as premissas atendidas no item anterior, pode ser iniciada a aplicação dos modelos De Larrard (1999) e Fennis (2011) e se obter a densidade ótima de empacotamento referente a cada formulação pré-determinada, consequentemente, elegendo a proporção adequada. Para CPM, foram aplicadas as equações (14), (15) e (16) e (17) e, para CIPM, as equações (18) e (19), conforme descrito no capítulo 3. O fator K adotado de acordo com Fennis (2011), foi 12, ou seja, tipo de compactação para empacotamento virtual.

Para essa etapa da pesquisa, que se refere ao cálculo da densidade de empacotamento do conjunto granular foram utilizadas dez formulações com $AN_{1,87}$ e aplicado os três modelos de densidade de empacotamento de partículas, real (ϕ) e virtual (γ): CIPM, CPM e comparado ao método experimental Wong e Kwan (2008a), tal como as tabelas do Apêndice D (Tabelas D1, D2 e D3) e figura 39. A partir dos resultados obtidos com o modelo experimental Wong e Kwan (2008a), com o agregado $AN_{1,87,}$ foram eleitas as melhores formulações (1:0,6:6, 1:1:6, 1:2:6 e 1:2:9), ou seja, com maiores densidades de empacotamento, que seguiram os testes com os estudos dos outros agregados ($AN_{2,69}$ e $AA_{2,04}$), no método experimental.

FIGURA 39 –COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS CIPM, CPM E MÉTODO EXPERIMENTAL PARA TODAS AS FORMULAÇÕES E AGREGADOS DA PESQUISA

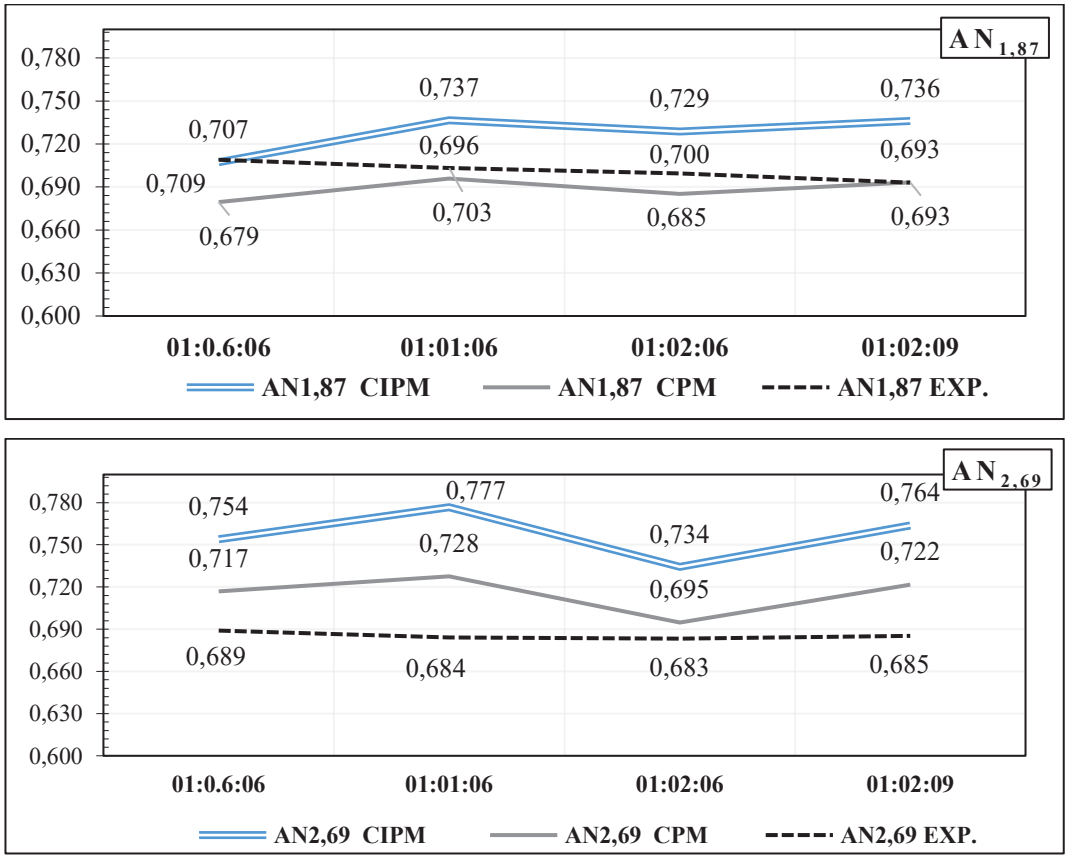


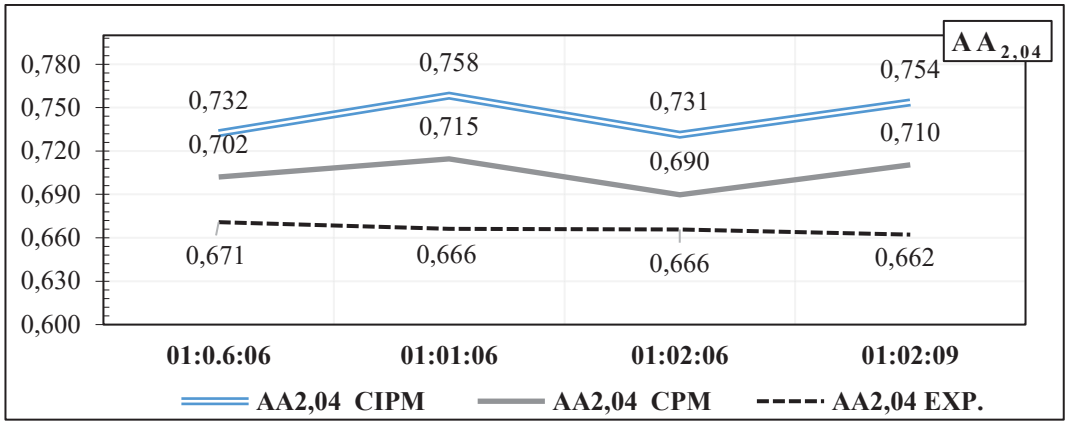
FONTE: A autora (2021).

Nota-se que os modelos CIPM e CPM tiveram a mesma tendência correlacionada para cada formulação. Os modelos analíticos tendem a ser apresentados com valores absolutos maiores, em comparação com o método experimental, tendo em vista que nos métodos analíticos são levadas em conta as partículas em formato esférico perfeito, o que não ocorre na prática.

Como fora dito, o modelo experimental Wong e Kwan (2008a) apresentou-se numericamente com os menores valores em comparação com os demais modelos, porém com uma pequena similaridade em sua curva com o modelo CPM. Outra particularidade do modelo experimental foram os resultados obtidos para as formulações 1:2:6, 1:1:6 e 1:0,6:6 que resultaram nas maiores densidades de empacotamento (0,70, 0,703 e 0,709 respectivamente). Em consequência dessa elevada densidade de empacotamento obtida, essas formulações foram eleitas para a aplicação do modelo experimental desenvolvido com os demais agregados ($AA_{2,04}$ e $AN_{2,69}$), com o acréscimo da formulação 1:2:9 que, mesmo não tendo demonstrado um valor otimizado de densidade de empacotamento, foi eleita pela grande utilização em obras.

FIGURA 40 – DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO POR MEIO DOS MÉTODOS CIPM, CPM E EXPERIMENTAL: (A) $AN_{1,87}$ E (B) $AN_{2,69}$ E (C) $AA_{2,04}$





FONTE: A autora (2021).

A mesma observação adquirida nos resultados referente aos modelos CPM e CIPM com $AN_{1,87}$ foi percebida nos ensaios com o $AA_{2,04}$ e $AN_{2,69}$, ou seja, a mesma linha de tendência entre os modelos CPM e CIPM, com um pequeno intervalo numérico entre as formulações. A média de resultados entre os modelos CPM e CIPM chegou em 6,1% para o $AN_{1,87,}$ 5,3%, para o $AN_{2,69}$ e 5,4% e para o $AA_{2,04}$. Nota-se também que no modelo experimental, independente da formulação apresentada, os resultados plotados foram muito semelhantes, em alguns casos sendo diferenciado somente na segunda casa decimal do resultado obtido.

A maior média nas densidades de empacotamento ficou entre o método experimental *versus* CIPM, chegando em 12% no $AA_{2,04}$. Em contrapartida, entre o método experimental *versus* CPM o valor foi de 6,2%. Esse dado comprova que o modelo experimental, para esse estudo, ficou mais próximo do modelo CPM. A semelhança entre os modelos CPM e o método experimental também foi observada em outros trabalhos correlacionados (HERMANN *et al.,* 2016; CAMPOS, 2019; CAMPOS *et al.,* 2020).

4.3 ETAPA III – CÁLCULO DO EXCESSO DE ÁGUA

Neste item, são salientados os resultados obtidos com o objetivo do cálculo de excesso de pasta para as argamassas dosadas em laboratório, com os três agregados utilizados ($AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ e $AA_{2,04}$), bem como demais análises referentes à composição de grãos e análises estatísticas ligadas aos resultados e uma discussão dos comportamentos observados.

4.3.1 Análise do comportamento reológico por meio do ensaio de *Squeeze flow*

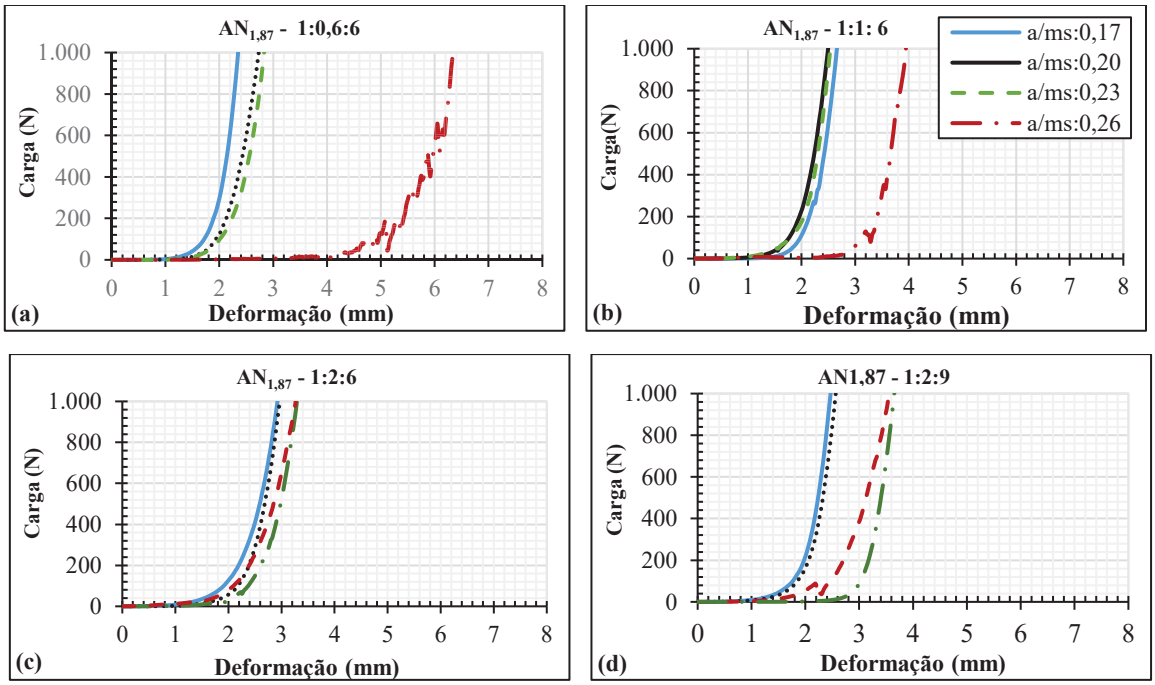
A partir da tabela 20, é possível visualizar o resultado das curvas de carga (N) *versus* deformação (mm) aferidas por meio dos ensaios de *squeeze flow* utilizando o agregado $AN_{1,87}$ e, na figura 41, estão descritos os valores referentes ao deslocamento (Δdef.) e à carga (ΔF). O apêndice F (figura F1) ressalta a ilustração de todos os corpos de prova ensaiados.

TABELA 20– ΔDEF. ATRAVÉS DO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW* PARA $AN_{1,87}$

Formulação	a/ms	Estágio I/II				Estágio II/III				ΔF (N)	Δdef. (mm)
		$DE_{máx}$ (mm)	$FE_{máx}$ (N)	Equação linear	R^2	$DP_{máx}$ (mm)	$FE_{máx}$ (N)	Equação exp.	R^2		
1:0,6:6	0,17	0,008	0,13	y = 18,003x - 0,0114	0,96	1,182	10,0	$y = 0,155e^{3,7264x}$	0,99	9,9	1,17
1:0,6:6	0,20	0,008	0,13	y = 15,804x + 0,003	0,98	1,266	5,3	$y = 0,1454e^{3,2431x}$	0,97	5,1	1,26
1:0,6:6	0,23	0,006	0,06	y = 12,192x + 0,0002	0,99	1,301	4,9	$y = 0,1336e^{3,1758x}$	0,98	4,8	1,30
1:0,6:6	0,26	0,015	0,13	y = 5,0313x + 0,0612	1	1,451	0,2	$y = 0,0284e^{2,386x}$	0,94	0,1	1,44
1:1:6	0,17	0,006	0,07	y = 12,364x + 0,0087	0,82	0,851	0,3	$y = 0,0176e^{4,1627x}$	0,98	0,3	0,85
1:1:6	0,20	0,022	0,13	y = 6,078x + 0,0035	0,99	1,001	5,5	$y = 0,2799e^{3,2517x}$	0,99	5,4	0,98
1:1:6	0,23	0,006	0,06	y = 12,329x + 0,0078	0,84	1,035	10,4	$y = 0,5205e^{2,947x}$	0,99	10,3	1,03
1:1:6	0,26	0,015	0,13	y = 9,7798x - 0,0241	0,88	2,201	6,9	$y = 0,0038e^{3,1755x}$	0,99	6,8	2,19
1:2:6	0,17	0,006	0,06	y = 14,628x - 5,5179	0,75	1,185	8,2	$y = 0,4337e^{2,559x}$	0,99	8,1	1,18
1:2:6	0,20	0,031	0,13	y = 3,7158x + 0,0094	0,86	1,385	9,6	$y = 0,2166e^{2,8183x}$	0,99	9,5	1,35
1:2:6	0,23	0,031	0,13	y = 3,7123x + 0,009	0,85	2,051	40,6	$y = 0,3569e^{2,3915x}$	0,99	40,4	2,02
1:2:6	0,26	0,022	0,27	y = 12,34x + 0,008	0,99	2,535	270,4	$y = 2,7812e^{1,7933x}$	0,99	270,1	2,51
1:2:9	0,17	0,015	0,13	y = 8,8382x - 0,0044	0,97	0,718	3,4	$y = 0,3909e^{3,157x}$	0,99	3,3	0,70
1:2:9	0,20	0,010	0,14	y = 14,735x - 0,0049	0,97	0,768	3,9	$y = 0,3376e^{3,0904x}$	0,99	3,7	0,76
1:2:9	0,23	0,015	0,13	y = 9,5486x - 0,0209	0,85	1,285	7,9	$y = 0,885e^{1,9776x}$	0,99	7,8	1,27
1:2:9	0,26	0,018	0,13	y = 3,9787x + 0,0646	1	1,879	44,7	$y = 0,1215e^{3,1039x}$	0,99	44,6	1,86

Fonte –A autora (2021).

FIGURA 41 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE *SQUEEZE FLOW* PARA $AN_{1,87}$: (A) 1:0,6:6; (B) 1:1:6; (C) 1:2:6 E (D) 1:2:9



FONTE: A autora (2021).

De forma geral, os Δdef. obtidos para o agregado $AN_{1,87}$ tiveram uma diferença de 0,70 a 2,51 mm. Como era esperado, o acréscimo de água determinou uma tendência de aumento de Δdef. Para Cardoso (2009), argamassas que apresentem aumento crescente de deformação sem requisitar grande esforço têm o comportamento ideal à aplicação do revestimento argamassado.

Nota-se que, para cada argamassa analisada sob a ótica das formulações e dos teores de água, houve um comportamento reológico em específico.

Na formulação mais rica em aglomerante 1:2:6 (agl/agregado: 0,5), para todos os teores de água (a/ms 0,17, 0,20, 0,23 e 0,26), percebe-se um comportamento direto em estágio III, visto que existem pequenas deformações para um aumento expressivo da carga necessária para prosseguir a deformação do material. Há também um enrijecimento por deformação (*strain hardening*) que dificulta a aplicação e o acabamento devido às altas cargas envolvidas (ENGMANN *et al.,* 2005). Ademais, mesmo a argamassa com a/ms 0,26 não apresentou uma trabalhabilidade adequada, pois visualmente exibiu exsudação (figura F.1, disponível no Apêndice F). Os teores de água não são unicamente responsáveis pela viscosidade da

argamassa, ou seja, a coesão entre essas partículas pode ser almejada também devido à algumas características dos agregados, como é o caso do teor de finos.

Para a formulação 1:2:9 (agl/agr: 0,33), apesar de conter a menor relação de aglomerante/agregados das quatro formulações estudadas, observa-se um comportamento semelhante ao ocorrido na formulação 1:2:6 para as relações a/ms de 0,17 e 0,20, ou seja, a argamassa apresentou uma resistência ao deslocamento que, na prática, resulta em uma condição desfavorável de aplicação. A partir das relações de a/ms de 0,23 e 0,26, já foi possível observar um maior estágio plástico, ou seja, a argamassa eleva seu escoamento, o que facilita a aplicação. A formulação 1:2:9, apesar de ser utilizada pela bibliografia (CARASEK *et al.,* 2010; SILVA,2011; STOLZ, 2015) e vastamente aplicada nas obras, não resultou em uma argamassa aplicável sem analisar o teor de água adequado. Logo, se essa formulação, para esse agregado em específico ($AN_{1,87}$), com poucos finos, fosse aplicada sem um estudo aprofundado dos materiais e teores de água, o resultado seria uma argamassa de difícil aplicação.

Para as formulações 1:1:6 e 1:0,6:6, mesmo utilizando uma quantidade menor de cal na formulação, e por evidenciarem baixas relações agl/agregado (0,33 e 0,26 respectivamente), o comportamento conforme teores de água foi muito semelhante com a formulação 1:2:9. Entretanto, para a formulação 1:0,6:6 com o teor de a/ms de 0,26 houve uma oscilação de carga observada na curva de resultados. Esse fenômeno pode estar relacionado com o atrito entre as placas do *squeeze flow* e a argamassa, assim como com os mecanismos internos de deformação e fluxo do material, principalmente quando a separação de fases atua aumentando a concentração localizada de agregados (CARDOSO, 2009). Esse ruído presente não desqualifica o ensaio e, em alguns casos, ainda pode ser suavizado pelo software do tipo Microsoft Excel ou similar por meio de uma linha de tendência.

É importante destacar que algumas das características dos agregados podem estar influenciando essa falta de coesão e excesso de exsudação salientada na maioria das formulações das argamassas com $AN_{1,87}$. Visto isso, o $AN_{1,87}$ foi o agregado que teve a menor quantidade de finos, pouco material pulverulento (1,16%) e a mais baixa densidade de empacotamento do material individual (ϕ: 0,6520).

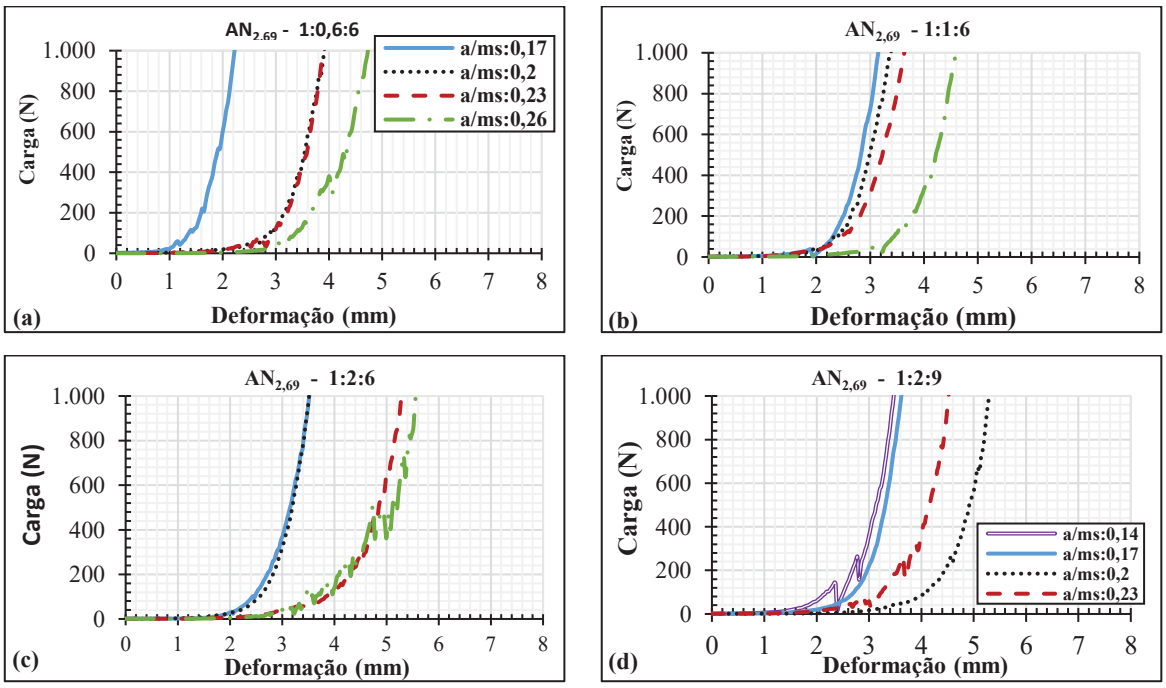
A tabela 21 mostra os resultados do ensaio de *squeeze flow* utilizando agregado $AN_{2,69}$ e na figura 42 estão descritas as variações referentes ao deslocamento (ΔD) e carga (ΔF).

TABELA 21 – ΔDEF. POR MEIO DO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW* PARA $AN_{2,69}$

Formulação	a/ms	Estágio I/II				Estágio II/III				ΔF (N)	ΔDef. (mm)
		$DE_{máx}$ (mm)	$FE_{máx}$ (N)	Equação linear	R^2	$DP_{máx}$ (mm)	$FP_{máx}$ (N)	Equação exp.	R^2		
1:0,6:6	0,17	0,011	2,17	y = 162,27x + 0,72	0,57	1,046	30,08	$y = 2,8316e^{2,5914x}$	0,98	27,91	1,03
1:0,6:6	0,20	0,011	1,49	y = 111,09x + 0,5216	0,54	1,678	12,40	$y = 0,3359e^{2,0274x}$	0,99	10,91	1,67
1:0,6:6	0,23	0,009	1,49	y = 160,9x + 0,2348	0,77	1,808	10,36	$y = 0,2788e^{2,0808x}$	0,99	8,87	1,80
1:0,6:6	0,26	0,005	1,69	y = 13,87x + 1,6396	0,58	2,108	8,81	$y = 0,0328e^{2,5442x}$	0,99	7,11	2,10
1:1:6	0,17	0,006	1,49	y = 244,16x + 0,2922	0,71	1,045	5,28	$y = 0,3272e^{2,5128x}$	0,98	3,79	1,04
1:1:6	0,20	0,002	1,90	y = 992,47x	1,00	1,491	9,82	$y = 0,4047e^{2,2952x}$	0,98	7,93	1,49
1:1:6	0,23	0,003	1,83	y = 657,95x	1,00	2,179	49,99	$y = 0,9457e^{1,9005x}$	0,99	48,16	2,18
1:1:6	0,26	0,003	1,69	y = 609,24x - 2E-16	1,00	2,246	12,26	$y = 0,1405e^{1,9113x}$	0,99	10,57	2,24
1:2:6	0,17	0,005	1,49	y = 277,36x + 0,3525	0,65	0,858	1,69	$y = 0,1552e^{2,5132x}$	0,98	0,20	0,85
1:2:6	0,20	0,009	0,95	y = 80,15x + 0,3589	0,50	1,807	19,24	$y = 0,3053e^{2,2664x}$	0,99	18,29	1,80
1:2:6	0,23	0,006	1,08	y = 177,62x + 0,2134	0,70	1,979	6,30	$y = 0,378e^{1,4813x}$	0,99	5,22	1,97
1:2:6	0,26	0,002	1,15	y = 473,48x	1,00	2,095	6,30	$y = 0,5425e^{1,374x}$	0,97	5,15	2,09
1:2:9	0,14	0,003	1,49	y = 591,56x	1,00	1,445	15,65	$y = 1,0182e^{1,9662x}$	0,97	14,16	1,44
1:2:9	0,17	0,003	1,49	y = 591,56x	1,00	1,545	7,59	$y = 0,1756e^{2,3718x}$	0,99	6,10	1,54
1:2:9	0,20	0,006	1,42	y = -11,835x + 1,48	0,61	1,895	2,44	$y = 0,1711e^{1,471x}$	0,99	1,02	1,89
1:2:9	0,23	0,008	1,35	y = 29,528x + 1,124	0,98	2,003	13,21	$y = 0,4721e^{1,6886x}$	0,99	11,85	2,00

FONTE: A autora (2021).

FIGURA 42 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE *SQUEEZE FLOW* PARA $AN_{2,69}$:(A) 1:0,6:6; (B) 1:1:6; (C) 1:2:6 E (D) 1:2:9



FONTE: A autora (2021).

Nota-se que a média de Δdef. vista para todas as formulações com o agregado AN2,69 (média: 1,69 mm) teve uma diferença absoluta de 19,5% em relação a AN1,87 (média: 1,36 mm). Apesar de ambos os agregados serem naturais (AN1,87 e AN2,69), apresentam

características distintas, tais como módulo de finura (1,87 e 2,69), teor de material pulverulento (1,16% e 1,33%) e área superficial (7,64m²/kg e 4,10 m²/kg), que podem ter influência no comportamento reológico das argamassas.

Como era esperado, quando há um aumento do fator a/ms, as curvas dos resultados de *squeeze flow* indicam menor força e atingem deslocamentos maiores, ou seja, as argamassas produzidas com $AN_{2,69}$ começam a se posicionar mais no estado plástico do que aquelas com $AN_{1,87}$.

Para a formulação 1:2:6, a quantidade de água em a/ms 0,23 foi a que evidenciou maior Δdef. da curva (1,97 mm), tendo em vista de que em 0,26 já é possível visualizar um ruído na curva, indicativo de separação de fases, incluindo a exsudação de água. Já para a formulação 1:2:9, a água mínima iniciou em 0,14 diferente das outras formulações (água mínima de 0,17). Entretanto, a curva também destacou um ruído que pode estar associado com a deficiência de água na mistura com pouco distanciamento entre as partículas grossas (agregado miúdo). Entretanto, mesmo com a curva mostrando essa falta de água na mistura, ainda não foi possível ser visualizado *strain hardening* ou enrijecimento do material por deformação (estágio III), tendo em vista que o Δdef foi de 1,44 mm, ou seja, um valor que representa uma pequena deformação que, logo em seguida, passa para o estágio III (enrijecimento do material). As formulações 1:2:9 e 1:2:6 com a/ms de 0,23 resultaram nas curvas com maior e melhor fase plástica (estágio II), ou seja, máxima deformação e curvas sem ruído, respectivamente. Esse resultado pode ocorrer em razão da quantidade de cal nessa formulação. A cal é um material fino que proporciona uma melhor lubrificação entre as partículas do agregado e assim reduzindo o atrito dos grãos, logo melhorando a trabalhabilidade e a capacidade de retenção de água, diminuindo módulo de elasticidade, ou seja, absorvem melhor as tensões ocorridas (HENDRICKX, 2009). Para a formulação 1:1:6, apesar dos teores de a/ms de 0,23 e 0,26 apresentarem curvas distintas, porém essa diferença absoluta foi de apenas 2,67%, sendo que o Δdef. foi de 2,18 e 2,24 mm, respectivamente.

Finalmente, analisando a formulação 1:0,6:6, nota-se que com a/ms de 0,17 já foi possível observar o *strain hardening*, sendo que o Δdef. da curva se obteve na deformação 1,5 mm (figura 43), que pode ter sido causada pela falta de aglomerante na mistura.

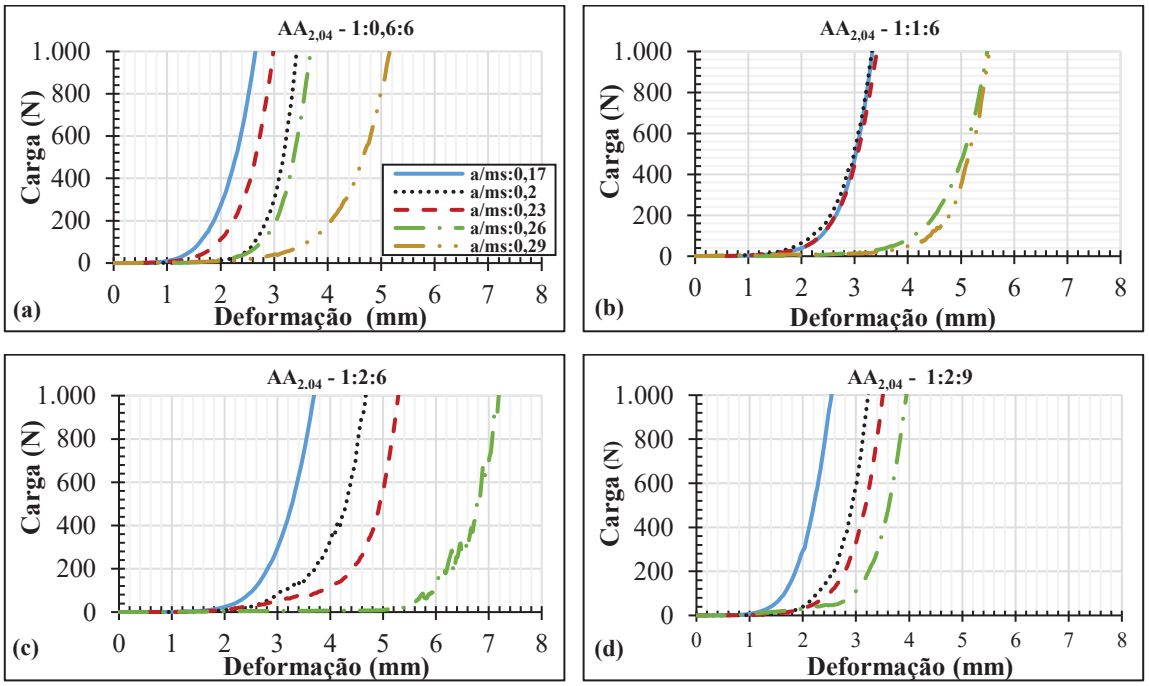
Por fim, os resultados dos ensaios de *squeeze flow* com o agregado $AA_{2,04}$ estão sendo mostrados. Conforme a tabela 22, os pontos de Δdef. e ΔF as curvas através da figura 43.

TABELA 22 – ΔDEF. A PARTIR DO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW* PARA $AA_{2,04}$

Formulação	a/ms	Estágio I/II				Estágio II/III				ΔF (N)	ΔDef (mm)
		$DE_{máx}$ (mm)	$FE_{máx}$ (N)	Equação Linear	R^2	$DP_{máx}$ (mm)	$FP_{máx}$ (N)	Equação Exp.	R^2		
1:0,6:6	0,17	0,006	1,60	y = 11,426x - 0,0112	R^2 = 0,70	1,60	95,78	$y = 4,5951e^{2,0185x}$	R^2 = 0,99	94,18	1,596
1:0,6:6	0,2	0,022	1,57	y = 5,1612x + 0,0121	R^2 = 0,85	1,70	5,83	$y = 0,031e^{3,0293x}$	R^2 = 0,99	4,26	1,679
1:0,6:6	0,23	0,010	1,98	y = 13,957x - 0,0038	R^2 = 0,98	1,98	108,04	$y = 1,5619e^{2,1601x}$	R^2 = 0,99	106,06	1,975
1:0,6:6	0,26	0,031	1,73	y = 3,8177x + 0,0234	R^2 = 0,88	2,05	16,73	$y = 0,097e^{2,5055x}$	R^2 = 0,99	15,00	2,020
1:0,6:6	0,29	0,067	2,12	y = 3,024x + 0,0346	R^2 = 0,74	2,30	13,48	$y = 0,4211e^{1,5085x}$	R^2 = 0,99	11,36	2,235
1:1:6	0,17	0,008	0,14	y = 17,258x - 0,0022	R^2 = 0,99	0,93	2,51	$y = 0,3188e^{2,4111x}$	R^2 = 0,99	2,37	0,924
1:1:6	0,20	0,017	0,20	y = 11,073x + 0,013	R^2 = 0,97	1,83	42,13	$y = 1,1147e^{2,0365x}$	R^2 = 0,99	41,93	1,811
1:1:6	0,23	0,008	0,14	y = 10,72x + 0,059	R^2 = 0,74	2,10	19,64	$y = 0,3626e^{1,9913x}$	R^2 = 0,99	19,51	2,091
1:1:6	0,26	0,004	0,07	y = 16,246x + 1E-17	R^2 = 1	3,51	35,63	$y = 0,1139e^{1,6501x}$	R^2 = 0,99	35,56	3,511
1:1:6	0,29	0,015	0,27	y = 18,135x	R^2 = 1	3,62	25,67	$y = 0,0181e^{1,9687x}$	R^2 = 0,99	25,40	3,603
1:2:6	0,17	0,001	0,07	y = 51,986x - 8E-18	R^2 = 1	2,47	86,16	$y = 1,139e^{1,8312x}$	R^2 = 0,99	86,10	2,467
1:2:6	0,2	0,031	0,14	y = 4,6233x - 0,0283	R^2 = 0,79	2,68	39,63	$y = 0,7176e^{1,5423x}$	R^2 = 0,99	39,49	2,653
1:2:6	0,23	0,006	0,07	y = 17,127x - 0,0344	R^2 = 0,84	3,50	66,25	$y = 0,2017e^{1,5938x}$	R^2 = 0,98	66,18	3,496
1:2:6	0,26	0,003	0,07	y = 41,043x - 0,057	R^2 = 1	4,40	7,11	$y = 0,0012e^{1,8823x}$	R^2 = 0,97	7,04	4,398
1:2:9	0,17	0,022	0,14	y = 6,0567x + 0,0034	R^2 = 0,99	1,70	118,75	$y = 3,3746e^{2,2201x}$	R^2 = 0,98	118,61	1,679
1:2:9	0,2	0,010	0,07	y = 7,0252x	R^2 = 1	2,25	97,14	$y = 0,5492e^{2,3072x}$	R^2 = 0,99	97,07	2,242
1:2:9	0,23	0,022	0,14	y = 6,0269x + 0,0037	R^2 = 0,99	2,52	104,59	$y = 0,4343e^{2,204x}$	R^2 = 0,99	104,45	2,496
1:2:9	0,26	0,003	0,07	y = 22,28x - 1E-17	R^2 = 1	2,53	46,60	$y = 0,1427e^{2,2323x}$	R^2 = 0,99	46,54	2,532
1:2:9	0,29	0,054	0,34	y = 5,6318x + 0,0198	R^2 = 0,90	2,83	18,29	$y = 0,1505e^{1,6572x}$	R^2 = 0,99	17,95	2,781

FONTE: A autora (2021).

FIGURA 43– RESULTADOS DOS ENSAIOS DE *SQUEEZE FLOW* PARA $AA_{2,04}$: (A) 1:0,6:6; (B) 1:1:6; (C) 1:2:6 E (D) 1:2:9



FONTE: A autora (2021).

Para a análise dos ensaios utilizando o $AA_{2,04}$, ao contrário dos resultados obtidos com o agregado natural, observa-se que, no geral, quando há um aumento do fator a/ms as curvas dos resultados de *squeeze flow* necessitam de menor força e, mesmo assim, atingindo deslocamentos maiores, ou seja, as formulações com $AA_{2,04}$ começam a se comportar no estado mais plástico e deformável, chegando em Δdef. de 4,398 mm. Esse comportamento deve estar relacionado com as características desse agregado que possui maior teor de finos (3,86%), em comparação com os demais agregados ($AN_{1,87}$: 1,16% e $AN_{2,69}$: 1,33%), e sua área específica (8,52m²/kg) que foi a maior de todos os agregados analisados ($AN_{1,87}$: 7,64 m²/kg e $AN_{2,69}$: 4,10 m²/kg), como demonstrado no item 3.1.2. (capítulo 3).

Para a formulação 1:2:6, com a quantidade de água em a/ms 0,23 é possível visualizar uma argamassa plástica e aplicável, visto que o seu Δdef. evidenciou 3,496 mm, o que significa que esse teor de água conseguiu promover ao material uma deformação suficiente para que essa formulação tivesse boa trabalhabilidade e possivelmente boa aplicabilidade pelo operário. Já no teor de a/ms de 0,26 foi oportuno observar um ruído na curva, que pode ter sido causado pela separação de fases que o excesso de água acaba causando na mistura comprimida pelas placas do *squeeze flow*.

Já para a formulação 1:2:9, que representa uma das formulações com a menor relação agl/agr (0,33), foi possível observar valores menores de Δdef., sendo que o maior deles foi em 2,781 mm (a/ms: 0,29). Todavia, mesmo com essa quantidade menor de água, não foi visualizado o *strain hardening* ou enrijecimento do material por deformação (estágio III).

Na formulação 1:1:6, é possível visualizar que as curvas com os teores 0,17 e 0,20 e 0,23 ficaram sobrepostas por meio da plotagem de dados, porém com a aplicação do método de determinação das deformações, a partir das curvas exponenciais, é possível visualizar um comportamento semelhante, porém não igual entre elas, com Δdef: 0,924, 1,811 e 2,091 mm, respectivamente. Essa diferença representa uma média absoluta (entre o maior e o menor valor) de 55%, o que ressalta a importância de uma metodologia de análise para esses dados. Os demais teores de 0,26 e 0,29 tiveram bons resultados, (Δdef. de 3,51 e 3,603 mm) para a aplicação da argamassa em campo, sem ruídos, ou seja, sem constatação de separação de materiais.

Finalmente, para a análise da formulação de 1:0,6:6, foi visualizado um comportamento plástico com teor de a/ms igual a 0,29, em Δdef. de 2,235 mm, igualmente verificado na formulação 1:1:6, sem ruído, consequentemente, sem separação de fases. A tabela 23 mostra as

melhores condições de plasticidade entre as formulações e os três agregados, a partir das considerações de maior extensão do estágio II (maior Δdef.) e sem ruído na curva.

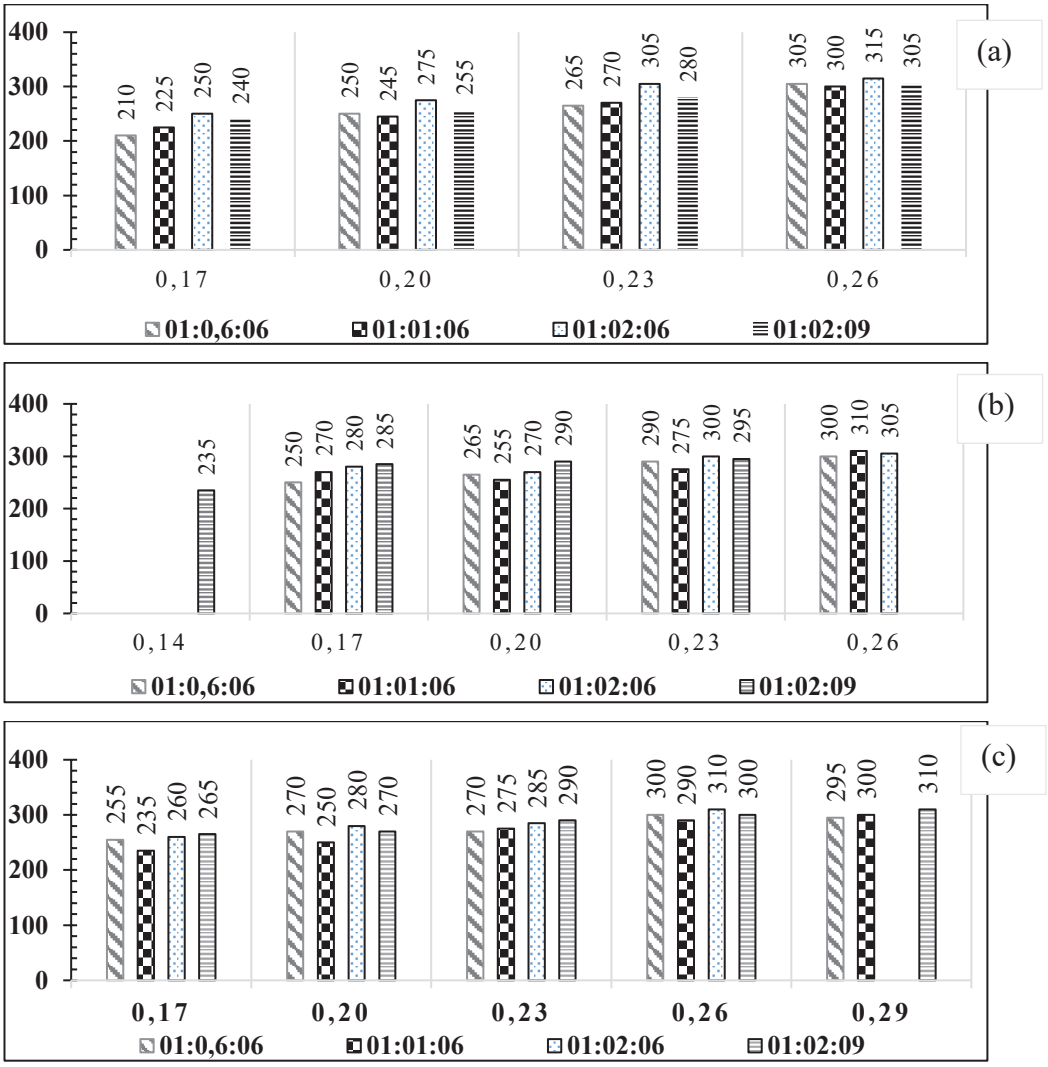
TABELA 23 – RESULTADOS REFERENTE AO MAIOR ΔDEF. PARA TODAS AS FORMULAÇÕES.

Formulação	Agregado	a/ms	Δdef.(mm)	Médias Δdef. (mm)
1:0,6:6	$AN_{1,87}$	0,23	1,30	1,527
1:1:6	$AN_{1,87}$	0,23	1,03	
1:2:6	$AN_{1,87}$	0,26	2,51	
1:2:9	$AN_{1,87}$	0,23	1,27	
1:0,6:6	$AN_{2,69}$	0,23	1,80	1,975
1:1:6	$AN_{2,69}$	0,26	2,24	
1:2:6	$AN_{2,69}$	0,23	1,97	
1:2:9	$AN_{2,69}$	0,20	1,89	
1:0,6:6	$AA_{2,04}$	0,29	2,23	2,94
1:1:6	$AA_{2,04}$	0,26	3,51	
1:2:6	$AA_{2,04}$	0,23	3,49	
1:2:9	$AA_{2,04}$	0,26	2,53	

FONTE: A autora (2021).

Ressalta-se que o agregado artificial lavado tem algumas vantagens em relação às areias naturais como, por exemplo, uma menor variabilidade de propriedades e características, como granulometria e ausência de impurezas como matéria orgânica tais como argila em torrões. Por conta disso, ele pode ter sido responsável por aumentar o Δdef. de todas as formulações desenvolvidas com ele, inclusive, a média. A maior quantidade finos pode ter sido responsável por maior coesão e trabalhabilidade das formulações desenvolvidas com esse tipo de material. Por outro lado, apesar do formato circular evidenciado pelos agregados naturais, no estudo proposto não foi o suficiente para a trabalhabilidade adequada das formulações estudadas. A falta de finos e a granulometria menos contínua podem ter reduzido a trabalhabilidade das formulações. Conforme Carneiro e Cincotto (1999), um dos fatores que pode ser levado em conta para determinar a viscosidade nas argamassas é a granulometria dos agregados que, quando bem graduada, permite que as partículas mais finas rolem entre as mais grossas, levando a uma redução da quantidade de água necessária para a mistura. A figura 44 mostra o resultado de índice de consistência para todas as argamassas analisadas.

FIGURA 44 – ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA PARA AS ARGAMASSAS COM AGREGADOS: (A) $AN_{1,87}$, (B) AN2,69, (C) $AA_{2,04}$



FONTE: A autora (2021).

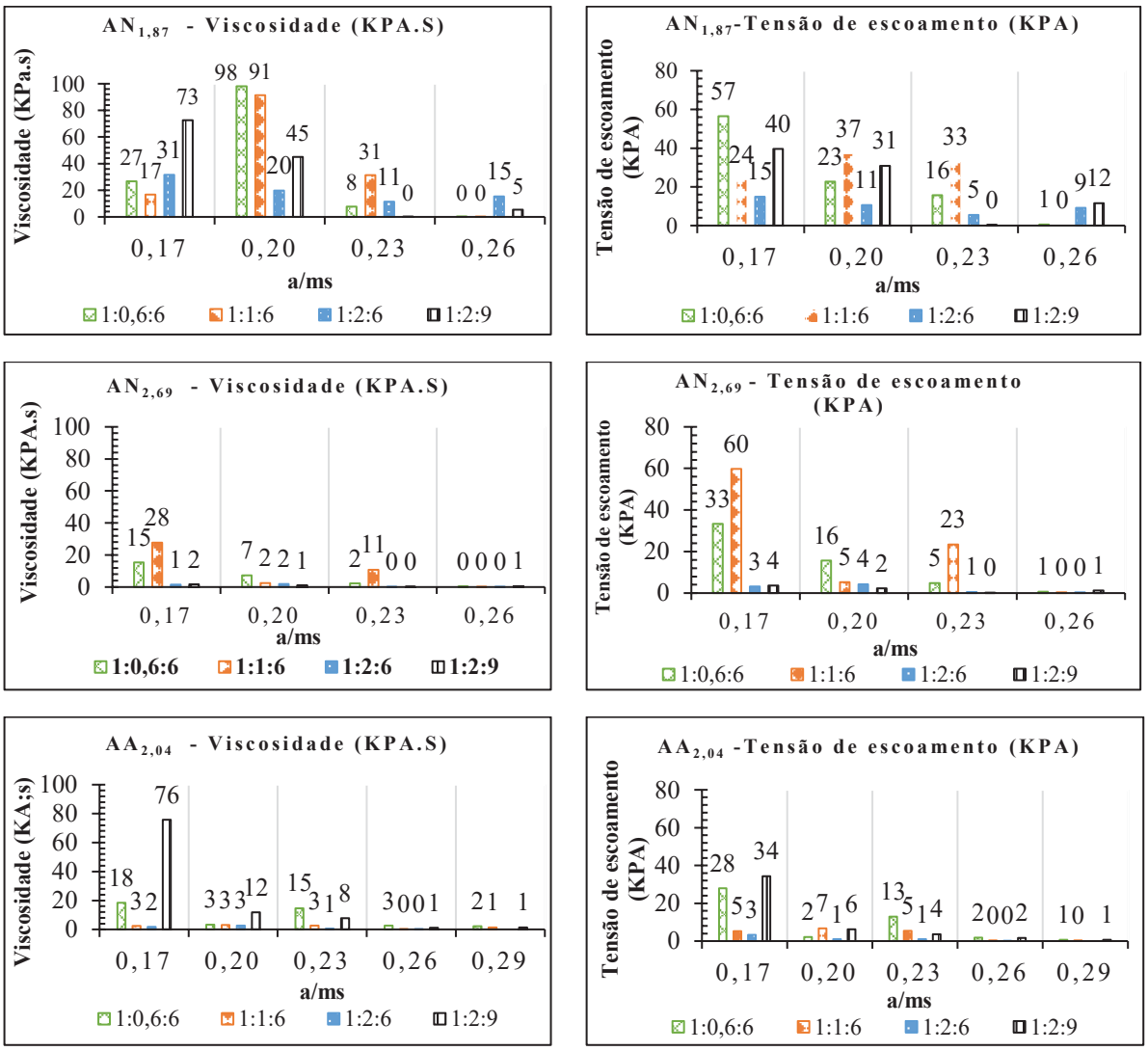
Pode-se observar na figura 44 que, ao analisar os três agregados, as argamassas desenvolvidas com o $AA_{2,04}$ apresentaram as maiores médias, em relação aos agregados naturais ($AN_{1,87}$ e $AN_{2,69}$). No entanto, por se tratar de uma diferença muito pequena (diferença relativa de 4,3%) é prematuro arbitrar qualquer característica dos agregados na influência desses resultados.

Com relação ao impacto das formulações no índice de consistência, foi possível observar que, para as formulações com menor volume de finos (aglomerantes) nas formulações 1:0,6:6 e 1:1:6, o índice de consistência foi menor (argamassa menor fluida) em comparação às formulações com mais aglomerantes. As análises quanto ao índice de consistência são cada vez

mais consensuais entre os especialistas, pois não devem serem utilizados isoladamente para definir a condição de trabalhabilidade para um determinado tipo de argamassa (BAUER *et al.,* 2005; CARDOSO, 2009; STOLZ, 2015).

Por fim, também a partir dos ensaios de *squeeze flow* foi possível determinar a viscosidade plástica e a tensão de escoamento por meio das equações (4) e (5), para a deformação de 2,50mm, respectivamente. Os resultados são exibidos na figura 45.

FIGURA 45 – VISCOSIDADE PLÁSTICA E TENSÃO DE ESCOAMENTO DAS FORMULAÇÕES PARA OS AGREGADOS: $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$



FONTE: A autora (2021).

Como é possível observar, as maiores viscosidades estão sendo destacadas pelas argamassas formuladas com $AN_{1,87}$ e as menores com agregado $AN_{2,69}$. Nos ensaios de *squeeze flow* (figuras 43, 44 e 45), observou-se igualmente essa mesma tendência. Esse fato mostra que só o proporcionamento dos materiais não é suficiente na análise do comportamento reológico das argamassas, mas também as características específicas de cada tipo de agregado, assim com a distribuição granulométrica de grãos, o teor de finos, a continuidade da curva, dentre outros têm grande influência neste comportamento. O agregado $AN_{1,87}$ com o menor teor de finos (1,16%) e uma granulometria menos contínua, quando o coeficiente de uniformidade foi o menor apresentado dentre os demais (C_{un}: 2,71), visualizado por meio da tabela 12, pode ter sido algumas das causas da elevada viscosidade salientada.

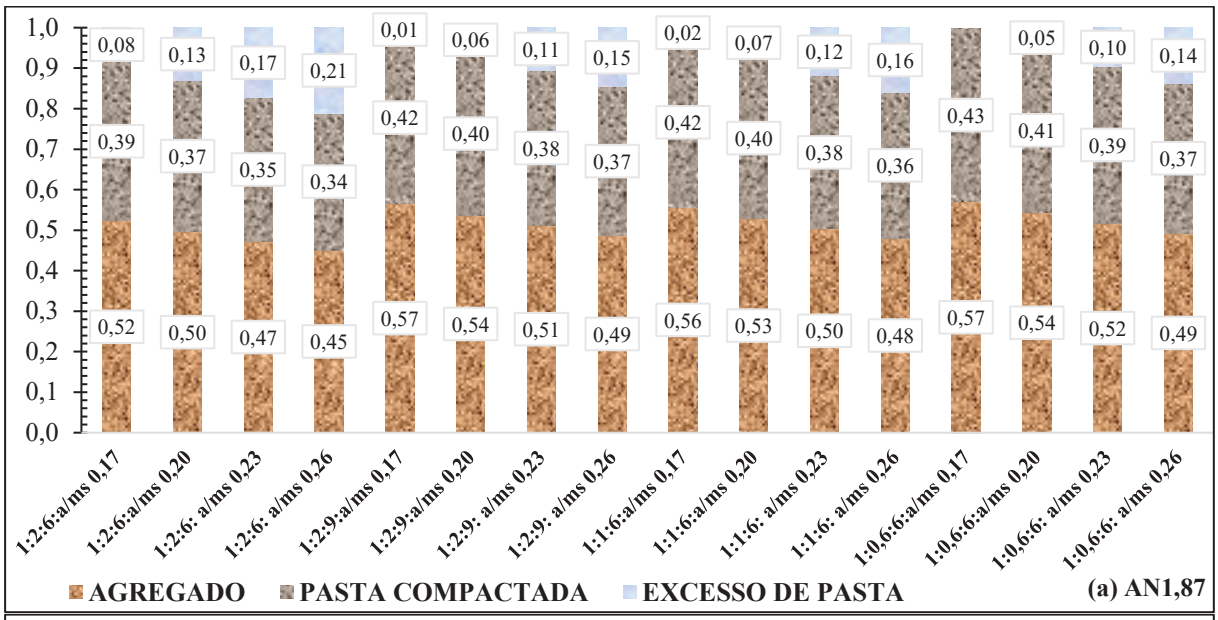
Com relação ao teor de água, como era esperado para todos os agregados analisados, quanto maior é a relação a/ms, menores são os resultados de viscosidade e, consequentemente, de tensão de escoamento.

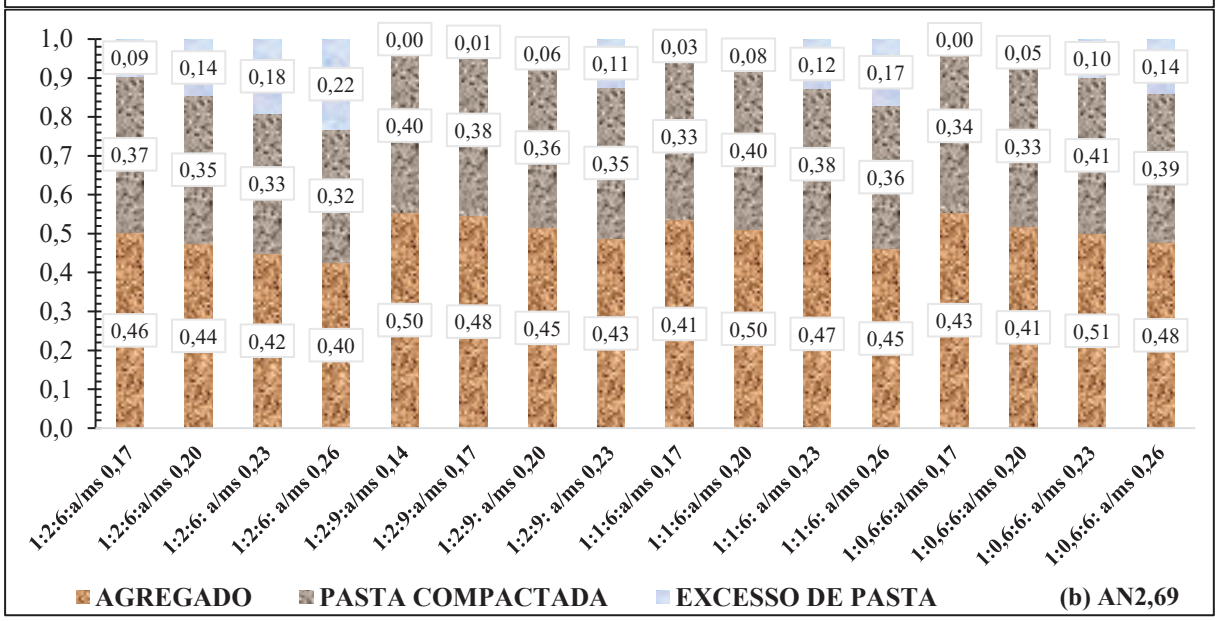
Como já foi mencionado, essa análise quanto à viscosidade aparente cabe destacar que elas são calculadas fixando a deformação em 2,5 mm. Sendo assim, essa viscosidade não traduz o comportamento que a argamassa apresenta em sua totalidade por ser tratar de um material que trabalha com fluxo homogêneo.

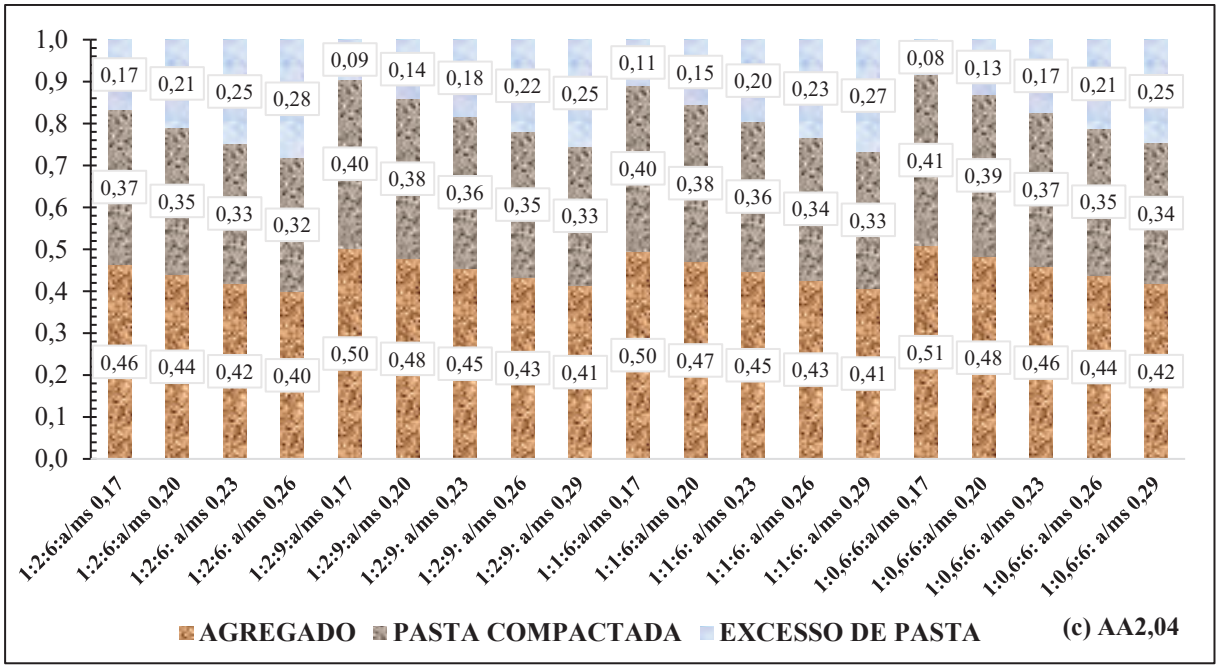
4.3.2 Estudo da influência do excesso de pasta no comportamento reológico das formulações

Na figura 46, encontram-se as distribuições volumétricas (m^3/m^3) das argamassas no estado fresco, dividido entre os agregados e pasta, conforme o cálculo dos consumos de materiais. A pasta está subdividida entre o volume de pasta compactada (equação 27) e excesso de pasta (equação 28), conforme descrita no capítulo 3.

FIGURA 46– VOLUME DE ARGAMASSA SUBDIVIDIDO EM AGREGADO, EXCESSO DE PASTA E PASTA COMPACTADA PARA 1M³: (A) $AN_{1,87}$, (B) $AN_{2,69}$ E (C) $AA_{2,04}$







FONTE: A autora (2021).

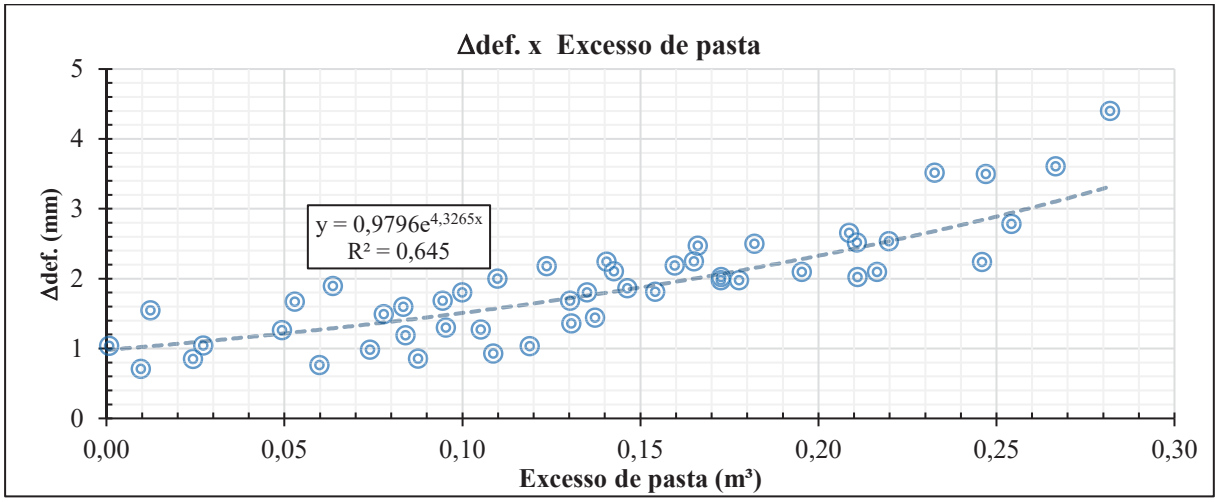
Como era esperado, quando há um acréscimo de água, consequentemente, há um aumento tanto do volume de pasta (m³), quanto do excesso (m³) dela, para todas as formulações enfatizadas (figura 46a, b e c). Nas argamassas, não basta a pasta compactada, visto que há a necessidade do excesso de água para que a argamassa se torne trabalhável e aplicável.

Para todos os agregados analisados, a maior quantidade de pasta (média entre todos os a/ms) e, consequentemente, excesso de pasta ocorreu na formulação 1:2:6. Essa informação é confirmada, tendo em vista que essa formulação exibe uma maior relação entre aglomerante/agregado (0,5), logo uma maior quantidade de pasta. Ao contrário, os menores valores de pasta (e excesso de pasta) foram identificados em duas diferentes formulações. Para o $AN_{2,69}$, a menor média está em 1:2:9 (0,456m³) e em $AN_{1,87}$ e $AA_{2,04}$ em 1:0,6:6 (0,469 e 0,538m³, respectivamente). Para Romano *et al.,* (2018), quando não se utiliza um aditivo incorporador de ar na mistura, o impacto das alterações granulométricas dos agregados é intensificado em função da proximidade das partículas e da maior força de atrito entre os grãos. Assim, quando é mantida a quantidade de água e o teor de pasta, e altera-se a distribuição granulométrica dos agregados, percebe-se uma alteração na viscosidade e tensão de escoamento da argamassa.

Com os dados referentes ao excesso de pasta, calculados por meio dos métodos e modelos de empacotamento de partículas (equação 28 do capítulo 3) , e o Δdef (mm) retirado das curvas do ensaio de *squeeze flow* (tabelas 20, 21 e 22) foi possível a seguinte análise

demonstrada na figura 47. Ressalta-se que no gráfico dessa figura foram utilizadas todas as formulações da pesquisa, sem agrupamento por formulação ou tipo de agregado.

FIGURA 47– RELAÇÃO ENTRE ΔDEF. E VOLUME DE EXCESSO DE PASTA



Fonte –A autora (2021).

Nota-se (figura 47) que há uma tendência na relação entre todos os dados obtidos sem necessariamente a separação de formulações por tipo de agregado, entretanto, com um coeficiente de determinação R^2 com um ajuste da curva igual a 0,65. A equação é representada pela letra "y" que significa os valores relacionados as Δdef. (mm) e o "x" representando o excesso de pasta (m^3). Ressalta-se ainda que o gráfico representa essa relação referente a todas as formulações das argamassas dosadas em laboratório, levanto em conta todos os agregados e todas as formulações desenvolvidas. Assim, aqui é demonstrada uma tendência de crescimento do Δdef. frente ao excesso de pasta com pouca influência das características dos agregados e formulações.

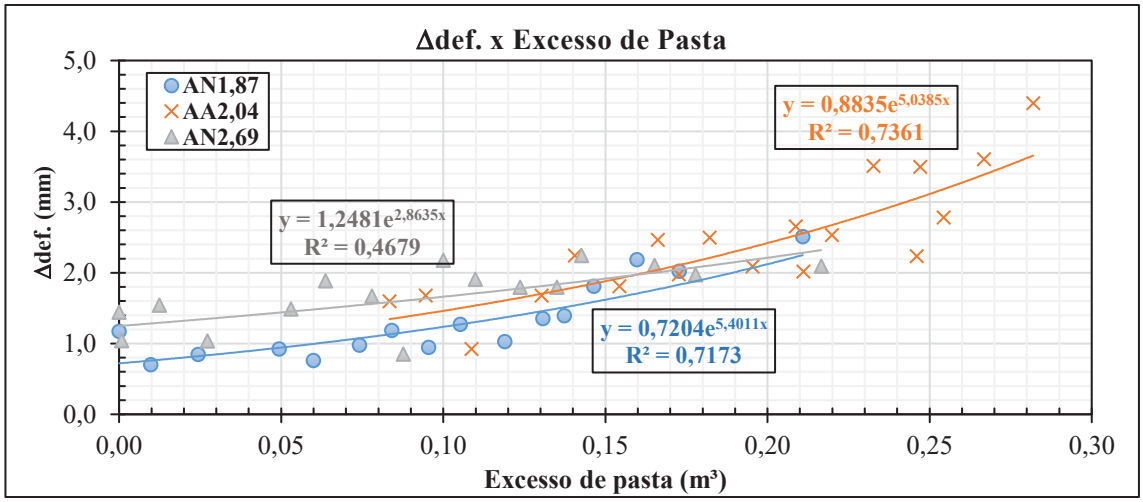
O excesso de pasta calculado por meio dos conceitos de empacotamento de partículas justifica o crescimento do Δdef. das formulações de argamassas de laboratório. O Δdef. representa um parâmetro reológico que está relacionado com a fluidez da argamassa, obtido a partir das curvas do ensaio de *squeeze flow*. Quanto maior é o Δdef. em uma formulação, maior será sua fluidez e melhor será a trabalhabilidade para a aplicação da argamassa. Em contrapartida, argamassas que não conseguem ter um comportamento plástico (baixos Δdef.), tendem a se tornarem materiais com maior dificuldade de espalhamento, aplicação, nivelamento, com níveis elevados de viscosidade ou uma sobrecarga na tensão de escoamento

para mante-se estável (ENGMANN *et al.,* 2005; CARDOSO, 2009; GRANDES *et al.,* 2018). O Δdef. também associado a um outro parâmetro que se relaciona à fluidez da argamassa, como o excesso de pasta, traz um aprofundamento no conhecimento do comportamento reológico das argamassas.

Já o excesso de pasta, que auxilia na verificação da fluidez das argamassas, foi baseado em uma teoria desenvolvida por Fennis *et al.* (2013), para dosagem de concretos ecológicos calcula o excesso de água na mistura. Nesse caso, essa teoria foi adaptada e, ao contrário do cálculo de água, optou-se pelo cálculo do excesso de pasta que representa melhor o universo das argamassas. O cálculo do excesso de pasta está descrito no capítulo 3 dessa pesquisa.

Com a finalidade de explorar esse comportamento percebido por meio da curva geral de Δdef. e excesso de pasta (figura 47), dividiu-se a relação geral encontrada em grupos de formulações, de acordo com cada tipo de agregado ($AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ e $AA_{2,04}$) e está sendo demonstrado por meio da figura 48.

FIGURA 48– RELAÇÃO ENTRE ΔDEF. E VOLUME DE EXCESSO DE PASTA DIVIDIDA POR TIPOS DE AGREGADOS



FONTE: A autora (2021).

Verifica-se pelo gráfico da figura 48 que quando há a divisão de agregados para essa mesma relação de Δdef. e excesso de pasta, não há um acréscimo expressivo entre o coeficiente de determinação das equações de cada agregado comparado com a curva geral. O R^2 de $AN_{2,69}$ foi a exceção desse acréscimo no R^2, tendo em vista de que esse conjunto de dados quando separado dos demais passa a ter um R^2 de 0,4122. Já o $AN_{1,87}$ foi o agregado que mais se

distanciou quanto ao coeficiente de determinação da curva (R^2: 0,733) em relação à curva geral (R^2: 0,645).

A diferença entre as características dos agregados utilizados pode ter sido o que impactou no comportamento das curvas demonstradas (figura 48). O $AN_{2,69}$ teve um impacto maior na curva, que pode ter sido influenciado pela esfericidade dos grãos (figura 16, capítulo 3). O agregado $AN_{2,69}$ tem partículas mais grossas, em comparação aos demais agregados, e estas ainda com esfericidade baixa (grãos retidos nas peneiras maiores, apresentam-se menos esféricos do que nas peneiras menores) em comparação com os demais agregados. Em contrapartida, o agregado $AN_{1,87}$ foi o que evidenciou graus de esfericidade elevados (figura 16, capítulo 3) para a maioria das peneiras, sem alterações significantes na esfericidade por abertura de peneira.

Com a finalidade de verificar essa significância entre os tipos de agregados, foi aplicada a análise de variância (ANOVA) demonstrada por meio da tabela 24.

TABELA 24 – APLICAÇÃO ANOVA PARA ΔDEF. ENTRE OS AGREGADOS UTILIZADOS

Grupo	*Contagem*	*Soma*	*Média*	*Variância*
AN1,87	4	5,272	1,318	0,094178
AN2,69	4	6,7612	1,6903	0,001288
AA2,04	4	9,3918	2,34795	0,394452

Fonte da variação	*SQ*	*Gl*	*MQ*	*F*	*valor-P*	*valor-P*	*F crítico*
Entre grupos	2,175877	2	1,087939	6,661961	0,016774		4,256495
Dentro dos grupos	1,469754	9	0,163306			P<0,05 mostra que existe significância entre os agregados	
Total	3,645632	11					

gl: grau de liberdade
MQ: médias quadradas
F: Distribuição F de SNEDECOR
Valor-P: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste
F crítico: comparação da hipótese.

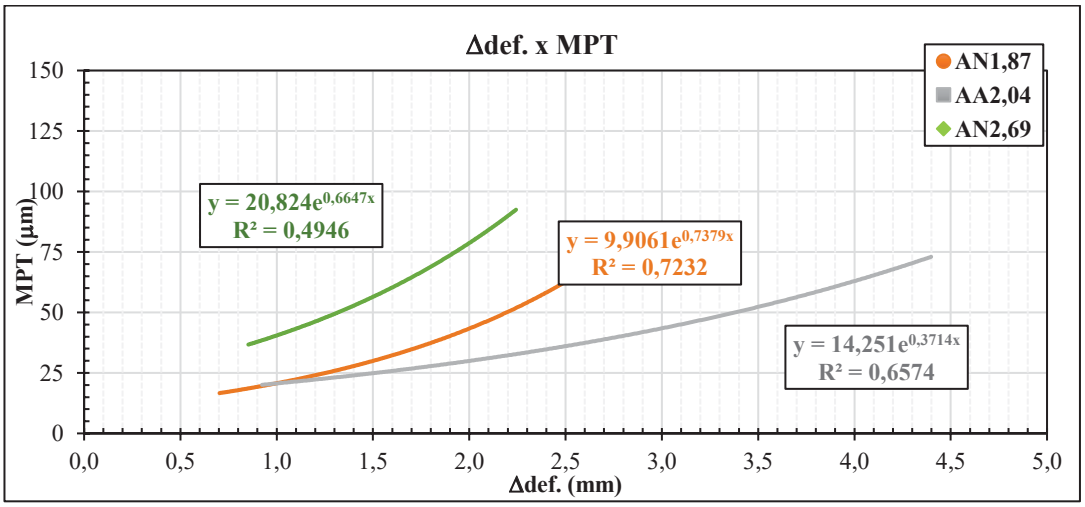
FONTE: A autora (2021).

Como era esperado, é possível observar a partir do valor-P <0,05 (0,016774) que há diferença nas relações de Δdef. *versus* excesso de pasta quando há uma modificação nas características dos agregados.

Outro aspecto que pode ser associado à fluidez das argamassas é o estudo da distância entre partículas. Por intermédio as figuras 49 e 50, é possível demonstrar a relação referente ao Δdef (mm) com as respectivas correlações de MPT (espessura da camada de pasta que separa

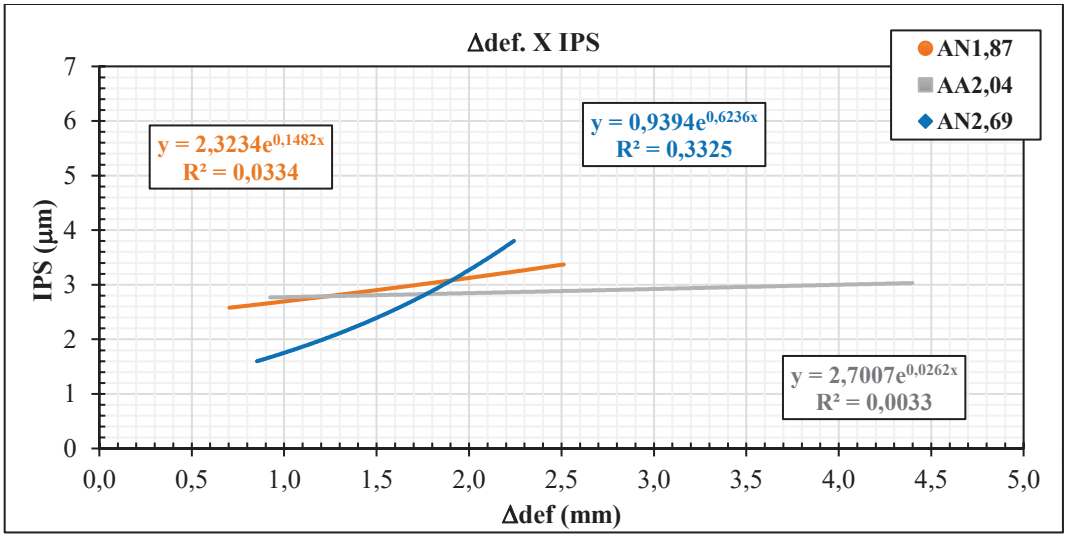
os agregados) e IPS (distância de separação entre as partículas mais finas). Os dados de ambos os gráficos contêm os resultados de todas as formulações e agregados utilizados. Os detalhes dos cálculos do MPT e IPS estão apresentados no apêndice E (figura E1, E2 e E3).

FIGURA 49– RELAÇÃO ENTRE ΔDEF. E MPT



FONTE: A autora (2021).

FIGURA 50– RELAÇÃO ENTRE ΔDEF. E IPS



FONTE: A autora (2021).

É possível observar que há uma relação aceitável entre o Δdef. e o MPT, para as argamassas utilizadas com os três agregados, independentemente da sua formulação. Essa relação pode ser vista a partir do R^2 das curvas exponenciais apresentadas. Essa correlação representa uma convergência na trabalhabilidade das argamassas. Quanto maior a distância de

separação entre as partículas graúdas (MPT) que compõem o sistema, maior a fluidez resultante (BONADIA *et al.,* 1999). Esse mesmo comportamento pode ser descrito também por intermédio do parâmetro Δdef. É importante afirmar que há uma influência significativa do empacotamento de partículas, representado pelo efeito dos agregados, no comportamento reológico das argamassas (POWERS, 1968; HU; LARRARD, 1995).

Em contrapartida, não foi possível demonstrar uma boa correlação entre o Δdef. e IPS. De acordo com Cardoso (2009), a utilização dessa relação na interpretação dos resultados de caracterização reológica das argamassas é mais complexa por conta da influência dos teores de ar. A argamassa figuram como um fluido compressível por meio do qual os teores de ar são representados por bolhas que podem colapsar, podendo exercer uma influência desconhecida, principalmente na matriz cimentícia. No agregado, o ar atua diretamente como pasta, aumentando a sua quantidade e, consequentemente, influenciando no aumento da distância dos grãos dos agregados, associado ao acréscimo do MPT. Contudo, na pasta, o ar não é representado como um fluido contínuo que se mistura como a água, ou seja, ele fica separado em regiões definidas (bolhas) e as partículas finas ficam na interface entre o ar-pasta das bolhas (STRUBLE; JIANG, 2004). Por conta disso, a aplicação do IPS nas argamassas necessita de cuidados, tendo em vista de que o ar é um fluido presente na pasta, mas que não afasta as partículas finas na suspensão. Assim, a maior relevância para o comportamento reológico de argamassas sob *squeeze flow* ainda está representada pelo atrito dos agregados (CARDOSO, 2009).

4.4 ETAPA IV – PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Os resultados do comportamento no estado endurecido das argamassas estão sendo apresentados e analisados por meio dos ensaios de resistência à compressão (f_c), resistência à tração na flexão (f_t) e módulo de elasticidade (E), conforme tabela 25.

TABELA 25 – RESUMO DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS DOSADAS EM LABORATÓRIO

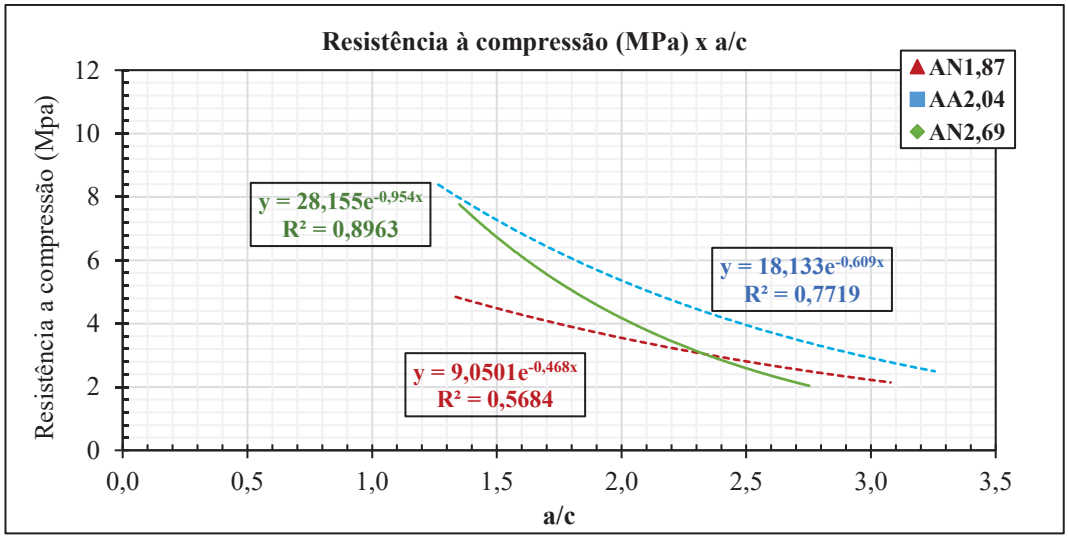
Agregado x Formulação	a/ms	Densidade (kg/m³)	fc (MPa)		ft (MPa)		E (GPa)	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
$AN_{1,87}$ (1:0,6:6)	0,17	1772,7	4,39	0,26	1,58	0,19	8,12	0,75
$AN_{1,87}$ (1:0,6:6)	0,2	1818,4	4,49	0,42	1,47	0,05	7,62	0,14
$AN_{1,87}$ (1:0,6:6)	0,23	1801,3	4,12	0,23	1,50	0,15	5,74	0,64
$AN_{1,87}$ (1:0,6:6)	0,26	1711,3	2,52	0,25	1,00	0,06	4,99	0,03
$AN_{1,87}$ (1:1:6)	0,17	1480,4	4,06	0,14	1,46	0,04	9,84	0,09
$AN_{1,87}$ (1:1:6)	0,2	1858,3	4,70	0,13	1,59	0,08	6,38	0,10
$AN_{1,87}$ (1:1:6)	0,23	1763,9	4,10	0,08	1,51	0,02	4,75	0,12
$AN_{1,87}$ (1:1:6)	0,26	1735,1	2,90	0,35	1,24	0,14	4,94	0,19
$AN_{1,87}$ (1:2:6)	0,17	1812,4	5,34	0,47	2,28	0,16	12,46	0,28
$AN_{1,87}$ (1:2:6)	0,2	1861,6	4,57	0,37	1,50	0,02	9,73	0,71
$AN_{1,87}$ (1:2:6)	0,23	1799,6	4,98	0,19	1,59	0,13	8,30	0,11
AN1,87 (1:2:6)	0,26	1757,7	3,95	0,16	1,48	0,10	7,12	0,24
$AN_{1,87}$ (1:2:9)	0,17	1715,6	2,81	0,03	0,18	0,16	0,16	0,29
$AN_{1,87}$ (1:2:9)	0,2	2706,0	2,80	0,18	0,88	0,13	6,70	0,20
$AN_{1,87}$ (1:2:9)	0,23	1748,8	1,95	0,09	0,79	0,01	5,17	0,10
$AN_{1,87}$ (1:2:9)	0,26	1670,5	2,66	0,16	1,03	0,11	3,87	0,17
$AN_{2,69}$ (1:0,6:6)	0,17	1988,8	7,92	0,37	2,53	0,03	15,72	0,36
$AN_{2,69}$ (1:0,6:6)	0,2	1929,6	6,33	0,16	2,07	0,10	13,71	0,56
$AN_{2,69}$ (1:0,6:6)	0,23	1891,2	3,94	0,12	1,51	0,11	9,06	0,44
$AN_{2,69}$ (1:0,6:6)	0,26	1730,6	2,75	0,19	1,14	0,10	5,18	0,43
$AN_{2,69}$ (1:1:6)	0,17	1949,4	8,11	0,17	2,22	0,09	13,82	0,56
$AN_{2,69}$ (1:1:6)	0,2	1946,7	5,95	0,51	2,00	0,09	11,49	0,21
$AN_{2,69}$ (1:1:6)	0,23	1852,1	4,57	0,16	1,57	0,21	10,17	0,69
$AN_{2,69}$ (1:1:6)	0,26	1880,4	3,64	0,16	1,42	0,02	7,16	0,47
$AN_{2,69}$ (1:2:6)	0,17	1889,8	6,98	0,29	2,08	0,12	14,62	0,25
$AN_{2,69}$ (1:2:6)	0,2	1926,0	6,15	0,24	2,13	0,15	14,28	0,08
$AN_{2,69}$ (1:2:6)	0,23	1910,8	5,34	0,25	1,75	0,25	10,90	0,32
$AN_{2,69}$ (1:2:6)	0,26	1794,0	3,98	0,21	1,42	0,06	9,34	0,26
$AN_{2,69}$ (1:2:9)	0,14	1936,4	5,89	0,26	2,02	0,10	13,26	0,22
$AN_{2,69}$ (1:2:9)	0,17	1894,7	3,58	0,15	1,41	0,15	8,70	0,01
$AN_{2,69}$ (1:2:9)	0,2	1828,4	2,65	0,10	1,08	0,03	5,44	0,53
$AN_{2,69}$ (1:2:9)	0,23	1851,5	2,31	0,07	0,93	0,13	6,31	0,38
$AA_{2,04}$ (1:0,6:6)	0,17	1862,0	10,11	0,40	3,52	0,01	14,23	0,00
$AA_{2,04}$ (1:0,6:6)	0,2	1875,7	9,82	0,36	3,43	0,00	11,68	0,29
$AA_{2,04}$ (1:0,6:6)	0,23	1804,6	6,89	0,20	2,12	0,11	9,36	0,22
$AA_{2,04}$ (1:0,6:6)	0,26	1706,6	6,13	0,06	1,92	0,04	6,55	0,10
$AA_{2,04}$ (1:0,6:6)	0,29	1687,6	5,33	0,24	1,64	0,16	6,16	0,20
$AA_{2,04}$ (1:1:6)	0,17	1798,5	7,36	0,35	2,12	0,12	12,59	0,45
$AA_{2,04}$ (1:1:6)	0,2	1831,5	6,41	0,25	1,98	0,19	11,21	0,17
$AA_{2,04}$ (1:1:6)	0,23	1763,9	5,85	0,40	1,88	0,16	9,96	0,10
$AA_{2,04}$ (1:1:6)	0,26	1785,6	4,53	0,22	1,55	0,03	8,68	0,10
AA2,04 (1:1:6)	0,29	1700,3	3,63	0,26	1,44	0,18	6,02	0,37
$AA_{2,04}$ (1:2:6)	0,17	1836,3	8,88	0,32	2,49	0,20	13,01	0,57
$AA_{2,04}$ (1:2:6)	0,2	1792,2	6,35	0,27	2,24	0,07	11,86	0,55
$AA_{2,04}$ (1:2:6)	0,23	1755,5	5,11	0,06	1,79	0,18	8,44	0,20
$AA_{2,04}$ (1:2:6)	0,26	1678,9	3,45	0,27	1,52	0,03	6,05	0,05
$AA_{2,04}$ (1:2:9)	0,17	1768,2	6,58	0,29	2,18	0,10	8,88	0,06
$AA_{2,04}$ (1:2:9)	0,2	1768,1	5,17	0,30	1,79	0,18	7,02	0,37
$AA_{2,04}$ (1:2:9)	0,23	1735,5	2,85	0,24	1,02	0,04	5,21	0,24
$AA_{2,04}$ (1:2:9)	0,26	1704,3	3,63	0,08	1,55	0,01	4,67	0,10
$AA_{2,04}$ (1:2:9)	0,29	1742,9	3,15	0,09	1,04	0,05	4,59	0,50

FONTE: A autora (2021).

Foram desenvolvidas todas as formulações do estudo no estado endurecido. Com isso, foi possível informar com mais detalhes as diretrizes de dosagem de argamassas que serão descritas no item a seguir. Foram respeitados os desvios padrões de 0,3 MPa para a resistência à tração na flexão e 0,5 MPa para a resistência à compressão, tal como recomenda a NBR 13279 (ABNT, 2005).

Por intermédio da figura 51, é possível observar a relação entre os resultados de resistência à compressão *versus* relação a/c para os três agregados estudados.

FIGURA 51 –RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E RELAÇÃO A/C PARA TODAS AS ARGAMASSAS PARA $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$



FONTE: A autora (2021).

Observa-se (figura 51) que todas as linhas de tendência exponencial representadas pelo R^2 salientam uma boa correlação. Quando a análise de variância (ANOVA) é aplicada entre as médias de formulações com a finalidade de averiguar a significância entre os agregados, também é possível constatar essa relação, assim como mostra a tabela 26.

TABELA 26 – APLICAÇÃO ANOVA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS FORMULAÇÕES DAS ARGAMASSAS DE LABORATÓRIO

Grupo	*Contagem*	*Soma*	*Média*	*Variância*
AN1,87	4	15,083542	3,7708854	0,801516
AN2,69	4	20,019583	5,0048958	0,90088
AA2,04	4	24,770625	6,1926563	2,309845

Fonte da variação	*SQ*	*gl*	*MQ*	*F*	*valor-P*		*F crítico*
Entre grupos	11,731374	2	5,865687	4,385844	0,046807	Se valor-P<0,05 existe diferença significativa entre os agregados	4,256495
Dentro dos grupos	12,0367227	9	1,3374136				
Total	23,7680967	11					

SQ: soma de quadrados
gl: grau de liberdade
MQ: médias quadradas
F: Distribuição F de SNEDECOR
Valor-P: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste
F crítico: comparação da hipótese.

FONTE: A autora (2021).

Com base no ANOVA, foi possível verificar que, de fato, há uma diferença significativa quando ocorre uma mudança nos agregados na relação de a/ms e fc, pois o valor-P resultou em 0,046807, que demonstra a significância dos grupos analisados. Já para a análise dos dados das curvas (figura 51), pode-se fixar um valor a/c médio e, assim, numericamente discorrer acerca de uma análise comparativa. Então, para um a/c arbitrado em 2, o fc calculado por meio das equações para $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ e $AA_{2,04}$ chega, respectivamente, em 3,54, 4,17 e 5,36 MPa. A diferença relativa entre as curvas de cada agregado pode chegar em até 33,8%, mostrando significância de resultados.

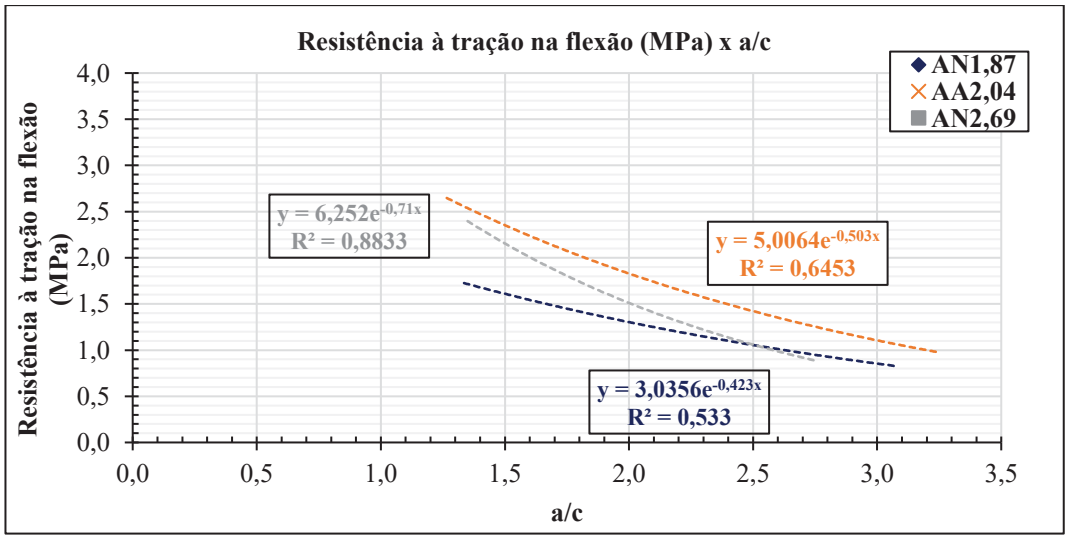
As formulações compostas pelo agregado artificial tiveram melhor desempenho em comparação com os agregados naturais. O agregado artificial apresentou-se com o maior grau de uniformidade (C_{un}: 4,08) em relação aos demais agregados (tabela 12), isso mostra um maior empacotamento de partículas tendo em vista de que os grãos melhores se acomodaram na mistura influenciando suas resistências mecânicas. A área superficial do $AA_{2,04}$ (8,52 m²/kg) também se apresenta com o maior valor em relação aos $AN_{1,87}$ e $AN_{2,69}$ (7,64 m²/kg e 4,10 m²/kg, respectivamente), o que também pode ter mais uma justificativa para as resistências a compressão apresentadas. Área superficial pode ser traduzida como um material com formato menos circular (tabela 13) e com superfície porosa, observado por meio das imagens do microscópio digital (figura 14). Além disso, esses atributos apresentados na caracterização dos agregados corroboram com o maior volume (médio) de pasta, também obtido nas formulações

com agregado artificial (0,550m³/m³), chegando em uma diferença relativa de 11,81% com relação ao agregado ($AN_{1,87}$) com menor volume de pasta.

Ao classificar essas argamassas de laboratório quanto à NBR 13281 (ABNT, 2005a) para a resistência à compressão, verificou-se que se encontram compreendidas entre as classes P2 (Fc:1,95 MPa em 1:2:9 com a/ms 0,23 em $AN_{1,87}$) a P6 (Fc: 10,11 MPa em 1:0,6:6 com a/ms 0,17 – $AA_{2,04}$), demonstrando que, por meio da norma, não é possível fixar parâmetros mais pontuais que remetam a qualidade do material e sim apenas à uma classificação mercadológica de produtos. As argamassas que se apresentam com maior resistência à compressão, quando houve uma maior classificação de P5 e P6, foram as dosadas com $AA_{2,04.}$ Ao que tudo indica, os finos mostrados nesse material podem ter ajudado no empacotamento das partículas, maior volume de pasta e, consequentemente, no aumento das resistências para esse conjunto de argamassas. Em contrapartida, as argamassas formuladas com $AN_{1,87}$ foram as que apresentaram as menores resistência a compressão, com resultados compreendidos entre 1,95 MPa e 5,34 MPa, o que significa uma classificação por norma que varia de argamassas classificadas por norma em P2 a P5.

A figura 52, que está sendo demostrada a seguir, enfatiza a mesma correlação entre Ft e a/c, porém dividindo os grupos de agregados. A tabela 27 mostra a análise ANOVA desenvolvida para essas mesmas correlações.

FIGURA 52 – RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO E RELAÇÃO A/C PARA AS ARGAMASSAS FORMULADAS EM LABORATÓRIO PARA $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$



Fonte –A autora (2021).

TABELA 27 – APLICAÇÃO ANOVA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS FORMULAÇÕES DAS ARGAMASSAS DE LABORATÓRIO

Grupo	*Contagem*	*Soma*	*Média*	*Variância*
AN1,87	4	5,499583	1,374896	0,100344
AN2,69	4	6,817917	1,704479	0,053318
AA2,04	4	8,27375	2,068438	0,228229

Fonte da variação	*SQ*	*Gl*	*MQ*	*F*	*valor-P*	*valor-P*	*F crítico*
Entre grupos	0,962788	2	0,481394	3,78166	0,064258	P≥0,05 mostra que não existe diferença significativa entre os agregados	4,256495
Dentro dos grupos	1,145673	9	0,127297				
Total	2,108461	11					

SQ: soma de quadrados
gl: grau de liberdade
MQ: médias quadradas
F: Distribuição F de SNEDECOR
Valor-P: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste
F crítico: comparação da hipótese.

FONTE: A autora (2021).

O resultado do ANOVA (tabela 27) demonstrou que o grupo dos agregados para esses dados de resistência à tração na flexão não apresentou diferença significativa, tendo em vista de que o P-valor resultou em 0,064258 (≥0,05). Por intermédio da figura 52, é possível visualizar uma pequena diferença entre a resistência a tração na flexão quando se dividem os grupos de agregados ($AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ e $AA_{2,04}$).

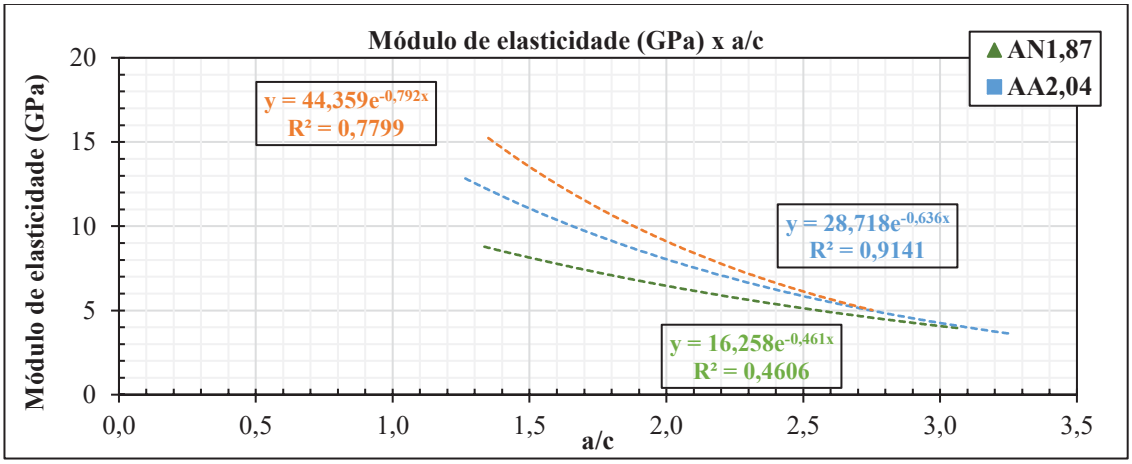
A curva de tendência exponencial figurou como satisfatória na correlação representada pelo coeficiente de determinação do $AN_{2,69}$ em $R^2 = 0,8801$. Todavia, para os demais agregados, as curvas apresentaram coeficiente de determinação baixo, porém com valores próximos ($AN_{1,87}$ com R^2 de 0,5661 e $AA_{2,04}$ com R^2 de 0,6934).

Quando há uma análise nas equações emitidas a partir das linhas de tendência exponenciais também pode ser fixado um valor para a/c e assim é possível uma análise comparativa. Para o a/c:2, tem-se os resultados de F_t para os agregados $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ e $AA_{2,04}$, respectivamente: 1,30, 1,51 e 1,83 MPa. Como era esperado, o $AA_{2,04}$ apresentou-se com ft superior aos demais agregados, igualmente visto nos resultados de resistência à compressão, chegando em uma diferença de 28,96% em relação ao menor valor, representado pelo agregado $AN_{1,87}$.

A resistência à tração na flexão também é classificada de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005) e, como era esperado, as formulações desenvolvidas com $AA_{2,04}$ também chegaram a enfatizar R5 em sua classificação (Ft: 3,52 MPa - 1:0,6:6 a/ms:0,17). O agregado $AN_{1,87}$ obteve os menores valores de Ft, chegando em 0,79 MPa (1:2:9 a/ms 0,23).

A figura 53 mostra a mesma correlação entre E (GPa) e a/c para os três agregados da pesquisa e a tabela 28 exibe a análise ANOVA desenvolvida para essas mesmas correlações.

FIGURA 53– MÓDULO DE ELASTICIDADE E A/C PARA AS ARGAMASSAS FORMULADAS EM LABORATÓRIO PARA $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$



FONTE: A autora (2021).

TABELA 28 – APLICAÇÃO ANOVA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS FORMULAÇÕES DAS ARGAMASSAS DE LABORATÓRIO

Grupo	*Contagem*	*Soma*	*Média*	*Variância*
AN1,87	4	27,74417	6,9360417	3,079202
AN2,69	4	42,29208	10,573021	2,552379
AA2,04	4	37,34875	9,3371875	3,83411

Fonte da variação	*SQ*	*gl*	*MQ*	*F*	*valor-P*	*valor-P*	*F crítico*
Entre grupos	27,360537	2	13,680269	4,335743	0,048013	P<0,05 mostra que existe diferença significativa entre os agregados	4,256495
Dentro dos grupos	28,397072	9	3,1552303				
Total	55,757609	11					

SQ: soma de quadrados
gl: grau de liberdade
MQ: médias quadradas
F: Distribuição F de SNEDECOR
Valor-P: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste
F crítico: comparação da hipótese.

FONTE: A autora (2021).

Nota-se, por meio da tabela 28, que esse grupo de resultados divididos entre os agregados teve uma significância entre o tipo de agregado na análise, pois o *valor-P* , apesar de muito próximo ao limite de 0,05 (Valor-P: 0,048), ainda assim resulta em diferenças

significativas com confiança de 95% entre os tipos de agregados para os resultados de módulo de elasticidade.

Quanto às correlações no coeficiente de determinação R^2, tem-se os agregados $AA_{2,04}$ e $AN_{2,69}$ com boas resultados, chegando em valores acima de 0,70 e muito próximos entre si. Já para o agregado $AN_{1,87}$, a mesma correlação em R^2=0,48, desmontando algum tipo de erro, possivelmente de ensaio, compactação, ou até mesmo da própria metodologia utilizada na determinação do módulo de elasticidade com o coeficiente de *Poisson* (υ=0,20).

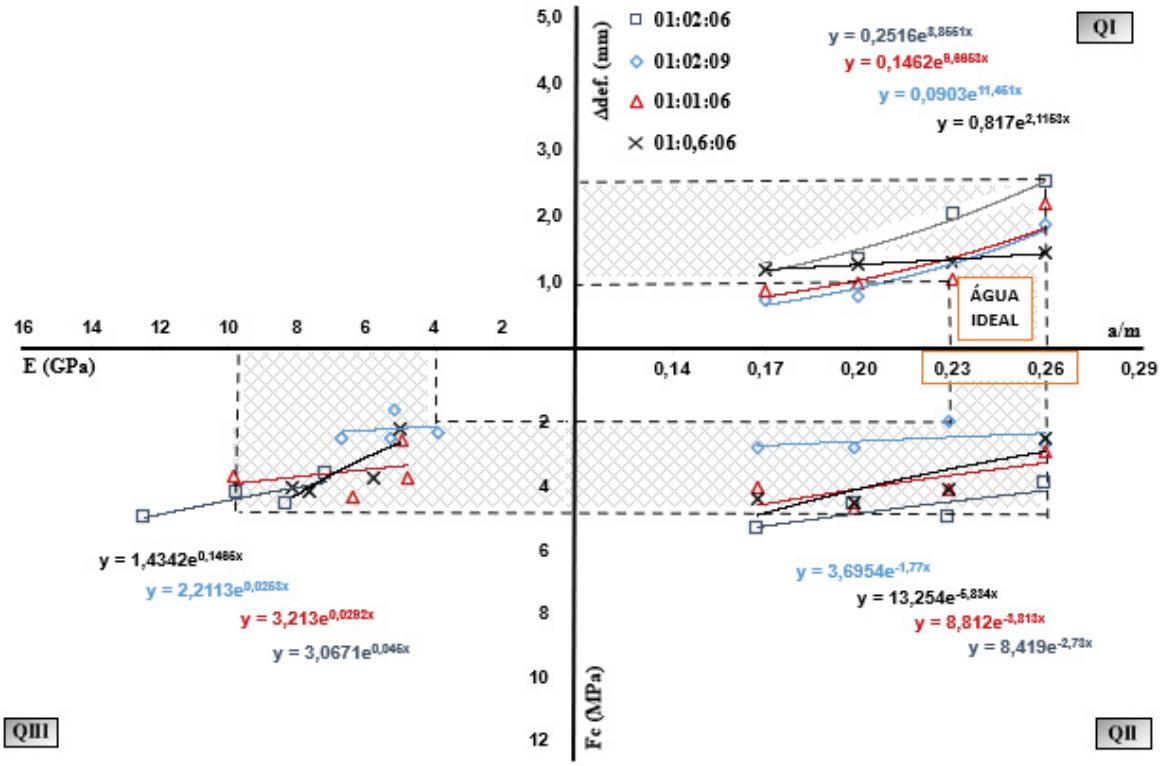
Na análise da figura 53, é possível verificar uma diferença relativa de 29% entre os resultados dos agregados ($AN_{1,87}$: 6,46 GPa, $AN_{2,69}$=9,1GPa e $AA_{2,04}$=8,04 GPa), quando fixado o a/c em 2. Diferente do esperado, como já descrito nos resultados mecânicos, o maior valor de módulo está relacionado com o $AN_{2,69}$ e não com o $AA_{2,04}$, como era esperado. Para Constantinides (2004), como há uma relação entre o tamanho do corpo de prova e o comprimento de onda nos ensaios com o ultrassom, isso pode corroborar com uma distorção de resultados, principalmente nos corpos de prova prismáticos, utilizado nas argamassas. Assim, recomenda-se que o comprimento de onda deve ser maior que o comprimento do corpo de prova utilizado no ensaio.

Para as argamassas de revestimento, o parâmetro relacionado ao módulo tem grande relevância e deve ser analisado com cautela, pois o material necessariamente deverá salientar uma capacidade de se deformar, sem falhas, quando submetidas à carga externa e ações. Quando a argamassa apresentar um elevado módulo de elasticidade, ela evidenciar baixa ductilidade para responder às deformações quando submetida às tensões, ficando suscetíveis às fissuras e rachaduras no revestimento (MARQUES *et al.,* 2020).

Por fim, foi desenvolvido um diagrama para cada tipo de agregado, com o objetivo de evidenciar as correlações entre alguns parâmetros obtidos no estudo. O diagrama foi dividido em três partes, sendo elas: quadrante I (QI) relacionando Δdef. e relação a/ms, quadrante II (QII) relacionando a/ms e Fc e quadrante III (QIII) relacionando resistência a compressão (fc) e módulo de elasticidade (E). Junto ao diagrama está o indicativo da faixa ideal de água, adquirido nas etapas II e III desse estudo, para as quatro formulações testadas.

A figura 54 demonstra o diagrama para o $AN_{1,87}$.

FIGURA 54– DIAGRAMA COM AS CORRELAÇÕES DE ΔDEF. E PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS FORMULADAS EM LABORATÓRIO PARA $AN_{1,87}$



FONTE: A autora (2021).

Conforme figura 54, em QI é possível observar, como era esperado, uma relação diretamente proporcional entre a relação a/ms e Δdef, ou seja, quando há um acréscimo de água a tendência é que a argamassa se apresente mais trabalhável com maiores Δdef. Essa relação pode ser visualizada para as quatro formulações ensaiadas. O efeito do acréscimo de água nas argamassas tende a influenciar no maior afastamento e lubrificação dos grãos, impactando na diminuição da viscosidade da pasta, e consequentemente aumentando a capacidade plástica do material. Assim o atrito entre os agregados diminui, visto que o acréscimo de água, além de impactar nas características da pasta, influência também fornecimento de uma película mais espessa de líquido que envolve a superfície dos agregados, consequentemente elevando esse afastamento dos grãos (Cardoso, 2009). A influência das diferentes formulações teve um pequeno impacto entre a/ms e Δdef., onde a relação 1:2:9, foi a que apresentou a menor média referente aos quatro teores de água ensaiados. Como era esperado a formulação com maior

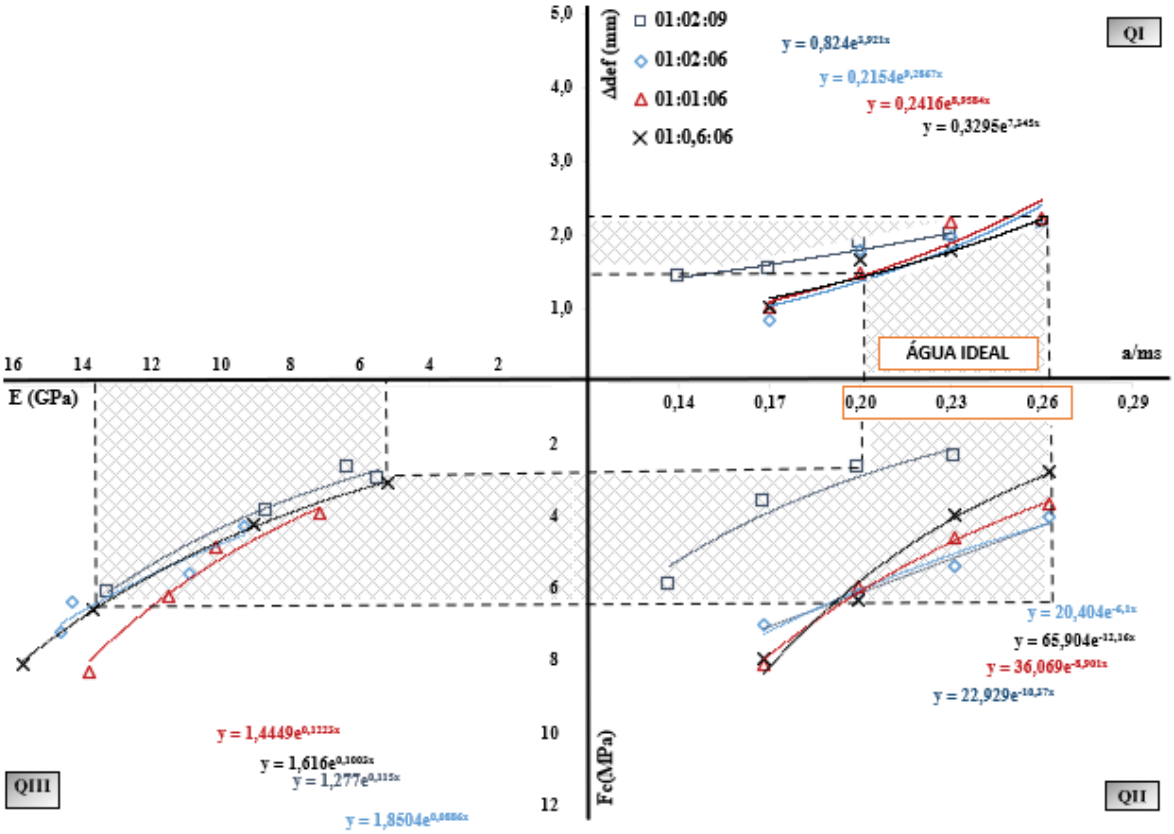
volume de aglomerante (1:2:6) representou a maior média de Δdef, em comparação as demais formulações.

No quadrante II (QII), a relação foi desenvolvida baseada na relação a/ms e resistência a compressão. Ao considerar essa faixa de água ideal (entre 0,23 a 0,26) é possível visualizar valores de fc com intervalo entre 1,95 a 4,98 MPa. As resistências elencadas através do gráfico se enquadram nos limites da norma NBR 13281 (ABNT, 2005) como sendo argamassas classificadas entre as classes P2 à P4. Essa diferença é evidenciada através das diferentes formulações, onde o mesmo racional foi observado quando analisado o gráfico referente e formulações com diferentes quantidades de aglomerante utilizadas.

Por fim, o último quadrante (QIII) apresenta a relação entre resistência (Fc) e módulo de elasticidade (E), onde a faixa de valores resultante do agregado natural $AN_{1,87}$ foi entre 3,9 GPa a 9,7 GPa. A formulação que apresentou elevado módulo de elasticidade (E=12,46GPa) foi a 1:2:6, onde é possivel verificar que o excesso de aglomerante em relação ao agregado também não é sinônimo de qualidade nas argamassas.

A figura 55 demonstra o diagrama das correlações desenvolvidas para as formulações com o agregado $AN_{2,69}$.

FIGURA 55– DIAGRAMA COM AS CORRELAÇÕES DE ΔDEF. E PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS FORMULADAS EM LABORATÓRIO PARA $AN_{2,69}$



FONTE: A autora (2021).

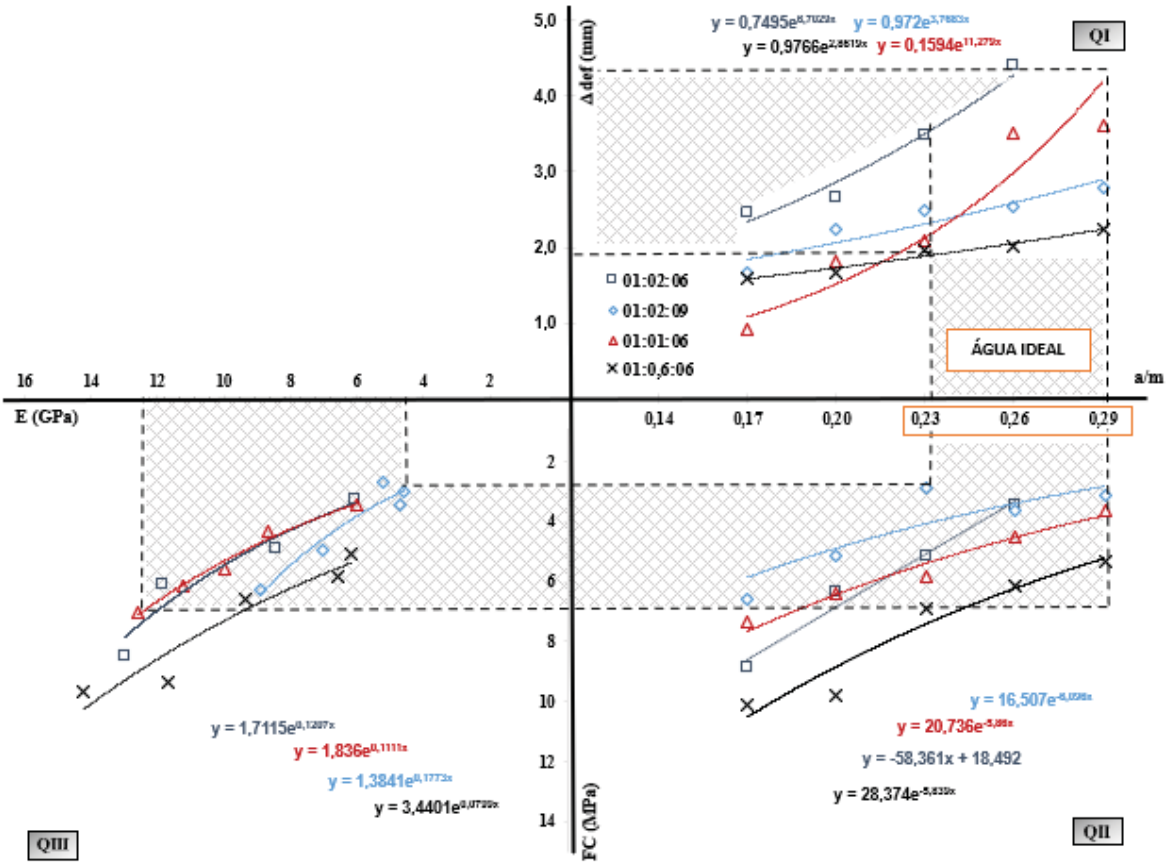
O diagrama da figura 55 com $AN_{2,69}$ mostram uma faixa maior na relação a/ms que vai de 0,20 a 0,26, em comparação ao diagrama $AN_{1,87}$. Entretanto mesmo com a extensão na relação de a/ms houve uma diminuição na faixa de Δdef que ficou entre 1,67 e 2,18 mm. Para a análise de Δdef. que traduz numericamente a trabalhabilidade das argamassas formuladas, nota-se que independente do tipo de formulação houve uma variação de 0,51 mm.

Em contrapartida essa extensão na faixa de água impactou no acréscimo das faixas de fc (QII) e E (QIII). Para o fc os resultados chegaram à 6,3 MPa, ou seja, 26,5% superior, em comparação ao agregado $AN_{1,87}$. Assim, esses valores foram classificados através da NBR 13281 (ABNT, 2005) resultaram na mesma classificação apontada para as formulações com $AN_{1,87}$, ficando entre as classes P2 à P4.

Na análise do QIII, o módulo de elasticidade (E) também apresentou um acréscimo em comparação com as argamassas desenvolvidas com $AN_{1,87}$, cerca de 41,2%.

Quanto ao tipo de formulação, a 1:2:9 foi a que apresentou-se com resultados mais distantes das demais formulações. No QII é possível visualizar uma curva com argamassas mais trabalháveis com Δdef. superiores às demais formulações. Já em QIII nota-se que a curva representante da formulação 1:2:9 fica afastada das demais com resultados de Fc inferiores às demais formulações. Por fim a figura 56 demonstra o diagrama com correlações das formulações desenvolvidas com agregado artificial $AA_{2,04}$.

FIGURA 56– DIAGRAMA COM AS CORRELAÇÕES DE ΔDEF. E PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS FORMULADAS EM LABORATÓRIO PARA $AA_{2,04}$



FONTE: A autora (2021).

Através da figura 56 é possível visualizar dados diferentes dos últimos diagramas desenvolvidos com agregados naturais em suas formulações. Na análise do QI, o Δdef. que tem como valor máximo em 2,51mm com $AN_{1,87}$ com agregado artificial ($AA_{2,04}$) chega num valor de 4,4 mm, ou seja, formulações mais trabalháveis. O agregado artificial, neste caso, mesmo sendo um agregado lavado, apresentou um maior teor de material pulverulento (3,86%) em comparação aos agregados naturais $AN_{1,87}$ (1,16%) e $AN_{2,69}$ (1,33%), o que pode ter impactado

nesse aumento na trabalhabilidade. Assim, como era previsto esse aumento de finos também pode ter sido a justificativa por uma demanda maior de água para se atingir a trabalhabilidade ideal (a/ms:0,29). A formulação 1:2:9 utilizando o $AA_{2,04}$ também é uma formulação que se diferencia dentre as demais, sendo esta a que apresenta com Δdef maiores, consequentemente mais trabalháveis.

Para o QII os resultados foram semelhantes ao já discutidos com agregado $AN_{2,69}$, onde a faixa de Fc fica entre 2,9 e 6,9 MPa, com a mesma classificação normativa das demais argamassas com agregados naturais ($AN_{1,87}$ e $AN_{2,69}$). Já para o módulo de elasticidade essa faixa foi ampliada, visto que com esse agregado é possível chegar em valores de 12,5 GPa.
A tabela 29 demonstra um resumo de algumas das características dos agregados utilizados *versus* as faixas encontradas para os três agregados utilizados.

TABELA 29 – RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS *VERSUS* FAIXAS IDEAIS PARA AS ARGAMASSAS FORMULADAS COM $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$

	Propriedades	**$AN_{1,87}$**	**$AN_{2,69}$**	**$AA_{2,04}$**
Características dos agregados	Teor de material pulverulento (%)	1,16	1,33	3,86
	Módulo de finura (-)	1,87	2,69	2,04
	Coeficiente uniformidade - C_{un} (-)	2,71	4,09	4,08
	Densidade de empacotamento (-)	0,6286	0,6592	0,6520
	Análise visual do microscópio (-)	lisa/arredondada	lisa/arredondada	rugosa/lamelar
	Área superficial (m^2/kg)	7,64	4,10	8,52
	a/ms mínimo (-)	0,17	0,14	0,17
Faixas recomendadas com objetivo no comportamento reológico e propriedades no estado endurecido	a/ms (-)	0,23 - 0,26	0,20 - 0,26	0,23 - 0,29
	FC (MPa)	1,95 - 4,98	2,60 - 6,30	2,90 - 6,90
	E (GPa)	3,90 - 9,70	5,20 - 13,70	4,60 - 12,50
	Δdef (mm)	1,03 - 2,51	1,67 - 2,18	2,00 - 4,40

FONTE: A autora (2021).

Através da tabela 29 é possivel observar há uma variação significativa de resultados quando se há uma mudança nas características dos agregados. Dependendo do tipo dessas características, pode ocorrer um número elevado de possíveis resultados, nos dando indícios e

tendências de correlações. Entretanto, essas características devem ser bem avaliadas, tendo em vista de que cada uma delas pode significar dominância e apresentar-se mais influente quando se analisa as propriedades da argamassa aplicada, tanto no estado fresco quanto endurecido.

4.4.1 Aplicação do modelo estatístico de regressão múltipla

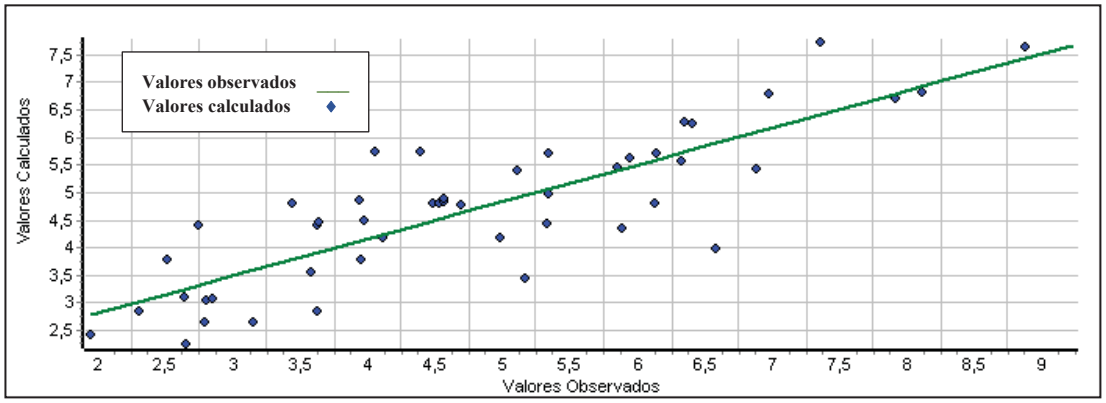
Como já detalhado anteriormente, alguns parâmetros no estado fresco têm influência direta no estado endurecido. Por conta disso, optou-se por aplicar o modelo de regressão múltipla por meio do *software TS-Sisreg,* com o objetivo de avaliar a interação entre elas. As propriedades no estado endurecido (variáveis dependentes), como a resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade, foram aplicadas ao modelo estatístico separadamente com as propriedades no estado fresco e algumas das características visualizadas como impactantes dos agregados (variáveis independentes): módulo de finura dos agregados, relação a/c e volume de excesso de pasta.

Primeiro, foi fixada como variável dependente a resistência à compressão e, a partir do uso de regressão múltipla, foi possível uma análise de experimento fatorial cruzado, de todas as formulações do estudo, quando se determinou uma equação (33) de regressão que representa o resultado experimental fatorial cruzado entre 4 variáveis independentes.

$$Y_{Fc} = 0{,}275632*2{,}718^{\left(-1{,}028632*\frac{1}{X_1}\right)}*2{,}718^{\left(4{,}101041*\frac{1}{(X_2)^{\frac{1}{2}}}\right)}*2{,}718^{(1{,}779372*X_3)} \quad (33)$$

Onde o Y_{Fc} (variável dependente) representa a resistência à compressão e as demais variáveis independentes são: X_1 é o módulo de finura, X_2 é a relação a/c e X_3 é excesso de pasta. Assim, por intermédio da equação destacada, plota-se o gráfico que representa a aderência do modelo desenvolvido para o experimento que relaciona os valores calculados x valores observados, conforme figura 57.

FIGURA 57 – GRÁFICO DE ADERÊNCIA OBTIDA POR MEIO DA REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA (Y_{FC})



FONTE: A autora (2021).

Observa-se, com base no gráfico de aderência (figura 57), que a consistência da equação atingiu um coeficiente de determinação e resultados estatísticos significativos. Essa aderência demonstra os valores estimados por meio do modelo em função dos valores da variável dependente de cada modelo. Quanto mais os pontos se aproximam da reta de referência (bissetriz) melhor costuma ser o ajuste do modelo, tendo em vista que a equação da regressão é o resultado da equação (variável dependente) em função das variáveis independentes (RADEGAZ, 2011).

A tabela 30 destaca um resumo das características relevantes quanto ao modelo desenvolvido.

TABELA 30 – RESUMO DOS DADOS ESTATÍSTICOS DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO DETERMINADA PARA O MODELO PROPOSTO PARA (Y_{FC})

Características gerais

- Variável dependente: Y_{Fc} (Resistência a compressão)
- Variáveis independentes: X_1 é o módulo de finura, X_2 é a relação a/c e X_3 é excesso de pasta.
- Número de amostras: 51
- Número de amostras utilizadas: 47
- Número de variáveis: 4
- Outlier: 2

Características estatísticas

Linear

- Coeficinete de correlação: 0,83113
- Coeficiente de determinação: 0,69078
- Coeficiente de determinação ajustado (R^2): 0,66921
- Fisher-Snedecor: 32,01981
- Significância: < 0,01000

Características do modelo

- Coeficiente de aderência: 0,69843
- Variação Residual: 39,27
- Variância: 0,913362
- Desvio Padrão: 0,9557

Parâmetros de análise de variáveis independentes

Variável	Equação	Significância	Determinação ajustado R^2=0,66921
X_1 Módulo de finura	1/x	3,11	0,63937
X_2 a/c	1/x½	0,01	-0,01182
X_3 Excesso de pasta	x	0,02	0,55568

FONTE: A autora (2021).

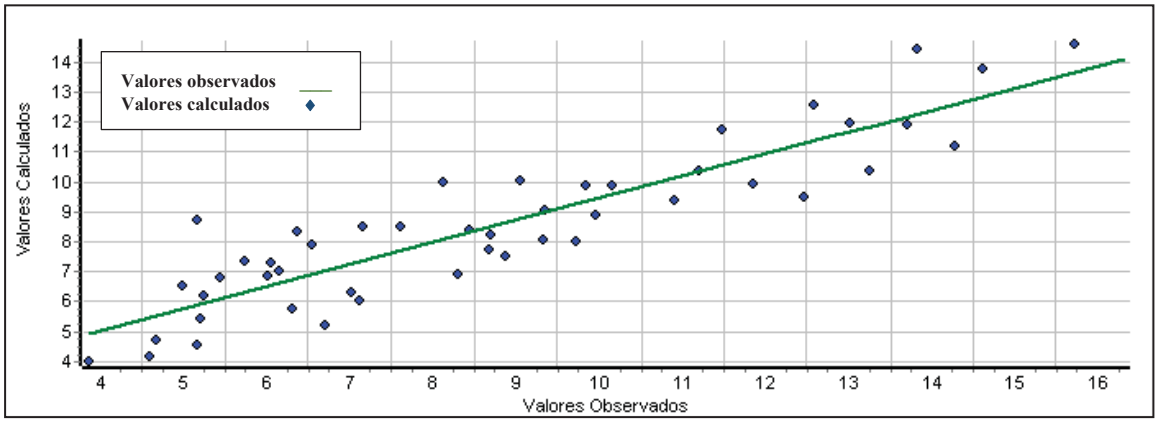
Constata-se (tabela 30) que o número das 4 amostras desconsideradas do modelo é referente às formulações com a/ms 0,14 e 0,29 que, por não estarem presentes em todas as formulações, acabaram sendo retiradas para que não ocorresse certa interferência no modelo. Além do mais, é oportuno observar um bom índice de determinação da curva (R^2) de 0,66921, o que indica a interligação entre as variáveis e as possíveis interface entre elas.

A análise de regressão múltipla também foi aplicada com outra variável dependente: resistência à tração na flexão (Y_{Ft}), pois também foi determinada uma equação de regressão (34) que representa o resultado experimental fatorial cruzado entre 4 variáveis independentes. As variáveis independentes foram as mesmas utilizadas anteriormente: X_1 é o módulo de finura, X_2 é a relação a/c e X_3 é excesso de pasta.

$$(Y_{Ft}) = \frac{1}{(-0{,}177077+0{,}378106*\left(\frac{1}{X_1}\right)^2+0{,}332813*X_2^{\frac{1}{2}}+(-0{,}099595)*X_3)^2} \quad (34)$$

Usando a equação em relevância, plota-se o gráfico que representa a aderência do modelo desenvolvido para o experimento que relaciona os valores calculados *versus* valores observados, tal como mostra a figura 58.

FIGURA 58 – GRÁFICO DE ADERÊNCIA OBTIDA POR MEIO DA REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA (Y_{FT})



FONTE: A autora (2021).

Percebe-se, com base na figura 58, que o gráfico de aderência e a consistência da equação determinada atingiram coeficiente de determinação e resultados estatísticos significativos. Essa aderência também demonstrou que os valores estimados relacionados com a resistência à tração na flexão *versus* demais variáveis independentes também apontou boas correlações, tendo em vista de que boa parte dos pontos (valores calculados) estão próximos à reta (valores observados). A tabela 31 demonstra o resultado do modelo, inclusive o R^2=0,75557 que representa a correlação do modelo.

TABELA 31 – RESUMO DOS DADOS ESTATÍSTICOS DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO DETERMINADA PARA O MODELO PROPOSTO PARA (Y_{FT})

Característica gerais

- Variável dependente: Y_{Ft} (Resistência a tração na flexão)
- Variáveis independentes: X_1 é o módulo de finura, X_2 é a relação a/c e X_3 é excesso de pasta.
- Número de amostras: 51
- Número de amostras utilizadas: 47
- Número de variáveis: 4
- Outlier: 1

Características estatísticas

Linear

- Coeficinete de correlação: 0,87835
- Coeficiente de determinação: 0,77151
- Coeficiente de determinação ajustado (R^2): 0,75557
- Fisher-Snedecor: 48,39637
- Significância: < 0,01000

Características do modelo

- Coeficiente de aderência: 0,79978
- Variação Residual: 92,05
- Variância: 2,14
- Desvio Padrão: 1,46

Parâmetros de análise de variáveis independentes

Variável	Equação	Significância	Determinação ajustado R^2=0,75557
X_1 Módulo de finura	$1/x^2$	0,01	0,63164
X_2 a/c	x½	0,01	0,18260
X_3 Excesso de pasta	X	14,16	0,74867

FONTE: A autora (2021).

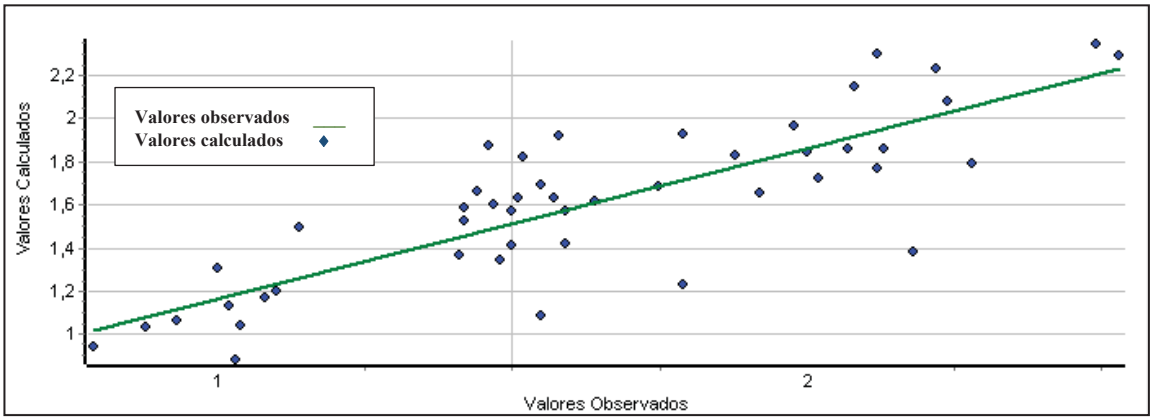
Nota-se que a resistência à tração na flexão obteve uma compatibilização mais elevada em comparação com o coeficiente de determinação da resistência à compressão. O R^2 do Y_{Ft} teve uma diferença absoluta de 11,4% em relação ao Y_{Fc}.

Por fim, tem-se a análise de regressão múltipla aplicada à variável dependente em módulo de elasticidade (Y_E), sendo também foi determinada uma equação de regressão (35) que representa o resultado experimental fatorial cruzado entre 4 variáveis independentes. As variáveis independentes foram as mesmas usadas anteriormente: X_1 é o módulo de finura, X_2 é a relação a/c e X_3 é excesso de pasta.

$$(Y_{Ft}) = \frac{1}{(0{,}458168+0{,}434368*\left(\frac{1}{X_1}\right)^2+0{,}475399*\ln(X_2)+(-2{,}284747)*X_3{}^2)^2} \quad (35)$$

Utilizando a equação salientada, plota-se o gráfico que representa a aderência do modelo desenvolvido para o experimento que relaciona os valores calculados *x* valores observados, conforme figura 59.

FIGURA 59 – GRÁFICO DE ADERÊNCIA OBTIDA POR MEIO DA REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA (Y_E)



FONTE: A autora (2021).

Nota-se (figura 59) que o gráfico de aderência, a consistência da equação atingiu um coeficiente de determinação e resultados estatísticos significativos.

A tabela 32 demonstra o resultado do modelo, inclusive o R^2=0,68267, que representa a correlação do modelo.

TABELA 32 – RESUMO DOS DADOS ESTATÍSTICOS DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO DETERMINADA PARA O MODELO PROPOSTO PARA (Y_E)

Características gerais

- Variável dependente: Y_E (Módulo de elasticidade)
- Variáveis independentes: X_1 é o módulo de finura, X_2 é a relação a/c e X_3 é excesso de pasta.
- Número de amostras: 51
- Número de amostras utilizadas: 47
- Número de variáveis: 4
- Outlier: 3

Características estatísticas

Linear

- Coeficinete de correlação: 0,83867
- Coeficiente de determinação: 0,70337
- Coeficiente de determinação ajustado (R^2): 0,68267
- Fisher-Snedecor: 33,98675
- Significância: < 0,01000

Características do modelo

- Coeficiente de aderência: 0,67932
- Variação Residual: 2,93
- Variância: 0,0681257
- Desvio Padrão: 0,261009

Parâmetros de análise de variáveis independentes

Variável	Equação	Significância	Determinação ajustado R^2=0,68267
X_1 Módulo de finura	$1/x^2$	1,23	0,64059
X_2 a/c	In (x)	0,01	0,00505
X_3 Excesso de pasta	x^2	0,01	0,55064

FONTE: A autora (2021).

De forma geral, a análise estatística mostra que as resistências mecânicas têm forte relação com as variáveis dependentes exibidas (módulo de finura, relação a/c e excesso de pasta). Há certa dificuldade no meio acadêmico no sentido de abordar um modelo único que auxilie os métodos de dosagem que levem em conta a influência de algumas das características do agregado ligadas às propriedades da argamassa, sejam elas no estado fresco ou endurecido. Evidencia-se a necessidade de condicionar o desempenho da argamassa de revestimento aos parâmetros de agregados, condicionados à morfologia (tipo de rocha) e granulometria do agregado (módulo de finura, diâmetro máximo e continuidade da curva), tendo em vista que são parâmetros com um teor elevado de interface com as propriedades no estado endurecido (SANTOS *et al.,* 2018b; PAN; WENG, 2012). O empacotamento de partículas que, nesse caso, está representado pelo excesso de pasta, também é um fator de grande importância a ser ponderado nas análises das propriedades, tendo em vista que deverá ter um equilíbrio entre a quantidade de água, trabalhabilidade na produtividade do aplicador e resistências mecânicas que deverão ser respeitadas (MENG *et al., 2*012).

4.5 DIRETRIZES PARA A DOSAGEM DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

a) Eleição das propriedades de interesse para a argamassa de revestimento

Para o estabelecimento das propriedades desejadas com o objetivo de propor diretrizes para uma dosagem de argamassas, foi necessária a eleição de propriedades no estado fresco e endurecido. Ao eleger algumas das propriedades, necessariamente cumpre-se com requisitos exigidos, sejam eles fixados por norma ou por meio da bibliografia. No caso da argamassa de revestimento desse estudo, foram fixadas algumas dessas propriedades:

- estado fresco - A trabalhabilidade foi mensurada com o estudo do comportamento reológico do material priorizando os ensaios com *squeeze flow, conforme NBR* 15839 (ABNT, 2010).
- estado endurecido - resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade, seguindo a NBR 13279 (ABNT, 2005) e NBR 15630 (ABNT, 2009).

Apesar do método de ensaio de *squeeze flow* ser normalizado, a análise dos resultados do comportamento reológico não é normalizada. Por conta disso, houve um estudo direcionado com objetivo de analisar e indicar possivelmente a trabalhabilidade das argamassas retiradas de

obras, caracterizando objetivamente as curvas do ensaio de *squeeze flow* (etapa I). Dentro desse estudo, não foi possível parametrizar uma faixa ideal de curvas resultantes desse ensaio, devido à grande diversidade de resultados obtidos. Por intermédio da figura 30 (item 4.1.1), foi possível visualizar essa ampla variação descrita.

Dessa forma, a partir dos procedimentos descritos no item 4.1.1, as análises das curvas levaram à indicação do fator Δdef. que, para as argamassas utilizadas em obras, variaram de 1,3 a 5,2 mm, ou seja, em uma ampla faixa, dificultando a indicação da trabalhabilidade de argamassas de revestimento, pois todas essas argamassas se apresentaram mais ou menos plásticas, com uma amplitude maior ou menor no estágio II da curva do ensaio de *squeeze flow*. Da mesma forma, as referências de trabalhabilidade da bibliografia de argamassas produzidas em obras também apresentaram uma faixa de valores nas curvas do ensaio *squeeze flow*, entre 1,5 a 3 mm, conforme mostrado na figura 33 (item 4.1.1).

Diante das variações encontradas em busca de parâmetros de trabalhabilidade ideal, optou-se por levar em conta as recomendações para a trabalhabilidade já disponíveis na literatura (Min *et al*., 1994; Cardoso *et al*., 2009; Cardoso *et al*., 2014), apesar de subjetivas. Nesse caso, optando-se por argamassas que apresentem deformações mais elevadas no estágio II (com pequenas cargas), por indicar maior facilidade no desempeno e acabamento da argamassa de revestimento.

b) Caracterização dos materiais componentes

Para possibilitar uma dosagem com base no empacotamento de partículas, segundo a abordagem adotada no estudo proposto, os materiais componentes das argamassas de revestimento devem ser caracterizados com base nos ensaios indicados a seguir:

- massa específica do cimento e da cal, conforme NBR 16605 (ABNT, 2017), e da areia, conforme NBR NM 52 (ABNT, 2009);
- massa unitária e índice de vazios da areia, conforme norma NBR NM 45 (ABNT, 2006);
- densidade de empacotamento do cimento e da cal na condição úmida, conforme procedimento proposto a partir de Wong e Kwan (2008a).

c) Determinação da composição da pasta

A proporção dos materiais granulares presentes na pasta pode ser definida tendo em vista a ocupação ótima dos espaços pelo cimento e pela cal, por meio da densidade de empacotamento máxima destes materiais combinados. Para isso, recomenda-se utilizar o modelo de empacotamento de partículas CPM, proposto por De Larrard (1999). Este modelo

teve resultados de previsão mais próximos dos experimentais, estando de acordo com outros estudos reportados na literatura técnica (CAMPOS, 2019; HERMANN *et al.,* 2016), tal como previamente mostrado no item 4.2.3.

A recomendação de proporcionar o cimento e a cal pela máxima densidade de empacotamento é feita com ressalvas, sendo necessária uma investigação mais profunda em estudos subsequentes de outras propriedades que não foram aqui investigadas, tais como retenção de água, absorção de água, capilaridade e resistência potencial de aderência, por exemplo.

d) Determinação da composição da argamassa

Com base nas ponderações salientadas, a composição das argamassas de revestimento pode ser determinada a partir das equações (36) a (40), tendo sido estas adaptadas do método de dosagem para concretos sustentáveis de alta resistência, cujos procedimentos se baseiam na otimização do empacotamento de partículas, proposto por Campos *et al.* (2020).

$$V_{pasta} = V_{pComp.} + V_{pEx.} \tag{36}$$

$$V_{cim} = \frac{R_{cim}\left(V_{pasta}\text{-}V_{ar}\right)}{1 + \left[a/agl_{(v)}\right]} \tag{37}$$

$$V_{cal} = \frac{R_{cal}\left(V_{pasta}\text{-}V_{ar}\right)}{1 + \left[a/agl_{(v)}\right]} \tag{38}$$

$$R_{cim} + R_{cal} = 1 \tag{39}$$

$$V_{areia} = 1\text{-}V_{pasta} \tag{40}$$

Onde:

V_{pasta}: volume de pasta na argamassa (m^3);

$V_{pComp.}$: volume de pasta compactada nos vazios da areia (m^3);

$V_{pEx.}$: volume de pasta que excede os vazios da areia (m^3);

$V_{cim.}$: volume de cimento na argamassa (m^3);

$V_{cal.}$: volume de cal na argamassa (m^3);

$V_{ar.}$: volume de ar na pasta (m^3);

$V_{areia.}$: volume de areia na argamassa (m^3);

$R_{cim.}$: volume relativo de cimento na pasta (-);

$R_{cal.}$: volume relativo de cal na pasta (-);
$a/agl_{(v)}$: relação água/aglomerante, em volume (-).

O volume de pasta na argamassa é a soma dos volumes de pasta compactada nos vazios da areia e do volume de pasta que excede esses vazios, que pode ser referenciada também como volume do excesso de pasta, tal como mostra a equação (32). O volume de pasta compactada pode ser determinado na própria caracterização da areia, com base na NBR NM 45 (ABNT, 2006), já que é numericamente igual ao índice de vazios do agregado (IV_{areia}). Para o volume de ar na pasta, para aplicação das equações (33) e (34), em métodos de dosagem sugerida, é considerado entre 0 a 5% do volume de pasta para argamassas de revestimento (SANTOS *et al.*, 2018; ROMANO, 2013; ROMANO *et al.,* 2018). Esse valor pode ser variado dependendo do tipo de insumo a ser utilizado. A cal, por exemplo, com 100% de Ca(OH)2 tem um comportamento como um aditivo incorporador de ar (CARASEK, 2010). Como na argamassa não se tem o esqueleto granular da areia compactada (partículas da areia não estão em contato), este valor deve ser minorado para levar em conta o volume efetivo de agregado presente na argamassa, conforme equação (41).

$$V_{pComp.} = IV_{areia}\left(\frac{V_{areia}}{1\text{-}IV_{areia}}\right) \tag{41}$$

Substituindo as equações (40) e (41) em (36), tem-se que:

$$V_{pasta} = IV_{areia}\left(\frac{1\text{-}V_{pasta}}{1\text{-}IV_{areia}}\right) + V_{pEx.}$$

$$V_{pasta} = \frac{IV_{areia}}{(1\text{-}IV_{areia})}\text{-}\left[\frac{IV_{areia}}{(1\text{-}IV_{areia})}.V_{pasta}\right] + V_{pEx.}$$

$$V_{pasta} + \left[\frac{IV_{areia}}{(1\text{-}IV_{areia})}.V_{pasta}\right] = \frac{IV_{areia}}{(1\text{-}IV_{areia})} + V_{pEx.}$$

$$V_{pasta}\left[1 + \frac{IV_{areia}}{(1\text{-}IV_{areia})}\right] = \frac{IV_{areia}}{(1\text{-}IV_{areia})} + V_{pEx.}$$

$$V_{pasta}\left[\frac{(1\text{-}IV_{areia})}{(1\text{-}IV_{areia})}+\frac{IV_{areia}}{(1\text{-}IV_{areia})}\right]=\frac{IV_{areia}}{(1\text{-}IV_{areia})}+V_{pEx.}$$

$$V_{pasta}\left[\frac{1}{(1\text{-}IV_{areia})}\right]=\frac{IV_{areia}}{(1\text{-}IV_{areia})}+V_{pEx.}$$

$$V_{pasta}=\left[\frac{IV_{areia}}{(1\text{-}IV_{areia})}+V_{pEx.}\right](1\text{-}IV_{areia})$$

$$V_{pasta}=IV_{areia}+V_{pEx.}\,(1\text{-}IV_{areia})$$

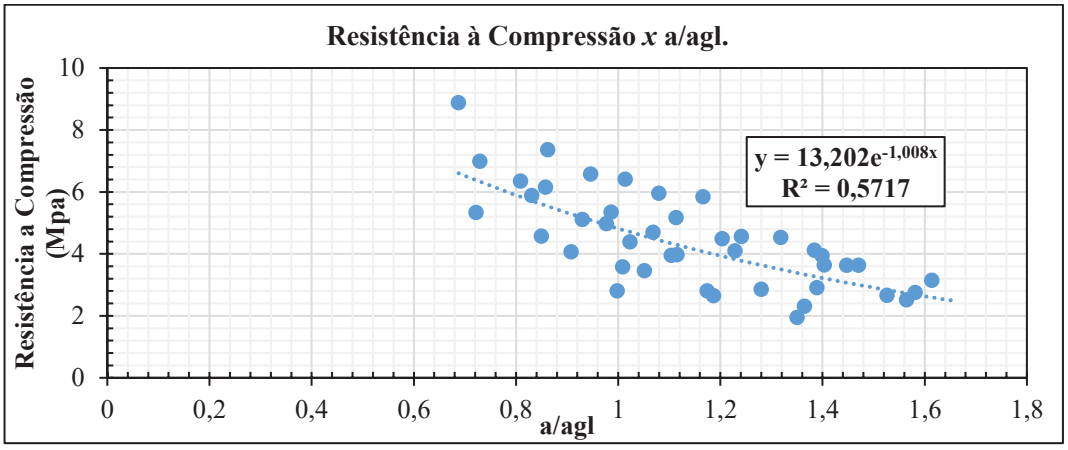
$$V_{pasta}=IV_{areia}+V_{pEx.}\cdot\beta_{areia} \qquad (42)$$

Em que o β_{areia} é densidade de empacotamento da areia (-).

O volume do excesso de pasta, por outro lado, tem sua determinação a partir da curva que correlaciona este volume do excesso de pasta com a deformação das argamassas durante o estágio II, no ensaio de *squeeze flow* (Δdef.), figura 49 (já demonstrada por meio do item 4.3.1.1). Para que esta curva possa ser usada adequadamente, é necessário estabelecer o valor de deformação desejado para a argamassa que se está proporcionando. Foi visto previamente no item 4.3 que as argamassas de obra avaliadas no estudo tiveram valores de deformação no estágio II que variam de 1,3 a 5,2 mm (ver figura 30 e tabela 16 previamente salientadas), sendo estas tidas como adequadas para aplicação em obra pelos operários. Para as argamassas obtidas da literatura, visto que há relatos de aplicação em obra, observa-se que as deformações no estágio II foram menores (ver figura 33), indicando uma variação bastante grande do comportamento das argamassas trabalháveis no ensaio de *squeeze flow*. Desse modo, essa grande variação representa uma dificuldade para definir limites quanto aos parâmetros reológicos que representem argamassas trabalháveis. Ainda assim, dada a associação do comportamento da argamassa durante o estágio II no ensaio de *squeeze flow* com a aplicação da argamassa em obra, recomenda-se que esse valor de deformação seja sempre o maior possível (MIN, *et al.*, 1994; CARDOSO *et al.*, 2009; CARDOSO *et al.,* 2014), pois facilitaria as operações de espalhamento da argamassa aplicada.

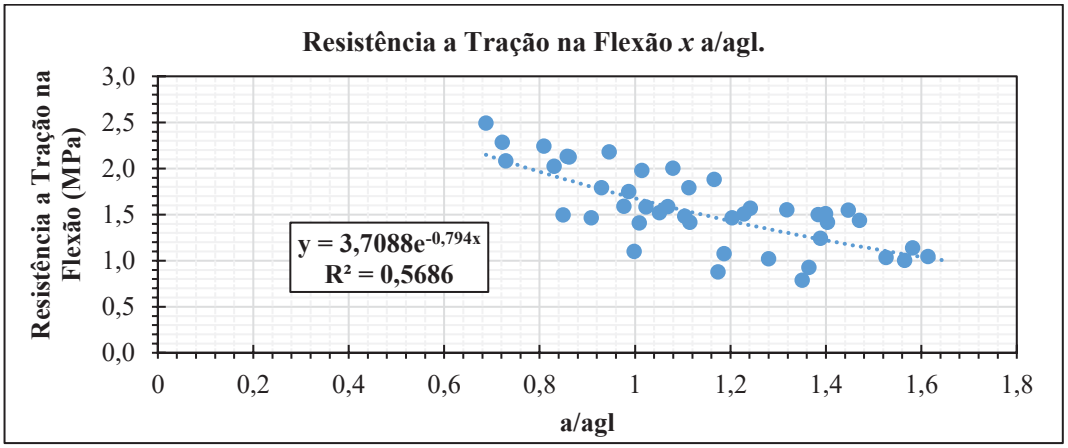
Definido o volume de pasta da argamassa, os volumes de cimento, cal e areia são determinados pelas equações (37) a (40), ressaltando apenas que os volumes relativos de cimento e cal (R_{cim} e R_{cal}) são obtidos a partir da aplicação do modelo de empacotamento CPM, proposto por De Larrard (1999), na etapa anterior do estudo. A relação a/agl pode ser obtida por meio dos gráficos que estabelecem essa relação com as propriedades no estado endurecido (resistência a compressão, resistência a tração na flexão, módulo de elasticidade, conforme as figuras 60, 61 e 62.

FIGURA 60 – RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO X A/AGL.



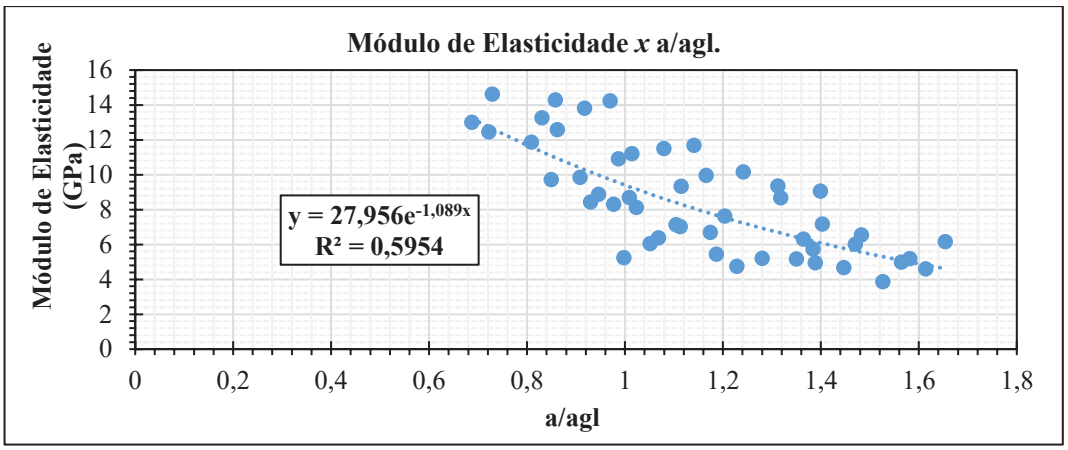
FONTE: A autora (2021).

FIGURA 61 – RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO X A/AG



FONTE: A autora (2021).

FIGURA 62 – RELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE ELASTICIDADE X A/AGL



FONTE: A autora (2021).

Para esse estudo, as figuras 60 e 61 tiveram 8 *outliers* (valores que se diferem de forma ampla de todos os outros) que não representaram os resultados de forma adequada e acabaram distorcendo os mesmos. Na figura 62, os *outliers* foram apenas 2. Esses pontos que acabaram distorcendo o gráfico podem estar relacionados com alguma imprecisão dos equipamentos, como é o caso do ensaio com a utilização de ultrassom (módulo de elasticidade) na obtenção do módulo de elasticidade, calibração, algum tipo de erro de moldagem dos CP ou até mesmo a metodologia utilizada para o CP utilizado nas moldagens das argamassas (CONSTANTINIDES, 2004).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta desse estudo, baseada em uma investigação experimental, foi o desenvolvimento de diretrizes que pudessem auxiliar na dosagem das argamassas de forma a verificar o impacto de seus insumos nas propriedades das argamassas com ênfase em seu comportamento reológico. Ao todo, foram testadas quatro formulações (1:0,6:6, 1:1:6, 1:2:6 e 1:2:9), três agregados ($AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ e $AA_{2,04}$) e quantidades variadas de água, inclusiva a água mínima, a considerar, que pudessem servir como diretrizes de análises aplicada a suas propriedades. Ademais, foram usados modelos e métodos de empacotamento de partículas com a finalidade de otimizar a utilização de todos os materiais.

Os estudos foram divididos em quatro etapas:

Etapa I: essa etapa teve como motivação o conhecimento do comportamento reológico de seis argamassas retiradas de obras (3 produzidas em obra, 1estabilizada e 2 industrializadas) e argamassas da literatura que pudessem contribuir com as diretrizes de dosagem das argamassas de laboratório. Nota-se que:

- Foi desenvolvida uma metodologia para mensurar numericamente o comportamento da argamassa no estágio II, quando uma curva exponencial, traçada no último estágio da curva, com o máximo R^2, mostrou-se de forma eficiente.
- Para as argamassas retiradas de obras, os resultados obtidos por meio do *squeeze flow* que resultaram em um Δdef. (DP_{max}-DE_{max}) com variação de 4,3 a 8,5 mm, principalmente para às argamassas produzidas em obra. Isso confirma o fato de que a argamassa ainda é material que sofre fortemente influências dos seus insumos e formulações que, consequentemente, desencadeia uma série de problemas que podem serem apontados o em seu estado fresco, endurecido. Essa variação no comportamento reológico mensurado por meio do *squeeze flow* traduz um problema que persiste em obras e que reflete não só na consistência de um material acabado e sim em seu transporte, bombeamento, aplicação, acabamento e a durabilidade do dos revestimentos argamassados.
- Para os $DE_{máx}$ retirados das argamassas da literatura, a faixa de resultados (1,5 a 3 mm) foi menor que as argamassas de obra, porém, mesmo assim, são argamassas com comportamento distintos umas das outras, o que dificulta a padronização das faixas ideais quanto ao comportamento reológico.

Etapa II: foram desenvolvidos os estudos de empacotamento de partículas a partir dos modelos CPM (DE LARRARD, 1999), CIPM (FENNIS, 2011) e pelo método experimental úmido (WONG; KWAN, 2008). O método experimental auxiliou na obtenção da água mínima e os modelos CPM e CIPM, com o método experimental indicaram as densidades de empacotamento de cada formulação testadas, demonstram que:

- Todos os modelos de empacotamento de partículas utilizados no desenvolvimento do método de dosagem de argamassas de revestimento demonstraram uma coerência significativa entre eles. Todavia, o método CPM e o experimental se mostraram muito próximos para todos os agregados do estudo na maioria das formulações adotadas;
- Utilizando o método experimental, os resultados obtidos de densidade de empacotamento tiveram performance diferenciada, tanto para os materiais analisados

individuais quanto para o conjunto de formulações. O agregado $AN_{2,69}$ foi o que obteve o melhor resultado de densidade de empacotamento nos resultados individuais, ou seja, o empacotamento das partículas com esse material em específico foi o que resultou em maior concentração de sólidos com o mínimo de vazios. Já para o conjunto de formulações, o agregado $AN_{1,87}$ foi o que obteve maiores densidades de empacotamento;

- Utilizando o método experimental, os resultados de maior densidade de empacotamento ocorreram para a formulações 1:0,6:6, para os três agregados testados.
- Já para os modelos CPM e CIPM, a formulação 1:1:6 foi a que apresentou maiores valores de densidade de empacotamento;
- Com relação à água mínima obtida por meio do método experimental, ou seja, a água necessária somente para o preenchimento da área específica do grão, teve-se os resultados de relação a/ms: 0,17 para os agregados $AN_{1,87}$ e $AA_{2,04}$ e a/ms: 0,14 para o agregado $AN_{2,69}$.

Etapa III: a partir dos resultados mínimos de água, partiu-se para os estudos do excesso de água (etapa III) por meio dos ensaios com o *squeeze flow*, quando foi sendo acrescentada a água em pequenas parcelas, até a impossibilidade do ensaio. Foram visualizados:

- Quando analisadas as curvas de *squeeze flow*, foram identificadas pequenas variações de Δdef., mesmo quando variado o tipo de formulação. Em contrapartida, uma diferença maior nos resultados de Δdef. foi identificada quando havia a mudança de tipos de agregados;
- As formulações desenvolvidas com o agregado $AA_{2,04}$ foram as que apresentaram maiores Δdef. em comparação com as demais formulações;
- A quantidade de água ideal, quando foi possível visualizar a trabalhabilidade adequada e a facilidade de aplicação pelos operários, está sendo representada pelas curvas que obtiveram maiores Δdef. sem ruídos.

Etapa IV: contribuiu com uma gama de propriedades e parâmetros interligados.

- Foi possível a obtenção de uma relação entre o Δdef., com o excesso de pasta nas argamassas, obtidos por meio do empacotamento de partículas, quando foi observado de forma numérica que estas estão diretamente relacionadas.
- As relações entre a a/agl e propriedades no estado endurecido também foram demonstrados. Essa relação será de grande valia na obtenção de diretrizes de dosagem.

- Com os resultados do estado fresco e endurecido foi possivel a elaboração de ábacos com indicativos de formulações *versus* características de agregados.
- Por intermédio do modelo estatístico de regressão múltipla, foi demonstrado que é possível alcançar bom índice de determinação de curvas, quando se conectam as variáveis dependentes e independentes, tanto no estado fresco quanto endurecido.

Finalizando os estudos com um demonstrativo de etapas de diretrizes de dosagem de argamassas que irão auxiliar em pesquisas com novas formulações e/ou produtos a serem desenvolvidos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de ampliar os estudos no que diz respeito às diretrizes na dosagem de argamassas, são indicados alguns temas que não foram atingidos no escopo dessa pesquisa, sob os seguintes aspectos:

a) Analisar a resistência de aderência das argamassas aplicadas no substrato.

b) Utilizar um aditivo incorporador de ar para a análise dos Δdef. retirados do *squeeze flow*.

c) Testagem dessas diretrizes com agregados e aglomerantes com características distintas como, por exemplo, a areia artificial, com teores de pulverulento elevado, mesclando agregado natural e artificial, outros tipos de cimento e cales.

d) Testagem de mais formulações, inclusive substituindo a cal pelo aditivo incorporador de ar.

e) Testar a aplicação dessas formulações em diferentes tipos de substratos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 30: Agregado miúdo: Determinação da absorção água. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **ABNT NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **ABNT NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003c.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009c.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6473**: Cal virgem e cal hidratada - Análise química. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. **NBR 7200:** Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento. Rio de Janeiro. 1998. 13p.

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

_____.**NBR 8545**: Execução de alvenaria sem função estrutural de tijolos e blocos cerâmicos – Procedimento, 13p. 1984. Rio de Janeiro

_____.**NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. 2016. 3p.

_____.**NBR 13278:** Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro. 2005. 2p.

_____.**NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro. 2005. 9p.

_____.**NBR 13280:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro. 2005. 2p.

_____.**NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro. 2005. 7p.

_____.**NBR 15575:4:** Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. Rio de Janeiro, 63p, 2013.

_____.**NBR 15630:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através de propagação da onda. Rio de Janeiro. 2009. 4p.

_____. **NBR 15839**: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológico pelo método *squeeze-flow*. Rio de Janeiro. 6p, 2010.

_____. **NBR 1637**2: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro. 11p., 2015.

_____. **NBR 16541**: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro. 2016. 2p.

_____. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó. Determinação da massa específica. Rio de Janeiro. 4p. 2017.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro. 2018, 16p.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **C141**: Standard Specification for Hydrated Hydraulic Lime for Structural Purposes. Philadelphia, USA, 2009.

_____. **ASTM C270**: Mortar for unit masonry. Philadelphia, USA, 2004.

_____. **ASTM C926**: Application of Portland Cement-Based Plaster. Philadelphia, USA, 1987.

AITCIN, P. C.; JOLICOEUR, C.; MACGREGOR, J. **Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. Concrete International**, v. 16, n.5, p. 45-52, 1994.

ANDREASEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. **Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten).** Kolloid-Zeitschrift 50, 217-228, 1930.

ANEPAC **- Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados.** Disponível em: https://www.anepac.org.br/agregados/mercado**.** Acesso em dez/2020.

ARAÚJO, G. S.; BICALHO, K. V.; TRISTÃO, F. A. **Determinação da área específica das areias através da análise de imagens.** V SBTA, São Paulo, 2003.

ARIZZI, A.; CULTRONE, G. **Inadequacy of different methods of assessing the correct dosages during the preparation of air-hardening lime mortars.** Geological Society, London, Special Publications, 416, 275-283, 18 March 2015.

APOSTOLOPOULOU, M., ARMAGHANI, D. J., BAKOLAS, A., DOUVIKA, M. G., MOROPOULOU, A., ASTERIS, P. G. **Compressive strength of natural hydraulic lime**

mortars using soft computing techniques. ICSI 2019 The 3rd International Conference on Structural Integrity, 17 (2019) 914–923.

BAÍA, L. L.; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa. Coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras.** 1. ed. São Paulo - O Nome da Rosa, 82p., 2000.

BAHIENSE, A. V.; MANHÃES, R. T.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. **Utilização do planejamento experimental na incorporação do resíduo da indústria cerâmica em argamassas para obtenção da capacidade de retenção de água.** Revista Cerâmica 54, 395-403, 2008.

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G.; GUIMARÃES, E. A. **Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI - ANTAC, Florianópolis, p. 95-105, 2005.

BENEZET, J. C., ADAMIEC, P., & NEMOZ-GAILLARD, M. **Study of real granular assemblies.** Powder Technology, 173(2), 118–125 (2007).

BETIOLI, A. **Influência dos Polímeros MHEC e EVA na Consolidação de Pastas Cimentícias.** 190 f. Florianópolis, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BONADIA, P.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; VENDRASCO, S. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Applying MPT principle to high-alumina castables.** Amer. Ceram. Soc. Bull. v.78, n3, p 57-60, 1999.

BOTELHO, P. C. **Argamassas tradicionais em suportes de alvenaria antiga: comportamento em termos de aderência e durabilidade.** Lisboa, Fevereiro de 2003. Dissertação de Mestrado pelo Instituto Superior Técnico.

BRANDSTETTER, M. C. G. DE O., CARASEK, H., SIQUEIRA, R. (2018). **Analysing the logistics impact on the cost composition of a mechanised spraying process of rendering mortar.** Ambiente Construído, 18(2), 107–132.

BRITISH STANDARD INSTITUTION: **BS 5262**. Code of Practice for External Renderings, 1991.

_____. BS-5628. Code of practice for the use of masonry. Materials and components, design and workmanship, 2005.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência dos materiais.** Livros Técnicos e Científicos, 2002 - 589 páginas.

CAMPANELLA, O. H.; PELEG, M. **Squeezing flow viscosimetry of peanut butter.** Journal of Food Science 52 (1), p. 180-184, 1987.

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, ANTAC, Goiânia, 1995.

CAMPOS, H. F. **Dosagem de concreto sustentável e de alta resistência, otimizada por modelos de empacotamento de partículas, com substituição parcial do Cimento Portland por pó de pedra e silica ativa**. Tese (Doutorado em Construção Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia da Construção Civil da UFPR), Curitiba, 2019.

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES J. F.; BIANCHINI, **Low-cement high-strength concrete with partial replacement of Portland cement with stone powder and silica fume designed by particle packing optimization.** Journal of Cleaner Production 261 (2020).

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. **Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa.** In: Simpósio Brasileiro De Tecnologia Das Argamassas, 4°, Brasília, 2001.

CARASEK, H. C. **Argamassas.** In: ISAIA, G. C. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 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, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Caracterização reológica de argamassas pelo método de *squeeze flow*.** In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de. Argamassas. Florianópolis, SC. 2005.

CARDOSO, F. A.; CAMPORA, F. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Caracterização reológica de argamassas do mercado por *squeeze flow*.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VII., Recife: ANTAC, 2007.

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

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Rheological behavior of mortars under different squeezing rates.** Cement and Concrete Research, Amsterdam, v. 39, n. 9, p. 748-753, 2009.

CARDOSO, F. A; JOHN, V.M.; PILEGGI, R.G.; BANFILL, P.F.G. **Characterisation of rendering mortars by *squeeze flow* and rotational rheometry.** Cement and Concrete Research 57. P. 79–87 Contents, 2014.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas.** Departamento de Engenharia da Construção Civil - Boletim Técnico (EPUSP). São Paulo, 1999.

CASALI, J. M.; MELO, F. D.; SERPA, V. C.; OLIVEIRA, A. L. de; BETIOLI, A. M.; CALÇADA, L. M. L. **Influence of cement type and water content on the fresh state properties of ready-mix mortar.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 33-52, abr./jun. 2018.

CASTRO, A. L. **Aplicação dos conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho.** Doutorado (Tese) - Escola de Engenharia de São Carlos, 302p., São Paulo, 2007.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil.** Cerâmica. 55 18-32, 2009.

CAVALARO, S.; AGUADO, A. **Caracterización de los morteros de relleno usados en diferentes túneles españoles.** Materiales de Construcción Vol. 63, 309, 65-78 enero-marzo 2013.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT (CSTB). **Note d'information sur les caractéristiques et le comportement des enduits extérieurs d'imperméabilisation de murs à base de liants hidraulyques.** Cahiers du CSTB, Paris, Livraison 230, n. 1778, juin, 1982.

CEOTTO, L. H., BANDUK, R. C., NAKAKURA, E. H. **Revestimentos de Argamassas: boas práticas em projeto, execução e avaliação.** Recomendações Técnicas Habitare - ANTAC, v. 1, 96p, Porto Alegre, 2005.

CHALENCON, F.; ORGÉAS, L.; DUMONT, P. J. J.; FORAY, G.; CAVAILLÉ, J. -Y.; MAIRE, E.; ROLLAND DU ROSCOAT, S. Lubricated Compression and X-Ray Microtomography to Analyse the Rheology of a Fibre-Reinforced Mortar. Rheologica Acta, v. 49, n. 3, p. 221-235, 2009.

CHO, J. S., MOON, K. Y., CHOI, M. K., CHO, K. H., AHN, J. W., YEON, K. S. **Performance improvement of local Korean natural hydraulic lime-based mortar using inorganic by-products.** Korean Journal of Chemical Engineering, 34(5), 1385-1392 (2017).

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Boletim Técnico n. 68. 1995.

COLLOMB, J.; CHAARI, F.; CHAOUCHE, M. **Squeeze flow of concentrated suspensions of spheres In Newtonian and shear-thinning fluids.** J. RHEOL. 48 (2004) 405-416.

CONSTANTINIDES, G.; ULM, F. J. **The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling.** Cement and Concrete Research 34 (2004) 67–80

CORRÊA, C. A. R. **Influência das frações granulométricas de agregados miúdos no comportamento de argamassas de cimento.** Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-002A/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 246 p, 2009.

COSTA, F. N. **Processo de produção de revestimento de fachada de argamassas: problemas e oportunidade de melhorias.** Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 180p, 2005.

COVEY, G. H; STANMORE, B. R. **Use of the parallel-plate plastometer for the characterisation of viscous fluids with a yield stress.** J. Non- Newton. Fluid Mech. 8 (1981) 249–260.

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

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

DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J. N. F. **Utilização do planejamento experimental em rede simplex no estudo de resíduo de rocha ornamental como filler para obtenção de máxima compacidade.** Revista Cerâmica, v. 57, p. 491-498, 2011.

European Committee for Standardization. Methods of test for mortar for masonry (Part 3): **EN 1015-3**. Determination of consistence of fresh mortar EN 1015-3:1999.

_____. **EN 1015-6** (1999). Methods of test for mortar for masonry. (Parte 6): Determination of bulk density of fresh mortar. Brussels, CEN.

_____. **EN 1015-7** (1999). Methods of test for mortar for masonry. Part 7. Determination of air content of fresh mortar; 1999.

_____. **EN 1015-9** (1999). Methods of test for mortar for masonry e Part 9: Determination of workable life and correction time of fresh mortar. Brussels, CEN.

_____. **EN 1015-11** (1999). Methods of test for mortar for masonry. (Parte 11): Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels, CEN.

_____. **EN 459-1** (2015). Building lime. Definitions, specifications and conformity criteria. Brussels, CEN.

ENGMANN, J.; SERVAIS, C.;BURBIDGE, A. S. ***Squeeze flow* theory and applications to rheometry** : J. Non-Newtonian Fluid Mech. 132 (2005) 1–27.

ERIKSSON, J., JOHANSSON, S., ERIK, J. **Development of mortars in Sweden during the period. 1800 to 1950.** 4º HMC 2016, 204–210 (2016).

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

_____. **Compaction-interaction packing model: regarding the effect of fillers in**

concrete mixture design. Materials and Structures, v. 46, p. 463-478, 2013a.

FERRARIS, C. F. **Measurement of rheological properties of high performance concrete: state of the art report.** Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. vol. 104, n. 5, pp 461-478, 1999.

FERRARIS, C. F.; LARRAD, F. **Testing and modeling of fresh concrete rheology.** NIST IR6094. National Institute of Standards and Technology, 1998.

FERREIRA, R.L.D.S.; BARROS, I.M.D.S.; COSTA, T.C.S.; MEDEIROS, M., DE SÁ, M.D.V.V.A.; CARNEIRO, A.M.P. **Efeitos do uso de areia de praia nas propriedades de argamassas mistas: análise da variação granulométrica.** Revista Matéria, vol.24 no.2 Rio de Janeiro 2019.

FIGUEIREDO, B. S. **Development Of Dosage Methodology For Mortar To Plaster.** American Journal Journal of Engineering Research (AJER), VOL. 8, NO. 12, 2019, PP 159-163.

FORMOSA, J.; CHIMENOS, J. M.; LACASTA, A. M.; HAURIE, L.; ROSELL, J. R. **Novel fire-protecting mortars formulated with magnesium by- products.** Cement And Concrete Research, [s.l.], v. 41, n. 2, p.191-196, fev. 2011. Elsevier BV.

FREITAS, C. **Argamassas de Revestimento Com Agregados Miúdos de Britagem da Região Metropolitana de Curitiba: propriedades no estado fresco e endurecido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2010.

FUKUI E.; MARTINS E. J.; CAMPOS H. F.; PINTO M. C. C.; SILVA S. H. L.; ROCHA T. M. S.; KUDLANVEC JR V. L.; COSTA M. R. M. M. **Efeito do procedimento de mistura no comportamento no estado fresco de argamassas de revestimento produzida em obra e industrializada.** Revista Matéria, v. 23, n°1, 2018.

FULLER, W. B. and THOMPSON, S. E**. The laws of proportioning concrete.** ASCE J. Transport., Vol. 59, pp. 67-143, 1907.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions** - Applied to Ceramic Manufacturing. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994.

FERREIRA, R.L.D.S.; BARROS, I.M.D.S.; COSTA, T.C.S.; MEDEIROS, M., DE SÁ, M.D.V.V.A.; CARNEIRO, A.M.P. **Effects of the use of beach sand on mixed mortar properties: Analysis of granulometric variation**. Revista Matéria, v. 24, n. 2, (2019).

FERRARIS, C. F., & DE LARRARD, F. **Testing and Modelling of Fresh Concrete Rheology** (p. 61), 1998.

FUNG, W. W. S.; KWAN, A. K. H.; WONG, H. H. C. **Wet packing of crushed rock fine aggregate.** Materials and Structures (2009) 42:631–643.

GARIJO, L.; ZHANG, X. X.; RUIZ, G; ORTEGA, J. J.**The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Gottingen**, Vol. XLIV-M-1-2020: 351-356. Gottingen: Copernicus GmbH. (2020).

GARIJO, L., ZHANG, X. X., RUIZ, G., ORTEGA, J. J., WU, Z. **The effects of dosage and production process on the mechanical and physical properties of natural hydraulic lime mortars.** Construction and Building Materials, 169, 325-334, (2018).

GIORDANI, C.; MASUERO, A. B. **Blended mortars: Influence of the constituents and proportioning in the fresh state.** Construction and Building Materials 210, 574–587 (2019).

GOMES, A. O.; NEVES, C. M. M. **Proposta de método de dosagem racional de argamassas contendo argilominerais.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 19-30, 2002.

GRANDES, F. A.; SAKANO, V. K.; REGO, A. C. A.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. ***Squeeze flow* coupled with dynamic pressure mapping for the rheological evaluation of cement-based mortars.** Cement and Concrete Composites, 92(May), 18–35 (2018).

GUINDANI, E. N. (2018). **Argamassa estabilizada para revestimento: Avaliação da influência da adição de finos nas propriedades do estado fresco e endurecido.** Florianópolis. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 146p, 2018.

HADDAD, L. D.; COSTA, C.M.; LOPES, P.H.P.; DE CARVALHO JÚNIOR, A.N.; DOS SANTOS, W.J. **Análise da influência da granulometria do agregado miúdo nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas de revestimento.** Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal) 25 (1): 07 – 16, jan. – jun. 2016.

HADDAD, L. D. O.; NEVES, R. R.; OLIVEIRA, P. V.; SANTOS W. J. **Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties.** Jmater Res Technol; 9(4):9299–9314 (2020).

HAWLITSHEK, G. **Caracterização das propriedades de agregados miúdos reciclados e a influência no comportamento reológico da argamassa**. Dissertação (mestrado) apresentada à Escola Politécnica de SP, USP, 173p. São Paulo, 2014.

HENDRICKX, R. **The Adequate Measurement of the Workability of Masonry Mortar,** Ph.D. dissertation, Civil Engineering Department, K.U.Leuven, 213 p., Oct. 2009.

HERMANN, A.; LANGARO, E. A.; LOPES DA SILVA, S. H.; KLEIN, N. S. **Particle packing of cement and silica fume in pastes using an analytical model.** Revista IBRACON, v.9, nº 1 (p. 48 – 65), 2016.

HO, D. W. S.; SHEINN, A. M. M.; NG, C. C.; TAM, C. T. **The use of quarry dust for SCC applications**. 32, 505–511 (2002).

HOPPE F. J.; CARDOSO, F. A.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. **Técnicas de caracterização reológica de argamassas.** Aceito para publicação revista eletrônica E-MAT,

(2007).

HU, C.; LARRARD, F. **Rheological Testing and Modelling of Fresh High Performance Concrete.** Materials and Structures v. 28, p. 1-7, 1995.

IDEIES, **Análise de Competitividade do Setor das Indústrias de Argamassa do Estado do Espírito Santo,** 2018.

INCE, C., DEROGAR, S.; MICHELITSCH, T.M. **Influence of supplementary cementitious materials on water transport kinetics and mechanical properties of hydrated lime and cement mortars. Materiales de Construcción**. Vol. 65 No. 318 (2015).

IVESON, S.M., LITSTER, J.D., HAPGOOD, K.E., BRYAN, J., 2001. **Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review.** Powder Technol. 118, 3e39.

IZZO, F., ARIZZI, A., CAPPELLETTI, P., CULTRONE, G., DE BONIS, A., KWAN, A. K. H.; MORA, C. F. **Effects of various, shape parameters on packing of aggregate particles.** Magazine of Concrete Research, 53(2), 91–100 (2001).

KACI, A., CHAOUCHE, M.; ANDRÉANI, P. A.; BROSSAS, H. **Rheological behaviour of render mortars.** Applied Rheology Volume 19 · Issue 1, 2009.

KALAGRII, A; KARATASIOSV. KILIKOGLOU. **The effect of aggregate size and type of binder on microstructure and mechanical properties of NHL mortars.** Construction and Building Materials 53 (2014) 467–474.

KAZMIERCZAK, C. de S.; ROSA, M.; ARNOLD, D. C. M. **Influência da adição de filer de areia de britagem nas propriedades de argamassas de revestimento.** Ambiente Construído,Porto Alegre,v. 16, n. 2,p. 7-19, abr./jun. 2016.

KHELIFI H; PERROT A.; LECOMPTE, T; RANGEARD, D; AUSIAS, G. **Prediction of extrusion load and liquid phase filtration during ram extrusion of high solid volume fraction pastes.** Powder Technol. 249 (2013) 258–268.

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

KLEIN, N. S., CAVALARO, S., AGUADO, A., SEGURA, I., TORALLES, B. **The wetting water in cement-based materials: modeling and experimental validation.** Construct. Build. Mater. 121, 34e43, 2016.

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

KUDLANVEC JR, V. L. **Aderência de argamassas de reparo em substrato de concreto com ênfase no comportamento reológico.** 179 f. Dissertação (mestrado do Programa de Pós-

Graduação em Engenharia de Construção Civil), 2017.

KWAN, A. K. H.; CHAN, K. W.; WONG, V. **A3-parameter particle packing model incorporating the wedging effect**. Powder Technology 237 (2013) 172–179.

KWAN, A. K. H.; MORA, C. F. **Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles.** Magazine of Concrete Research. Volume 53 Issue 2, April 2001, pp. 91-10.

LARA, D., NASCIMENTO, O., MACEDO, A., GALLO, G., PEREIRA, L POTY, E. **Dosagem das argamassas.** In Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas I, ANTAC, A995. P. 63-72. Goiânia, 1995.

LE GOFF, J. **Culture cléricale et traditions folkloriques dans la civilisation mérovingienne.** Annalles. Économies, Societés, Civilisations. Paris, ano 22, n.4, p.780-791, 1967.

LEE S. H.; KIM H. J.; SAKAI, E.; DAIMON, M. **Effect of particle size distribution of fly ash-cement system on the fluidity of cement pastes.** Cem Concr Res 33(5):763–768, 2003.

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

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

LONDERO, C.; LENZ, L. A.; SANTOS, Í. M. R.; KLEIN, N. S. **Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias.** Cerâmica 63 (2017) 22-33.

LUCAS, S., SENFF, L.; FERREIRA, V.M.; BARROSO DE AGUIAR, J.L.; LABRINCHA, J.A. **Fresh state characterization of lime mortars with PCM additions**. Applied Rheology, vol. 20: Issue 6, 2019.

MACIEL, M. H. BERNARDO, H. M. SOARES, G. S. ROMANO, R. C. O. CINCOTTO, M. A. PILLEGGI, R. G. **Efeito da variação do consumo de cimento em argamassas de revestimento produzidas com base nos conceitos de mobilidade e empacotamento de partículas.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 245-259, 2018.

MARK, A.; MINDESS, S. Aggregates in Concrete. 2005.

MARQUES, A. I.; JOÃO MORAIS, J. MORAIS, P.; VEIGA, M. R.; SANTOS, C.; CANDEIAS, P. FERREIRA J. G. **Modulus of elasticity of mortars: Static and dynamic analyses**. Construction and Building Materials 232 (2020) 117216.

MARTINS, A. A. N.; DJANIKIAN, J. G. **Aspectos de desempenho da argamassa dosada em central.** Boletim Técnico ISSN 0103-9830. São Paulo, 1999.

MATTANA, A. J. **Estudos de cales hidratadas de mercado – caracterização química, física e comportamento reológico da pasta.** Mestrado em Engenharia da Construção Civil – PPGECC, 148p, 2013.

MARVILA, M. T.; AZEVEDO A. R. G.; ALEXANDRE, J.; ZANELATO, E. B.; CERQUEIRA, N. A. **Proposal of Dosing of Mortars Using Simplex Network.** Metals and The Minerals, Metals & Materials Series, 2019.

MEETEN, G. H. **Yield stress of structured fluids measured by *squeeze flow*.** Rheologica Acta, Berlin, v. 39, n. 4, p. 399-408, ago. 2000.

MENG, L. *et al*. **Shape and Size Effects on the Packing Density of Binary Spherocylinders.** Powder Technology, v. 228, p. 284-294, 2012.

METSO MINERALS: Disponível em: https://www.metso.com/br/industria/agregados/. Acesso em dez/2020.

MIN, B. H.; ERWIN, L.; JENNINGS, H.M. **Rheological behavior of fresh cement paste as measured by *squeeze flow*,** J. Mater. Sci. 29 (1994) 1374–1381.

NAKAMURA, J. **Projeto de fachadas.** Téchne: a revista do Engenheiro Civil, São Paulo, ano 12, n. 92, p. 44-49, 2004.

NENO, C.; BRITO, J.; VEIGA, R. **Using Fine Recycled Concrete Aggregate for Mortar** Production. Materials Research - 17(1): 168-177, 2014.

OATES J. A. H. **Lime and limestone (chemistry and technology, production and uses).** Wiley-VCH; 1998. p. 208–25.

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

PAES, I.N.; BAUER, E.;CARASEK, H.; PAVÓN, E. **Influencia del transporte de agua en morteros de revestimiento, en la resistencia a la adherencia Influence of water transportation inside a mortar/block system on bonding resistance behavior**. Revista Ingeniería de Construcción RIC Vol 29 Nº2, 2014.

PAGANI, R., KOVALESKI, J., E RESENDE, L. **Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication.** Scientometrics, pp. 1–27, 2015.

PAN, H.; WENG, G. **Investigation of the Age- Dependent Constitutive Relations of Mortar.** Journal of Engineering Mechanics, v. 138, n. 3, p. 297-306, 2012.

PAVÍA, S., TOOMEY, B. **Influence of the aggregate quality on the physical properties of natural feebly hydraulic lime mortars.** Materials and Structures (2008) 41:559–569.

PENAS, F. E. **Argamassas de Cal Hidráulica para Revestimentos de Paredes.** Lisboa, Fevereiro de 2008. Dissertação de Mestrado pelo Instituto Superior Técnico.

PHAN, P.H.; CHAOUCHE, M. **Rheology and stability of self-compacting concrete cement pastes,** Appl. Rheol. 15 (2005) 336.

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários.** Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

PIMENTEL, L. L., PISSOLATO JR., O.; JACINTHO, A. E. P. G. A., MARTINS, H. L. S. **Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil – Avaliação de características físicas e mecânicas.** Revista Matéria, v.23, n.1, 2018.

PINTO, A. P. F; GOMES, A; PINTO, J. B. **Materiais de Construção Argamassas.** Pesquisa técnica. Lisboa, 2006.

POITOU, A, RACINEUX, G. **A squeezing experiment showing binder migration in concentrated suspensions**, J. Rheol. 45 (2001) 609–625.

POWERS, T. C. The **Properties of Fresh Concrete.** New York: John Wiley, 1968.

QUARCIONI, V. A.; CINCOTTO, M. A. Optmization of calculation method for determination of composition of hardened mortars of Portland cement and hydrated lime made in laboratory. Construction and Building Materials 20, 1069–1078, (2006).

RADEGAZ, N. J. **Avaliação de bens: princípios básicos e aplicações.** São Paulo: Liv. e Ed. Universitária de Direito, 2011.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo Argamassa.** 2ª ed. Porto Alegre, ed. Edipucrs, 188p, 2015.

REED, J. S. **Principles of Ceramics Processing**. 2ª ed. Nova York, EUA. John Wiley and Sons, Inc., 1995.

RILEM. MR-3. **The Complex Workability – Consistence – Plasticity.** France, 1982.

ROCHA, A. P. **Riscos em alta: saiba quais são os sistemas mais suscetíveis a erros e má execução e como o planejamento pode diminuir falhas em obras.** Téchne, São Paulo, ano 19, n. 171, p. 30-35, jun. 2011.

ROMANO, R. C. O. **Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil.** Tese EPUSP. 227p, 2013.

ROMANO, R. C. O.; SEABRA, M. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Caracterização reológica de suspensões cimentícias mistas com cales ou filitos.** Ambient. constr. vol.14 no.1 Porto Alegre Jan./Mar. 2014.

ROMANO, R. C. O.; TORRES, D. R.; PILEGGI. R. G. **Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars.** Construction and Building Materials 82, 219–226 (2015).

ROMANO, R. C. de O.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. **Incorporação de ar em materiais cimentícios: uma nova abordagem para o desenvolvimento de argamassas de revestimento.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 289-308, abr./jun. 2018.

SABBATINI, F. H. **Tecnologia de execução de revestimento de argamassas**. In: SIMPATCON – Simpósio de aplicação da tecnologia do concreto, 13, Campinas, 1990.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A.; STUDENT, M. **Reusing of Marble and Granite Powders in Self-Compacting Concrete for Sustainable** Development. Journal of Cleaner Production. (2016).

SAHMARAN, M.; LACHEMI, M.; HOSSAIN, K. M. A.; RANADE, R.; LI, V. C. **Influence of aggregates type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites.** ACI Materials Journal, v. 106, n. 3, p. 308-316, May.-Jun., 2009.

SANTIAGO, C. C. **Argamassas tradicionais de cal.** EDUFBA. ISBN 978-85-232-0471-6. 202p. Salvador, 2007.

SANTOS, W. J. **Desenvolvimento de Metodologia de Dosagem de Argamassas de Revestimento e Assentamento.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa), Viçosa, 2014.

SANTOS, A. R.; VEIGA, M. R.; SILVA, A. S.; BRITO J.; ALVAREZ, J. I. **Evolution of the microstructure of lime based mortars and influence on the mechanical behaviour: The role of the aggregates.** Construction and Building Materials 187 (2018a) 907–922 Contents.

SANTOS, A.R., VEIGA, M.R., MATIAS, L., SANTOS SILVA, A., DE BRITO, J. **Durability and compatibility of lime-based mortars: The effect of aggregates.** Infrastructures (2018b), 3, 34.

SANTOS, W. J. dos; ALVARENGA, R. de C. S.; SILVA, R. C. da; PEDROTI, L. G.; SOUZA, A. T.; FREIRE, A. S. **Análise da influência do tipo de agregado miúdo nas características e dosagem de argamassas mistas**. Ambiente Construído,Porto Alegre, v. 19,n. 4, p. 271-288, out./dez. 2019.

SALOMÃO, M. C. de F.; BAUER, E.; KAZMIERCZAK, C. de S. **Drying parameters of rendering mortars. Ambiente Construído,** Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 7-19, abr./jun. 2018. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

SAKANO, V. K.; GRANDES, F. A.; ROMANO, R. C. de O.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. **Comportamento reológico em *squeeze flow* de suspensões concentradas de esferas de vidro em silicones de diferentes viscosidades.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 361-377, 2018.

SÉBAÏBI, Y.; DHEILLY, R. M.; QUÉNEUDEC, M. **Study of the water-retention capacity of a lime–sand mortar: Influence of the physicochemical characteristics of the lime.** Cement and Concrete Research 33 (2003) 689–696.

SEGAT, G. T. **Manifestações patológicas observadas em revestimento de argamassa: estudo de caso em conjunto habitacional popular na cidade de Caxias do Sul.** Porto alegre, 164p. Trabalho de conclusão (Mestrado Profissionalizante) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachada de edifícios.** São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1989.

SELMO, S. M. de S., HELENE, P. R. do L. **Dosagem de Argamassas de Cimento Portland e Cal para Revestimento Externo de Fachada dos Edifícios.** Boletim Técnico USP. BT/PCC39, 1991.

SELMO, S.M.S.; NAKAKURA, E.H.; MIRANDA, L.F.R.; MEDEIROS, M.H.F.; SILVA, C.O. **Propriedades e Especificações de Argamassas Industrializadas de Múltiplo Uso**. São Paulo: EPUSP, 2002. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/310, 2002.

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

SCHUTTER, G.; AUDENAERT, K **. Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration.** Materials and structures, 2004 – Springer.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. **Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento Portland, cal e areia**. Revista Ambiente Construído, v. 8, n. 4, p. 21-35, 2008.

SILVA, N. G. **Avaliação da retração e da Fissuração em Revestimento de Argamassa na Fase Plástica.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil da UFSC), Florianópolis, 2011.

SILVA, B.; FERREIRA PINTO, A. P.; GOMES, A.; **Candeias,** Impact of a viscosity modifying admixture on the properties of lime mortars. J. Build. Eng. (2020).

SINGH, S.; NAGAR, R.; AGRAWAL, V.; RANA, A.; TIWARI, A. **Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete.** J. Clean. Prod., 116 (2016), pp. 223-235.

SOUSA, J. G. G.; BAUER, E. **Estudo da reologia das argamassas de revestimento no estado fresco.** Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais - CBCIMAT, Natal, 2002.

SOUZA, A. T., CARVALHAIS, C. D. A., & JOSE, W. **Analysis of chemical admixtures combination on coating mortar using Simplex network method.** Construction and Building Materials, 239, 117796 (2020a).

SOUZA, A. T.; CALDAS, R. B.; LUDVIG, P.; SANTOS, W. J. **The effects of mixture's components on the mechanical properties and durability indicators of mixed mortar using simplex network method.** Constr Build Mater, 249 (2020b).

SRIBOONLUE W.; WALLO E. M. **The effect of constituent proportions on stress–strain characteristics of Portland cement–lime mortar and grout.** In: Matthys JH, editor. Masonry: components to assemblages, ASTM STP 1063. Philadelphia: 1990, p. 206–14.

STEIN, H. N. **The rheological behaviour of suspensions.** In N. K. Cheremisinoff (Ed.), Slurry flow technology (pp. 36-48). (Encyclopedia of fluid mechanics; Vol. 5 (1986).

STOLZ, C. M. **Análise dos principais parâmetros que influenciam na área de contato substrato/argamassa de revestimento.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

STOLZ, C. M.; MASUERO, A. B. **Influence of grains distribution on the rheological behavior of mortars.** Construction and Building Materials 177 (2018) 261–271.

STOVALL, T.; LARRARD, F.; BUIL, M. **Linear Packing Density Model of Grain Mixtures.** Powder Technology, 1986.

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

STRUBLE, L. J.; JIANG, Q. Effects of Air Entrainment on Rheology. ACI Materials Journal. 101 (6), p 448-456, 2004.

TEMOCHE E. J. F.; BARROS, M. M. S. B.; JOÃO R. L. S. **A escolha do revestimento de fachada de edifícios influenciada pela ocorrência de problemas patológicos.** In: X–CONPAT 2005. Asunción, Paraguai. 2005.

TOUFAR, W., BORN, M., KLOSE, E. **Beitrag zur Optimierung der Packungsdichte Polydisperse Korniger Systeme. Freiberger Forschungsheft** A 588, VEB Deutscher Verlag fur Grundstoffindustrie, 1976.

USGS - United States Geological Survey. Disponível em: http://www.usgs.gov. Acesso em 20/02/2021.

VASQUEZ, E. G.; QUALHARINI, E. L.; HADDAD, A.; PERAZZO, D.; ALVES, L. **Falhas associadas nas etapas de projeto e execução de revestimento de placas de rocha**. VI Conferência de Patologias e Reabilitação de Edifícios, Rio de Janeiro, 2018.

VELOSA, A. L.; CACHIM, P. B. **Hydraulic lime-based concrete: Strength development using a pozzolanic addition and different curing conditions.** Construction and Building materials, 23(5), 2107-2111 (2009).

VYŠVAŘIL, M.; VOZÁK, R. **Effect of aggregate gradation on lime mortars rheology.** IOP

Conference Series: Materials Science and Engineering, 549(1), 2019.

XU, W. X.; LV, Z.; CHEN, H. S. **Effects of particle size distribution, shape and volume fraction of aggregates on the wall effect of concrete via random sequential packing of polydispersed ellipsoidal particles.** Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 392(3), 416–426, 2013.

WESTMAN, A. E. R; HUGILL, H. R. **The packing of particles.** J. Am. Ceram. Soc. 13 (10) (1930) 767–779.

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

WONG, H. H. C. KWAN, A. K. H. **Packing density of cementitious materials: part 2 - packing andflowofOPC +PFA +CSF.** Materials and Structures 41, 773-784, (2008b).

Y. SÉBAÏBI, R. M. DHEILLY, M. QUÉNEUDEC. **A study of the viscosity of lime–cement paste: influence of the physico-chemical characteristics of lime.** Construction and Building Materials 18 (2004) 653–660.

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

APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS

As argamassas de revestimento de obras foram disponibilizadas por seis construtoras distintas e atuantes na região de Curitiba-PR, onde três delas foram produzidas *in loco* e três delas industrializadas. Dentre as industrializadas uma é estabilizada e duas são argamassas industriais anidras de fabricantes distintos. A tabela A.1 descreve as características das argamassas pesquisadas.

TABELA A.1 – ARGAMASSAS PRODUZIDAS EM OBRAS *IN LOCO* E INDUSTRIALIZADAS

NOMENCLATURA ADOTADA	TIPO	CARACTERÍSTICA DA EDIFICAÇÃO
O1	Produzida *in loco*	Argamassa utilizada no revestimento externo de obras de edifícios altos.
O2	Produzida *in loco*	Argamassa utilizada numa residência unifamiliar
O3	Produzida *in loco*	Argamassa utilizada no revestimento externo de obras de edifícios altos.
I4	Industrializada - Estabilizada	Argamassa fresca pronta para uso, utilizada em fachada de edifícios de médio porte.
I5	Industrializada Anidra	Argamassa industrializada – Utilizada em revestimento de tetos e paredes de alvenaria e assentamento de blocos
I6	Industrializada Anidra	Argamassa industrializada. Utilizada em revestimento de tetos e paredes de alvenaria e assentamento de blocos

FONTE: A autora (2021).

Cada uma das argamassas apresentaram-se com suas particularidades, seja ele na formulação, tipo de mistura, diferentes constituintes, entre outros. Por conta disso, a caracterização desses materiais será dividida entre as argamassas produzidas *in loco* (O1, O2 e O3) e as argamassas industrializadas (I4, I5 e I6).

Caracterização dos materiais das argamassas produzidas in loco

a) Cimento

Os cimentos utilizados nas argamassas retiradas de obras que foram produzidas *in loco* foram basicamente resumidos em dois: CP II F-32 e CP IV-RS. Esta escolha foi opcional de cada empreiteira, sendo que todos mencionaram a opção de acordo com menor custo e disponibilidade nas lojas de materiais de construção. Todos os cimentos utilizados seguem requisitos conforme NBR 16697 (ABNT, 2018). Na tabela A.2 está sendo apresentada a caracterização dos cimentos, fornecido pelos seus respectivos fabricantes.

TABELA A.2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS CIMENTOS DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS EM OBRAS *IN LOCO*

ARGAMASSA DA OBRA		**O1**	**O2**	**O3**
TIPOS DE CIMENTOS		**CP II F 32**	**CP II F 32**	**CP IV 32**
Parâmetros Físicos	Massa Unitária - kg/m³	1.420	1.420	1.500
	Massa específica - kg/m³	3.080	3.080	3.130
	Tempo de Pega (Início) - minutos.	230	230	272
	Tempo de Pega (Fim) - minutos.	285	285	345
	Blaine - cm²/g	3.450	3.450	4.667
	Resistência à Compressão – R1 (MPa)	17,1	17,1	13,24
	Resistência à Compressão – R3 (MPa)	32,7	32,7	22,4
	Resistência à Compressão – R7 (MPa)	37,1	37,1	27,72
	Resistência à Compressão – R28 (MPa)	43,5	43,5	41,38
Parâmetros Químicos	Perda ao Fogo (%)	6,96	6,96	4,3
	Resíduo Insolúvel (%)	1,78	1,78	29,36

FONTE: Fabricantes consultados em set/2019 (2021).

Para a confecção das argamassas de revestimento foram utilizados cimentos de diferentes tipologias, conforme indicado pela obra. Entretanto, através das características físicas dos cimentos, mostra que o CPIV -32 RS é o cimento mais fino utilizado (blaine de 4667cm²/g) em comparação aos demais cimentos. Já com relação a resistência inicial do CPIV-32 é possível observar valores bem inferiores em comparação ao CP II F 32, o que era previsto, tendo em vista que o CP IV tem uma quantidade muito superior de cinza volante em comparação ao cimento CP II F 32, o que diminui as resistências em idades iniciais dos materiais.

b) Cal

Outro aglomerante utilizado na confecção das argamassas de revestimento produzidas *in loco* é a cal. As cales utilizada tem características distintas, e foram emitidas pelos respectivos fornecedores e serão apresentadas pela tabela A.3.

TABELA A.3– CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DAS CALES DAS ARGAMASSAS RETIRADAS DE OBRAS E PRODUZIDAS *IN LOCO*

PROPRIEDADES (NBR NM 6473)	O1	O2	O3
Tipo da Cal	HIDRATADA – CH I	HIDRÁULICA HL II	VIRGEM
Massa Específica (g/cm³)	2,42	2,10	3,30
Massa Unitária (g/cm³)	0,55	0,722	1,22
Granulometria # 30 (%)	0	-	26,20
Granulometria # 70 (%)	-	≤ 5	-
Granulometria # 140 (%)	-	≤ 15	-
Granulometria #200 (%)	4,9	-	-
Resíduo Insolúvel	-	≥ 35	7,85
Água combinada (%)	23	-	18,53
Óxidos	95,4	≤10	99,98
CO2 (%)	3,2	≤ 5	23,85
Composição	Cálcio e Magnésio	Hidróxido de cálcio e magnésio, silicatos e aluminatos de cálcio	Cálcio e Magnésio

FONTE: Fabricantes (2021).

Nota-se, através da tabela apresentada a diferença de características entre as cales apresentadas, sendo que cada uma das argamassas de obra *in loco* apresentada foi desenvolvida com um tipo de cal distinta. A massa unitária e a massa específica da cal virgem tem uma diferença relativamente grande da cal hidratada, o que significa, que esse material irá influenciar significativamente o comportamento dessas argamassas.

c) Agregado Miúdo

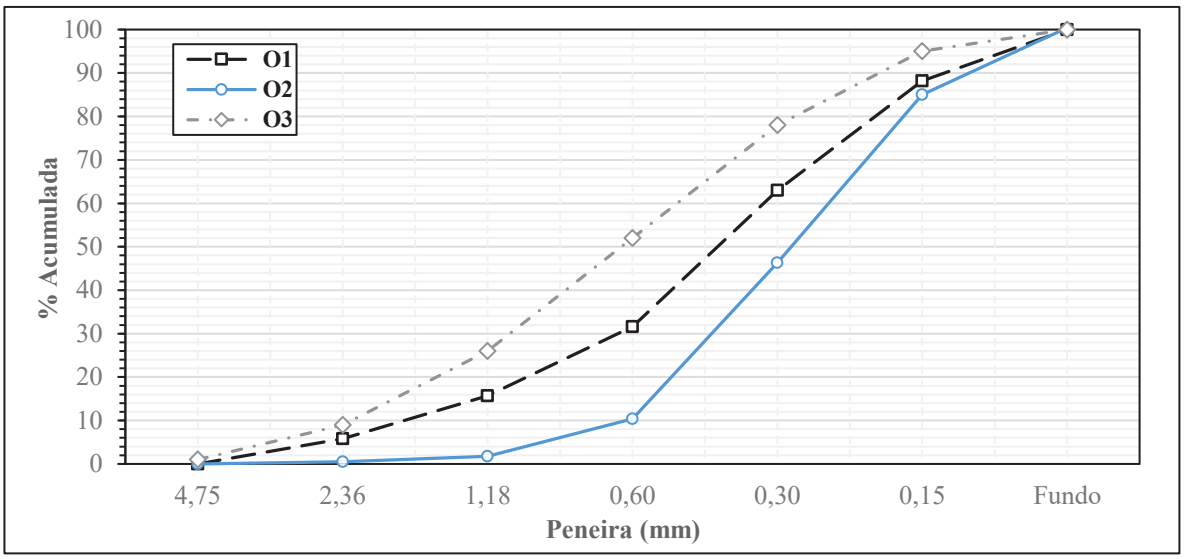
O agregado miúdo utilizado em todas as argamassas de revestimento produzido *in loco*, são regionais e caracterizados em laboratório, conforme tabela A.4 e curvas granulométricas através da figura A.1.

TABELA A.4 – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO *IN LOCO*

PROPRIEDADES	O1	O2	O3
Massa Específica (g/cm³)	2,52	2,64	2,58
Massa Unitária (g/cm³)	1,45	1,47	1,56
Absorção (%)	1,27	0,5	0,4
Índice de Vazios (%)	42,29	40,68	39,38
Materiais Pulverulentos (%)	1,33	2,20	2,80
Módulo de Finura (-)	2,04	1,35	2,61
Dimensão Máxima Característica (mm)	4,75	1,18	4,75
Origem do agregado	Natural	Artificial lavado	Natural

FONTE: A autora (2021).

FIGURA A.1 – CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS UTILIZADOS NAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS *IN LOCO*



FONTE: A autora (2021).

d) Formulação e Procedimento de Mistura

As formulações fornecidas pelas respectivas empreiteiras estão sendo descritas em volume, conforme tabela A.5.

TABELA A.5 – FORMULAÇÃO EM VOLUME FORNECIDA PELAS EMPREITEIRAS DAS ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

MATERIAL	O1	O2	O3
Cimento	1	1	1
Cal	2,3	3,5	0,8
Agregado Miúdo	9,6	9,2	7,1
a/c	0,11	0,18	0,23
C_{cim}(kg/m³)	171,1	141,8	164,5
C_{cal} (kg/m³)	154,0	255,3	113,5
$C_{ag.miúdo}$ (kg/m³)	1.676,5	1.347,5	1.214,0

FONTE: Empreiteiras (2019).

Quanto ao procedimento de mistura a empreiteira da argamassa de revestimento O1 utiliza padiola para a dosagem, recipiente utilizado para a dosagem dos agregados em volume unitário, fabricada especialmente para a formulação da argamassa de revestimento de paredes externas. Uma foto da mesma está sendo mostrada na figura A.2.

FIGURA A.2 – PADIOLA UTILIZADA NA FORMULAÇÃO DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO O1.

FONTE: Construtora (2021).

O equipamento utilizado no procedimento de mistura é um misturador de argamassa de eixo horizontal. O procedimento de mistura adotado tem um tempo máximo de mistura de 7 minutos, onde os materiais são colocados no misturador, sempre na mesma ordem: agregado miúdo, cimento, cal e por último a água.

O procedimento de mistura da argamassa O2 é feito manualmente pelo pedreiro, sem uma aferição padronizada de tempo, considerando somente a homogeneidade apresentada de uma forma subjetiva. Os materiais são misturados sempre na ordem: agregado miúdo, cimento, cal e por último a água, em um recipiente de madeira compensada (masseira), conforme mostrado na figura A.3.

FIGURA A.3 – RECIPIENTE UTILIZADO NA O2 PARA O PROCEDIMENTO DE MISTURA DAS ARGAMASSAS

FONTE: A autora (2021).

A argamassa de revestimento O3 é uma argamassa parcialmente produzida em obra, visto que a argamassa branca de cal (massa unitária da argamassa branca de cal corresponde a 1,71 g/cm³) é adquirida de uma central dosadora, ou seja, é uma argamassa branca industrializadas. Essa argamassa branca quando recebida na obra é misturada com o cimento e a água e só então é aplicada.

O procedimento de mistura utilizado pela construtora é mecânico, ou seja, executada com a ajuda de uma betoneira. Os constituintes são acrescentados em ordem: a argamassa branca, cimento e por último a água, misturados por 3 minutos.

Argamassas Industrializadas

As argamassas industrializadas referem-se a argamassa estabilizada e as duas argamassas industrializadas anidras. A argamassa estabilizada (I4), ou seja, dosada em central, transportada e misturada por caminhões betoneira e armazenadas em recipientes próprios na obra (figura 21), em estado fresco. Essa tecnologia foi introduzida no Brasil na metade da década de 80. Seguindo Bauer *et al.* (2015) a aplicação da argamassa estabilizada nos canteiros de obras brasileiros ainda é em pequena escala e restrita, quando comparado a outras tecnologias das argamassas, porém ela vem ganhando o mercado consumidor visto que são produzidas em larga escala em usinas dosadoras, com controle tecnológico adequado, podendo ser utilizada para assentamento de alvenaria de vedação, assim como em revestimentos (rebocos internos e externos, emboços) regularização de pisos, sacadas entre outros.

FIGURA A.4 – RECIPIENTE PRÓPRIO PARA ARMAZENAMENTO DA ARGAMASSA ESTABILIZADA

FONTE: A autora (2021).

Como a argamassa estabilizada é uma argamassa produzida em central não foi possível obter dados detalhados da formulação utilizada. Entretanto, sabe-se que a argamassa estabilizada utiliza os mesmos constituintes das argamassas convencionais, com a ressalva da cal e dos aditivos químicos que variam dependendo do fabricante, dentre eles incorporadores de ar e estabilizadores do tempo de pega. Abaixo está descrita a caracterização da argamassa estabilizada proposta pelo fornecedor do material, conforme tabela A.6.

TABELA A.6 – CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA ESTABILIZADA

Ensaios	**Normas**	**Argamassa Estabilizada (I4)**
Resistência à compressão (MPa)	NBR 13279/2005	P5 (5,5 a 9)
Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m³)	NBR 13280/2005	M4 (1400 a 1800)
Resistência à tração na flexão (MPa)	NBR 13279/2005	R3 (1,5 a 2,7)
Coeficiente de capilaridade (g/dm².min $^{1/2}$)	NBR 15259/2005	C5 (5 a 12)
Densidade de massa no estado fresco (kg/m³)	NBR 13278/2005	D4 (1.600 a 2.000)
Retenção de água (%)	NBR 13277/2005	U2 (72 a 85)
Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	NBR 15258/2005	A3 (≥0,3)
Preparo da mistura	NBR 12276/2005	Não informado
Resistência de aderência à tração (MPa)	NBR 13528/2010 e NBR 13749/1996	Revestimento interno sem chapisco ≥0,2 Revestimento interno e externo com chapisco ≥0,3
a/ms		0,14
Constituintes		Cimento Portland cinza, areia quartzosa e aditivos químicos.

FONTE: Fabricantes (2021).

As argamassas industrializadas anidras (I5 e I6) foram classificadas de acordo com a norma NBR 13281/2005, apresentada pela tabela A.7, retirada da ficha técnica dos respectivos fabricantes. Entretanto, elas apresentam uma diversidade muito grande dependendo do tipo de fornecedor e região em que ela é encontrada, por conta disso a caracterização de classificação teve que ser retirada da ficha técnica do fabricante, sendo incluída nessa pesquisa a análise granulométrica do material. O teor de água também é indicado por cada fornecedor.

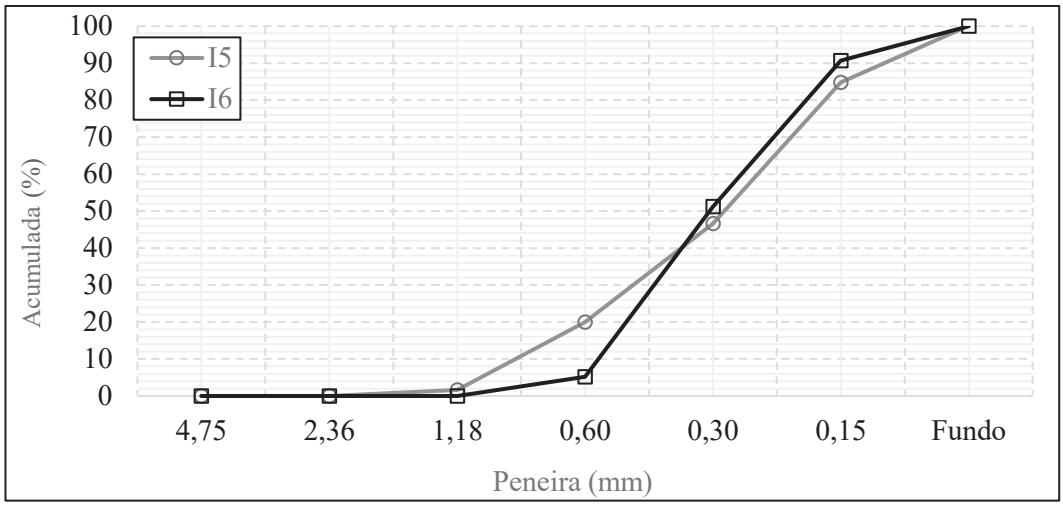
TABELA A.7 – CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS

Ensaio	**Normas**	**Industrializada – (I5)**	**Industrializada - (I6)**
Resistência à compressão (MPa)	NBR 13279/2005	P3 (2,5 a 4,5)	P5 (5,5 a 9,0)
Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m³)	NBR 13280/2005	M4 (1400 a 1800)	M4 (1400 a 1800)
Resistência à tração na flexão (MPa)	NBR 13279/2005	R4 (2,0 a 3,5)	R4 (2,0 a 3,5)
Coeficiente de capilaridade (g/dm².min $^{1/2}$)	NBR 15259/2005	Não informado	C4 (3,0 a 7,0)
Densidade de massa no estado fresco (kg/m³)	NBR 13278/2005	D3 (1400 a 1800)	D4 (1600 a 2000)
Retenção de água (%)	NBR 13277/2005	U4 (86 a 94)	U2 (72 a 85)
Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	NBR 15258/2005	A3 (≥0,3)	A3 (≥0,3)
Preparo da mistura	NBR 12276/2005	Não informado	Mistura com tempo add de 15s
Resistência de aderência à tração (MPa)	NBR 13528/2010 e NBR 13749/1996	Não informado	≥ 0,3 Ver. Com chapisco
a/ms		0,14	0,16 a 0,165
Constituintes		Cimento Portland cinza, areia quartzosa e aditivos químicos	Cimento Portland, agregados minerais com granulometria controlada e aditivos químicos

FONTE: Fabricantes (2021).

Os ensaios de caracterização das argamassas industrializadas para revestimento quanto a curva granulométrica do material anidro e está sendo demonstrada pela figura A.5. Entretanto é possível verificar que tanto a I5 quanto a I6 apresentam resultados semelhantes quanto a sua granulometria, porém a argamassa I5 com mais finos retidos na peneira #600.

FIGURA A.5 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS



FONTE: A autora (2021).

APÊNDICE B – EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS ATRAVÉS DO MÉTODO WONG E KAN (2008) DO CIMENTO E DA CAL

TABELA B.1 – RESULTADO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS WONG E KWAN (2008) PARA O CIMENTO CP II F32

a/ms	Índice de Vazios - (υ)	Concentração de Sólidos - (ϕ)
0,80	2,282	0,305
0,70	2,205	0,312
0,60	1,901	0,345
0,50	1,577	0,388
0,40	1,247	0,445
0,30	0,956	0,511
0,25	0,864	0,536
0,24	0,877	0,533
0,23	0,855	0,539
0,22	0,903	0,526
0,21	1,178	0,459
0,20	1,124	0,471
0,15	1,125	0,471

FONTE: A autora (2021).

TABELA B.1 – RESULTADO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS WONG E KWAN (2008) PARA A CAL HL II

a/ms	Índice de Vazios - (υ)	Concentração de Sólidos - (ϕ)
0,75	1,865	0,349
0,70	1,727	0,367
0,65	1,588	0,386
0,75	1,865	0,349
0,70	1,727	0,367
0,65	1,588	0,386
0,60	1,466	0,406
0,55	1,372	0,422
0,54	1,343	0,427
0,53	1,324	0,430
0,52	1,238	0,447
0,51	1,284	0,438
0,50	1,271	0,440
0,45	1,419	0,413

FONTE: A autora (2021).

APÊNDICE C – ENSAIO EXPERIMENTAL WONG E KWAN (2008) PARA O EMPACOTAMENTO DO CONJUNTO GRANULAR

TABELA C.1 – ENSAIOS EXPERIMENTAIS PARA O CONJUNTO GRANULAR COM $AN_{1,87}$

Formulação em volume	a/ms	Relação de vazios - (υ)	Concentração de sólidos (ϕ)
01:0.6:06	0,20	0,497	0,668
	0,17	0,410	0,709
	0,14	0,515	0,660
	0,11	0,554	0,644
	0,08	0,559	0,641
01:01:06	0,20	0,617	0,618
	0,17	0,422	0,703
	0,14	0,484	0,674
	0,11	0,539	0,650
	0,08	0,563	0,640
01:02:06	0,20	0,522	0,657
	0,17	0,430	0,700
	0,14	0,461	0,684
	0,11	0,610	0,621
	0,08	0,778	0,562
01:02:07	0,20	0,515	0,660
	0,17	0,509	0,663
	0,14	0,511	0,662
	0,11	0,621	0,617
	0,08	0,765	0,567
01:02:08	0,20	0,546	0,647
	0,17	0,494	0,669
	0,14	0,497	0,668
	0,11	0,600	0,625
	0,08	0,693	0,591
01:02:09	0,20	0,491	0,670
	0,17	0,443	0,693
	0,14	0,454	0,688
	0,11	0,585	0,631
	0,08	0,751	0,571
01:02:10	0,20	0,528	0,654
	0,17	0,498	0,668
	0,14	0,518	0,659
	0,11	0,609	0,622
	0,08	0,654	0,605
01:02:11	0,20	0,526	0,655
	0,17	0,502	0,666
	0,14	0,534	0,652
	0,11	0,607	0,622
	0,08	0,703	0,587
01:03:10	0,20	0,543	0,648
	0,17	0,504	0,665
	0,14	0,482	0,675
	0,11	0,612	0,621
	0,08	0,753	0,570
01:03:11	0,20	0,653	0,605
	0,17	0,593	0,628
	0,14	0,530	0,654
	0,11	0,538	0,650
	0,08	0,804	0,554

FONTE: A autora (2021).

TABELA C.2 – ENSAIOS EXPERIMENTAIS WONG E KWAN (2008) PARA O CONJUNTO GRANULAR COM $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$

Formulação em volume	$AA_{2,04}$			$AN_{2,69}$		
	a/ms	Relação de vazios - (υ)	Concentração de sólidos (ϕ)	a/ms	Relação de vazios - (υ)	Concentração de sólidos (ϕ)
1:0.6:6	0,23	0,568	0,638	0,23	0,563	0,640
	0,20	0,518	0,659	0,20	0,494	0,670
	0,17	0,491	0,671	0,17	0,451	0,689
	0,14	0,707	0,586	0,14	0,517	0,659
	0,11	0,690	0,592	0,11	0,498	0,668
01:01:06	0,23	0,559	0,641	0,23	0,565	0,639
	0,20	0,509	0,663	0,20	0,485	0,674
	0,17	0,501	0,666	0,17	0,462	0,684
	0,14	0,506	0,664	0,14	0,544	0,648
	0,11	0,678	0,596	0,11	0,653	0,605
01:02:06	0,23	0,574	0,635	0,23	0,566	0,639
	0,20	0,527	0,655	0,20	0,500	0,667
	0,17	0,502	0,666	0,17	0,464	0,683
	0,14	0,615	0,619	0,14	0,501	0,666
	0,11	0,834	0,545	0,11	0,730	0,578
01:02:09	0,23	0,567	0,638	0,23	0,533	0,652
	0,20	0,527	0,655	0,20	0,486	0,673
	0,17	0,510	0,662	0,17	0,470	0,680
	0,14	0,527	0,655	0,14	0,459	0,685
	0,11	0,742	0,574	0,11	0,669	0,599

FONTE: A autora (2021).

APÊNDICE D – RESULTADOS DOS MODELO DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS DO CONJUNTO GRANULAR CPM, CIPM E WONG E KWAN (2008)

TABELA D.1 – CÁLCULOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS PARA O $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$

Formulações	$AN_{1,87}$			$AA_{2,04}$			$AN_{2,69}$		
	CIPM	CPM	EXP.	CIPM	CPM	EXP.	CIPM	CPM	EXP.
01:0.6:06	0,707	0,679	0,709	0,732	0,702	0,671	0,754	0,717	0,689
01:01:06	0,737	0,696	0,703	0,758	0,715	0,666	0,777	0,728	0,684
01:02:06	0,729	0,685	0,700	0,731	0,690	0,666	0,734	0,695	0,683
01:02:07	0,740	0,696	0,663	0,746	0,704	-	0,750	0,710	-
01:02:08	0,742	0,697	0,669	0,754	0,710	-	0,760	0,719	-
01:02:09	0,736	0,693	0,693	0,754	0,710	0,662	0,764	0,722	0,685
01:02:10	0,726	0,687	0,668	0,748	0,706	-	0,760	0,723	-
01:02:11	0,716	0,680	0,666	0,739	0,701	-	0,753	0,714	-
01:03:10	0,733	0,693	0,675	0,739	0,702	-	0,742	0,709	-
01:03:11	0,736	0,694	0,654	0,745	0,707	-	0,750	0,715	-

FONTE: A autora (2021).

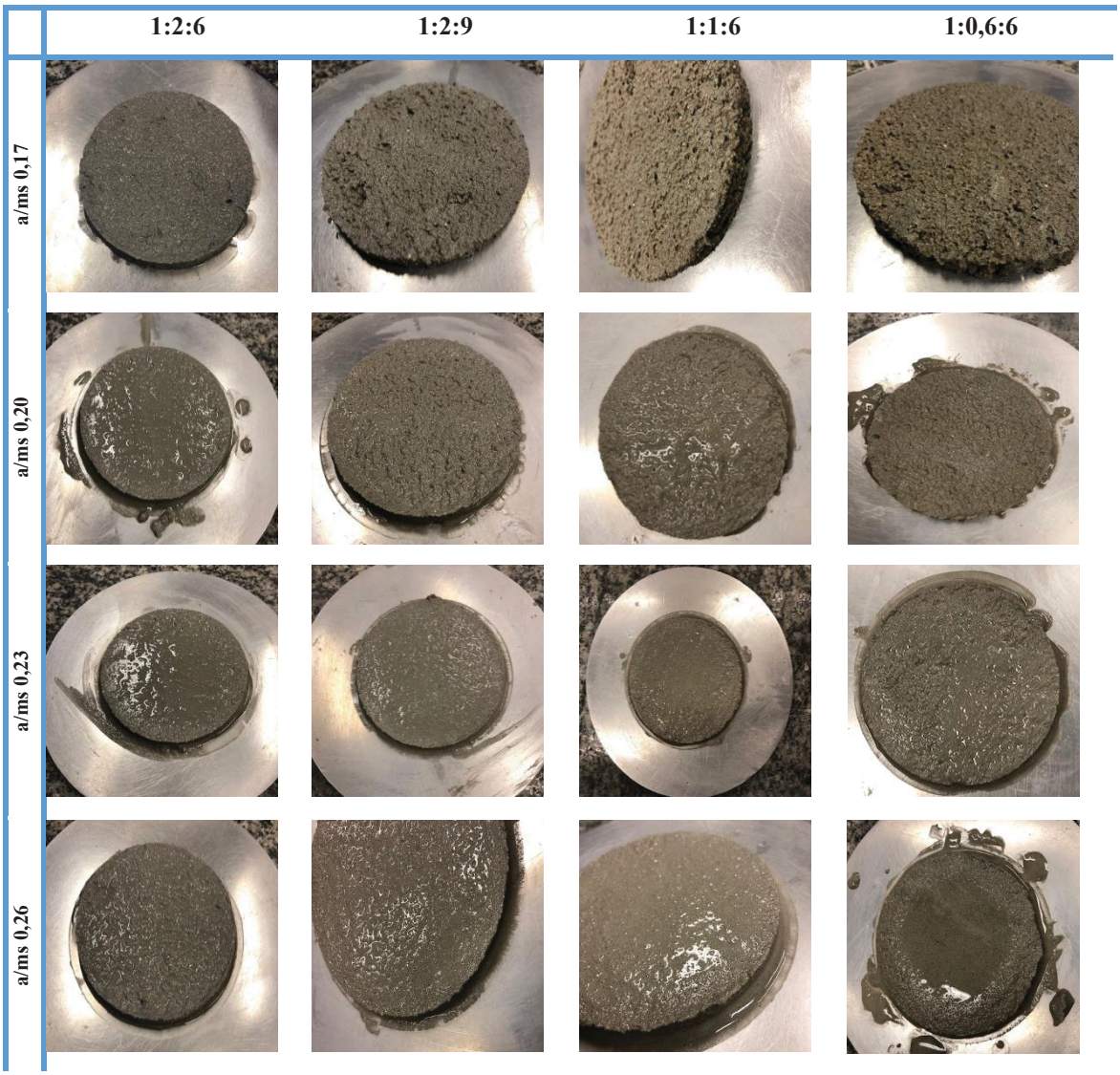
APÊNDICE E – CÁLCULO DOS PARÂMETROS REFERENTE À DISTÂNCIA ENTRE PARTÍCULAS MPT E IPS

Formulação	a/ms	MPT	IPS
AN1,87 (1:2:6)	0,17	26,2	1,0
AN1,87 (1:2:6)	0,2	36,5	1,5
AN1,87 (1:2:6)	0,23	46,8	2,0
AN1,87 (1:2:6)	0,26	57,0	2,6
AN1,87 (1:2:9)	0,17	11,8	2,1
AN1,87 (1:2:9)	0,2	21,3	2,8
AN1,87 (1:2:9)	0,23	30,7	3,5
AN1,87 (1:2:9)	0,26	40,2	4,2
AN1,87 (1:1:6)	0,17	14,5	2,1
AN1,87 (1:1:6)	0,2	24,1	2,8
AN1,87 (1:1:6)	0,23	33,8	3,5
AN1,87 (1:1:6)	0,26	43,5	4,2
AN1,87 (1:0,6:6)	0,17	9,8	2,9
AN1,87 (1:0,6:6)	0,2	19,2	3,7
AN1,87 (1:0,6:6)	0,23	28,6	4,6
AN1,87 (1:0,6:6)	0,26	38,0	5,4
AA2,04 (1:2:6)	0,17	31,7	0,9
AA2,04 (1:2:6)	0,2	41,0	1,4
AA2,04 (1:2:6)	0,23	50,4	1,9
AA2,04 (1:2:6)	0,26	59,7	2,3
AA2,04 (1:2:9)	0,17	17,9	1,9
AA2,04 (1:2:9)	0,2	26,5	2,6
AA2,04 (1:2:9)	0,23	35,1	3,3
AA2,04 (1:2:9)	0,26	43,7	3,9
AA2,04 (1:2:9)	0,29	52,2	4,6
AA2,04 (1:1:6)	0,17	20,5	1,9
AA2,04 (1:1:6)	0,2	29,2	2,6
AA2,04 (1:1:6)	0,23	38,0	3,3
AA2,04 (1:1:6)	0,26	46,8	3,9
AA2,04 (1:1:6)	0,29	55,5	4,6
AA2,04 (1:0,6:6)	0,17	16,0	2,7
AA2,04 (1:0,6:6)	0,2	24,5	3,5
AA2,04 (1:0,6:6)	0,23	33,0	4,3
AA2,04 (1:0,6:6)	0,26	41,6	5,0
AA2,04 (1:0,6:6)	0,29	50,1	5,8
AN2,69 (1:2:6)	0,17	66,5	1,0
AN2,69 (1:2:6)	0,2	85,6	1,6
AN2,69 (1:2:6)	0,23	104,7	2,1
AN2,69 (1:2:6)	0,26	123,8	2,6
AN2,69 (1:2:9)	0,14	22,4	1,5
AN2,69 (1:2:9)	0,17	40,0	2,2
AN2,69 (1:2:9)	0,2	57,6	2,9
AN2,69 (1:2:9)	0,23	75,2	3,6
AN2,69 (1:1:6)	0,17	44,9	2,2
AN2,69 (1:1:6)	0,2	62,9	2,9
AN2,69 (1:1:6)	0,23	80,9	3,6
AN2,69 (1:1:6)	0,26	98,8	4,3
AN2,69 (1:0,6:6)	0,17	36,3	3,0
AN2,69 (1:0,6:6)	0,2	53,8	3,8
AN2,69 (1:0,6:6)	0,23	71,3	4,7
AN2,69 (1:0,6:6)	0,26	88,8	5,5

FONTE: A autora (2021).

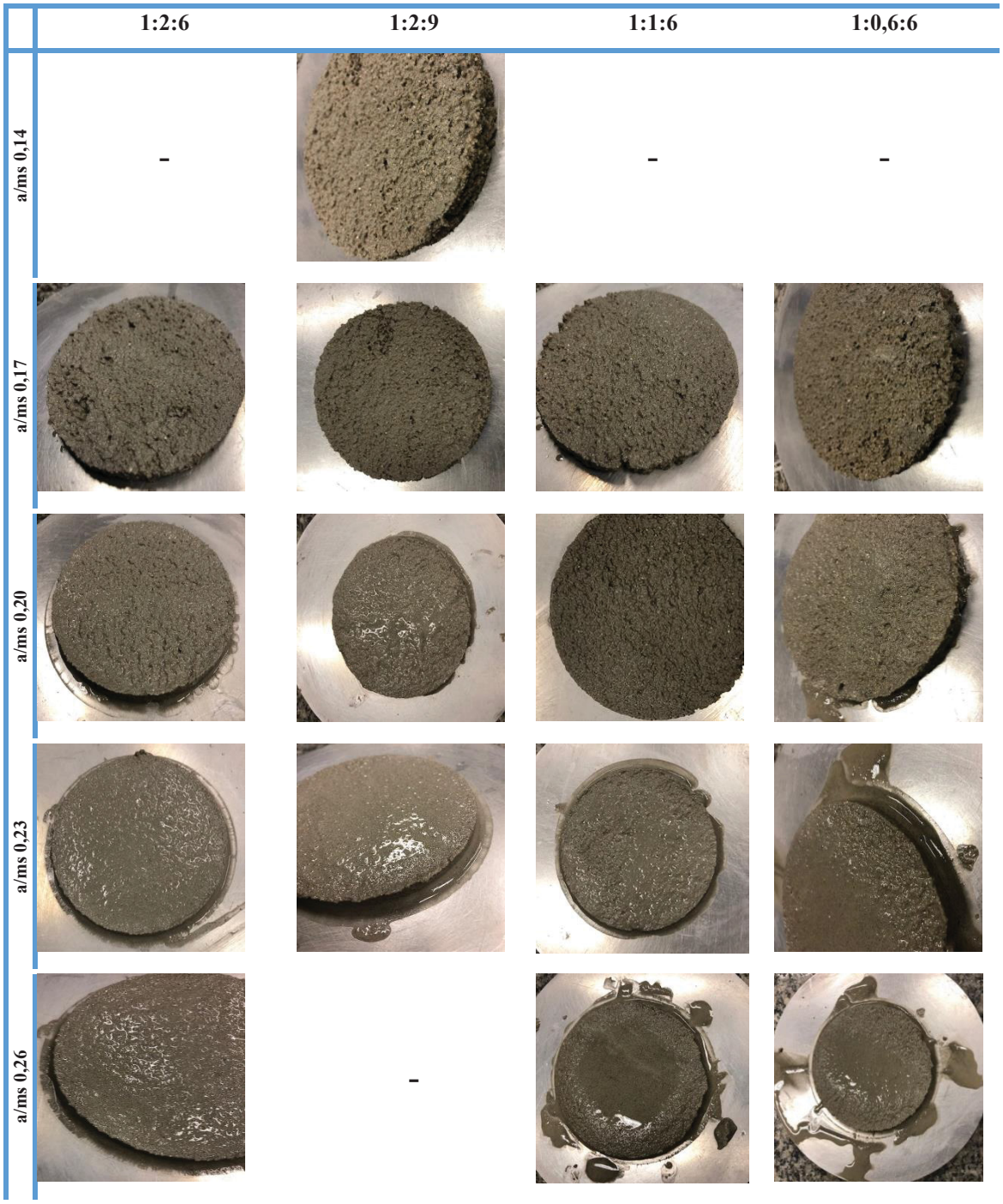
APÊNDICE F – IMAGENS DOS CORPOS DE PROVA DAS ARGAMASSAS COM AGREGADO $AN_{1,87}$, $AN_{2,69}$ E $AA_{2,04}$

FIGURA F.1.– CORPOS DE PROVA DAS ARGAMASSAS COM $AN_{1,87}$ ANTES DO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW*.



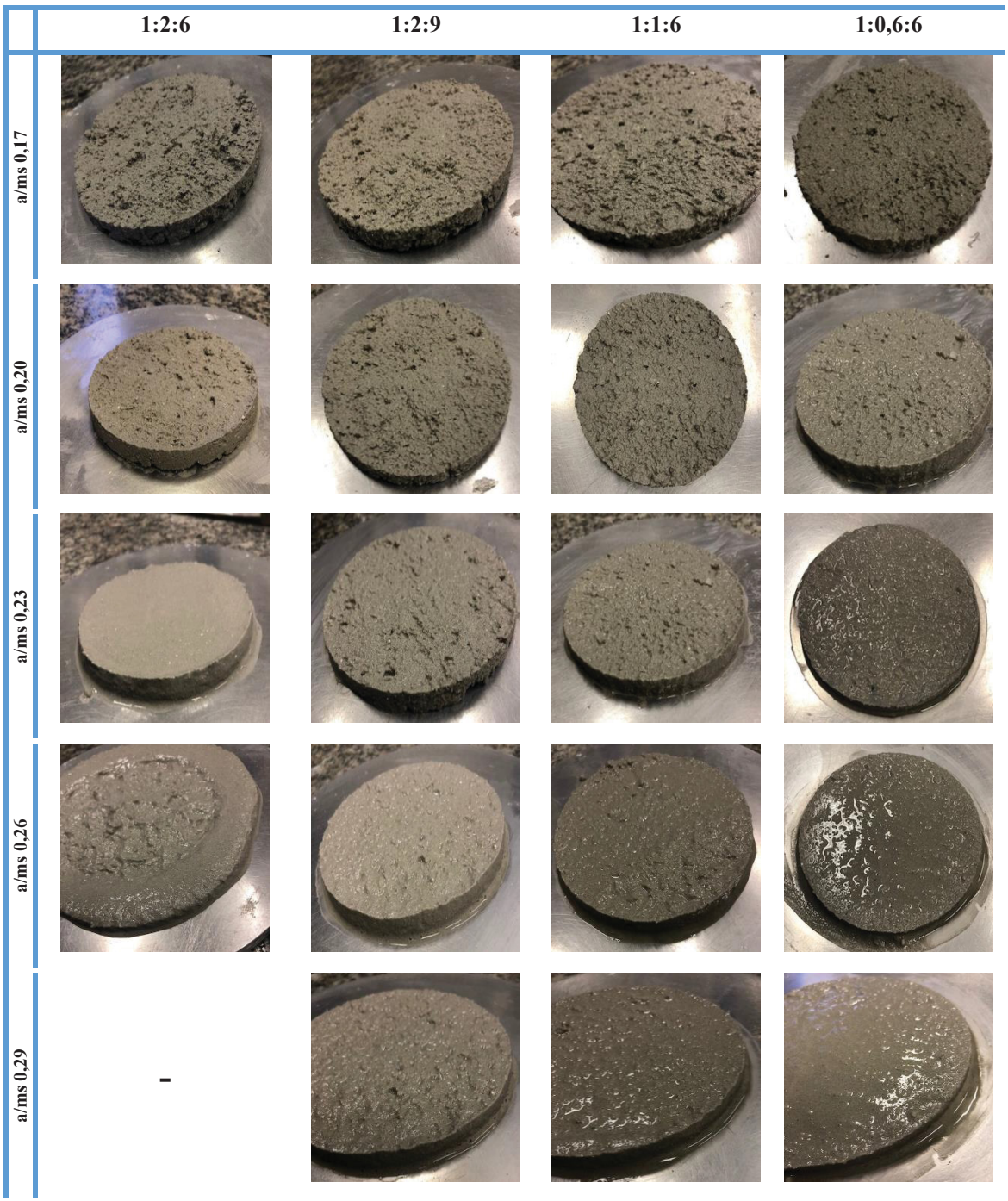
Fonte –A autora (2021).

FIGURA F.2. – CORPOS DE PROVA DAS ARGAMASSAS COM $AN_{2,69}$.



Fonte –A autora (2021).

FIGURA F.3. – CORPOS DE PROVA DAS ARGAMASSAS COM $AA_{2,04}$.



Fonte –A autora (2021).

APÊNDICE G – RESULTADO DOS CONSUMOS DE MATERIAIS

FIGURA G.1.– CONSUMOS DE MATERIAIS DE TODAS AS FORMULAÇÃO

Agregado *versus* Formulação	a/m	Consumo (m³/m³)					V. Pasta	V. Agregado	V. Pasta Compactada	V. excesso de pasta
		Cim	Cal	Ag. Miúdo	Água	V. ag. pass.# 100				
$AN_{1,87}$ (1:2:6)	0,17	0,067	0,086	0,543	0,304	0,020	0,477	0,523	0,393	0,084
$AN_{1,87}$ (1:2:6)	0,20	0,064	0,082	0,515	0,339	0,019	0,504	0,496	0,373	0,131
$AN_{1,87}$ (1:2:6)	0,23	0,061	0,078	0,490	0,371	0,018	0,528	0,472	0,355	0,173
$AN_{1,87}$ (1:2:6)	0,26	0,058	0,074	0,468	0,400	0,017	0,549	0,451	0,339	0,211
$AN_{1,87}$ (1:2:9)	0,17	0,049	0,062	0,587	0,302	0,021	0,435	0,565	0,425	0,010
$AN_{1,87}$ (1:2:9)	0,20	0,046	0,059	0,557	0,338	0,020	0,463	0,537	0,403	0,060
$AN_{1,87}$ (1:2:9)	0,23	0,044	0,056	0,530	0,370	0,019	0,489	0,511	0,384	0,105
$AN_{1,87}$ (1:2:9)	0,26	0,042	0,054	0,506	0,399	0,018	0,513	0,487	0,366	0,146
$AN_{1,87}$ (1:1:6)	0,17	0,072	0,046	0,578	0,304	0,021	0,443	0,557	0,419	0,024
$AN_{1,87}$ (1:1:6)	0,20	0,068	0,044	0,549	0,340	0,020	0,471	0,529	0,397	0,074
$AN_{1,87}$ (1:1:6)	0,23	0,065	0,042	0,522	0,372	0,019	0,497	0,503	0,378	0,119
$AN_{1,87}$ (1:1:6)	0,26	0,062	0,040	0,498	0,401	0,018	0,520	0,480	0,361	0,160
$AN_{1,87}$ (1:0,6:6)	0,17	0,074	0,028	0,594	0,304	0,022	0,428	0,572	0,430	0,000
$AN_{1,87}$ (1:0,6:6)	0,20	0,070	0,027	0,563	0,340	0,021	0,457	0,543	0,408	0,049
$AN_{1,87}$ (1:0,6:6)	0,23	0,067	0,026	0,536	0,372	0,020	0,484	0,516	0,388	0,095
$AN_{1,87}$ (1:0,6:6)	0,26	0,064	0,024	0,511	0,401	0,019	0,507	0,493	0,370	0,137
$AN_{2,69}$ (1:2:6)	0,17	0,068	0,088	0,533	0,311	0,018	0,485	0,515	0,398	0,088
$AN_{2,69}$ (1:2:6)	0,20	0,065	0,083	0,505	0,347	0,017	0,512	0,488	0,377	0,135
$AN_{2,69}$ (1:2:6)	0,23	0,062	0,079	0,480	0,379	0,017	0,536	0,464	0,358	0,178
$AN_{2,69}$ (1:2:6)	0,26	0,059	0,075	0,458	0,408	0,016	0,558	0,442	0,341	0,217
$AN_{2,69}$ (1:2:9)	0,14	0,052	0,067	0,611	0,270	0,021	0,410	0,590	0,455	0,000
$AN_{2,69}$ (1:2:9)	0,17	0,049	0,063	0,577	0,310	0,020	0,443	0,557	0,430	0,012
$AN_{2,69}$ (1:2:9)	0,20	0,047	0,060	0,547	0,346	0,019	0,472	0,528	0,408	0,064
$AN_{2,69}$ (1:2:9)	0,23	0,044	0,057	0,520	0,378	0,018	0,498	0,502	0,388	0,110
$AN_{2,69}$ (1:1:6)	0,17	0,073	0,047	0,568	0,312	0,020	0,451	0,549	0,424	0,027
$AN_{2,69}$ (1:1:6)	0,20	0,069	0,044	0,539	0,348	0,019	0,480	0,520	0,402	0,078
$AN_{2,69}$ (1:1:6)	0,23	0,066	0,042	0,512	0,380	0,018	0,506	0,494	0,382	0,124
$AN_{2,69}$ (1:1:6)	0,26	0,063	0,040	0,488	0,409	0,017	0,529	0,471	0,364	0,165
$AN_{2,69}$ (1:0,6:6)	0,17	0,075	0,029	0,584	0,312	0,020	0,436	0,564	0,435	0,001
$AN_{2,69}$ (1:0,6:6)	0,20	0,071	0,027	0,553	0,348	0,019	0,466	0,534	0,413	0,053
$AN_{2,69}$ (1:0,6:6)	0,23	0,067	0,026	0,526	0,381	0,018	0,492	0,508	0,392	0,100
$AN_{2,69}$ (1:0,6:6)	0,26	0,064	0,025	0,501	0,410	0,017	0,516	0,484	0,374	0,143
$AA_{2,04}$ (1:2:6)	0,17	0,071	0,091	0,533	0,305	0,070	0,537	0,463	0,371	0,166
$AA_{2,04}$ (1:2:6)	0,20	0,067	0,086	0,506	0,340	0,067	0,561	0,439	0,352	0,209
$AA_{2,04}$ (1:2:6)	0,23	0,064	0,082	0,482	0,372	0,063	0,582	0,418	0,335	0,247
$AA_{2,04}$ (1:2:6)	0,26	0,061	0,078	0,459	0,401	0,061	0,601	0,399	0,319	0,282
$AA_{2,04}$ (1:2:9)	0,17	0,051	0,066	0,579	0,303	0,076	0,497	0,503	0,403	0,095
$AA_{2,04}$ (1:2:9)	0,20	0,049	0,063	0,550	0,339	0,072	0,523	0,477	0,382	0,141
$AA_{2,04}$ (1:2:9)	0,23	0,046	0,059	0,523	0,371	0,069	0,546	0,454	0,364	0,182
$AA_{2,04}$ (1:2:9)	0,26	0,044	0,057	0,499	0,400	0,066	0,567	0,433	0,347	0,220
$AA_{2,04}$ (1:2:9)	0,29	0,042	0,054	0,477	0,426	0,063	0,586	0,414	0,332	0,254
$AA_{2,04}$ (1:1:6)	0,17	0,076	0,049	0,570	0,305	0,075	0,505	0,495	0,396	0,109
$AA_{2,04}$ (1:1:6)	0,20	0,072	0,046	0,541	0,341	0,071	0,530	0,470	0,376	0,154
$AA_{2,04}$ (1:1:6)	0,23	0,069	0,044	0,515	0,373	0,068	0,553	0,447	0,358	0,195
$AA_{2,04}$ (1:1:6)	0,26	0,065	0,042	0,491	0,402	0,065	0,574	0,426	0,341	0,233
$AA_{2,04}$ (1:1:6)	0,29	0,063	0,040	0,469	0,428	0,062	0,593	0,407	0,326	0,267
$AA_{2,04}$ (1:0,6:6)	0,17	0,078	0,030	0,586	0,306	0,077	0,491	0,509	0,408	0,083
$AA_{2,04}$ (1:0,6:6)	0,20	0,074	0,028	0,556	0,341	0,073	0,517	0,483	0,387	0,130
$AA_{2,04}$ (1:0,6:6)	0,23	0,071	0,027	0,529	0,373	0,070	0,541	0,459	0,368	0,173

$AA_{2,04}$ (1:0,6:6)	0,26	0,067	0,026	0,505	0,402	0,067	0,562	0,438	0,351	0,211
$AA_{2,04}$ (1:0,6:6)	0,29	0,064	0,025	0,482	0,429	0,064	0,581	0,419	0,335	0,246

Fonte –A autora (2021).