



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**PREVISIBILIDADE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE ARGAMASSA DE
REVESTIMENTO USANDO MICROMECAÂNICA**

DAIANE MAYER

Foz do Iguaçu
2022



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**PREVISIBILIDADE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE ARGAMASSA DE
REVESTIMENTO USANDO MICROMECAÂNICA**

DAIANE MAYER

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^o. Dr^o. César Winter de Mello

Foz do Iguaçu
2022

DAIANE MAYER

**PREVISIBILIDADE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE ARGAMASSA DE
REVESTIMENTO USANDO MICROMECHANICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof^o. Dr^o. César Winter de Mello
UNILA

Prof^a. Dr^a. Edna Possan
UNILA

Prof^o. Dr^o. Dan Yushin Miyaji
PTI

Prof^a. Dr^a. Angela Borges Masuero
UFRGS

Foz do Iguaçu, 07 de junho de 2022.

*A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre
aquilo que todo mundo vê.*
Arthur Schopenhauer

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

M468p

Mayer, Daiane.

Previsibilidade do módulo de elasticidade de argamassa de revestimento usando micromecânica / Daiane Mayer. - Foz do Iguaçu, 2022.

147 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: César Winter de Mello.

1. Micromecânica. 2. Cimento. 3. Módulo de Young. 4. Nitrogênio - absorção e adsorção. 5. Argamassa - propriedades mecânicas. I. Mello, César Winter de. II. Título.

CDU 624.012.45

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a minha mãe pelo amor, carinho e compreensão. Você é a minha base, minha fortaleza e a maior merecedora de todas as minhas conquistas.

Ao meu orientador Prof. César Winter de Mello (me lembro com carinho ainda dos ensinamentos na etapa da graduação) pela paciência, pela confiança e por sempre me incentivar a seguir em frente na minha formação pessoal e profissional. À Prof. Edna Possan pelo apoio, incentivo e pelas contribuições e ensinamentos durante o mestrado. Agradeço ao Prof. André pelo suporte e contribuições muito valiosas quando bateu aquele desespero no tratamento dos dados.

Aos melhores colegas de mestrado, Karine, Sheila e Cássio, juntos formamos uma equipe de discussões, de apoio, de troca de experiências e, principalmente, de amizade. Obrigada por deixarem as coisas mais leves, pelas risadas e parceria. Ainda, aos parceiros e amigos de laboratório, Raquel, Dalila, Eduardo, Cristiano e Gabriela, onde juntos conseguimos realizar um belo trabalho, superação e muitas risadas e momentos de descontração.

Aos técnicos do laboratório da UNILA, Wagner Ferreira, Luciano, Paula e Andrey pelo apoio, pelos conhecimentos trocados e pela parceria sempre. Aos técnicos do laboratório da UDC, Elaine e Sérgio, por estarem sempre disponíveis e ajudar em diversas etapas do meu trabalho.

Agradeço à Prof. Dayana e a UDC pelo apoio e pela disponibilidade do uso dos laboratórios.

Obrigada as empresas (Itambé, Mineromix e Districal) pelo fornecimento de materiais que foram utilizados na pesquisa.

Em especial ao meu marido Flavio, por sempre transmitir carinho e compreensão e acima de tudo por me incentivar a correr atrás dos meus sonhos, além de entender as dificuldades que encontrei ao longo desse processo, que muitas vezes roubaram o nosso tempo de convívio.

MAYER, Daiane. **Previsibilidade do módulo de elasticidade de argamassa de revestimento usando micromecânica**. 2022. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

RESUMO

O módulo de elasticidade define a capacidade de deformação elástica dos materiais e os ensaios não destrutivos são técnicas que podem ser empregadas para obter parâmetros como o módulo de elasticidade dinâmico, sem causar danos à estrutura analisada. Este estudo teve por objetivo analisar através da micromecânica e de ensaios não destrutivos, a influência do tipo e teor do agregado miúdo e do tipo de cimento no módulo de elasticidade dinâmico de argamassas de revestimento. Produziram-se 12 dosagens, utilizando cimento CP II Z, CP II F e CP IV, cal CH III e agregado natural e britado para a composição das argamassas, nos traços 1:1:4 e 1:1:6 (em volume). Foram moldados corpos de prova prismáticos 4 x 4 x 16 cm para determinação do módulo de elasticidade dinâmico, utilizando a técnica de excitação por impulso e a velocidade de pulso ultrassônico, resistência à compressão e à tração, absorção por capilaridade, densidade aparente e volume de poros por adsorção de nitrogênio (métodos BJH e DFT). Além disso, foram moldadas pastas para caracterização da matriz cimentícia das argamassas. Para aplicação da micromecânica relacionada com a velocidade de pulso ultrassônico foi necessário determinar as propriedades elásticas da matriz (pasta cimentícia) e das inclusões (agregados) e suas respectivas frações volumétricas. Com base nesses dados de entrada, expressões matemáticas foram aplicadas para estimar o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas. Os resultados da análise experimental mostraram que as argamassas produzidas com agregado britado apresentam maiores densidades para todos os traços e composições adotadas. Na resistência à compressão e à tração os resultados foram superiores nas amostras produzidas com menor quantidade de agregado (1:1:4) e com agregado britado, na sua maioria. Já com relação à absorção por capilaridade, percebeu-se um aumento conforme aumenta a relação água/aglomerante, além de ser maior nas argamassas com agregado britado. Com relação ao módulo de elasticidade dinâmico, verificou-se que todas as variáveis possuem significância estatística para ambos os métodos de medição adotados no estudo, além de existir diferença significativa entre os próprios métodos. Ao comparar os resultados experimentais do módulo de elasticidade dinâmico com o estimado pela micromecânica, obteve-se diferença percentual média de 2% e 5% para argamassas com agregado britado, enquanto as argamassas com agregado natural apresentaram diferenças de 30% e 34% com inclusões esféricas e esferoides prolatos, respectivamente. Por fim, os resultados estão sintetizados em uma tabela relacionando as propriedades mecânicas com os traços e características dos materiais adotados na composição das argamassas.

Palavras-chave: Micromecânica. Cimento. Módulo de Young. Nitrogênio – absorção e adsorção. Argamassa - propriedades mecânicas.

MAYER, Daiane. **Predictability of coating mortar elastic modulus using micromechanics**. 2022. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

ABSTRACT

The elasticity modulus defines the elastic deformation capacity of the materials and the non-destructive tests are techniques that can be used to obtain parameters such as the dynamic modulus of elasticity, without causing damage to the analyzed structure. This study aimed to analyze, through micromechanics and non-destructive tests, the influence of the type and content of the fine aggregate and the type of cement on the dynamic elasticity modulus of coating mortars. Twelve dosages were produced, using cement CP II Z, CP II F and CP IV, lime CH III and natural and crushed aggregate for the composition of the mortars, in the traces 1:1:4 and 1:1:6 (by volume). Prismatic specimens 4 x 4 x 16 cm were molded to determine the dynamic elasticity modulus, using the impulse excitation technique and ultrasonic pulse velocity, compressive and tensile strength, capillary absorption, apparent density and volume of pores by nitrogen adsorption (BJH and DFT methods). In addition, pastes were molded to characterize the cementitious matrix of the mortars. For the application of micromechanics related to the ultrasonic pulse velocity, it was necessary to determine the elastic properties of the matrix (cement paste) and of the inclusions (aggregates) and their respective volumetric fractions. Based on these input data, mathematical expressions were applied to estimate the dynamic elasticity modulus of the mortars. The results of the experimental analysis showed that the mortars produced with crushed aggregate present higher densities for all the adopted traits and compositions. In terms of compressive and tensile strength, the results were higher in samples produced with less aggregate (1:1:4) and with crushed aggregate, for the most part. Regarding the absorption by capillarity, an increase was noticed as the water/binder ratio increases, in addition to being higher in mortars with crushed aggregate. Regarding the dynamic elasticity modulus, it was found that all variables have statistical significance for both measurement methods adopted in the study, in addition to a significant difference between the methods themselves. When comparing the experimental results of the dynamic modulus of elasticity with that estimated by micromechanics, an average percentage difference of 2% and 5% was obtained for mortars with crushed aggregate, while mortars with natural aggregate showed differences of 30% and 34% with inclusions spherical and prolate spheroids, respectively. Finally, the results are summarized in a table relating the mechanical properties with the traits and characteristics of the materials used in the composition of the mortars.

Keywords: Micromechanics. Cement. Young's modulus. Nitrogen – absorption and adsorption. Mortar - mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura da pesquisa.....	24
Figura 2 – Representação esquemática das fases constituintes de um material composto.....	25
Figura 3 – Esquema da microestrutura da argamassa no estado fresco	26
Figura 4 – Métodos para caracterizar a estrutura dos poros em materiais cimentícios e a faixa de tamanho de poros onde cada método é aplicável.....	27
Figura 5 – Representação esquemática de adsorção multicamadas em um único poro cilíndrico	28
Figura 6 – Classificação das isotermas segundo a IUPAC.....	29
Figura 7 – Dependência das forças e do potencial de energia em relação à separação atômica.....	34
Figura 8 – (a) Curva força-distância para dois materiais mostrando a relação entre a ligação atômica e o módulo de elasticidade; (b) curva de potencial com variação de distância interatômica e energia.....	35
Figura 9 – Comportamento típico da curva tensão – deformação da pasta de cimento, do agregado, da argamassa e do concreto	36
Figura 10 – Parâmetros que afetam o módulo de elasticidade do concreto	37
Figura 11 – Fatores que impactam no módulo de elasticidade da argamassa e seus efeitos.....	38
Figura 12 – Tipos de módulo de elasticidade estático no diagrama tensão-deformação	40
Figura 13 – Esquema dos métodos de transmissão: direta, indireta e semidireta....	42
Figura 14 – Modos de vibração dos corpos de prova prismáticos (TEI).....	43
Figura 15 – Esquema multiescala de materiais cimentícios	49
Figura 16 – Elemento de Volume Representativo (EVR).....	50
Figura 17 – Representação dos 8 tipos de simetria do tensor elástico	56
Figura 18 – Fatores controláveis, suas interações e as variáveis de resposta.....	60
Figura 19 – Etapas do programa experimental.....	61
Figura 20 – Distribuição das partículas por granulometria a laser nos aglomerantes	64
Figura 21 – Curvas de TG e DTG dos cimentos.....	65

Figura 22 – Curvas de TG e DTG da cal hidratada (CH III).....	67
Figura 23 – Distribuição granulométrica dos agregados	69
Figura 24 – Análise visual areia britada	70
Figura 25 – Análise visual da areia natural	71
Figura 26 – Estruturação da fase de testes das dosagens.....	73
Figura 27 – Estruturação da fase de produção e cura das pastas e argamassas	76
Figura 28 – Fissuração apresentada pelas amostras da dosagem P-C3_0,80	78
Figura 29 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico - (a) Velocidade de pulso ultrassônico;	79
Figura 30 – Ensaio resistência - (a) Dispositivo Rilem Multifuncional;.....	80
Figura 31 – Ensaio resistência - (a) Amostras de pasta e argamassa;.....	81
Figura 32 – Ensaio de absorção - (a) Amostras com agregado natural – traço 1:1:4;	82
Figura 33 – Preparação de amostras para ensaio de porosidade no BET	83
Figura 34 – Ensaio de distribuição do tamanho de poros - (a) Equipamento Quantachrome;.....	83
Figura 35 – Etapas para aplicação da micromecânica	85
Figura 36 – Densidade aparente x materiais e relação água aglomerante	89
Figura 37 – Resistência à compressão x materiais e relação água aglomerante.....	90
Figura 38 – Resistência à tração na flexão x materiais e relação água aglomerante	91
Figura 39 – Absorção por capilaridade x materiais e relação água aglomerante	92
Figura 40 – Fissuras em pastas com cimento C2 e C3 com relação a/agl 0,67	92
Figura 41 – Volume de poros das argamassas (traço 1:1:4) pelo método BJH e DFT	93
Figura 42 – Volume de poros das argamassas (traço 1:1:6) pelo método BJH e DFT	94
Figura 43 – Volume de poros médio x materiais e relação água aglomerante	95
Figura 44 – Tipo de agregado x módulo de elasticidade: (a) TEI; (b) VPU.....	97
Figura 45 – Teor de agregado x módulo de elasticidade	98
Figura 46 – Tipo de cimento x módulo de elasticidade	99
Figura 47 – Teste de Wilcoxon entre Ed_TEI e Ed_VPU.....	102
Figura 48 – Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade: (a) Ed_TEI; (b) Ed_VPU	104

Figura 49 – Relação entre a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade: (a) E_{d_TEI} ; (b) E_{d_VPU}	104
Figura 50 – Relação entre a absorção por capilaridade e o módulo de elasticidade: (a) E_{d_TEI} ; (b) E_{d_VPU}	105
Figura 51 – Comparação entre a densidade calculada e experimental das argamassas	107
Figura 52 – Diferença percentual entre E_{cal} e E_{exp} com inclusões esféricas.....	107
Figura 53 – Diferença percentual entre E_{cal} e E_{exp} com inclusões esferoidais prolatas	108
Figura 54 – Compilado das propriedades das argamassas de revestimento	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização física dos cimentos e da cal	63
Tabela 2 – Distribuição das partículas dos aglomerantes	63
Tabela 3 – Composição química, em óxidos, dos cimentos e da cal por FRX.....	64
Tabela 4 – Análise termogravimétrica dos cimentos (TG/DTG)	66
Tabela 5 – Análise termogravimétrica da cal (TG/DTG).....	67
Tabela 6 – Características físicas dos agregados.....	68
Tabela 7 – Classificação quanto ao módulo de finura.....	69
Tabela 8 – Valores médios de forma, arredondamento e esfericidade dos grãos.....	71
Tabela 9 – Dosagens das argamassas	74
Tabela 10 – Dosagens das pastas	75
Tabela 11 – Resumo dos ensaios no estado endurecido.....	77
Tabela 12 – Propriedades dos poros	94
Tabela 13 – Estatística descritiva relacionando os fatores independentes com o módulo de elasticidade dinâmico	96
Tabela 14 – Análise estatística da influência dos fatores independentes no módulo de elasticidade	100
Tabela 15 – Análise da significância e tamanho do efeito das variáveis	101
Tabela 16 – Análise da significância pelo teste de Wilcoxon	101
Tabela 17 – Estatística descritiva e teste de normalidade das propriedades mecânicas	102
Tabela 18 – Correlação das propriedades com o módulo de elasticidade.....	103
Tabela 19 – Propriedades calculadas e experimentais das argamassas.....	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Aplicações dos ensaios não destrutivos (ultrassom e ressonância) em materiais cimentícios e seus principais resultados.....	44
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BET	Método de determinação de área específica (<i>Brunauer, Emmett, Teller</i>)
BJH	Método para determinação da distribuição do tamanho de poros (<i>Barret, Joyner, Halenda</i>)
CP	Cimento Portland
DFT	<i>Density Functional Theory</i> (Teoria da Densidade Funcional)
EVR	Elemento de Volume Representativo
FRX	Fluorescência de Raios X
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i> (União Internacional de Química Pura e Aplicada)
LADEMA	Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais
LRX	Laboratório de Raios X
MT	Mori-Tanaka
NBR	Norma Brasileira
PIM	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
RMN	Ressonância Magnética Nuclear
TEI	Técnica de Excitação por Impulso
TG/DTG	Termogravimetria / Termogravimetria Derivada
UDC	Faculdade União Dinâmica das Cataratas
UFC	Universidade Federal do Ceará
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
VPU	Velocidade de Pulso Ultrassônico
μ CT	Tomografia Computadorizada de Raios X
\mathbb{A}	Tensor de concentração de deformação
AB	Agregado britado
AN	Agregado natural
A_p	Área de projeção do grão
A_r	Arredondamento dos grãos
\mathbb{B}	Tensor de concentração de tensão
\mathbb{C}	Tensor elástico de 4ª ordem

C1	Cimento CP II Z
C2	Cimento CP II F
C3	Cimento CP IV
D_c	Diâmetro de Feret
d_c	Diâmetro de projeção do grão
E	Módulo de elasticidade
E_d	Módulo de elasticidade dinâmico
E_o	Energia mínima
E_s	Esfericidade dos grãos
F_A	Forças atrativas
F_R	Forças repulsivas
G	Módulo de cisalhamento
K	Módulo de compressibilidade
P	Perímetro de projeção do grão
r_o	Espaçamento de equilíbrio
\mathbb{S}	Tensor de Eshelby de 4ª ordem
\mathbb{T}	Tensor de Wu de 4ª ordem
V	Volume
x	Vetor posição
ε	Deformação
ε_{ij}	Campo de deformação (inclusão)
ε_{ij}^*	Auto deformação (inclusão)
ρ	Densidade
σ	Tensão
$\langle \varepsilon \rangle$	Tensor de deformação média
$\langle \sigma \rangle$	Tensor de tensão média
v	Fração volumétrica
μ	Coefficiente de Poisson
“m”	Matriz
“i”	Inclusão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 JUSTIFICATIVA.....	20
1.2 OBJETIVO GERAL	22
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	22
1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA	23
2. MATERIAIS CIMENTÍCIOS COMPOSTOS E SUA MICROESTRUTURA	25
2.1 POROSIDADE	27
2.2 CONSIDERAÇÕES DA SEÇÃO	31
3. MÓDULO DE ELASTICIDADE E A MICROMECAÂNICA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS	32
3.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS.....	33
3.1.1 Métodos de Medição	39
3.1.1.1 <i>Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)</i>	41
3.1.1.2 <i>Técnica de Excitação por Impulso (TEI)</i>	42
3.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA ABORDAGEM MICROMECAÂNICA	48
3.2.1 Teoria da Homogeneização	49
3.2.1.1 <i>Elemento de Volume Representativo (EVR)</i>	50
3.2.2 Homogeneização em Elasticidade	53
3.2.2.1 <i>Teoria de Inclusões de Eshelby</i>	54
3.2.2.2 <i>Método de Mori-Tanaka (MT)</i>	55
3.2.2.3 <i>Fundamentos da elasticidade linear e os materiais isotrópicos</i>	56

3.2.2.4 Aplicações da micromecânica em materiais cimentícios utilizando o ultrassom.....	58
3.3 CONSIDERAÇÕES DA SEÇÃO	59
4. MATERIAIS E MÉTODOS	60
4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL	60
4.1.1 Caracterização Dos Materiais.....	62
4.1.1.1 Aglomerantes.....	62
4.1.1.2 Agregados.....	67
4.1.2 Dosagem e Produção das Pastas e Argamassas.....	72
4.1.3 Análise das Propriedades Mecânicas.....	77
4.1.3.1 Módulo de elasticidade dinâmico	78
4.1.3.2 Resistência à tração na flexão e à compressão.....	79
4.1.3.3 Densidade aparente.....	81
4.1.3.4 Absorção por capilaridade	81
4.1.3.5 Distribuição do tamanho de poros	83
4.2 APLICAÇÃO DA MICROMECAÂNICA	84
4.2.1 Considerações Teóricas	84
4.2.2 Aplicação do Modelo Micromecânico	85
5. ANÁLISES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	88
5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	88
5.2 ANÁLISE DE COMPARAÇÃO	95
5.3 ANÁLISE DE RELAÇÃO.....	102
5.4 ANÁLISE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO ESTIMADO PELA MICROMECAÂNICA E EXPERIMENTAL.....	105

6. CONCLUSÃO	110
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	115
REFERÊNCIAS	116
APÊNDICES	134
APÊNDICE A – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS	135
APÊNDICE B – CONTROLE DE TEMPERATURA E UMIDADE DURANTE A CURA	136
APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	138
APÊNDICE D – MICROMECAÂNICA.....	140

1. INTRODUÇÃO

As argamassas estão presentes em diversas etapas das edificações, desde o assentamento de blocos, pisos e revestimentos cerâmicos até a impermeabilização, nivelamento e regularização das superfícies. Quando empregadas como revestimento, tanto interno quanto externo, possuem papel importante no aspecto estético das edificações, estanqueidade das paredes e garantir conforto e segurança de seus usuários, fatores estes essenciais para a durabilidade (MESQUITA et al., 2019; HADDAD et al., 2020).

Um dos tipos de argamassa de revestimento é a mista, composta por material inerte, cimento, cal e água, podendo ou não conter aditivo ou adições. De acordo com Silva (2006), uma das principais vantagens do acréscimo da cal na mistura é uma melhor trabalhabilidade, melhorando assim, a produtividade na execução do revestimento.

Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), para que uma obra apresente desempenho adequado, esta deverá ser estanque, estável, funcional e durável. No entanto, as habitações têm apresentado uma queda gradativa na sua qualidade, que, apesar das políticas habitacionais, da evolução tecnológica dos materiais e das técnicas de execução, ainda sofrem grande influência de mão de obra e gerenciamento deficiente. Segundo Souza et al. (2020), uma parcela significativa das argamassas dosadas apresenta propriedades físicas, químicas e mecânicas insatisfatórias para atender as demandas de projeto quando submetidas a condições ambientais e de uso adversas.

Os problemas de produção mais comuns apresentados pelas argamassas são: falhas de dosagem (SOUZA et al., 2020), escolha equivocada de materiais (SANTOS et al., 2019; HADDAD et al., 2020) e deficiência na mistura (SILVA e LORDSLEEM, 2021). Esses problemas podem conduzir ao aparecimento de manifestações patológicas, as quais reduzem a durabilidade e o desempenho esperado das argamassas ao longo do tempo.

Os defeitos encontrados nas obras com maior frequência são as infiltrações, fissuras, corrosão da armadura, movimentações térmicas, deformações excessivas, deslocamentos de revestimento, umidade de paredes, entre outras

(GRANATO, 2013). Pesquisadores como BAUER (1997), BOLORINO e CINCOTTO (1999) e CARASEK (2010) relacionam os problemas de deterioração das argamassas de revestimento com a falta de conhecimento das características dos materiais e utilização inadequada deles, ação de fatores externos (exposição às intempéries, umidade de infiltrações) e internos (qualidade dos materiais e sua composição). Mesmo sendo amplamente utilizadas ao longo da história, as argamassas de revestimento ainda apresentam diversas manifestações patológicas, impactando na vida útil do sistema de vedação das edificações (ZANELATO et al., 2019; SANTOS et al., 2019; BRESCH et al., 2020; SOUZA et al., 2021).

Nesse sentido, Cardoso et al. (2009) e Haddad et al. (2020) afirmam que as características dos agregados e dos ligantes, bem como o proporcionamento na formulação das argamassas de revestimento têm grande influência nas suas propriedades mecânicas. Sendo que a distribuição granulométrica e a morfologia dos agregados influenciam no empacotamento das partículas afetando tanto as propriedades da argamassa no estado fresco quanto no estado endurecido; já em relação aos finos reativos, a distribuição de tamanhos e a área superficial impactam no consumo de água e nas características reológicas, influenciando a pasta cimentícia (CARDOSO et al., 2009).

Revestimentos eficientes devem levar em consideração as dimensões da edificação, os materiais aplicados e as condições ambientais a que a edificação ficará exposta. Ademais, questões econômicas e ambientais precisam ser consideradas, uma vez que o custo de reparos é alto e gera resíduos (SOUZA et al., 2021).

Trabalhos como BOUMIZ, VERNET e TENOUDJI (1996), BERNARD, ULM e LEMARCHAND (2003), ULM, CONSTANTINIDES e HEUKAMP (2004), HERNÁNDEZ et al. (2006) e PICHLER e HELLMICH (2011) apontam que o módulo de elasticidade dos materiais cimentícios tem dependência da estrutura da pasta de cimento e do tipo e teor de agregados utilizados. De acordo com Rato (2006), o desempenho das argamassas está ligado, principalmente, com o tipo de ligante, a natureza e a granulometria do agregado miúdo e com eventuais adições ou aditivos. Somado a isso, diferentes tipos de cimento Portland podem ser selecionados para diversas aplicações e fins específicos, além dos agregados reciclados, que a fim de reduzir custos e auxiliar na crescente demanda por sustentabilidade, têm sido

empregados em diversas proporções, tanto em argamassas quanto em concretos (DUTRA, 2012).

Para uma melhor análise do comportamento elástico das argamassas, podem ser utilizados modelos micromecânicos, os quais determinam as propriedades elásticas dos compósitos, levando em consideração as características intrínsecas de sua estrutura interna (BARBOSA, 2010). Esses modelos têm sido empregados em materiais como o concreto e argamassa (HASHIN e MONTEIRO (2002), HERNÁNDEZ et al. (2002), BARBOSA, LOPES-YANEZ e CARNEIRO (2011), PIANEZZER et al. (2017)) e em pastas cimentícias (PICHLER, HELLMICH e EBERHARDSTEINER (2008), MAALEJ, LAFHAJ e BOUASSIDA (2010)) e sua aplicação tem mostrado resultados satisfatórios. Além disso, por meio de modelos multiescala é possível prever as propriedades elásticas globais em função das propriedades dos constituintes e das frações de volume das fases, conforme estudado por BERNARD, ULM e LEMARCHAND (2003), ULM, CONSTANTINIDES e HEUKAMP (2004), PICHLER e HELLMICH (2011) e MOLERO et al. (2011).

Com base no apresentado, este estudo visa investigar, através da micromecânica e de ensaios não destrutivos, a influência do tipo e teor do agregado miúdo e do tipo de cimento no módulo de elasticidade dinâmico de argamassas de revestimento.

1.1 JUSTIFICATIVA

As argamassas têm passado por diversas alterações, desde os materiais constituintes até a produção e a aplicação. Além disso, existe uma diversidade de tipos de argamassas disponíveis no mercado, as quais podem ser preparadas no canteiro de obras ou serem industrializadas. Outra questão importante é que muitas vezes apenas se indica o tipo de argamassa de revestimento utilizada, no entanto, pouco se relata sobre as suas propriedades e seus materiais constituintes (OLIVEIRA et al., 2014; SOUZA et al., 2020; SOUZA et al., 2021). Cabe evidenciar que, muitas vezes são empregadas de maneira inadequada, ou seja, não são levados em consideração os locais onde serão aplicadas, os materiais constituintes e as adversidades do meio, o que tende a gerar diversas manifestações patológicas.

Haja vista que os compostos a base cimento são os materiais de construção mais populares e usados mundialmente, Zhang e Jivkov (2016) evidenciam a necessidade do entendimento e previsão das propriedades elásticas para o meio tecnológico e científico, uma vez que essas propriedades estão relacionadas ao desempenho e durabilidade das estruturas. Nesse sentido, Silva, Marros e Monte (2008) afirmam que a importância do módulo de elasticidade na caracterização das argamassas já é reconhecida, no entanto, as publicações sobre o assunto ainda são poucas e muito dispersas.

Considerando que os materiais cimentícios apresentam uma microestrutura heterogênea e multifásica que pode influenciar nas propriedades mecânicas em uma macroescala, modelos micromecânicos podem ser usados para realizar estudos prévios, o que permitiria uma redução em testes experimentais e, conseqüentemente, em tempo e custos (BARBOSA, 2010). Além disso, por meio da micromecânica é possível uma melhor compreensão de como as propriedades das fases constituintes influenciam no comportamento macroscópico do material (DANTAS, 2013).

Somado a isso, métodos não destrutivos, como o ultrassom, têm sido usados na caracterização da densidade ou porosidade e na determinação de parâmetros elásticos de materiais compostos relacionados com a micromecânica (JEONG e HSU, 1996). No entanto, segundo Maalej, Lafhaj e Bouassida (2013), a micromecânica aplicada à materiais cimentícios ainda é um desafio para a Engenharia Civil devido à complexidade da microestrutura desses materiais.

Conforme descrito por Hernández et al. (2002), é possível relacionar densidade e as propriedades elásticas de compósitos cimentícios com a velocidade de pulso ultrassônico, utilizando a micromecânica, para estimar o módulo de elasticidade de argamassas. Assim, optou-se por utilizar os modelos com o objetivo de analisar se eles realmente se adequam às argamassas quando variamos os tipos de materiais e suas dosagens, sendo que grande parte das aplicações foram realizadas em argamassas e pastas que não continham cal em sua composição e nem agregado britado.

Portanto, a contribuição deste estudo avança no sentido de melhorar o entendimento do comportamento elástico das argamassas com base em modelos micromecânicos e em ensaios não destrutivos, quando variamos a sua composição.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral dessa pesquisa é estudar a influência do tipo e teor do agregado miúdo e do tipo de cimento no módulo de elasticidade dinâmico em argamassas de revestimento por meio de ensaios não destrutivos e da micromecânica.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos têm-se:

- a) Avaliar o efeito do tipo de cimento e do agregado miúdo no módulo de elasticidade dinâmico.
- b) Verificar a influência da proporção do agregado miúdo no módulo de elasticidade dinâmico.
- c) Analisar a influência do método de medição não destrutivo no módulo de elasticidade dinâmico.
- d) Examinar a relação entre a absorção por capilaridade, a resistência à compressão e à tração e o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas.
- e) Aplicar modelo micromecânico para estimar o módulo de elasticidade efetivo das argamassas.
- f) Realizar um estudo comparativo entre os resultados experimentais e os estimados pela micromecânica.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Existem inúmeros fatores que influenciam o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas. Dentre esses fatores serão estudados apenas os relacionados à variação do tipo de cimento, o tipo e o teor do agregado miúdo, e sua relação com a resistência à compressão, resistência à tração na flexão, densidade e absorção por capilaridade.

O módulo de elasticidade dinâmico será estudado utilizando apenas a velocidade de pulso ultrassônico e a técnica de excitação por impulso. Além disso, os materiais utilizados na pesquisa são os de uso comum na região oeste do Paraná.

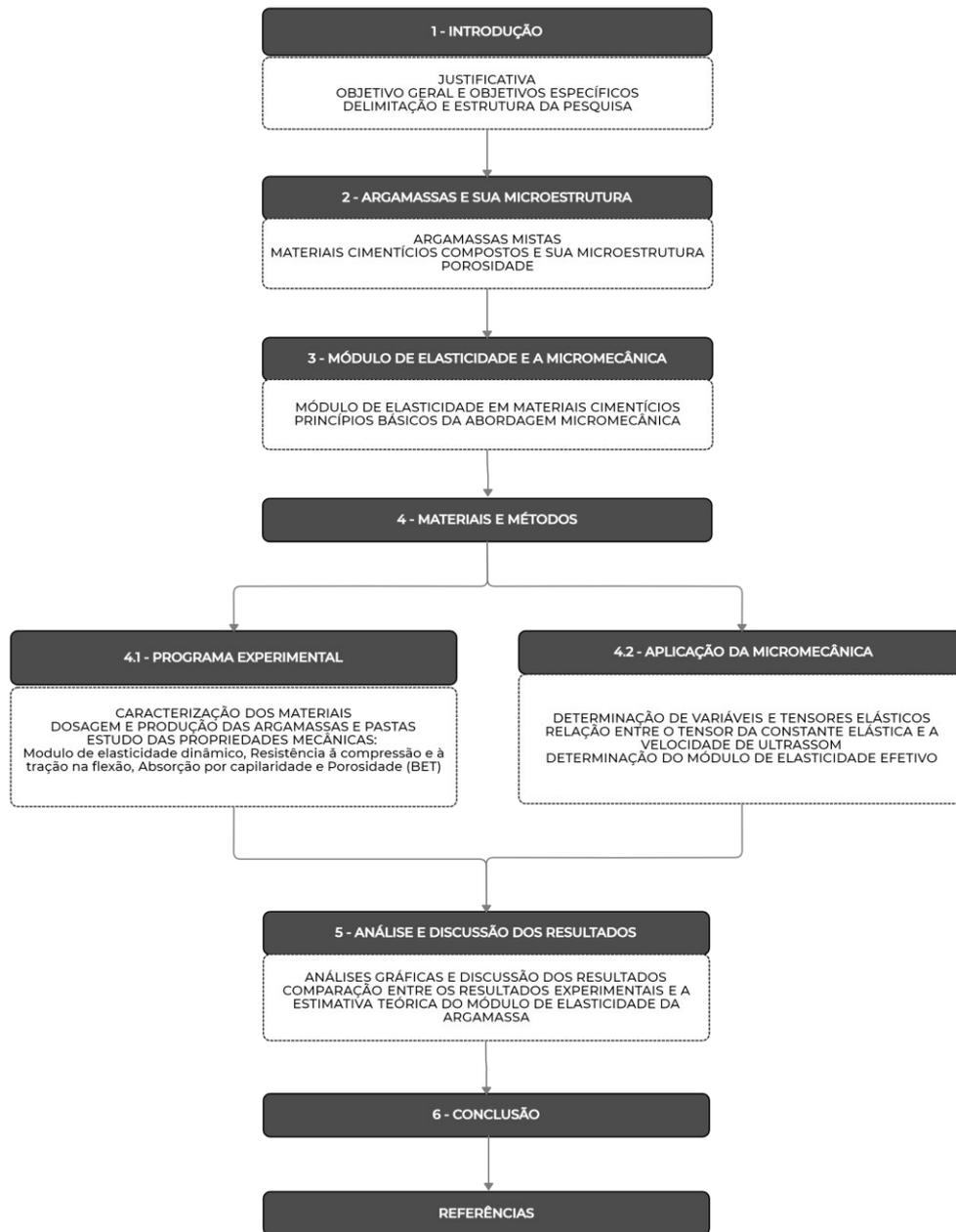
Para a aplicação das técnicas de homogeneização a argamassa será considerada como um material composto por duas fases, com partículas do agregado miúdo (inclusões) imersas em um meio homogêneo, denominado matriz. Neste caso, a matriz é composta pela pasta de cimento e as inclusões pelas partículas de areia, as quais estarão distribuídas randomicamente na matriz.

Neste trabalho o termo “fase” será utilizado para categorizar a composição da argamassa, sendo, uma fase composta pelo agregado e a outra pela matriz. Assim, a porção do agregado e da matriz é considerada homogênea, possuindo as mesmas características físicas e químicas. É importante evidenciar que o termo “fase” na Engenharia de Materiais leva em consideração a relação entre a temperatura, composição química e estado físico das composições para a análise de um material.

1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa está estruturada em introdução, uma breve análise das argamassas e sua microestrutura e sobre o módulo de elasticidade e a micromecânica em materiais cimentícios. Materiais e métodos, dividido em: programa experimental e aplicação da micromecânica. Além da análise e discussão dos resultados e conclusão. Essas etapas e seus componentes podem ser verificados na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura da pesquisa



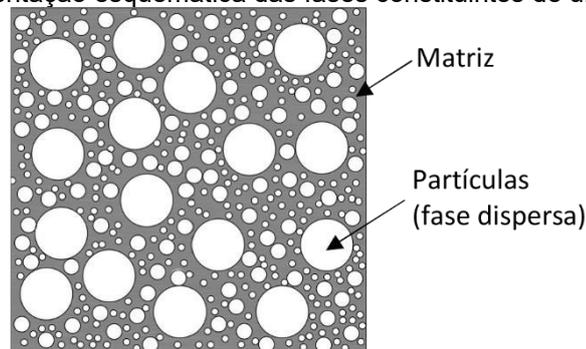
Fonte: Autor (2022)

2. MATERIAIS CIMENTÍCIOS COMPOSTOS E SUA MICROESTRUTURA

Um compósito é considerado como um material multifásico que apresenta uma porção significativa das propriedades das suas fases constituintes. Além dos compósitos naturais, como a madeira e os ossos, a grande maioria é criado “artificialmente” pela junção de dois ou mais materiais, principalmente, com o objetivo de melhorar as características mecânicas, tais como rigidez, tenacidade e resistência (CALLISTER e RETHWISCH, 2018).

Grande parte dos materiais compósitos é constituída por apenas duas fases: a matriz e a fase dispersa, conforme mostra a Figura 2. De acordo com Callister e Rethwisch (2018), as propriedades desses materiais compostos são resultantes das propriedades das suas fases constituintes, de sua quantidade relativa e das características da fase dispersa, como a forma, o tamanho, a distribuição e a orientação das partículas.

Figura 2 – Representação esquemática das fases constituintes de um material composto



Fonte: Autor (2022)

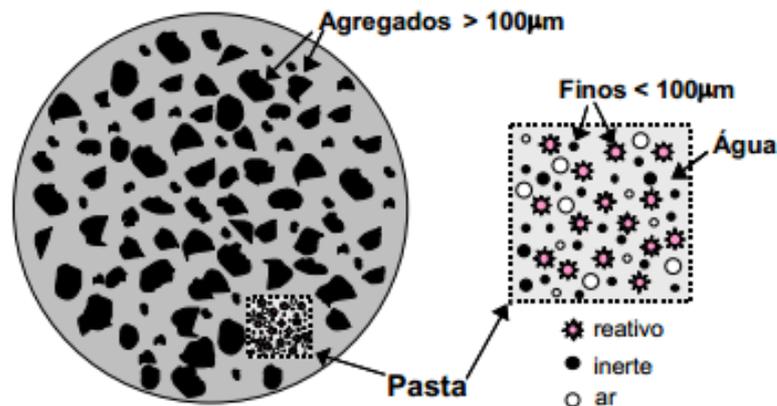
Os materiais compósitos à base de cimento, macroscopicamente são considerados materiais bifásicos (matriz cimentícia + agregados), entretanto, através de análises microscópicas, esses materiais apresentam uma multiplicidade de heterogeneidades, as quais podem se apresentar na forma de fissuras, vazios, partículas ou inclusões com propriedades e formas diferenciadas, ou ainda, como irregularidades em um arranjo de cristais (DUTRA, 2012). O comportamento dessas heterogeneidades e os efeitos que elas possuem sobre as propriedades e desempenho global de um material é o objetivo das investigações micromecânicas (GROSS e SEELIG, 2006; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Considerando que os materiais heterogêneos são compostos por várias fases, um dos problemas da Ciência e da Engenharia dos Materiais é analisar o comportamento dos materiais nas diversas escalas que compõem essas fases (TEIXEIRA, 2012).

Simplificadamente, a argamassa pode ser caracterizada, sob a ótica da microestrutura, como uma mistura bifásica de uma matriz fluída reativa de água e aglomerantes (partículas < 100 µm), como o cimento e a cal, e uma fração de partículas grandes e inertes, com partículas entre 100 µm e 2 mm, como a areia (CARDOSO, 2009; BELLEI, 2016).

Neste trabalho, a argamassa será considerada como um material bifásico composto por inclusões (partículas de agregado miúdo) embutidas em uma matriz cimentícia contínua de partículas homogeneizadas. A Figura 3 apresenta um esquema da microestrutura da argamassa no estado fresco.

Figura 3 – Esquema da microestrutura da argamassa no estado fresco



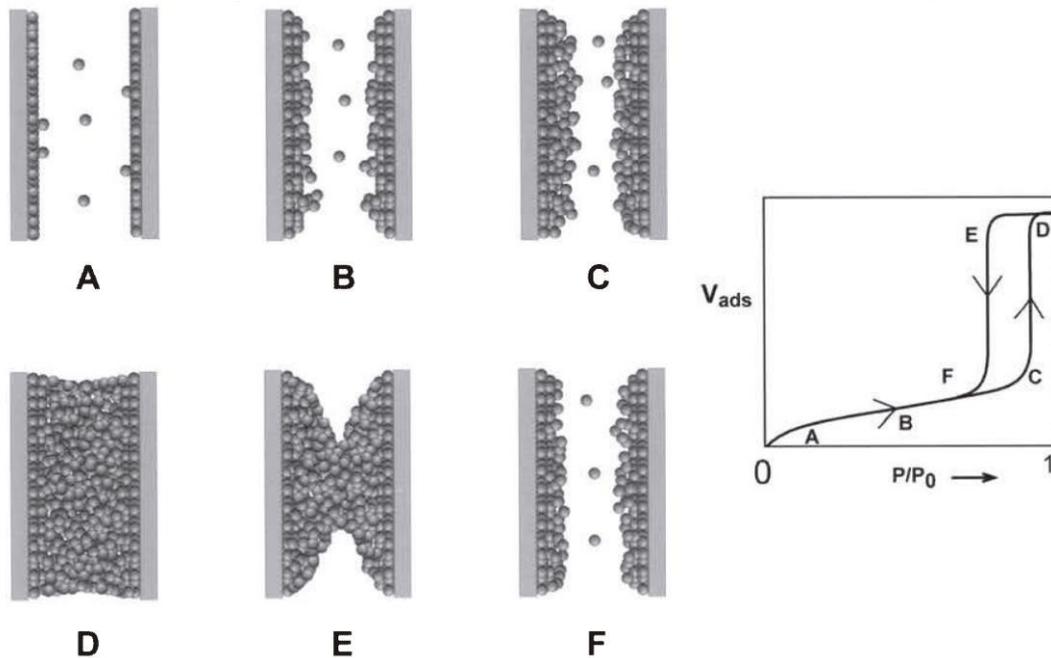
Fonte: CARDOSO (2009)

No estado fresco, as partículas grandes estão sujeitas a fenômenos como o atrito e impacto, enquanto as partículas finas são afetadas por fenômenos de superfície e reações de hidratação, principalmente, devido às reações entre o cimento e a água, e ao processo de secagem, quando acontece a mudança do estado fluído da argamassa para o estado endurecido (CARDOSO, 2009).

Dentre os diversos métodos apresentados, foco especial será dado a adsorção de nitrogênio, mais especificamente aos modelos de *Barret, Joyner e Halenda* (BJH) e Teoria da Densidade Funcional (DFT).

O método BJH, proposto em 1951 por *Barret, Joyner e Halenda* é baseado na equação de Kelvin como forma de descrever a condensação capilar-adsorção, em que para pressão relativa ($p/p_0 > 0,40$) há um aumento da espessura da camada adsorvida nas paredes dos poros, conforme aumenta a pressão (BEDNARSKA e KONIORCZYK, 2019). A Figura 5 mostra graficamente a relação entre o volume de nitrogênio adsorvido e a pressão relativa, durante os diversos estágios da adsorção e dessorção.

Figura 5 – Representação esquemática de adsorção multicamadas em um único poro cilíndrico



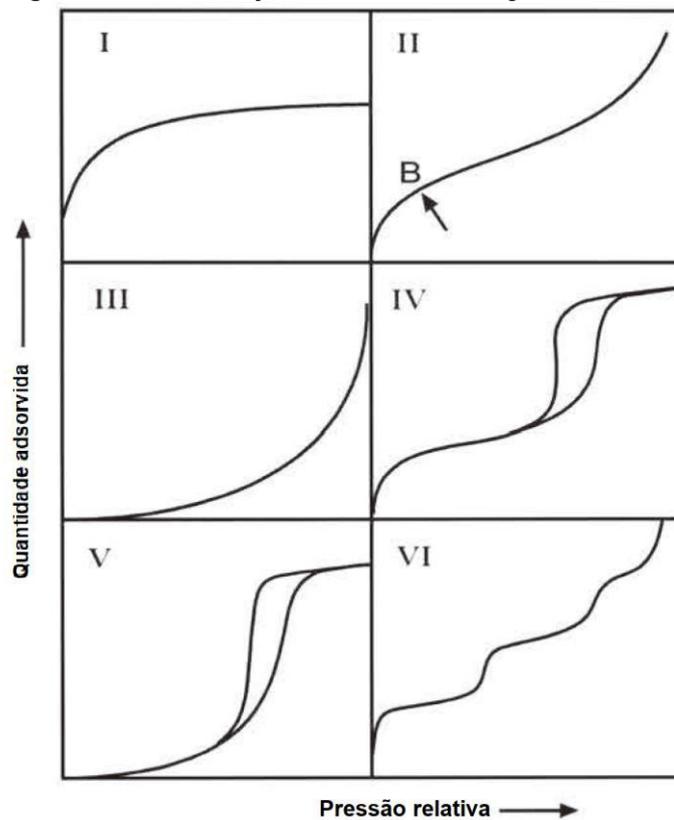
Fonte: Lowell et al. (2004)

Os pontos A, B, C e D descrevem o processo de adsorção, enquanto E, F mostram a dessorção gasosa em um sólido. Em A percebe-se a formação da monocamada formada pelas moléculas de gás adsorvido, em B e C há a formação de multicamadas até chegar em D, onde ocorre a condensação capilar (HILÁRIO, 2019). A distribuição do tamanho dos poros é determinada pelas isotermas de dessorção, uma vez que o líquido dos poros maiores evapora, seguido pelos poros menores,

conforme vai diminuindo a pressão. Esse método funciona bem para micro e mesoporos (LOWELL et al., 2004; DAS, BASU e KUMAR, 2019; HILÁRIO, 2019).

Por meio das curvas do tipo de isoterma, recomendadas pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), é possível analisar algumas características dos tipos de poros encontrados nas amostras (ALIGIZAKI, 2006; SCRIVENER, SNELLINGS e LOTHENBACH, 2016). A Figura 6 mostra a classificação das isotermas segundo a IUPAC.

Figura 6 – Classificação das isotermas segundo a IUPAC



Fonte: Traduzido de Aligizaki (2006)

Segundo Piumbim (2013) as isotermas podem ser classificadas como:

- Tipo I: típica de sistemas em que a adsorção se limita a uma ou poucas camadas moleculares. Ocorrem em sólidos com microporosidade, em que os poros não excedem muito o tamanho das moléculas do adsorvato.
- Tipo II: ocorre normalmente em materiais não porosos ou macroporosos. Apresenta um joelho da isoterma ou ponto de inflexão, no ponto B, encontrado em baixas pressões relativas.

- Tipo III: típicas de sistemas que apresentam interações fracas entre o adsorvente e o adsorvato. Essa isoterma não é muito comum.
- Tipo IV: essas curvas apresentam uma histerese com a curva de adsorção abaixo da curva de dessorção. As histereses estão ligadas ao preenchimento de mesoporos por meio da condensação por capilaridade. Essas isotermas são bem comuns, tendo apenas as histereses diferenciadas entre si.
- Tipo V: são raras e apresentam uma histerese associada com o preenchimento dos mesoporos.
- Tipo VI: são características de sistemas em que a adsorção é dada camada a camada sobre uma superfície uniforme.

De acordo com Teixeira et al. (2001), a construção de isotermas são importantes quando se pretende obter informações sobre a área específica e a estrutura porosa de um sólido, dado que sua forma revela detalhes sobre as características do material.

O método DFT permite obter informações sobre a distribuição do tamanho médio de micro e mesoporos, em um nível molecular que leva em consideração a geometria das partículas (LANDERS, GOR e NEIMARK, 2013). Além disso, Piumbim (2013) afirma que apesar do método ser muito confiável, ele assume que as paredes dos poros são lisas e homogêneas, não considerando a heterogeneidade geométrica e química dessas paredes.

Abordando os modelos de BJH e DFT, Rocha et al. (2019) analisaram como os métodos de secagem podem influenciar na avaliação da porosidade de pastas cimentícias. Os autores realizaram 5 métodos de secagem, sendo: temperatura à 85°C por 20 horas, temperatura à 30°C à vácuo por 24 horas, amostra submersa em acetona por 7 dias e seca em estufa à 105°C por 48 horas, temperatura à 85°C à vácuo por 24 horas e temperatura à 30°C por 24 horas. Após esses períodos, as amostras foram analisadas quanto à distribuição do volume de poros segundo os métodos BJH e DFT. Concluiu-se que para ambas as temperaturas de 30°C e 85°C

secadas à vácuo, foram eficientes na identificação de poros com diâmetros entre 2,5 e 5 nm.

Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016), afirmam que é essencial para se obter valores confiáveis, tanto de área específica quanto de porosidade, a escolha adequada das condições de desgaseificação. O estudo realizado por Mantellato, Palacios e Flatt (2015) mostra que a desgaseificação de amostras de cimento anidro a 40°C sob fluxo de N₂ por 16h é considerado como um método de desgaseificação ideal, uma vez que a composição do cimento é preservada. Ainda, ao analisar a porosidade em pastas cimentícias, Costoya (2008) verificou que realizar o processo de desgaseificação sob vácuo à 40°C por 24 horas é ideal para remover a água de poros menores.

2.2 CONSIDERAÇÕES DA SEÇÃO

A variabilidade dos materiais que compõem as argamassas é grande e suas mais diversas características físicas e químicas podem influenciar nas propriedades no estado endurecido do material composto.

A argamassa vista como um material composto de duas fases, constitui-se de uma matriz cimentícia heterogênea (finos reativos e inertes, ar e água) e agregados. Uma das propriedades que influencia o desempenho das argamassas e nos demais parâmetros de qualidade é a porosidade. Essa propriedade pode ser avaliada por diversos métodos, entre eles o BJH e DFT, via adsorção de nitrogênio. Técnica que caracteriza o volume e tamanho de poros que a amostra pode conter. Apesar de suas limitações, a técnica apresenta resultados satisfatórios com relação a micro e meso porosidade.

3. MÓDULO DE ELASTICIDADE E A MICROMECAÂNICA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

A presente seção tem por objetivo revisar de maneira sucinta os conceitos que fundamentam esta pesquisa. Assim, noções básicas acerca do módulo de elasticidade em materiais cimentícios e da micromecânica, como homogeneização e elasticidade são apresentados.

Algumas definições são importantes para familiarizar o leitor com os termos que serão tratados neste estudo:

- *Micromecânica*: estudo das propriedades de um composto a partir das propriedades de seus constituintes. Ferramenta utilizada na análise de propriedades efetivas de materiais heterogêneos compostos de duas ou mais fases (BASTOS, 2015; AGUIAR, 2016). Visa prever o comportamento mecânico macroscópico dos materiais com base na sua microestrutura (AGUIAR, 2016).
- *Homogeneização*: processo utilizado para transformar o material heterogêneo em um meio equivalente homogêneo (AGUIAR, 2016). Permite formular modelo que simule o comportamento de um meio homogêneo por meio da proposição de um meio equivalente (LORENCI, 2013).
- *Elemento de volume representativo*: porção do material heterogêneo que permite expressar seu comportamento global (LORENCI, 2013). Elemento com dimensões suficientes que possa admitir homogeneidade em relação aos defeitos nele contidos (BARBOSA, 2010).
- *Isotropia*: o comportamento mecânico é caracterizado por apenas duas constantes independentes. O material isotrópico possui as propriedades do material independentes em qualquer direção do espaço, sendo assim o tensor elástico é formado por apenas duas constantes elásticas (SANTOS, 2016).

3.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

O módulo de elasticidade ou módulo de *Young*¹ é considerado como a relação entre a tensão e a deformação, ou seja, o parâmetro mecânico que retrata a rigidez do material, caracterizando a sua maior ou menor capacidade de deformação (ASHBY e JONES, 1996; MEHTA e MONTEIRO, 2014; VIEIRA et al., 2019).

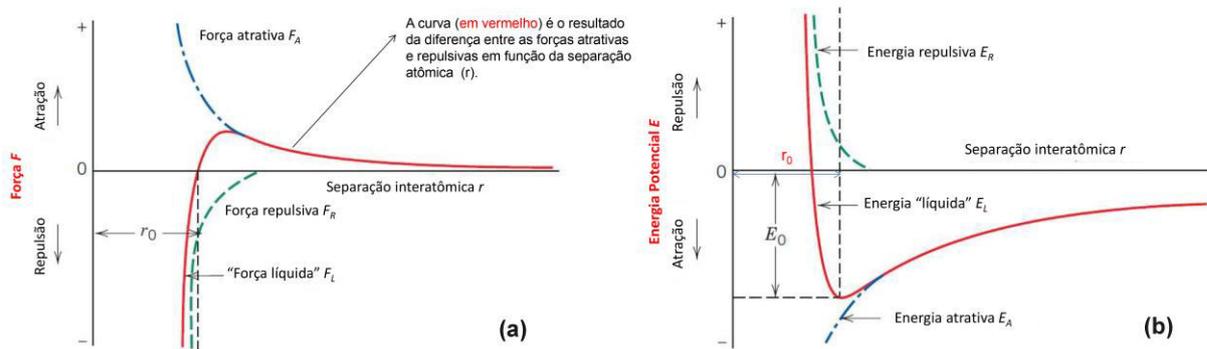
Em uma escala atômica, Callister e Rethwisch (2018) definem a deformação elástica dos materiais como uma manifestação de pequenas alterações no espaçamento e na extensão das ligações interatômicas. A magnitude do módulo de elasticidade pode ser descrita como a resistência à separação de átomos adjacentes. Nesse sentido, a deformação produz uma acomodação, ou seja, um ajuste da estrutura cristalina do material quando submetido a uma determinada força de tração ou compressão, que dependerá das forças de ligação interatômicas, da composição química, da microestrutura e de defeitos, como poros e trincas (ALMEIDA, 2012; GOULARTE, 2014).

Considerando a interação entre dois átomos isolados pode-se analisar os princípios das ligações atômicas, conforme descrito por Callister e Rethwisch (2018). Assumindo que em pequenas distâncias os átomos exercem forças de atração entre eles, e que essas forças podem ser atrativas (F_A) ou repulsivas (F_R), e a magnitude de cada uma dessas forças depende da distância interatômica (r), temos que as forças atrativas dependem do tipo de ligação que existe entre os átomos e as forças repulsivas são provenientes de interações entre as nuvens eletrônicas.

Quando essas forças se equilibram, ou seja, se tornam iguais, não há força resultante ($F_A + F_R = 0$), conforme mostra a Figura 7 (a), o que corresponde ao espaçamento de equilíbrio (r_0). Segundo Padmavathi (2011), às vezes é mais conveniente trabalhar com energias potenciais do que com forças, levando em conta que, E_0 corresponde a energia mínima necessária para separar dois átomos até uma distância infinita e que a energia, a forma e a profundidade da curva definem várias propriedades (Figura 7(b)).

¹ Módulo de Young: constante elástica nomeada em homenagem ao cientista britânico Thomas Young (1773-1829), que estudou o conceito em 1807 (TIMOSHENKO e GOODIER, 1951).

Figura 7 – Dependência das forças e do potencial de energia em relação à separação atômica

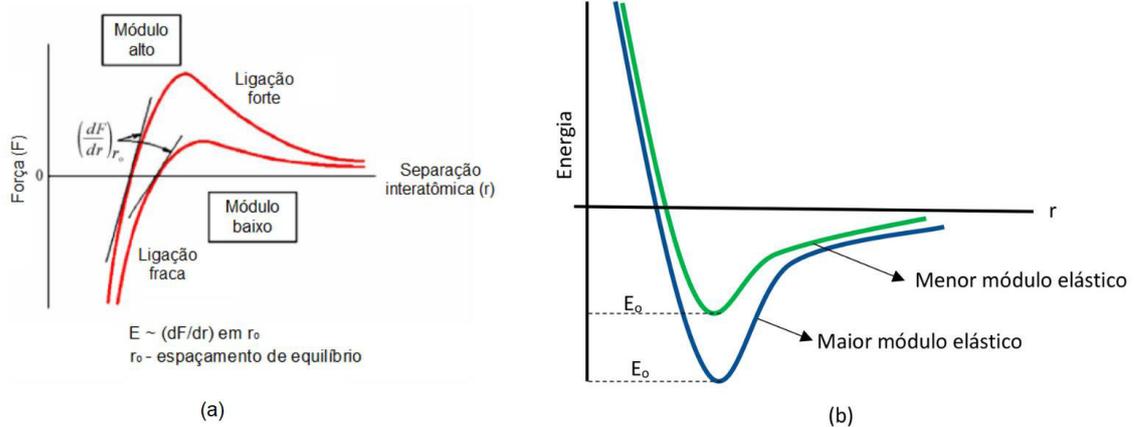


Fonte: Callister e Rethwisch (2018)

Os materiais de forma geral são compostos por átomos, os quais com base na sua natureza, organizam-se em diferentes estruturas cristalinas. A ordem em que esses átomos se organizam determinam a energia de ligação, a forma e a profundidade da curva da energia potencial (CALLISTER E RETHWISCH, 2018). Em um empacotamento desordenado em que as distâncias atômicas são relativamente grandes, existe uma variação no comprimento das ligações fazendo com que a densidade do material diminua. Nas estruturas cristalinas ordenadas, as forças de ligações entre átomos vizinhos são semelhantes, assim a energia de ligação entre eles permanece constante, portanto, materiais com essa configuração possuem boa densidade e, conseqüentemente, boa resistência (PADMAVATHI, 2011).

De acordo com a Figura 8 (a), tem-se o módulo de elasticidade E proporcional a inclinação da força versus a curva de separação interatômica no espaçamento de equilíbrio. Percebe-se que na posição $r = r_0$, a inclinação da curva é íngreme quando o material é mais rígido e rasa quando o material apresenta maior flexibilidade. Com relação à curva de distância interatômica de energia, Figura 8 (b), à medida que o módulo de elasticidade diminui, há uma queda na energia mínima, e, portanto, na força de ligação entre os átomos (PADMAVATHI, 2011).

Figura 8 – (a) Curva força-distância para dois materiais mostrando a relação entre a ligação atômica e o módulo de elasticidade; (b) curva de potencial com variação de distância interatômica e energia



Fonte: Traduzido de Padmavathi (2011)

A equação que representa o comportamento elástico dos materiais é conhecida como Lei de Hooke e é representada pela equação:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (\text{Equação 1})$$

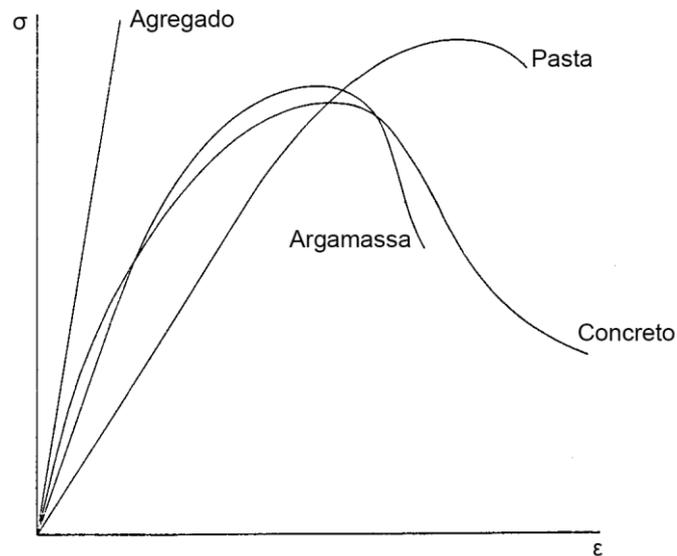
Onde σ é a tensão, E a constante de proporcionalidade, conhecida como módulo de elasticidade (é específica para cada material) e ε a deformação.

No entanto, os materiais cimentícios possuem relações tensão-deformação mais complexas, uma vez que esses materiais não são verdadeiramente elásticos (BENETTI, 2012; MEHTA e MONTEIRO, 2014). Diferente do que ocorre no aço, em que a estrutura cristalina básica é sempre a mesma, ou seja, as deformações sempre dependerão das ligações entre os átomos de ferro; nos materiais cimentícios as estruturas formadas pela hidratação do cimento apresentam diferentes morfologias dos cristais, fazendo com que seja muito difícil a obtenção de um módulo único para os compostos à base de cimento (VOIGT, SUN e SHAH, 2006).

De todos os materiais que constituem o concreto, conforme mostra a Figura 9, o agregado gráudo apresenta um comportamento elástico e, conseqüentemente, o maior módulo de elasticidade. A pasta, apesar de ter um comportamento elástico, apresenta rigidez inferior ao agregado e aspecto quebradiço. Com a adição de agregado miúdo na pasta, aumenta-se o módulo de elasticidade da argamassa, assim como com a adição do agregado gráudo na argamassa. Essa

variação no aumento do módulo depende do teor e do volume das inclusões e da água (SWAMY e RIGBY, 1971).

Figura 9 – Comportamento típico da curva tensão – deformação da pasta de cimento, do agregado, da argamassa e do concreto



Fonte: Traduzido de Swamy e Rigby (1971)

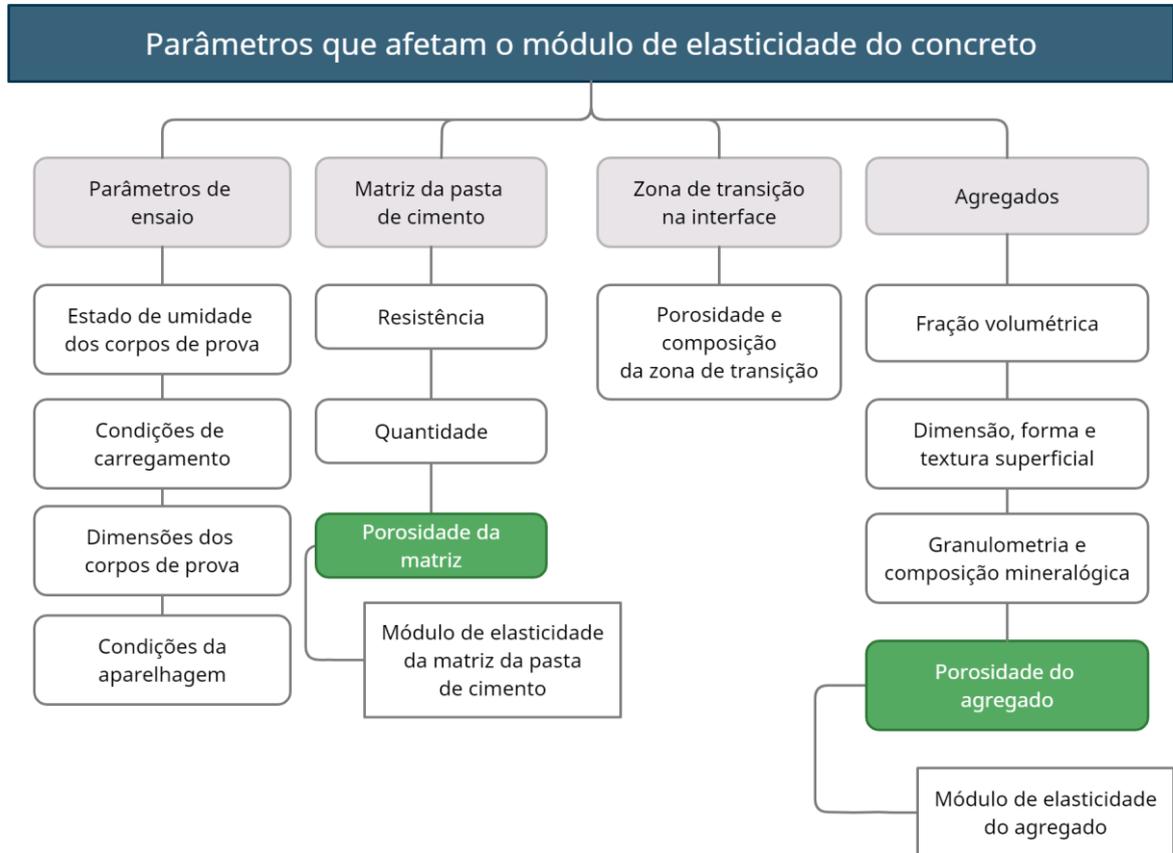
A não linearidade das curvas de tensão-deformação dos materiais cimentícios, de acordo com Vogt (2006) e Mehta e Monteiro (2014) está ligada à microfissuração desses materiais, que apresentam diferentes características térmicas e mecânicas mesmo antes do carregamento, as quais estariam relacionadas a efeitos de retração por secagem ou contração térmica.

O módulo de elasticidade pode ser afetado por vários fatores. Vogt (2006) e Barbosa (2010) declaram que em materiais compostos, essa propriedade é afetada pela natureza, fração volumétrica e características dos constituintes, o que corrobora com Mehta e Monteiro (2014), que citam que em materiais heterogêneos o comportamento elástico dos compósitos, como a argamassa e o concreto, pode ser influenciado pela massa específica, pela fração volumétrica e pelo módulo de deformação dos principais constituintes da mistura.

Gidrão (2015) afirma que o módulo de elasticidade de materiais cimentícios é afetado diretamente pela porosidade, além de fatores como: a relação água-aglomerante, maturidade, proporção volumétrica dos componentes da mistura,

tipo e dimensão máxima do agregado utilizado. A Figura 10 apresenta os principais parâmetros que afetam o módulo de elasticidade nos concretos.

Figura 10 – Parâmetros que afetam o módulo de elasticidade do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Como mostra a Figura 10, o módulo de elasticidade da pasta é influenciado pela porosidade da matriz, que está relacionada com a relação água-aglomerante, o teor de ar, teor e tipo de adições, além da hidratação do cimento. Outros dois fatores influenciados pela porosidade são o módulo de elasticidade do agregado e a zona de transição. De acordo com Almeida (2012), a zona de transição é influenciada pelas características físicas, a composição mineralógica e a fração volumétrica dos agregados, afetando o módulo de elasticidade do material composto.

Assim como as variações ligadas à composição e microestrutura dos materiais cimentícios para a medida do módulo de elasticidade, existem os fatores relacionados com os equipamentos e sua operação, como: a determinação do tipo de corpo de prova ou tipo de cura e as variações nas metodologias de ensaios.

Bilesky (2016) cita que a velocidade de aplicação da carga e a taxa de carregamento interferem na não linearidade da curva tensão-deformação, além do uso de equipamentos mal calibrados ou com defeitos. Somado a isso, existem os erros de natureza humana, por exemplo: corpos de prova ou sensores mal posicionados e falhas na preparação das amostras, que podem alterar os resultados obtidos nos ensaios.

A fim de reforçar os parâmetros de influência citados, a Figura 11 mostra os principais fatores e seus efeitos relacionados ao módulo de elasticidade dinâmico das argamassas.

Figura 11 – Fatores que impactam no módulo de elasticidade da argamassa e seus efeitos



Fonte: Autor (2022)

Anjos et al. (2020) ao estudar a incorporação de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em argamassas autonivelantes, observaram que o módulo de elasticidade dinâmico para as idades de 7, 14 e 28 dias, apresentou resultados inferiores à argamassa de referência sem adições, mostrando que o efeito de preenchimento da adição não contribuiu para essa propriedade. As argamassas produzidas apresentaram uma menor rigidez, ou seja, uma maior capacidade de deformação, característica que pode ser benéfica, dependendo da aplicação, uma vez

que são menos suscetíveis a fissuras. Resultados semelhantes foram encontrados por Gonçalves et al. (2020), ao substituir a areia natural por areia proveniente de demolição e a substituição parcial de cimento por óxido de magnésio reativo. Sendo que o declínio do módulo de elasticidade dinâmico pode estar relacionado a maior porosidade e menor resistência em decorrência da incorporação do agregado reciclado e ao maior consumo de água para obter níveis de trabalhabilidade semelhantes às referências sem adições.

Em contrapartida, Letelier et al. (2019), ao substituir parcialmente o cimento por pó de vidro e o agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado fino, obteve resultado similar para o módulo de elasticidade dinâmico em todas as séries de substituição analisadas, o que pode estar relacionado ao melhor empacotamento das partículas, resultando em uma matriz mais densa e menos porosa. Esse mesmo resultado foi encontrado por Farinha, De Brito e Veiga (2015), que observaram um aumento no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com uso de agregado reciclado proveniente de louças sanitárias.

No estudo realizado por Kalagri, Karatosios e Kilikoglou (2014), os autores evidenciam que o módulo de elasticidade dinâmico é influenciado pelo tempo de cura, bem como pelo tipo de aglutinante e pelo agregado. Concluíram que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico diminuem à medida que aumenta a porosidade e o raio médio dos poros.

De acordo com Aggelakopoulou, Bakolas e Moropoulou (2019), o módulo de elasticidade (estático ou dinâmico) pode apresentar discrepâncias que podem ser amenizadas com o aumento da velocidade de propagação de ondas de ultrassom. Essas diferenças podem estar relacionadas à heterogeneidade da microestrutura das argamassas, bem como a sua falta de homogeneidade e características dos poros.

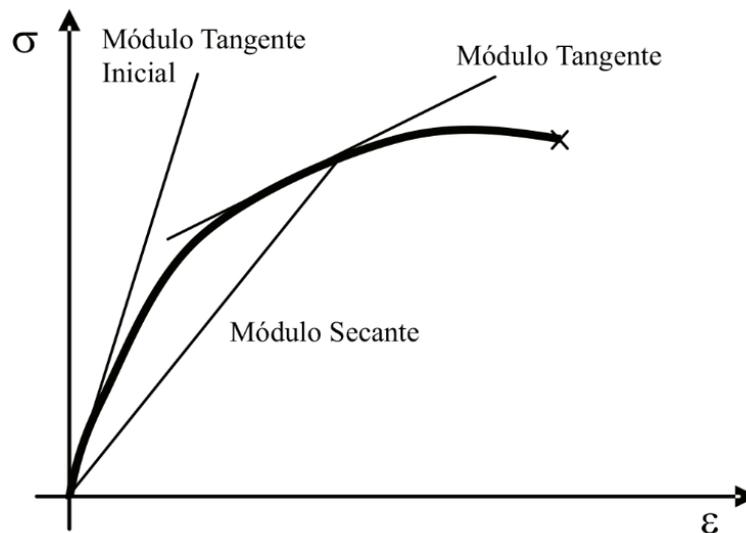
3.1.1 Métodos de Medição

O módulo de elasticidade da argamassa pode ser determinado experimentalmente por ensaios estáticos ou dinâmicos. O estático é avaliado, principalmente, por meio das curvas de tensão-deformação, resultantes de ensaios de compressão, em que são realizadas leituras das deformações ao longo do tempo

até a ruptura da amostra. É possível medir a deformação através de relógios comparadores, extensômetros elétricos ou medidores de deslocamento (SILVA, MARROS e MONTE, 2008).

O módulo de elasticidade estático, o qual é determinado pela declividade da curva tensão-deformação, está relacionado à diferentes estágios de cargas conforme ilustrado na Figura 12 (ARAÚJO, GUIMARÃES e GEYER, 2012; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Figura 12 – Tipos de módulo de elasticidade estático no diagrama tensão-deformação



Fonte: Araújo, Guimarães e Geyer (2012)

De acordo com Araújo, Guimarães e Geyer (2012) e Moraes (2012), a determinação dos três tipos de módulos, conforme ilustrado na Figura 12, pode ser dada por:

- Módulo tangente inicial: dado pela declividade da reta tangente que passa pela origem do diagrama. Utilizado para caracterizar deformações quando o material é submetido a tensões muito baixas.
- Módulo tangente: corresponde à inclinação da reta em um ponto qualquer. Utilizado na simulação de carregamentos e descarregamentos em diferentes estágios de carga.
- Módulo secante: dado pela declividade da reta traçada da origem até um ponto da curva.

Existe uma grande variedade de parâmetros que podem interferir nos resultados dos ensaios estáticos, como: tipo de prensa, equipamentos de medição de carga e deformação, forma de realização do ensaio, método de cálculo utilizado e pessoal especializado para sua correta execução (SILVA, MARROS e MONTE, 2008; MORAES, 2012).

Uma maneira alternativa para se estimar o módulo de elasticidade dos materiais cimentícios é dada por métodos de ensaio não destrutivos, os quais garantem a repetitividade do ensaio e resultados mais confiáveis, uma vez que causam pouco ou nenhum dano a amostra analisada (MARQUES et al., 2019). Os ensaios não destrutivos permitem obter informações sobre os defeitos e as características de um material ou, ainda, realizar a monitoração da degradação de componentes, equipamentos e estruturas em uso (COSSOLINO e PEREIRA, 2010; ABENDI, 2021).

O módulo de elasticidade dinâmico dos materiais cimentícios pode ser determinado através do método de velocidade de pulso ultrassônico, frequência natural de vibração, entre outros métodos de propagação de onda (DENIZ e ERGOGAN, 2015; CHEN e LEON, 2019).

Os ensaios de pulso ultrassônico, disseminado em vários países, é normalizado pela ASTM C597 (ASTM, 2016) e pela NBR 15630 (ABNT, 2009). Tal como o ensaio de emissão de ondas vibratórias, descrito pela Técnica de Excitação por Impulso (TEI) é normalizado pela ASTM E1876 (ASTM, 2015).

O método ultrassônico possui alta sensibilidade para detectar pequenos defeitos internos, como trincas, fissuras e poros (ANDREUCCI, 2014). No entanto, ao ser comparado com a TEI, essa apresenta algumas vantagens em relação àquele, como: os resultados não dependem tanto da habilidade do operador, já que não é necessário o acoplamento de transdutores e nem da estimativa do coeficiente de Poisson, além de permitir a caracterização do módulo de cisalhamento (OTTANI e PEREIRA, 2017).

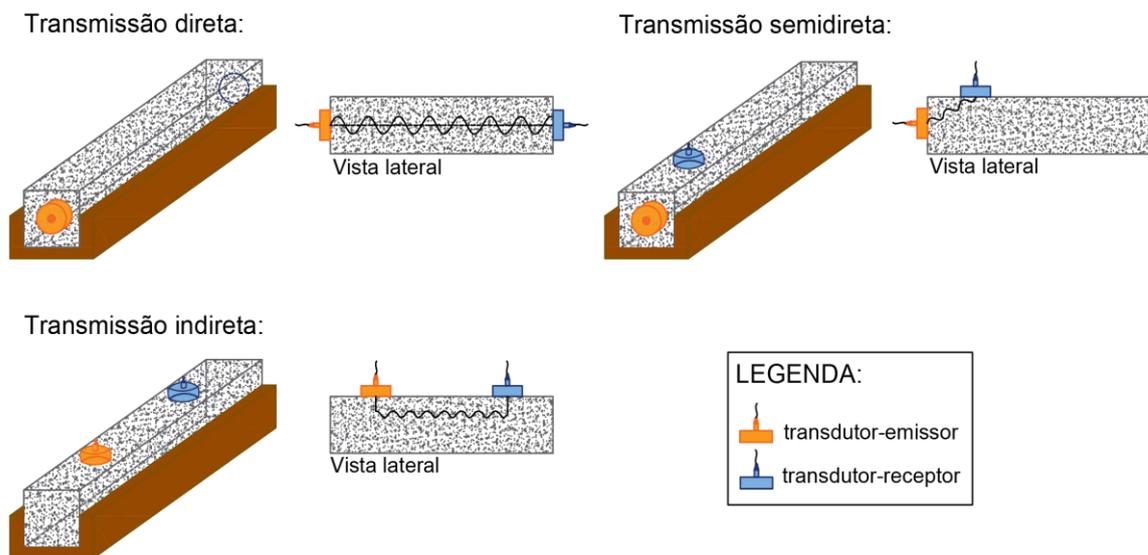
3.1.1.1 *Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)*

O método da velocidade de pulso ultrassônico é baseado no princípio da propagação de ondas ultrassônicas (alta frequência) por um sólido, em que a

velocidade de propagação depende das propriedades elásticas do meio (VIEIRA et al., 2019).

Simplificadamente, pode-se descrever o processo da seguinte forma: com um transdutor-emissor aplica-se um pulso em uma peça sólida, o qual será captado na extremidade oposta por um transdutor-receptor. A velocidade de propagação da onda pode ser calculada conhecendo-se a distância entre os transdutores e o tempo entre a emissão e a captação do pulso (CHIES, 2014). A Figura 13 apresenta os métodos de transmissão conforme posicionamento dos transdutores.

Figura 13 – Esquema dos métodos de transmissão: direta, indireta e semidireta



Fonte: Autor (2022)

A NBR 15630 (ABNT, 2009) descreve os métodos para execução do ensaio para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, através de ondas longitudinais, em corpos de prova de argamassa.

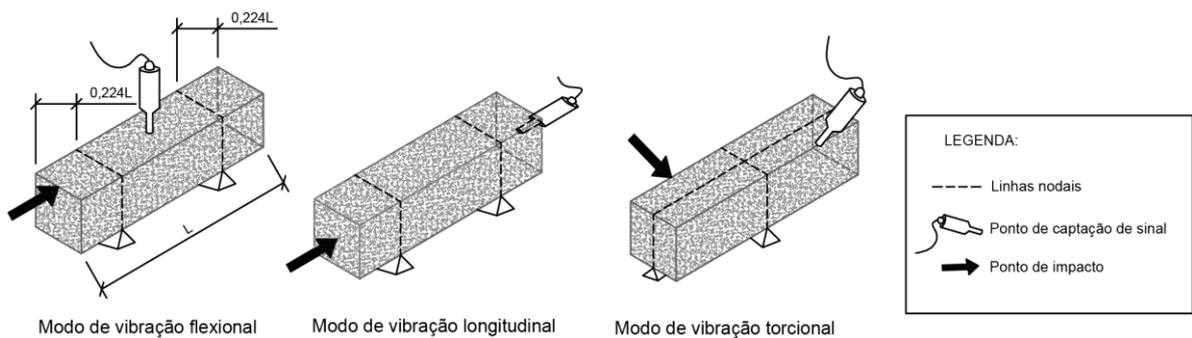
3.1.1.2 Técnica de Excitação por Impulso (TEI)

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser estimado a partir da frequência natural de vibração do corpo de prova de geometria regular (cilíndrica, prismática, placas etc.) quando submetido a vibrações longitudinais, transversais ou torcionais (CABRAL, 2014). Ao se impor uma excitação mecânica por meio de impacto, as vibrações resultantes serão captadas por um microfone. Esses dados

serão tratados por um *software* que realiza a Transformada Rápida de Fourier, levando o problema do domínio do tempo para o da frequência (GIDRÃO, 2015).

De acordo com Otani e Pereira (2017), com a excitação, cada corpo de prova vibra de um modo diferente e para cada modo há uma frequência característica, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 – Modos de vibração dos corpos de prova prismáticos (TEI)



Fonte: Adaptado de ASTM E1876 (ASTM, 2015)

Na Figura 14 são expostas as condições de contorno impostas para a excitação (ponto de impacto) e captação do sinal acústico, a fim de se obter as frequências naturais de vibração em corpos de prova prismáticos.

Nos últimos anos os métodos não destrutivos têm ganhado espaço na análise de materiais cimentícios, nesse sentido, o Quadro 1 apresenta algumas das aplicações do método de ultrassom e da técnica de excitação por impulso e seus principais resultados.

Quadro 1 – Aplicações dos ensaios não destrutivos (ultrassom e ressonância) em materiais cimentícios e seus principais resultados

Método não destrutivo	Aplicação	Resultados	Referências
Ultrassom	Análise da influência da fração volumétrica e da geometria dos poros, e da geometria e propriedades elásticas do agregado miúdo, na velocidade ultrassônica usando modelo micromecânico.	Percebeu-se que ao aumentar a relação a/c há uma redução na velocidade ultrassônica, assim como uma maior resistência e fração volumétrica do agregado, aumentam a velocidade ultrassônica.	Hernández et al. (2006a, 2006b); Hernández et al. (2002)
Ultrassom	Análise das propriedades físicas e químicas da pasta cimentícia durante a pega e endurecimento associadas às características da propagação de onda ultrassônica.	Constatou-se que a amplitude máxima da onda de ultrassom reflete as mudanças na resistência ao cisalhamento da pasta e o aumento da VPU está relacionada com a formações de etringita.	Kamada, Uchida e Rokugo (2005)
Ultrassom	Correlação entre a velocidade de pulso ultrassônico, a porosidade e a permeabilidade em argamassas com a/c e teor de água variáveis.	Apresentou resultados promissores na faixa de porosidade considerada, podendo ser usada para prever a evolução dos parâmetros estruturais a partir de ensaios de ultrassom.	Lafhaj et al. (2006)
Ultrassom	Análise da influência do agregado miúdo na atenuação ultrassônica, por meio de modelos capazes de prever a atenuação induzida por espalhamento de ondas ultrassônicas longitudinais pelas inclusões de areia distribuídas na matriz da pasta de cimento.	Os resultados mostraram ser possível usar modelos baseados na física para quantificar o efeito do agregado miúdo na atenuação ultrassônica.	Treiber et al. (2010)
Ultrassom	Investigação dos efeitos dos vazios de ar na propagação de ondas ultrassônicas em pastas de cimento, relacionando os parâmetros de onda com os tempos de pega do cimento.	A existência de vazios de ar na pasta cimentícia afeta fortemente a velocidades de ondas longitudinais, mas possuem pouco efeito na propagação de ondas de cisalhamento.	Zhu et al. (2011)

Método não destrutivo	Aplicação	Resultados	Referências
Ultrassom	Análise da microestrutura associada à porosidade da pasta cimentícia a partir de medições ultrassônicas.	O método ultrassônico fornece medição contínua e simultânea da porosidade capilar e do módulo de cisalhamento do material, assim, ele pode ser usado para analisar a microestrutura e as propriedades mecânicas dos produtos de hidratação de materiais cimentícios.	Wang e Subramaniam (2011)
Ultrassom	Avaliação da relação entre a porosidade e os parâmetros ultrassônicos em pastas de cimento seca e saturada.	Há uma diminuição da velocidade das ondas longitudinais e transversais com o aumento da porosidade; os modelos micromecânicos são adequados para análise das velocidades ultrassônicas tanto nas pastas secas quanto saturadas.	Maalej, Lafhaj e Bouassida, (2013)
Ultrassom	Estudo do efeito da frequência do transdutor e do comprimento do trajeto para determinar a VPU no monitoramento do processo de hidratação de argamassas.	Transdutores de alta frequência não são adequados para testar argamassas no estado fresco, tanto para distâncias muito curtas ou muito longas. As frequências de 54 e 82 kHz podem ser usadas de forma confiável para trajetos de 15 e 10 cm.	Keskin et al. (2013)
Ultrassom e Ressonância	Investigação de propriedades elásticas de argamassas feitas com cimentos diferentes nas primeiras idades para prever essas propriedades aos 56 dias.	Ao comparar os resultados do módulo de elasticidade dinâmico obtidos pelos dois métodos concluiu-se que: Ed-VPU é menor do que o Ed-TEI para todos os cimentos testados. O coeficiente de Poisson calculado na TEI pode ser usado na VPU para melhorar a precisão do Ed-VPU. A idade e o intervalo do módulo estático medidos devem ser levados em consideração ao tentar relacionar os módulos. A composição química do cimento influencia o módulo estático nas idades iniciais.	Deniz e Erdogan (2015)
Ultrassom	Análise do efeito do tipo/dosagem do aglutinante, relação a/c e do teor de finos nas propriedades mecânicas e ultrassônica de amostras produzidas com rejeitos.	A resistência e a VPU das amostras aumentaram com o aumento da dosagem do aglutinante ou redução da proporção a/c e conteúdo de finos. A correlação entre a resistência à compressão e a VPU foi aceitável.	Yilmaz et al. (2014)

Método não destrutivo	Aplicação	Resultados	Referências
Ultrassom	Estudo da relação entre a VPU, o módulo de elasticidade e a resistência à compressão foram realizadas em concretos com diferentes tipos e teores de agregados graúdos.	Para prever a resistência à compressão a partir da VPU, com razoável precisão, a relação areia/agregado graúdo deve ser considerada; é difícil estabelecer uma relação generalizada entre a resistência à compressão e a VPU sem considerar o tipo de agregado utilizado.	Mohammed e Rahman (2016)
Ressonância	Estudo do efeito da diminuição da umidade no módulo de elasticidade dinâmico em amostras de argamassa em idade precoce.	Em idades iniciais (1, 3 e 7 dias) o módulo de elasticidade não foi afetado pelo teor de umidade, no entanto, em idades posteriores o módulo torna-se menor à medida que o teor de umidade diminui, o que pode estar ligado a ocorrência de microfissuras ou efeitos de contenção exercidos pelos agregados. O módulo de elasticidade quase-estático não parece ser tão influenciado pelo teor de umidade quanto o dinâmico, em qualquer idade.	Di Bella et al. (2016)
Ressonância	Comparação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dinâmico de argamassas cimentícias e argamassas produzidas com escória de alto forno.	As argamassas cimentícias apresentaram maior resistência à compressão e, conseqüentemente, maior módulo de elasticidade do que as argamassas de escória nas idades de 7 e 28 dias.	Djayaprabha et al. (2018)
Ultrassom	Análise do módulo de elasticidade dinâmico em argamassas de cal.	O módulo de elasticidade dinâmico está relacionado com a resistência mecânica, a microestrutura e a porosidade do material.	Aggelakopoulou, Bakolas e Moropoulou (2019)
Ressonância	Aplicação da TEI para análise dos efeitos do uso de superplastificantes e adição de nanocristais de celulose na hidratação do cimento.	Teores mais baixos de nanocristais de celulose afetam positivamente a hidratação em idades iniciais, resultando em maior módulo de elasticidade e menor porosidade da pasta cimentícia.	Filipak Vanin et al. (2020)

Método não destrutivo	Aplicação	Resultados	Referências
Ultrassom	Estudo do módulo de elasticidade dinâmico em argamassas confeccionadas com agregado reciclado e natural, analisadas por meio da velocidade de propagação de ondas com base no ultrassom e em sensores Arduino.	Argamassas feitas com agregado reciclado apresentaram módulo de elasticidade e resistência menores do que as confeccionadas com agregado natural. Foi observado relação linear positiva entre os resultados captados pelo ultrassom e pelo sensor Arduino projetado para essa análise.	Yedra et al. (2020)
Ultrassom	Estudo da relação da VPU com a resistência à compressão para argamassas curadas em diferentes condições.	As condições de cura influenciam mais a resistência à compressão aos 28 dias e os resultados da VPU do que os tipos de cimento. Além disso uma relação linear foi utilizada com sucesso para estimar a resistência à compressão por medição VPU.	Estévez et al. (2020)

Fonte: Autor (2022)

De maneira geral, percebe-se que os ensaios não destrutivos (VPU e TEI) mostram bons resultados quando aplicados nas mais diversas situações (análise de teor de agregados, condições de cura, análises nos estados frescos e endurecidos, além da caracterização de materiais). É importante que mais estudos sejam realizados aplicando essas técnicas, uma vez que elas trazem celeridade aos ensaios devido à sua praticidade de realização, além de permitir que as amostras sejam utilizadas para outros ensaios, reduzindo assim o consumo de materiais e de tempo.

A união entre modelos micromecânicos e ensaios não destrutivos pode ser utilizada para prever propriedades e características de materiais antes de serem indicados ou aplicados na prática, proporcionando assim, melhor qualidade dos sistemas utilizados na construção civil.

3.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA ABORDAGEM MICROMECAÂNICA

As constantes elásticas estudadas por VOIGT (1889), REUSS (1929), KRÖNER (1959) e HILL (1965) e seus conceitos e aproximações analíticas podem ser empregados em materiais compósitos modernos (GROSS e SELIG, 2006).

Segundo Barbosa (2010), uma das tarefas da micromecânica é relacionar as propriedades dos materiais em diferentes escalas de comprimento. Sendo assim, é possível realizar a separação de um material heterogêneo em diferentes fases com propriedades constantes (BERNARD, ULM e LEMARCHAND, 2003).

Cabe evidenciar que o conceito de “fase”, na micromecânica, corresponde a uma amostra de material, a qual apresenta propriedades constantes em um estado de deformação homogêneo, que pode ser identificada em uma determinada escala (BERNARD, ULM e LEMARCHAND, 2003).

Ainda, segundo Zhang e Jivkov (2016), as abordagens micromecânicas, que têm como vantagem o fato de abordar informações importantes da microestrutura, podem ser classificadas em:

- Modelos analíticos: estimam as propriedades elásticas por meio de expressões simplificadas. Apesar de não ser o modelo mais preciso, apresenta bons resultados nas análises micromecânicas de materiais cimentícios.

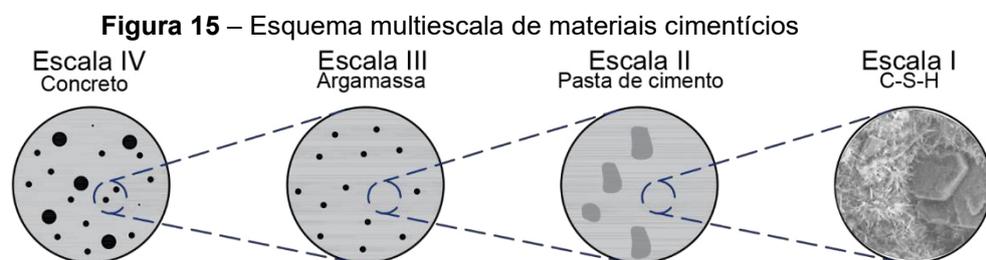
- Modelos numéricos: baseados na mecânica do contínuo e no método dos elementos finitos.
- Modelos de rede discreta: representa o material por um sistema de rede de viga ou elemento de mola, capazes de prever as propriedades mecânicas e a fratura em materiais cimentícios.

Neste estudo a abordagem micromecânica será realizada por modelos analíticos, com o objetivo de facilitar o emprego dessas análises e verificar seu comportamento ao variar o tipo de material utilizado.

3.2.1 Teoria da Homogeneização

Por meio das ferramentas teóricas fornecidas pela teoria da homogeneização é possível formular modelos representativos que simulem o comportamento de um meio heterogêneo através da proposição de um meio homogêneo equivalente (LORENCI, 2013).

Os modelos micromecânicos passam, inicialmente, pela consideração de um elemento de volume representativo (EVR), o qual tem o objetivo de correlacionar as propriedades da macroescala com as propriedades e estruturas da microescala do material (BARBOSA, 2010). Sendo assim, pode-se dizer que através da homogeneização é possível expandir as propriedades de um material de uma microescala para uma macroescala e que o EVR carrega informações de cada escala abordada (PIANEZZER, 2012). Esse mecanismo é descrito por Bernard, Ulm e Lemarchand (2003), Constantinides e Ulm (2004) e representado na Figura 15.



Fonte: Bernard, Ulm e Lemarchand (2003)

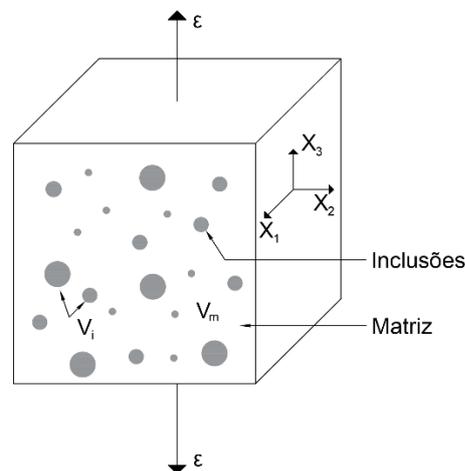
3.2.1.1 Elemento de Volume Representativo (EVR)

Um elemento de volume representativo (EVR) pode ser descrito como uma estrutura muito pequena que ajuda a descrever uma estrutura macroscópica, no entanto, ele é grande o suficiente em relação à microestrutura para que sua abordagem seja válida (GITMAN, ASKES e SLUYS, 2007).

De acordo com Barbosa (2010), um EVR pode ser caracterizado como um elemento que possua dimensões suficientes, que possa admitir homogeneidade em relação aos defeitos nele contidos, porém, pequeno o suficiente, de forma a evitar gradientes elevados de deformação no local de interesse. Ou seja, é uma porção do material heterogêneo capaz de representar o seu comportamento na macroescala (LORENCI, 2013).

Dantas (2013) descreve o EVR como um elemento que deve conter todos os microelementos que têm influência na macroescala. Hernández et al. (2002) diz que o EVR de um material composto é formado por uma matriz homogênea de volume (V^m) com inclusões de volume (V^i), conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 – Elemento de Volume Representativo (EVR)



Fonte: Hernández et al. (2002)

No entanto, poucas informações existem sobre o tamanho ideal para o EVR em materiais de engenharia (GITMAN, ASKES e SLUYS, 2007). Autores como Pichler et al. (2013) admitem que o tamanho do EVR deve ter aproximadamente 5 vezes o diâmetro máximo da inclusão para argamassas e 0,5 mm para pastas cimentícias. Já Van Vliet (2000), diz que para concretos o tamanho do EVR pode ser

considerado como 3 a 5 vezes a dimensão máxima do agregado graúdo. Em contrapartida, Van Mier (2001) considera o tamanho do EVR para concreto entre 7 e 8 vezes a dimensão do agregado.

Além disso, há estudos como o de Kanit et al. (2003), em que o tamanho do EVR é definido numericamente, baseado em propriedades efetivas.

Diversos métodos de homogeneização têm sido desenvolvidos com o propósito de determinar as propriedades efetivas de microestruturas de tipos variados orientados de maneira aleatória, uma vez que não é possível determinar suas propriedades efetivas com exatidão, busca-se determinar seus possíveis comportamentos efetivos em termos de limites (DANTAS, 2013).

Por meio da micromecânica de meios efetivos é possível admitir para o compósito as tensões e deformações médias, como mostram as Equações 2 e 3 (TEIXIERA, 2012):

$$\langle \sigma \rangle = \frac{1}{V} \int_V \sigma(x) dV \quad (\text{Equação 2})$$

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon(x) dV \quad (\text{Equação 3})$$

Onde σ é o tensor de tensão e $\langle \sigma \rangle$ representa o tensor de tensão média no compósito, V é o volume representativo e x é o vetor que indica a posição de um ponto material no interior do compósito.

De forma análoga, pode-se definir a tensão e a deformação média para a matriz $\langle \sigma \rangle^m$ e $\langle \varepsilon \rangle^m$ e para a inclusão $\langle \sigma \rangle^i$ e $\langle \varepsilon \rangle^i$. Assumindo V^m como o volume ocupado pela matriz e V^i o volume ocupado pela inclusão, as médias volumétricas podem ser definidas como mostrado nas Equações 4 e 5:

$$\langle \sigma \rangle^m = \frac{1}{V^m} \int_{V^m} \sigma^m(x) dV \quad \langle \sigma \rangle^i = \frac{1}{V^i} \int_{V^i} \sigma^i(x) dV \quad (\text{Equação 4})$$

$$\langle \varepsilon \rangle^m = \frac{1}{V^m} \int_{V^m} \varepsilon^m(x) dV \quad \langle \varepsilon \rangle^i = \frac{1}{V^i} \int_{V^i} \varepsilon^i(x) dV \quad (\text{Equação 5})$$

Nesse sentido, Dantas (2013) mostra que para matriz e inclusões que apresentam comportamento elástico linear, pode-se representar as relações entre tensão e deformação média em cada fase, conforme Equação 6:

$$\langle \sigma \rangle^m = \mathbb{C}^m \langle \varepsilon \rangle^m \quad \langle \sigma \rangle^i = \mathbb{C}^i \langle \varepsilon \rangle^i \quad (\text{Equação 6})$$

onde \mathbb{C}^m e \mathbb{C}^i são os tensores de rigidez elásticos da matriz e das inclusões, respectivamente.

De acordo com o definido até aqui, é possível deduzir as expressões que representam a tensão e a deformação efetivas do material compósito (Equação 7):

$$\langle \sigma \rangle = v^m \langle \sigma \rangle^m + v^i \langle \sigma \rangle^i \quad \langle \varepsilon \rangle = v^m \langle \varepsilon \rangle^m + v^i \langle \varepsilon \rangle^i \quad (\text{Equação 7})$$

em que v^m e v^i são as frações volumétricas de cada fase, definidas por:

$$v^m = \frac{V^m}{V} \quad (\text{Equação 8})$$

$$v^i = \frac{V^i}{V} \quad (\text{Equação 9})$$

Ainda, Dantas (2013) mostra que, através dos tensores de concentração de tensão (\mathbb{B}^m e \mathbb{B}^i) e deformação (\mathbb{A}^m e \mathbb{A}^i), é possível relacionar as tensões e deformações efetivas com as tensões e deformações médias, conforme Equações 10 e 11:

$$\langle \sigma \rangle^m = \mathbb{B}^m \langle \sigma \rangle \quad \langle \sigma \rangle^i = \mathbb{B}^i \langle \sigma \rangle \quad (\text{Equação 10})$$

$$\langle \varepsilon \rangle^m = \mathbb{A}^m \langle \varepsilon \rangle \quad \langle \varepsilon \rangle^i = \mathbb{A}^i \langle \varepsilon \rangle \quad (\text{Equação 11})$$

Dessa maneira, é possível definir o tensor unitário de quarta ordem \mathbb{I} , conforme Equação 12:

$$v^m \mathbb{B}^m + v^i \mathbb{B}^i = \mathbb{I} \quad v^m \mathbb{A}^m + v^i \mathbb{A}^i = \mathbb{I} \quad (\text{Equação 12})$$

Ao se conhecer um dos quatro tensores de concentração é possível determinar as constantes elásticas efetivas (DANTAS, 2013). Além disso, o tensor de rigidez elástico do compósito é definido como:

$$\mathbb{C} = \mathbb{C}^m + v^i(\mathbb{C}^i - \mathbb{C}^m)\mathbb{A}^i \quad (\text{Equação 13})$$

Sendo assim, é possível expressar os tensores efetivos do material compósito, com base nos tensores de concentração de tensão e de deformação, correlacionado com os tensores de rigidez e das respectivas frações volumétricas dos materiais constituintes (BARBOSA, 2010).

3.2.2 Homogeneização em Elasticidade

Existem várias técnicas de homogeneização (modelos micromecânicos) que podem fornecer propriedades efetivas de elasticidade, que podem variar desde o uso de aproximações analíticas simples, como é o caso dos Modelos de Voigt e Reuss (GIDRÃO, 2015) a métodos mais precisos, como Mori-Tanaka e Autoconsistente (BERNARD, ULM e LEMARCHAND, 2003; MAALEJ, LAFHAJ e BOUASSIDA, 2010; MAALEJ, LAFHAJ e BOUASSIDA, 2013; ABAIMOV, KHUDYAKOVA e LOMOV, 2016; BURYACHENKO, 2020). Além disso, existem os métodos totalmente numéricos, como os formulados pelo Método dos Elementos Finitos (DANTAS, 2013; MELO, 2015; SANTOS, 2016).

Os trabalhos de VOIGT (1889) e REUSS (1929) apresentam os modelos mais simples para se simular um material compósito, no primeiro considera-se que os constituintes do compósito estejam dispostos em paralelo, impondo uma condição de deformação uniforme. No segundo, impõe-se uma condição de tensão uniforme, ao se dispor os constituintes em série (MEHTA e MONTEIRO, 2014). As equações obtidas relacionam o módulo de elasticidade do compósito (E_{eq}) com os módulos dos constituintes (E^m e E^i) com suas respectivas frações volumétricas (v^m e v^i), sendo $v^m = 1 - v^i$, conforme mostram as Equações 14 e 15

$$\text{Modelo de Voigt: } E_{eq} = E^m v^m + E^i v^i \quad (\text{Equação 14})$$

$$\text{Modelo de Reuss: } \frac{1}{E_{\text{eq}}} = \frac{\nu^m}{E^m} + \frac{\nu^i}{E^i} \quad (\text{Equação 15})$$

De acordo com Dantas (2013), qualquer estimativa do módulo de elasticidade dos materiais compósitos estará compreendida em um intervalo de valores em que o limite superior é o valor do módulo de elasticidade dado por Voigt e o limite inferior corresponde ao módulo de elasticidade dado por Reuss. O estudo de Hashin e Shtrikman (1963) apresenta limites mais rigorosos para a estimativa do módulo de elasticidade (DANTAS, 2013; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

3.2.2.1 Teoria de inclusões de Eshelby

Uma das soluções analíticas mais importantes da micromecânica foi apresentada por Eshelby em 1957 (GROSS e SEELING, 2006). Eshelby considerou um domínio com uma inclusão elipsoidal submetida a uma auto deformação constante, apresentando uma solução para o campo da deformação em que:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \varepsilon_{kl}^* = \text{constante} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

ε_{ij} é o campo de deformação dentro da inclusão;

ε_{kl}^* é a auto deformação sofrida pela inclusão;

S_{ijkl} é o tensor de Eshelby 4ª ordem.

O tensor de Eshelby só depende da geometria e das constantes elásticas do material (VIGNOLI, 2020). Soluções genéricas para seus componentes são dados em Mura (1987) e em Kachanov, Shafiro e Tsukrov (2003).

Segundo Teixeira (2012) o tensor de Eshelby apresenta as seguintes características:

- O tensor não é completamente simétrico, isto é, $S_{ijkl} = S_{jikl} = S_{ijlk}$, no entanto, $S_{ijkl} \neq S_{klij}$;
- As propriedades do material da inclusão independem para o tensor;

- O tensor dependente apenas da geometria e das propriedades elásticas do material;
- Caso haja homogeneidade do meio em que ocorreu a inclusão, o tensor depende somente do coeficiente de Poisson da matriz e dos parâmetros geométricos da inclusão.

3.2.2.2 Método de Mori-Tanaka (MT)

O método de Mori-Tanaka (MT) é um dos esquemas de homogeneização mais utilizados para materiais compostos por uma matriz com inclusões inseridas em seu interior (DUTRA 2012; DANTAS, 2013). O método MT é oriundo de pesquisas realizadas sobre a mesomecânica de materiais compósitos, com o objetivo de elaborar modelos matemáticos abordando o conceito de campo médio microscópico para análise das propriedades macroscópicas de compósitos multifásicos (TEIXEIRA, 2012).

O trabalho desenvolvido por Mori-Tanaka (1973), baseado na inclusão de Eshelby, combina o conceito de *eigenstrain*² com o objetivo de calcular a tensão interna média da matriz de um material contendo precipitados (ABOUDI, ARNOLD e BEDNARCYK, 2013). No esquema de homogeneização de MT considera-se o tensor de concentração de deformação igual ao de um único problema de inclusão, ou seja, as inclusões no EVR sofrem a deformação da matriz (JR. MEDEIROS et al., 2018).

De acordo com Dantas (2013), o tensor de concentração da deformação da inclusão (A_{mt}^i) e as propriedades efetivas elásticas (\mathbb{C}) no método de MT pode ser realizada conforme as Equações 17 e 18:

$$A_{mt}^i = A_{dil}^i [(1 - \nu^i)\mathbb{I} + \nu^i A_{dil}^i]^{-1} \quad (\text{Equação 17})$$

$$\mathbb{C} = \mathbb{C}^m \nu^i + (\mathbb{C}^i - \mathbb{C}^m) [A_{dil}^i [(1 - \nu^i)\mathbb{I} + \nu^i A_{dil}^i]^{-1}] \quad (\text{Equação 18})$$

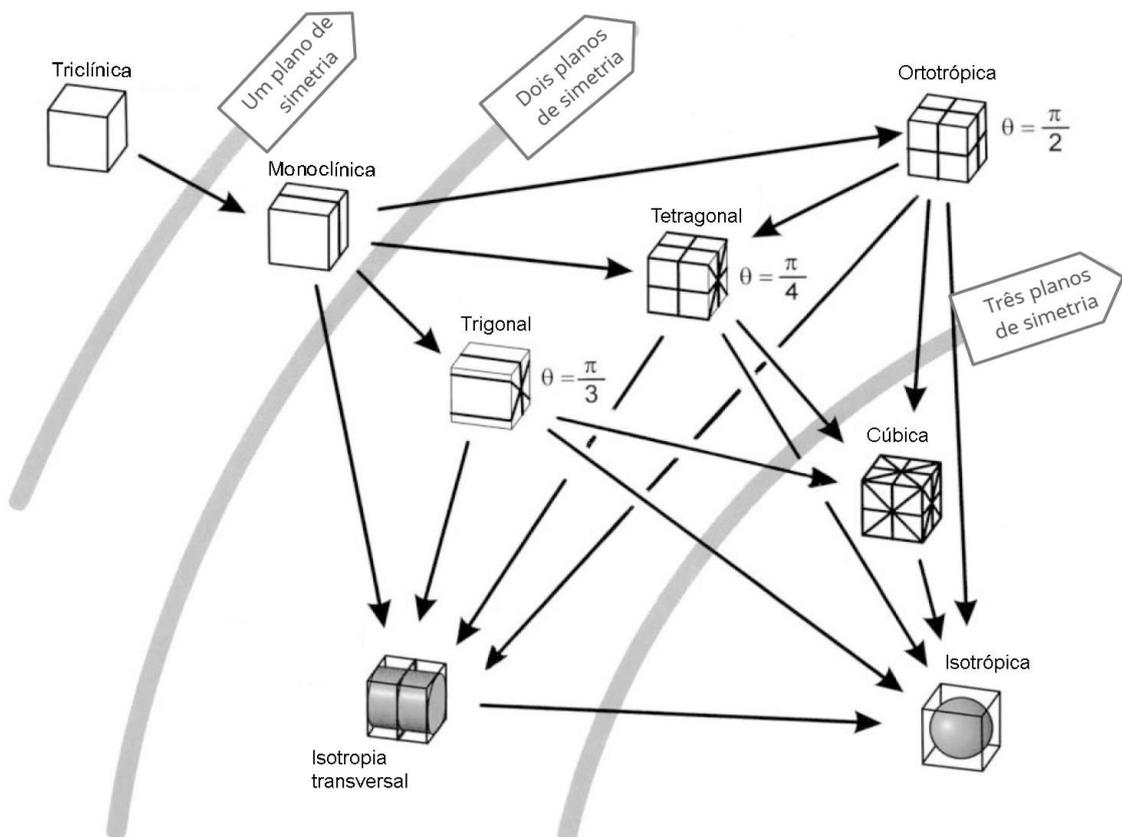
² 'Eigenstrain' é um nome genérico dado pelo autor a deformações não elásticas como expansão térmica, transformação de fase, deformações iniciais, deformações plásticas e deformações inadequadas (MURA, 1987).

3.2.2.3 Fundamentos da elasticidade linear e os materiais isotrópicos

De acordo com Kachanov, Shafiro e Tsukrov (2003), um material anisotrópico³ é dado por: $\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}\sigma_{kl}$ ou $\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl}$, onde: S_{ijkl} e C_{ijkl} são tensores de quarta ordem de elasticidade e rigidez. Para um caso tridimensional, o tensor das constantes elásticas (C) possui 81 componentes, necessários para ligar os tensores de segunda ordem da tensão e da deformação. Contudo, os tensores apresentam simetria, como: $S_{ijkl} = S_{jikl} = S_{ijlk} = S_{klij}$, $C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{klij}$.

Segundo Chadwick et al. (2001), os tensores possuem diferentes níveis de anisotropia, consoantes aos planos de simetria que apresentam. Na Figura 17 autores mostram a existência de 8 tipos de simetria do tensor elástico.

Figura 17 – Representação dos 8 tipos de simetria do tensor elástico



Fonte: Traduzido de Chadwick et al. (2001)

³ Material anisotrópico caracteriza-se por não apresentar simetria material, ou seja, apresenta propriedades diferentes em diferentes direções do seu domínio (GROSS e SEELING, 2006).

O caso de máxima anisotropia é dada no estado triclinico, em que não existe nenhum plano de simetria, tendo o tensor 21 constantes elásticas independentes. A monoclinica apresenta um plano de simetria, reduzindo o tensor elástico para 13 constantes e a ortotrópica que possui dois planos ortogonais de simetria, assim o tensor apresenta apenas 9 constantes elásticas (SANTOS, 2016).

Como visto, o aumento de simetria do tensor elástico, diminui o número de constantes independentes, dessa forma, na simetria trigonal, com 3 planos de simetria e na tetragonal com 5 planos de simetria, existem apenas 6 constantes elásticas independentes. Na simetria transversalmente isotrópica, o material apresenta as mesmas propriedades num mesmo plano e tem 5 constantes elásticas independentes, já na simetria cúbica, o material possui 9 planos de simetria e apenas 3 constantes elásticas independentes (SANTOS, 2016).

Por fim, os materiais isotrópicos são caracterizados por possuírem apenas duas constantes elásticas em qualquer direção do espaço, ou seja, as propriedades do material independem da orientação (ALMEIDA, 2017).

A lei de Hooke generalizada para materiais isotrópicos pode ser escrita com a combinação linear de dois tensores, como mostra a Equação 19.

$$\sigma_{ij} = 3K \left(\frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right) + 2G \left(\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (\text{Equação 19})$$

Onde K representa o módulo de compressibilidade, G o módulo de cisalhamento e δ_{ij} o delta de Kronecher. Para os casos de isotropia, K e G são dados por:

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (\text{Equação 20})$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (\text{Equação 21})$$

Em que E representa o módulo de elasticidade e μ o coeficiente de Poisson.

3.2.2.4 Aplicações da micromecânica em materiais cimentícios utilizando o ultrassom

O ultrassom é uma ferramenta versátil para a caracterização de materiais cimentícios (SALVADOR et al., 2017). Essa técnica tem sido empregada para estudar e analisar a microestrutura nas primeiras idades (VOIGT, SUN e SHAH, 2006; SALVADOR et al., 2017), porosidade (VERGARA et al., 2001; HERNÁNDEZ et al., 2000; HERNÁNDEZ et al., 2002; MAALEJ, LAFHAJ e BOUASIDA, 2013) e permeabilidade (LAFHAJ et al., 2006) em pastas, argamassas e concretos.

Além disso, ela pode ser associada a modelagem micromecânica com o objetivo de avaliar as propriedades elásticas de pastas e argamassas, como mostram os estudos realizados Hernández et al. (2002) que aplicaram o modelo bifásico de Mori-Tanaka, relacionando a porosidade com a velocidade de ultrassom. Em estudos seguintes, Hernández et al. (2006a) formularam um modelo trifásico para caracterização ultrassônica de argamassas. O modelo proposto foi aplicado pelos autores (HERNÁNDEZ et al., 2006b) levando em consideração a influência da fração de volume do agregado miúdo e dos poros e as constantes elásticas da matriz e das inclusões na velocidade ultrassônica. Os resultados desses estudos mostram que o volume e a geometria dos poros e o volume e a geometria da areia podem influenciar na velocidade de pulso ultrassônico, e que a porosidade da argamassa pode ser estimada com um erro médio de 10%.

Jeong e Hsu (1996) propuseram um método não destrutivo para estimar quantitativamente as variações nas propriedades dos materiais devido à porosidade em cerâmicas avançadas. O método é baseado na relação entre a velocidade ultrassônica e a micromecânica. Com base nas velocidades medidas nas amostras e inseridas no modelo micromecânico, pode-se estimar o volume de poros e a partir disso, a densidade aparente e as constantes elásticas puderam ser determinadas.

Maalej (2010) estudou a caracterização da porosidade em pastas cimentícias correlacionando a porosidade com a velocidade ultrassônica com base na micromecânica e experimentalmente. Vários modelos micromecânicos foram adotados na pesquisa e a estrutura porosa foi modelada por poros esféricos embutidos em uma matriz não porosa.

3.3 CONSIDERAÇÕES DA SEÇÃO

O módulo de elasticidade está relacionado a interação interatômica e caracteriza-se pela maior ou menor rigidez dos materiais. Em compósitos é um parâmetro que está relacionado a características como: natureza, tipo, fração volumétrica e dimensão dos constituintes. Pode ser analisado por meio de ensaios estáticos ou dinâmicos. O módulo de elasticidade dinâmico é dimensionado por meio de ensaios não destrutivos que garantem a integridade das amostras e celeridade aos ensaios.

Os ensaios não destrutivos podem ser relacionados a modelos de cálculo, como a micromecânica, para prever comportamentos de compósitos. Por meio da relação entre velocidade de ultrassom, da densidade e modelos de homogeneização é possível prever propriedades como: módulo de elasticidade, porosidade e resistência de materiais compostos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

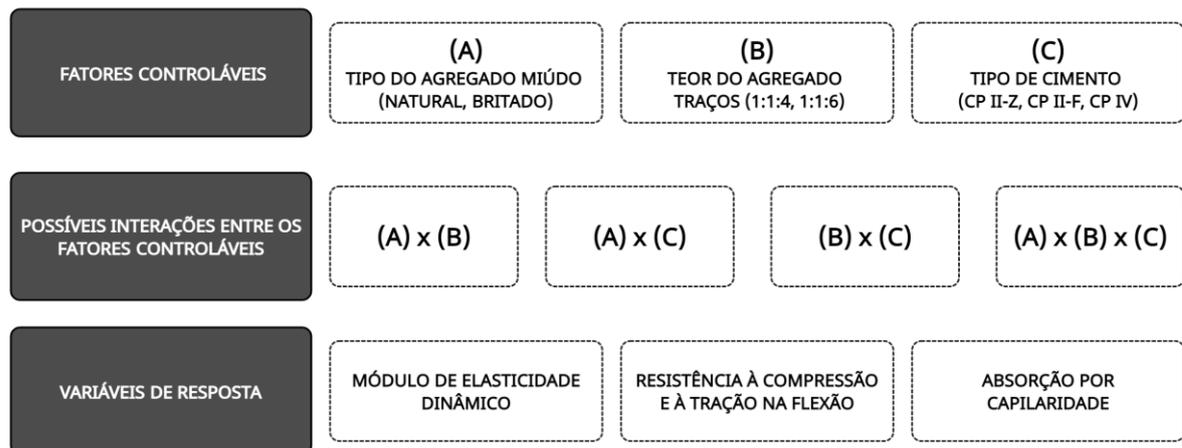
Neste item descreve-se a metodologia empregada na pesquisa, contendo suas estratégias de execução, caracterização dos materiais, bem como as técnicas e procedimentos adotados.

Como o objetivo deste estudo é analisar como os tipos de materiais empregados na composição das argamassas podem influenciar no módulo de elasticidade dinâmico desse material, o projeto experimental está focado basicamente na medição da velocidade de pulso de ultrassom e na frequência de vibração das ondas longitudinais das amostras. Ensaios de porosidade, densidade e resistência à compressão e à tração na flexão também foram realizados, uma vez que essas propriedades estão diretamente relacionadas com o módulo de elasticidade. Além disso, as etapas de aplicação do modelo micromecânico é descrito.

4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foram fabricadas 12 dosagens de argamassas mistas, produzidas utilizando cimento, cal e areia, variando o tipo de cimento e o agregado miúdo e suas proporções. Com base nas variáveis controláveis foram definidas as possíveis interações entre elas, como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Fatores controláveis, suas interações e as variáveis de resposta



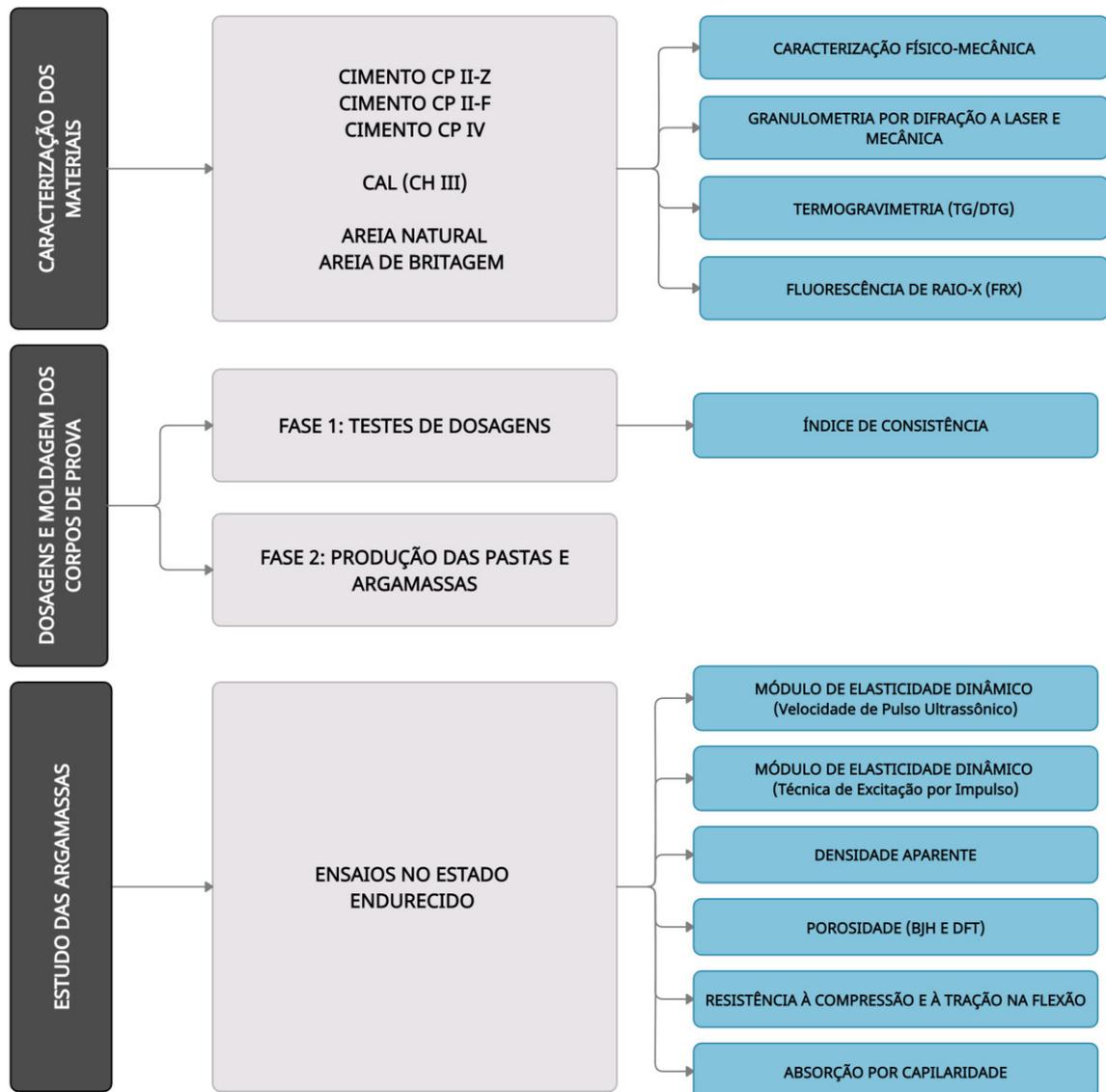
Fonte: Autor (2022)

Na sequência, foram analisadas as propriedades físicas e químicas dos materiais e selecionado o método de dosagem, o qual foi dividido em duas etapas: testes e produção.

Após a produção dos corpos de prova e o tempo de cura, realizaram-se os ensaios mecânicos para análise do módulo de elasticidade dinâmico, porosidade, densidade, absorção por capilaridade e resistência à compressão e à tração na flexão.

O planejamento do programa experimental baseou-se nas etapas apresentadas no fluxograma da Figura 19.

Figura 19 – Etapas do programa experimental



Fonte: Autor (2022)

4.1.1 Caracterização dos Materiais

Os materiais empregados no estudo são oriundos de amostra tomada como referência para todo o trabalho. Considerando que os cimentos compostos são os mais utilizados no preparo de argamassas, foram selecionados os cimentos (CP II Z, CP II F e CP IV), cal hidratada (CH III) e dois tipos de agregado miúdo (areia natural e areia de britagem) para sua composição.

Tendo em vista a importância das propriedades intrínsecas dos materiais, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados na confecção das pastas e argamassas.

4.1.1.1 *Aglomerantes*

De acordo com o exposto, os cimentos e a cal utilizados no estudo foram submetidos à caracterização física e química, seguindo as normas vigentes, conforme Tabela 1 e Tabela 3.

Verifica-se na Tabela 1 que os cimentos atendem aos requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018) em relação à finura (resíduo retido na peneira nº 200). O ensaio de determinação de finura por permeabilidade ao ar (método Blaine) foi realizado, no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional, de acordo com a NBR 16372 (ABNT, 2015).

O método de adsorção de nitrogênio (BET) foi realizado no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da UNILA, utilizando aparelho da marca *Quantachrome*, modelo NOVA 3200e. Para análise da superfície específica dos cimentos e da cal utilizados nos ensaios, adotou-se procedimento descrito por Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016) para cimento anidro, que consiste em desgaseificação por 16h a 40°C à vácuo, para posterior medições de adsorção de nitrogênio.

Tabela 1 – Caracterização física dos cimentos e da cal

Ensaio	Norma técnica	Resultado CP II Z 32	Resultado CP II F 32	Resultado CP IV 32	Resultado Cal CH III
Finura (material retido na peneira nº 200)	NBR 11579 (ABNT, 2013)	1,12% ≤ 10	1,74% ≤ 10	0,78% ≤ 8	-
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	0,95 g/cm ³	0,90 g/cm ³	0,87 g/cm ³	0,69 g/cm ³
Massa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)	2,97 g/cm ³	2,87 g/cm ³	2,85 g/cm ³	2,14 g/cm ³
Superfície específica (BET)	-	6.390 m ² /g	4.034 m ² /g	5.026 m ² /g	16.923 m ² /g
Finura Blaine	NBR 16372 (ABNT, 2015)	3.810 cm ² /g	3.900 cm ² /g	3.850 cm ² /g	6.560 cm ² /g
Superfície específica CP II Z + CH III (BET)	-	8.403 m ² /g	8.575 m ² /g	8.484 m ² /g	-

Fonte: Autor (2022)

Conforme visto na Tabela 1, os resultados de superfície específica (BET) são bem maiores do que aqueles do método Blaine, uma vez que o primeiro mede a área superficial dos poros/microporos e o segundo mede apenas a área específica considerando as rugosidades e grandes poros abertos na extremidade das partículas (GOBBI, 2014). Ainda, Taylor (1997) afirma que o método BET apresenta resultados duas a três vezes superiores aos apresentados pelo método Blaine.

Para avaliação do tamanho das partículas dos aglomerantes foi utilizada a técnica de granulometria a laser, por meio de um analisador de distribuição do tamanho de partículas modelo CILAS 1190, disponível no LADEMA.

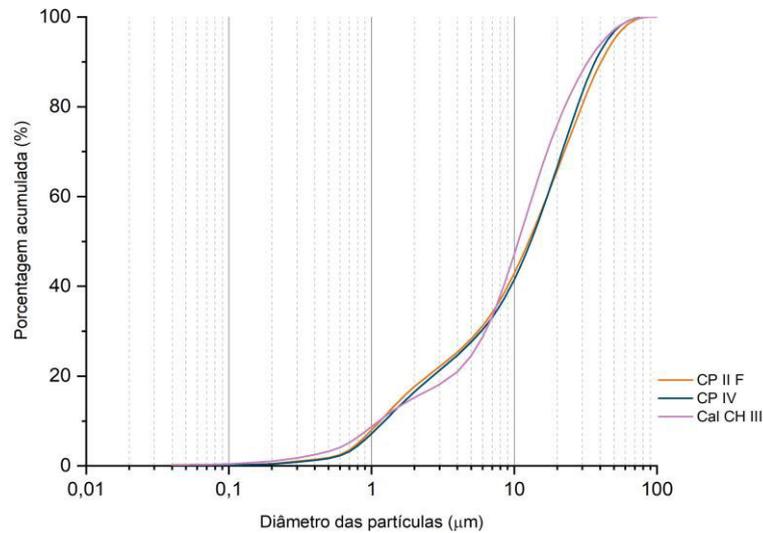
A Tabela 2⁴ mostra os valores D₁₀, D₅₀ e D₉₀ obtidos pela granulometria a laser. Sendo assim, vemos que 50% (D₅₀) das partículas de cimento são menores do que 12,64 µm para o CP II F e do que 13,07µm para o CP IV. Para a cal, tem-se 50% das partículas menores do que 10,74 µm. A distribuição granulométrica dos aglomerantes pode ser verificada na Figura 20.

Tabela 2 – Distribuição das partículas dos aglomerantes

Material	D ₁₀ (µm)	D ₅₀ (µm)	D ₉₀ (µm)
CP II F	1,15	12,64	40,60
CP IV	1,23	13,07	36,86
Cal CH III	1,13	10,74	32,69

Fonte: Autor (2022)

⁴ Não foi possível realizar a granulometria no cimento CP II Z, pois o equipamento não estava operante até o momento da finalização da pesquisa.

Figura 20 – Distribuição das partículas por granulometria a laser nos aglomerantes

Fonte: Autor (2022)

Para determinação da composição química dos cimentos e da cal foi utilizada a técnica de espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX), por meio de espectrômetro Rigaku, modelo ZSX Mini II, disponível no Laboratório de Raios X (LRX) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Os resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 3.

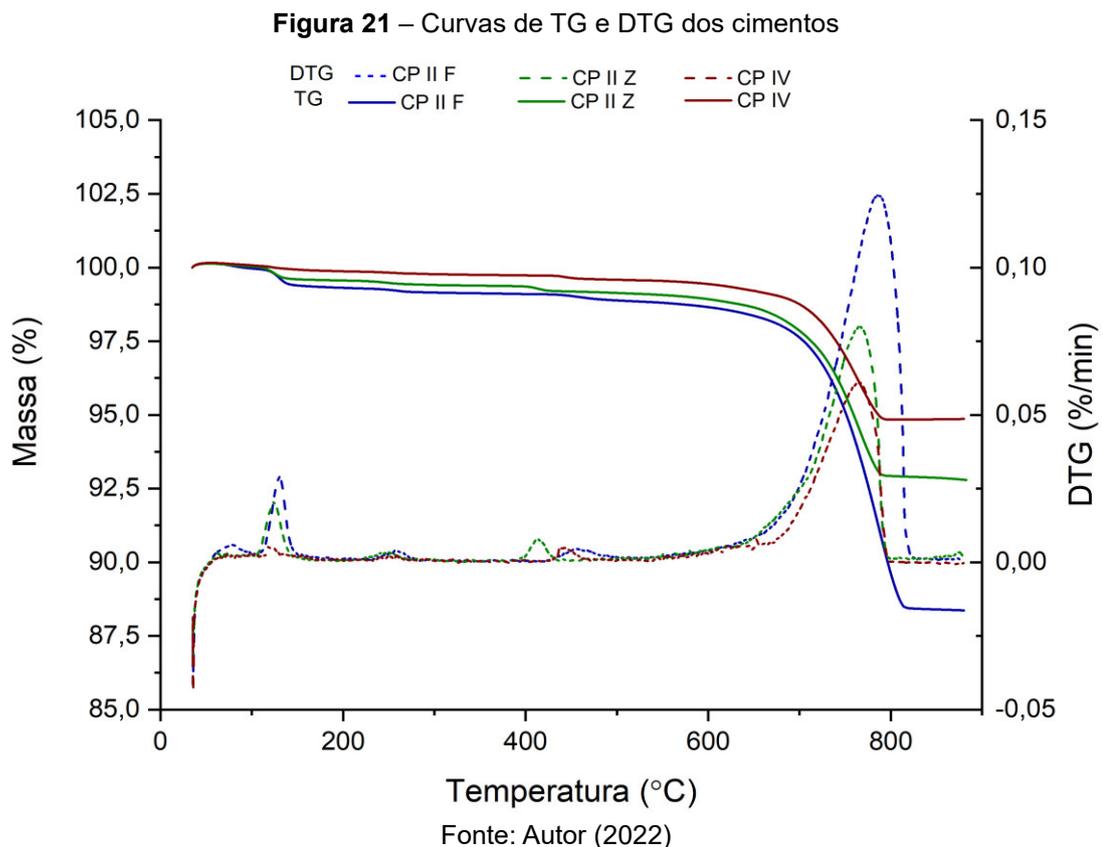
Tabela 3 – Composição química, em óxidos, dos cimentos e da cal por FRX

Material	Óxidos (%)											
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	PF
CP II Z	22,92	0,24	5,73	2,72	<LQ	5,54	51,53	0,21	1,26	0,18	3,17	6,94
CP II F	17,42	0,17	3,35	2,09	<LQ	1,95	60,27	<LQ	0,80	0,25	3,36	10,58
CP IV	26,69	0,30	6,74	1,87	0,39	2,77	53,92	0,13	0,65	0,23	2,23	4,62
Cal CH III	5,78	<LQ	0,20	0,14	<LQ	25,68	40,12	<LQ	<LQ	<LQ	0,13	26,94

Fonte: Autor (2022)

Com base nos resultados da Tabela 3, os cimentos atendem ao requisito da NBR 16697 (ABNT, 2018) em relação a porcentagem de massa de trióxido de enxofre (SO₃) ≤ 4,5%, além do teor de perda ao fogo (≤ 8,5 para o CP II Z, ≤12,5 para o CP II F e ≤ 6,5 para o CP IV). Considerando que a cal possui teor de CaO igual a 40,12%, de acordo com Carasek, Cascudo e Scartezini (2001), ela é classificada como dolomítica, ou seja, possui teor de CaO ≤ 65%.

Os cimentos anidros também foram analisados por termogravimetria (TG/DTG⁵), o qual foi realizado no LADEMA – UNILA, em analisador térmico da marca *PerkinElmer*, modelo STA 8000, utilizando nitrogênio grau analítico (20 mL/min). A taxa de aquecimento foi de 20°C/min entre 35°C e 900°C. Os dados das análises termogravimétricas e as derivadas de primeira ordem foram calculadas por meio do *software OriginPro®*. Os resultados são mostrados na Figura 21.



Pode-se observar que, para os cimentos analisados, há três picos principais observados nas curvas de DTG. O primeiro pico entre 35°C e 150°C corresponde à água livre presente e a desidratação de sulfato de cálcio dihidratado (gipsita). No intervalo de 400°C e 600°C percebe-se um segundo pico relacionado à desidroxilação do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que se decompõe formando $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. O terceiro pico ocorre entre 600°C e 850°C, referindo-se a descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO_3), formando o óxido de cálcio (CaO) e gás carbônico (CO_2).

⁵ TG/DTG: termogravimetria e termogravimetria derivada.

O pico identificado na faixa de 200°C a 300°C referente à decomposição da singenita $[K_2Ca(SO_4).H_2O]$, segundo Quarcioni 2008, pode estar vinculado à formação de pelotas no cimento anidro durante o período de estocagem dos cimentos.

As perdas de massa e suas relações com as faixas de temperatura e compostos de cada cimento podem ser verificadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Análise termogravimétrica dos cimentos (TG/DTG)

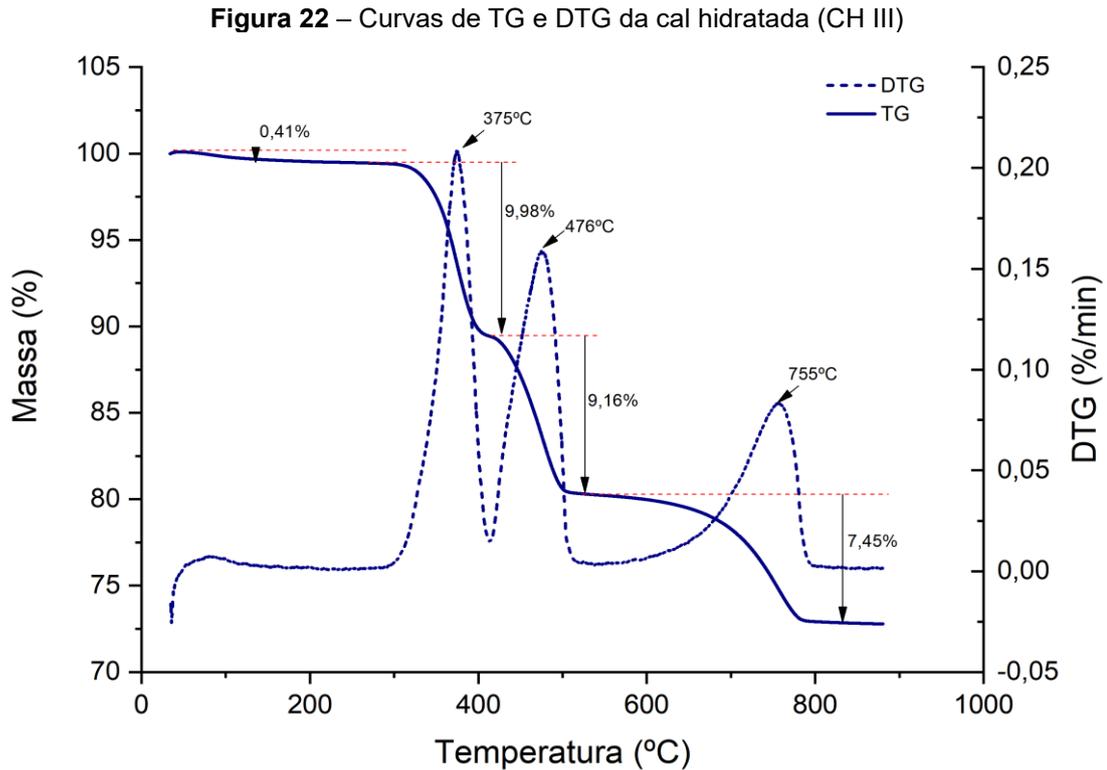
Amostra	Perda de massa total (%)	Perda de massa parcial (%)	Massa residual (%)	Faixa de temperatura (°C)	Composto associado
CP II Z	7,21	0,52	92,79	< 200	CaSO ₄ .2H ₂ O (gipsita)
		0,41		400 – 600	Ca(OH) ₂ (portlandita)
		6,28		650 – 850	CaCO ₃
CP II F	11,75	0,82	88,25	< 200	CaSO ₄ .2H ₂ O (gipsita)
		0,45		400 – 600	Ca(OH) ₂ (portlandita)
		10,48		650 – 850	CaCO ₃
CP IV	5,30	0,26	94,70	< 200	CaSO ₄ .2H ₂ O (gipsita)
		0,30		400 – 600	Ca(OH) ₂ (portlandita)
		4,74		650 – 850	CaCO ₃

Fonte: Autor (2022)

A perda de massa total dos cimentos, calculada pela diferença entre a massa a 100 °C e a 900 °C, foi de 7,21% no cimento CP II Z \leq 8,5% exigido por norma e de 5,30% no cimento CP IV, inferiores ao limite de perda ao fogo de \leq 6,5% preconizado pela NBR 16697 (ABNT, 2018). O cimento CP II F apresentou perda de massa total de 11,75%, ficando abaixo do limite exigido de \leq 12,5% pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Com base na análise da TG/DTG da cal (Figura 22), verifica-se que a amostra apresenta uma perda de massa inicial de 0,41% (entre 35°C e 200°C) referente à umidade. Na faixa de temperatura entre 300°C e 400°C há desidroxilação da brucita $[Mg(OH)_2]$, entre 400°C – 500°C a perda de massa corresponde a desidroxilação do hidróxido de cálcio $(Ca(OH)_2)$ e na faixa de 600°C a 800°C ocorre a decomposição do carbonato de cálcio $(CaCO_3)$.

As perdas de massa e suas relações com as faixas de temperatura e compostos podem ser verificadas na Tabela 5.



Fonte: Autor (2022)

Tabela 5 – Análise termogravimétrica da cal (TG/DTG)

Amostra	Perda de massa total (%)	Perda de massa parcial (%)	Massa residual (%)	Faixa de temperatura (°C)	Composto associado
Cal CH-III	27	0,41	73	35 – 200	-
		9,98		300 – 400	Mg(OH) ₂
		9,16		400 – 500	Ca(OH) ₂
		7,45		600 – 800	CaCO ₃

Fonte: Autor (2022)

4.1.1.2 Agregados

Como agregado miúdo foi empregado areia quartzosa natural, oriunda do Rio Paraná, com jazida situada na região de Guaíra - PR e a areia proveniente de britagem (pó de pedra) de origem basáltica, oriunda da cidade de Matelândia - PR. A granulometria foi executada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) por agitação mecânica realizada no Laboratório de Construção Civil da UDC – Medianeira.

Para padronizar o diâmetro máximo dos agregados, o lote inicial passou por peneira com diâmetro de 2,40 mm. As porcentagens retidas e passantes

acumuladas foram obtidas pela média de duas porções de areia. Os dados do ensaio podem ser visualizados no APÊNDICE A.

As características físicas dos agregados encontram-se na Tabela 6 e suas curvas granulométricas são apresentadas na Figura 23, juntamente com os limites estabelecidos pela norma BS 1200 (1976) para agregado miúdo para argamassas.

Tabela 6 – Características físicas dos agregados

MATERIAL		Areia Natural	Areia Britada
Ensaio	Norma técnica	Resultado	Resultado
Dimensão máxima característica	-	1,20 mm	2,40 mm
Módulo de finura	-	1,33	2,60
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,60 g/cm ³	1,79 g/cm ³
Massa específica ¹		2,43 g/cm ³	2,64 g/cm ³
Massa específica ²	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,44 g/cm ³	2,73 g/cm ³
Massa específica ³		2,45 g/cm ³	2,91 g/cm ³
Absorção de água	NBR NM 30 (ABNT, 2001)	1,26 %	1,17 %
Umidade superficial	NBR 9775 (ABNT, 2011)	4,70 %	3,62 %
Teor de argila e materiais friáveis	NBR 7218 (ABNT, 2010)	0,00%	1,00%

¹ do agregado seco
² do agregado saturado superfície seca
³ aparente

Fonte: Autor (2022)

A areia de britagem apresenta índices mais elevados do que a areia natural, ficando na ordem de 11,87% maior em relação à massa unitária, 18,77% maior nas massas específicas e 95,5% maior com relação à finura. Essas diferenças contribuirão para uma possível elevação da densidade de massa das argamassas.

Com relação à absorção de água, os agregados naturais apresentaram maior absorção do que os britados (7,69% a mais). Esse resultado pode estar relacionado a finura da areia natural, sendo que a quantidade de partículas finas é maior no agregado natural adotado nesta pesquisa.

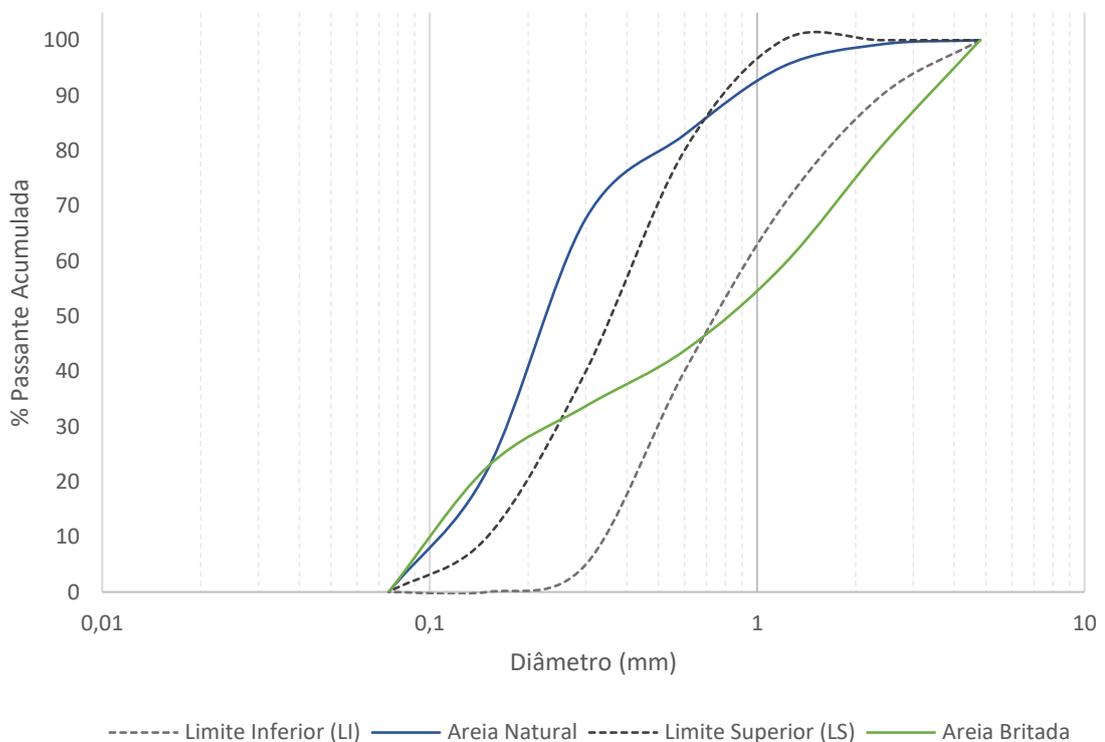
Uma das formas de caracterizar a areia é por meio do seu módulo de finura, conforme indicado por Bauer e Sousa (2005) e apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Classificação quanto ao módulo de finura

Areia	Módulo de finura
Grossa	$MF > 3,00$
Média	$2,00 \leq MF \leq 3,00$
Fina	$MF < 2,00$

Fonte: Bauer e Sousa (2005)

De acordo com o exposto, a areia natural pode ser classificada como fina ($MF = 1,33$) e uniforme ($C_u = 2,25 < 5$), já a areia britada caracteriza-se como média ($MF = 2,60$) e uniformidade média ($C_u = 12$).

Figura 23 – Distribuição granulométrica dos agregados

Fonte: Autor (2022)

É possível observar na Figura 23, que as areias se encaixam parcialmente na faixa de limites estabelecidos pela norma BS 1200 (1976). Percebe-se que apenas a fração mais grossa da areia natural se encaixa nos limites da norma, o restante da curva está fora do intervalo recomendado, ou seja, sua curva está quase toda deslocada para uma fração menor de partículas. A areia britada apresenta uma faixa de grãos mais finos e uma parcela de grãos maiores do que os limites estabelecidos pela norma.

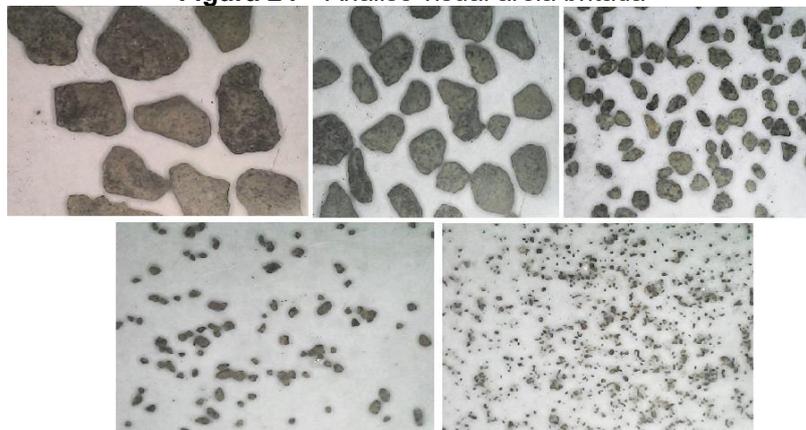
Segundo Tavares Junior (2018), partículas finas podem prejudicar a trabalhabilidade das misturas, uma vez que essas partículas possuem maior área específica e acabam absorvendo uma maior quantidade de água, diminuindo assim a água disponível para ajudar na mistura. Além disso, uma graduação ruim do agregado pode influenciar na densidade, na resistência e no módulo de elasticidade dos compósitos. Ainda, de acordo com Mehdipour e Khayat (2017), a presença de finos pode acarretar uma maior porosidade devido à elevada necessidade de água.

A análise dos parâmetros de forma foi realizada a partir da separação das partículas por meio de peneiramento mecânico. Os grãos de areia foram dispostos aleatoriamente sobre uma folha branca e a aquisição das imagens deram-se por meio de microscópio digital USB, o qual permite que imagens sejam realizadas com a câmera de um computador.

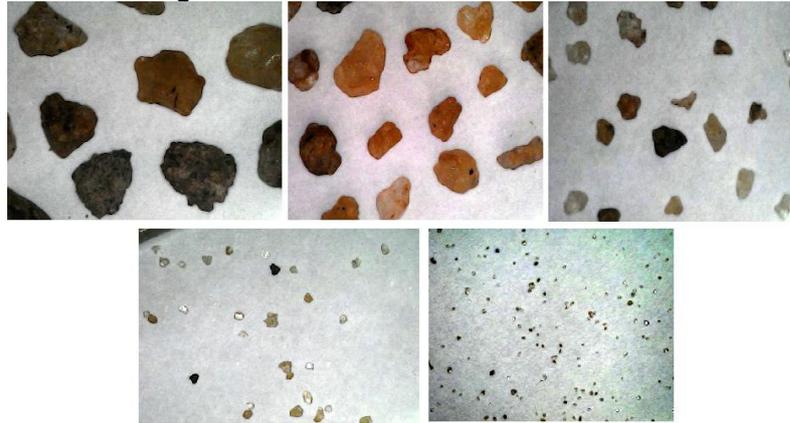
Conforme orientação da NBR 7389-1 (ABNT, 2009), foram separados 100 grãos para frações que representam de 5% a 15% da amostra total. E 500 grãos quando a fração representa mais de 15% da amostra. Devido à dificuldade de contabilizar as partículas menores, essas foram lançadas aleatoriamente de forma a garantir um valor expressivo de grãos.

Após aquisição das imagens, realizou-se tratamento utilizando o *software* de domínio público *ImageJ*, o qual fornece os parâmetros de forma das partículas. Na sequência, os dados foram tratados em planilha de processamento de dados. A Figura 24 e a Figura 25 mostram as imagens captadas pelo microscópio digital USB nas frações retidas nas peneiras 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm, respectivamente.

Figura 24 – Análise visual areia britada



Fonte: Autor (2022)

Figura 25 – Análise visual da areia natural

Fonte: Autor (2022)

A Tabela 8 apresenta os valores médios de forma (F_{forma}), arredondamento (A_r) e esfericidade (E_s) de cada fração analisada. Os valores foram obtidos por meio da análise de imagens utilizando o *software ImageJ*.

Tabela 8 – Valores médios de forma, arredondamento e esfericidade dos grãos

Fração (mm)	Areia natural			Areia britada		
	F_{forma}	A_r	E_s	F_{forma}	A_r	E_s
2,40	0,75	0,70	0,79	0,72	0,64	0,67
1,20	0,72	0,68	0,72	0,72	0,67	0,72
0,60	0,74	0,63	0,70	0,76	0,63	0,69
0,30	0,72	0,64	0,79	0,80	0,67	0,75
0,15	0,81	0,61	0,74	0,92	0,57	0,69

Fonte: Autor (2022)

Como forma de caracterizar os grãos dos agregados utilizados na composição das argamassas, utilizou-se as classificações sugeridas por Powers (1953) e pela NBR NBR 7389-1 (ABNT, 2009).

Constatou-se que as partículas de areia natural (2,40 mm) são muito arredondadas, pois possuem índice igual a 0,70. Já as demais partículas, tanto da areia natural quanto da areia britada, podem ser consideradas apenas arredondadas, uma vez que possuem índice entre 0,49 – 0,70.

Com relação a esfericidade, Araújo, Bicalho e Tristão (2015) apud Rittenhouse⁶ (1943), definiram que a esfericidade pode variar de 0 a 1, afirmando que na prática esses valores vão de 0,45 em partículas alongadas a 0,97 para partículas

⁶ RITTENHOUSE, G. Transportation and deposition of heavy mineral. Geological **Society of America Bulletin**. 1943. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1130/GSAB-54-1725>.

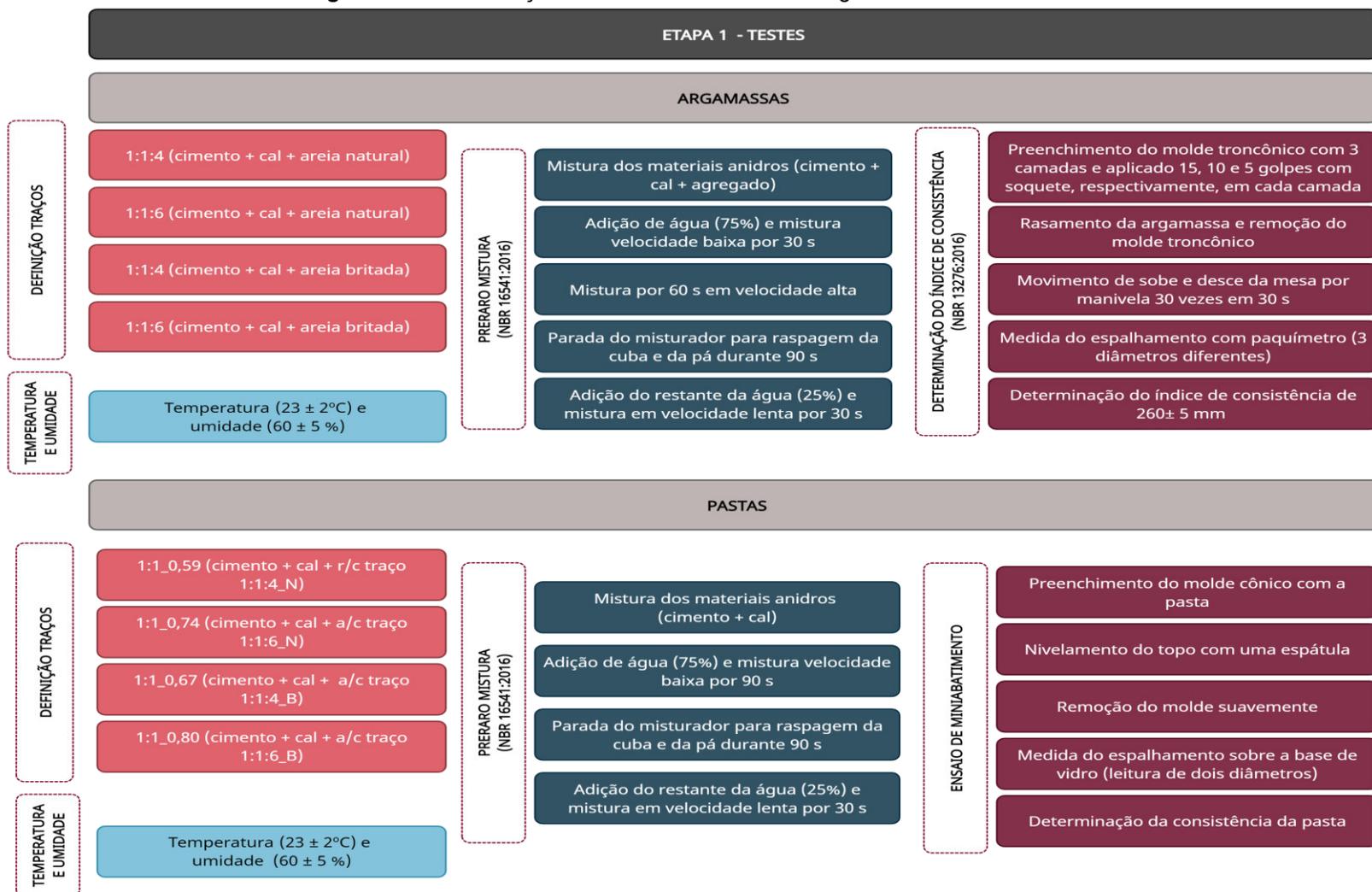
muito esféricas. Levando em consideração essas colocações, pode-se caracterizar os grãos com uma média esfericidade, sendo que as frações 2,40 mm (agregado natural) e 0,30 mm (areia natural e britada) tendem a uma esfericidade alta.

De maneira geral, pode-se caracterizar a areia natural com partículas arredondadas e alta esfericidade, enquanto os grãos de areia britada caracterizam-se como arredondadas e esfericidade média.

4.1.2 Dosagem e Produção das Pastas e Argamassas

A etapa de dosagem foi dividida em duas etapas: testes e produção. Na etapa dos testes, a determinação das proporções dos materiais componentes das argamassas foi realizada por meio de dosagens experimentais. As misturas foram preparadas conforme orientações da NBR 16541 (ABNT, 2016) e aceitas em função do índice de consistência ($260 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$), conforme NBR 13276 (ABNT, 2016). Os passos utilizados estão descritos na Figura 26.

Figura 26 – Estruturação da fase de testes das dosagens



Fonte: Autor (2022)

Com relação ao preparo das pastas, os traços são oriundos da matriz das argamassas, utilizando assim, a mesma quantidade de cimento, cal e água. Suas misturas seguiram os mesmos passos do preparo das argamassas, no entanto, aumentou-se o tempo de mistura na velocidade baixa e excluiu-se a mistura em velocidade alta, uma vez que as pastas eram muito fluidas e perdia-se material que era lançado para fora da cuba da argamassadeira.

A consistência das pastas foi analisada pelo ensaio de miniabatimento de Kantro, uma vez que esse ensaio é simples, rápido e envolve uma pequena quantidade de material. As dosagens e as consistências das argamassas utilizadas na pesquisa podem ser verificadas na Tabela 9, bem como para as pastas na Tabela 10.

Tabela 9 – Dosagens das argamassas

Nº	Amostra	Traço em volume	Quantidade de materiais (kg)				Relação a/agl	IC (mm)
			cimento	cal	areia	água		
1	ARG114C1N	1:1:4	0,417	0,417	1,667	0,490	0,59	260
2	ARG114C2N	1:1:4	0,417	0,417	1,667	0,490	0,59	263
3	ARG114C3N	1:1:4	0,417	0,417	1,667	0,490	0,59	265
4	ARG114C1B	1:1:4	0,417	0,417	1,667	0,560	0,67	260
5	ARG114C2B	1:1:4	0,417	0,417	1,667	0,560	0,67	265
6	ARG114C3B	1:1:4	0,417	0,417	1,667	0,560	0,67	264
7	ARG116C1N	1:1:6	0,312	0,312	1,875	0,460	0,74	262
8	ARG116C2N	1:1:6	0,312	0,312	1,875	0,460	0,74	261
9	ARG116C3N	1:1:6	0,312	0,312	1,875	0,460	0,74	258
10	ARG116C1B	1:1:6	0,312	0,312	1,875	0,500	0,80	263
11	ARG116C2B	1:1:6	0,312	0,312	1,875	0,500	0,80	265
12	ARG116C3B	1:1:6	0,312	0,312	1,875	0,500	0,80	264
114 e 116: proporções C1: cimento CP II Z C2: cimento CP II F C3: cimento CP IV				N: areia natural B: areia britada a/agl: relação água/aglomerante IC: índice de consistência				

Fonte: Autor (2022)

Tabela 10 – Dosagens das pastas

Nº	Amostra	Quantidade de materiais (kg)			Relação a/agl	Consistência (mm)
		cimento	cal	água		
1	P-C1_0,59	0,417	0,417	0,490	0,59	79
2	P-C2_0,59	0,417	0,417	0,490	0,59	80
3	P-C3_0,59	0,417	0,417	0,490	0,59	95
4	P-C1_0,67	0,417	0,417	0,560	0,67	131
5	P-C2_0,67	0,417	0,417	0,560	0,67	123
6	P-C3_0,67	0,417	0,417	0,560	0,67	134
7	P-C1_0,74	0,312	0,312	0,460	0,74	136
8	P-C2_0,74	0,312	0,312	0,460	0,74	161
9	P-C3_0,74	0,312	0,312	0,460	0,74	158
10	P-C1_0,80	0,312	0,312	0,500	0,80	164
11	P-C2_0,80	0,312	0,312	0,500	0,80	143
12	P-C3_0,80	0,312	0,312	0,500	0,80	168

C1: cimento CP II Z
C2: cimento CP II F
C3: cimento CP IV

a/agl: relação água/aglomerante

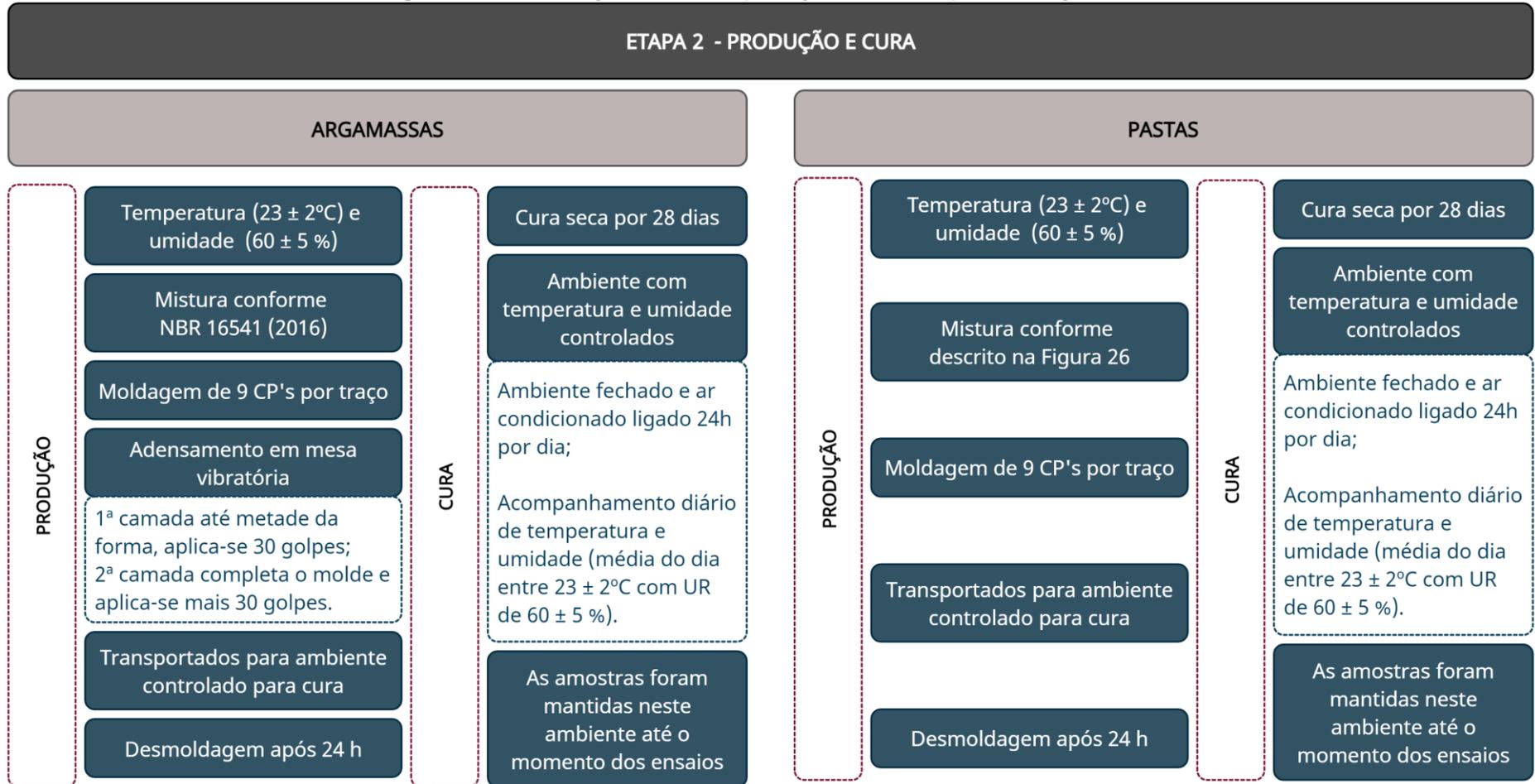
Fonte: Autor (2022)

Para garantir as proporções dos traços 1:1:4 e 1:1:6 (cimento: cal: agregado), em volume, manteve-se a quantidade de material, variando assim os tipos de cimento e os tipos e proporções de agregado, conforme o traço. Além disso, a quantidade de água para cada dosagem foi ajustada para que todas as amostras tivessem uma consistência dentro do intervalo de 260 ± 5 mm.

A fim de conseguir manter a temperatura e a umidade dentro do estabelecido (23 ± 5 °C e UR de 60 ± 5 %), ligava-se o refrigerador de ar climatizando o ambiente e realizava-se o controle por termômetro. Esse controle foi realizado durante todo o processo (teste e produção, cura e durante a execução dos ensaios mecânicos). O controle completo pode ser observado no APÊNDICE B.

Na segunda etapa (Figura 27), as argamassas foram produzidas de acordo com as dosagens pré-definidas nos testes e moldadas em corpos de prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm.

Figura 27 – Estruturação da fase de produção e cura das pastas e argamassas



Fonte: Autor (2022)

4.1.3 Análise das Propriedades Mecânicas

Após a fase de produção dos corpos de prova e do período de cura de 28 dias, foram realizados os ensaios no estado endurecido, conforme mostra a Tabela 11, que apresenta as normas utilizadas, a idade de realização dos ensaios e o número de corpos de prova (CP's) ensaiados para cada dosagem, totalizando 108 corpos de prova para argamassas e 108 para pastas.

Tabela 11 – Resumo dos ensaios no estado endurecido

Ensaio	Referência normativa	Corpos de prova			Idade (dias)
		Quantidade (argamassa)	Quantidade (pasta)	Dimensão (cm)	
Módulo de elasticidade dinâmico (VPU)	NBR 15630 (ABNT, 2009)	9	9	4 x 4 x 16	28
Módulo de elasticidade dinâmico (TEI)	ASTM E1876 (ASTM, 2015)	9	9	4 x 4 x 16	28
Resistência à tração na flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	3	3	4 x 4 x 16	28
Resistência à compressão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	6 metades (3 CP's)	6 metades (3 CP's)	4 x 4 x 16	28
Distribuição do tamanho de poros (BJH/DFT)	-	3	3	4 x 4 x 16	28
Densidade	NBR 13280 (ABNT, 2005)	3	3	4 x 4 x 16	28
Absorção por capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005)	3	3	4 x 4 x 16	28

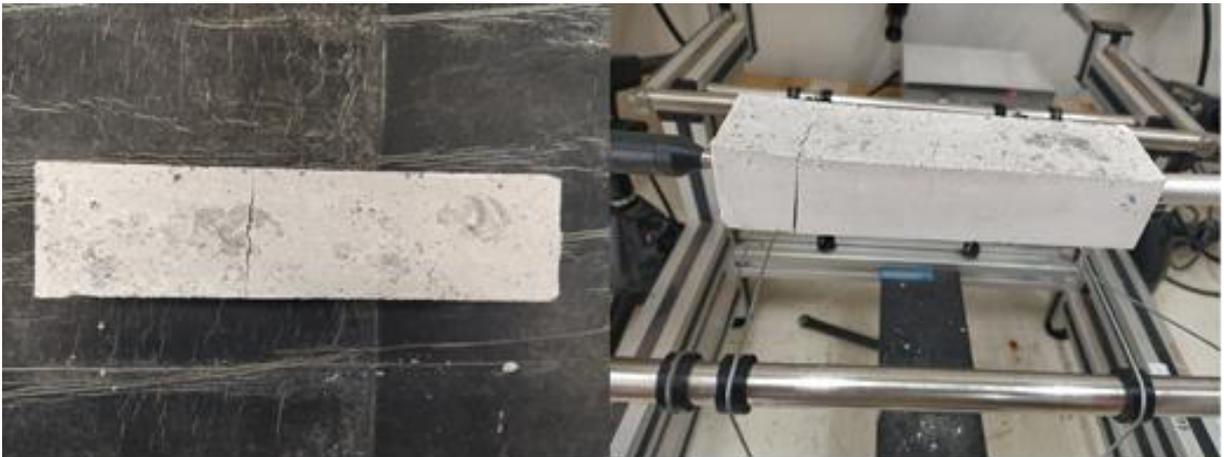
Fonte: Autor (2022)

Para cada dosagem foram moldados 9 corpos de prova, os quais foram separados aleatoriamente para a execução dos ensaios no estado endurecido. Como pode ser visto na Tabela 11, todas as amostras foram utilizadas para análise do módulo de elasticidade dinâmico, tanto para VPU quanto para TEI.

Na sequência, três corpos de prova foram separados para o ensaio de resistência à tração na flexão e resistência à compressão; três amostras para densidade aparente e absorção por capilaridade e, os outros três foram destinados ao ensaio de porosidade.

É importante evidenciar que não foi possível realizar os ensaios no estado endurecido para as amostras P-C3_0,80, dado que aos 28 dias os corpos de prova estavam quebradiços e fissurados ao ponto de não ser possível manuseá-los, como pode ser visto na Figura 28. Essa dosagem foi refeita 3 vezes, sob os mesmos critérios e pelo mesmo operador, no entanto, todas as amostras apresentaram o mesmo comportamento.

Figura 28 – Fissuração apresentada pelas amostras da dosagem P-C3_0,80



Fonte: Autor (2022)

4.1.3.1 *Módulo de elasticidade dinâmico*

O módulo de elasticidade dinâmico foi realizado aos 28 dias por dois métodos: velocidade de pulso ultrassônico (VPU) e técnica de excitação por impulso (TEI). O primeiro foi realizado conforme NBR 15630 (ABNT, 2009) e o segundo, de acordo com a ASTM E1876 (ASTM, 2015). A Figura 29 mostra a dinâmica de cada ensaio.

Figura 29 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico - (a) Velocidade de pulso ultrassônico; (b) Técnica de excitação por impulso



Fonte: Autor (2022)

Para o ensaio de VPU utilizou-se equipamento Ultracon-170. Para dar suporte às amostras fabricou-se caixa em madeira para minimizar as inconsistências que podem ser geradas pelo operador durante o ensaio e como acoplante utilizou-se graxa. Já a TEI foi realizada no *Sonelastic*[®].

4.1.3.2 Resistência à tração na flexão e à compressão

O ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão foi realizado no Laboratório de Construção Civil da UDC – Medianeira. Utilizou-se dispositivo *Rilem* multifuncional da *Solotest* para executar os ensaios, bem como prensa elétrica com indicador digital EMIC Modelo PCE100C, conforme mostra a Figura 30.

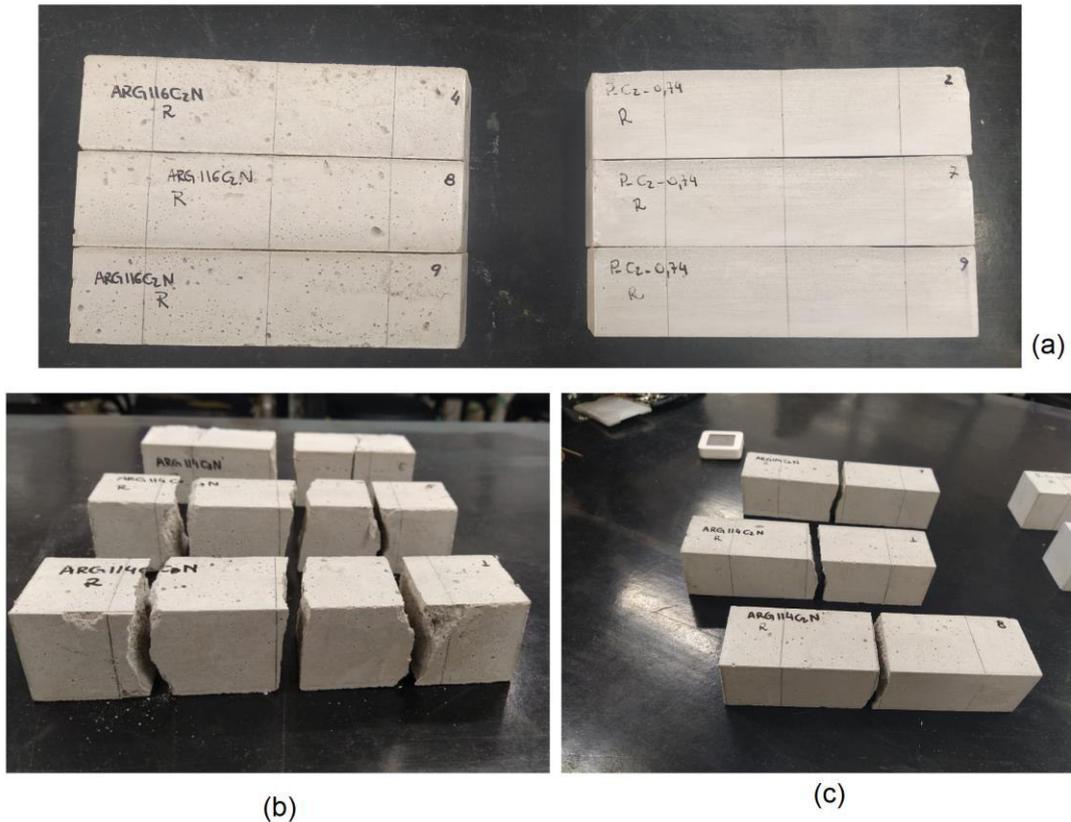
Figura 30 – Ensaio resistência - (a) Dispositivo Rilem Multifuncional;
(b) Ensaio à tração na flexão; (c) Ensaio à compressão



Fonte: Autor (2022)

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado em 3 corpos de prova para cada dosagem, tanto de pasta, quanto de argamassa, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005). Em conformidade com a mesma norma, as metades obtidas na ruptura foram utilizadas para o ensaio de resistência à compressão, conforme Figura 31.

Figura 31 – Ensaio resistência - (a) Amostras de pasta e argamassa; (b) Amostras rompidas à compressão; (c) Amostras rompidas à tração na flexão



Fonte: Autor (2022)

4.1.3.3 *Densidade aparente*

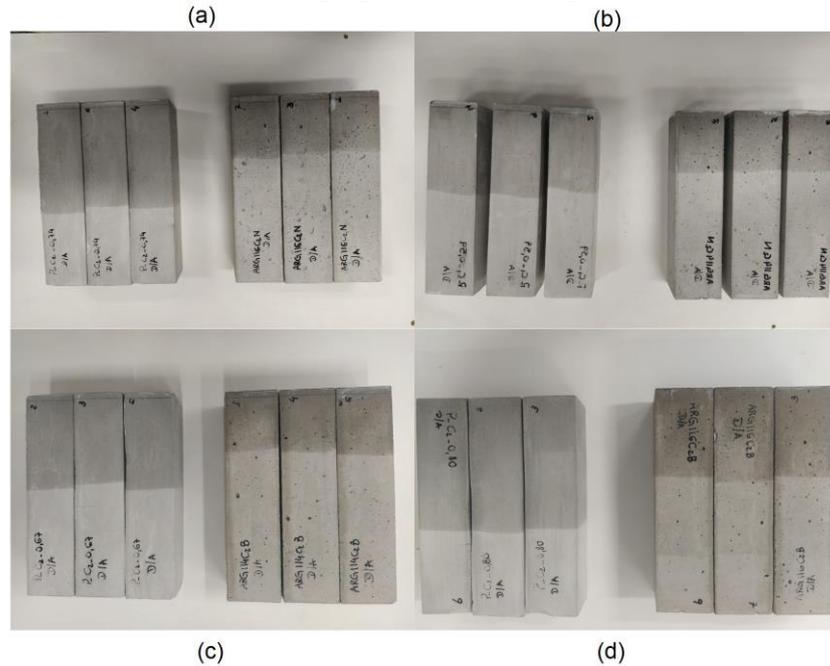
Esse ensaio foi realizado de acordo com a NBR 13280 (ABNT, 2005), aos 28 dias, em 3 corpos de prova. As amostras foram pesadas e, com o auxílio de um paquímetro, determinou-se a altura, a largura e o comprimento da amostra em duas posições. Na sequência, a densidade aparente foi calculada por meio da relação entre a massa e o volume da amostra.

4.1.3.4 *Absorção por capilaridade*

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado em conformidade com a NBR 15259 (ABNT, 2005). Utilizou-se os 3 corpos de prova do ensaio de densidade aparente, sendo o ensaio não destrutivo. Na Figura 32 é possível verificar a absorção de água de acordo com o tipo do agregado e o traço da argamassa. Cabe

ressaltar que, as extremidades dos corpos de prova foram lixadas antes de serem colocadas no recipiente com água (altura de 5 mm).

Figura 32 – Ensaio de absorção - (a) Amostras com agregado natural – traço 1:1:4; (b) Amostras com agregado natural – traço 1:1:6; (c) Amostras com agregado britado – traço 1:1:4; (d) Amostras com agregado britado – traço 1:1:6



Fonte: Autor (2022)

Calcula-se a absorção de água por capilaridade dividindo a variação de massa pela área transversal do corpo de prova que fica em contato com a água, de acordo com a Equação 22:

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (\text{Equação 22})$$

Em que:

A_t é a absorção de água por capilaridade (g/cm^2);

m_t é a massa do corpo de prova aos 10 min e aos 90 min (g);

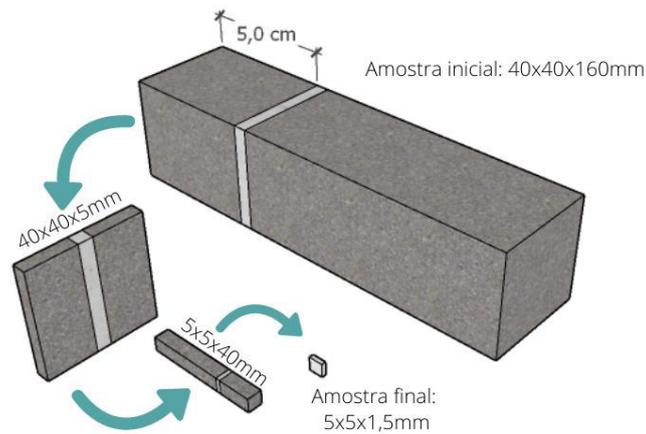
m_0 é a massa inicial do corpo de prova (g);

16 é a área transversal do corpo de prova (cm^2).

4.1.3.5 Distribuição do tamanho de poros

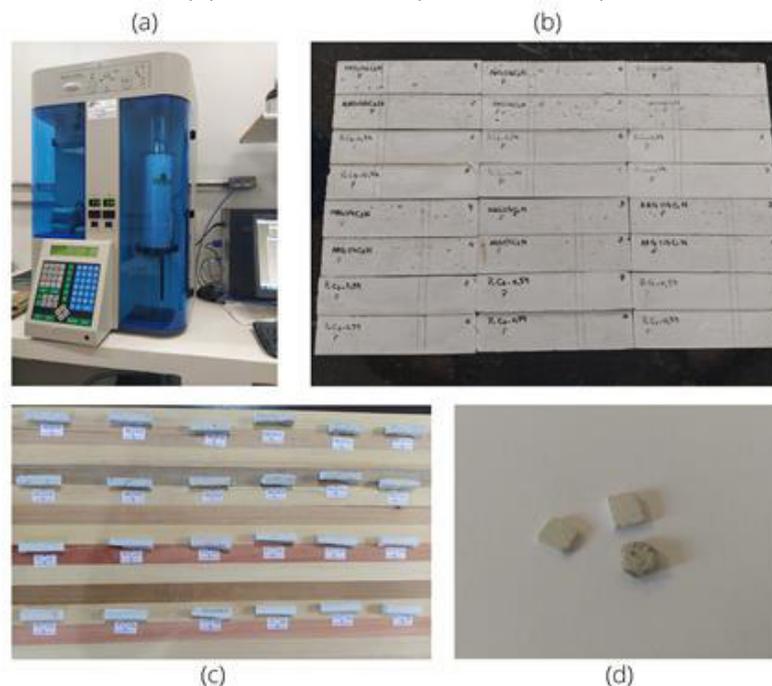
O ensaio foi realizado no LADEMA – UNILA, utilizando aparelho da marca *Quantachrome*, modelo NOVA 3200e. As amostras foram preparadas conforme mostra a Figura 33, sendo levadas ao equipamento amostras com, aproximadamente, 5 x 5 x 1,5 mm, como pode ser visto na Figura 34.

Figura 33 – Preparação de amostras para ensaio de porosidade no BET



Fonte: Autor (2022)

Figura 34 – Ensaio de distribuição do tamanho de poros - (a) Equipamento Quantachrome; (b) Amostras com marcações para primeira redução; (c) Amostras reduzidas (5 x 5 x 40 mm); (d) Amostras finais (5 x 5 x 1,5 mm)



Fonte: Autor (2022)

Essas amostras foram retiradas de 3 corpos de prova, sendo escolhidas apenas 2 amostras por dosagem para a realização do ensaio. Foram colocadas em tubo de ensaio e desgaseificadas à vácuo por 24h, a 40°C. Após esse período, as amostras foram transferidas para porta amostras e submersas em nitrogênio líquido, a 77K para a aquisição das curvas de adsorção e das características dos poros (SCRIVENER, SNELLINGS e LOTHENBACH, 2016).

As isotermas de adsorção obtidas foram analisadas utilizando-se os métodos BJH e DFT. A distribuição do tamanho de poros é obtida por meio das isotermas, sendo que pelo método DFT é possível identificar microporos (< 2 nm) e pelo método BJH micro e mesoporos (2 nm – 50 nm).

4.2 APLICAÇÃO DA MICROMECAÂNICA

Como a proposta do trabalho é estudar o efeito que as alterações nos materiais constituintes das argamassas podem ter no módulo de elasticidade dinâmico desse material, a metodologia baseou-se em análises experimentais e teóricas.

Para tal buscou-se estabelecer uma relação entre as propriedades dos materiais constituintes das argamassas em função das variáveis pré-definidas, utilizando modelos micromecânicos relacionados com a velocidade de pulso ultrassônico. Sendo assim, esta parte descreve os parâmetros para a estimativa do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas.

4.2.1 Considerações Teóricas

De forma a caracterizar o material compósito a análise teórica será baseada em alguns pressupostos:

- i. Supor que as inclusões possuem o mesmo tamanho, são isotrópicas (possuem as mesmas propriedades físicas, independentemente da direção considerada) e orientadas aleatoriamente;
- ii. O material compósito efetivo foi assumido como isotrópico e com comportamento elástico linear;

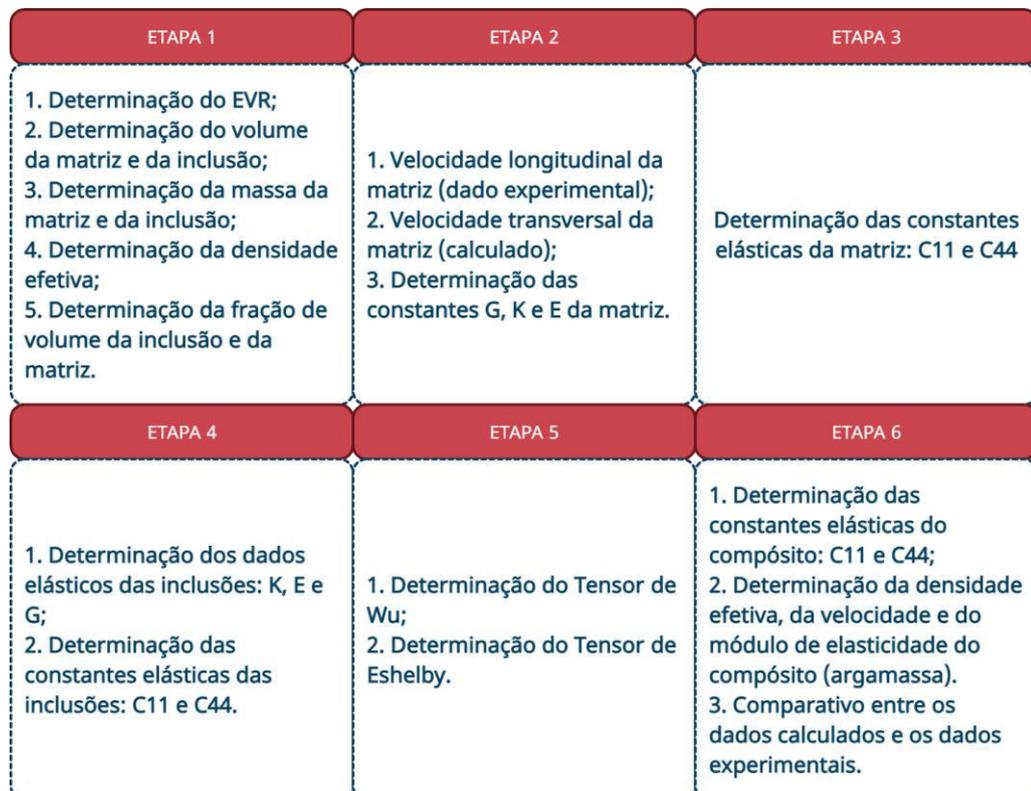
- iii. Ao considerar que a matriz e as inclusão são isotrópicas, o tensor de rigidez é reduzido a duas constantes independentes C_{11} e C_{44} .

Essas hipóteses foram adotadas em estudos como (HERNÁNDEZ et al., 2002; HERNÁNDEZ et al., 2006; BARBOSA, 2010; MAALEJ, LAFHAJ e BOUASIDA, 2013; GIDRÃO, 2015). Os resultados apontados nesses trabalhos foram satisfatórios para análise dos fatores elásticos de materiais cimentícios.

4.2.2 Aplicação do Modelo Micromecânico

Para aplicação da micromecânica várias etapas foram realizadas, conforme mostra a Figura 35. O tamanho do EVR adotado foi de 5 vezes do diâmetro máximo do agregado, conforme Pichler et al. (2013).

Figura 35 – Etapas para aplicação da micromecânica



Fonte: Autor (2022)

Na etapa 1, com base no EVR adotado e nos resultados experimentais, determinou-se volume e massa da inclusão e da matriz, densidade

efetiva e frações volumétricas. Na etapa 2, por meio da velocidade longitudinal coletada durante o ensaio experimental das pastas, calculou-se o módulo de elasticidade da matriz, possibilitando assim, por meio das constantes de *Lamé* determinar K e G.

Por fim, de posse dos valores de E, K e G, as constantes elásticas da matriz foram encontradas: C_{11}^m e C_{44}^m , relacionando a velocidade ultrassônica e a densidade da matriz, conforme Equação 23:

$$\sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} = \text{velocidade longitudinal medida} \quad (\text{Equação 23})$$

$$\sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} = \text{velocidade transversal medida}$$

Na sequência, por meio de pesquisa bibliográfica, os valores de E, G e K dos agregados foram determinados. Com esses valores foi possível estimar as constantes elásticas das inclusões: C_{11}^i e C_{44}^i .

Os tensores de Wu e de Eshelby levam em consideração os aspectos das inclusões, como: forma e orientação. As equações para determinação dos tensores podem ser encontradas em Wu (1966) e Mura (1986). Na análise realizada neste trabalho, comparou-se dados considerando as inclusões como esféricas, esferoides prolatos e oblatos.

Após a determinação das constantes elásticas da matriz, das inclusões e dos tensores, aplicaram-se as Equações 24 e 25 para determinação das constantes do compósito (C_{11} e C_{44}).

$$C_{11} = C_{11}^m + \frac{v^i [C_{11}^i - C_{11}^m - 4/3 (C_{44}^i - C_{44}^m)] (\langle \mathbf{T}_{1111} \rangle + 2 \langle \mathbf{T}_{1122} \rangle)}{v^m + v^i (\langle \mathbf{T}_{1111} \rangle + 2 \langle \mathbf{T}_{1122} \rangle)} + \frac{8/3 v^i (C_{44}^i - C_{44}^m) \langle \mathbf{T}_{1212} \rangle}{v^m + 2v^i \langle \mathbf{T}_{1212} \rangle} \quad (\text{Equação 24})$$

$$C_{44} = C_{44}^m + \frac{2v^i (C_{44}^i - C_{44}^m) \langle \mathbf{T}_{1212} \rangle}{v^m + 2v^i \langle \mathbf{T}_{1212} \rangle} \quad (\text{Equação 25})$$

Determinadas as constantes do compósito, estimou-se o módulo de elasticidade efetivo por meio da Equação 26.

$$E = \frac{C_{44}(3C_{11}-4C_{44})}{C_{11}-C_{44}} \quad (\text{Equação 26})$$

As etapas descritas e os cálculos estão disponíveis no APÊNDICE D.

5. ANÁLISES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Nesta parte são descritos os resultados dos estudos experimentais para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, densidade aparente, absorção por capilaridade, porosidade e resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas e pastas produzidas na pesquisa.

Apresenta-se, em primeiro lugar, os resultados e as análises dos ensaios no estado endurecido. Na sequência realiza-se análise estatística com objetivo de verificar a significância das variáveis adotadas no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas, por meio da ANOVA a um fator (não-paramétrica) pelo teste de *Kruskal-Wallis*, com nível de confiabilidade de 95%, ou seja, as diferenças são consideradas significativas quando o fator $p < 0,05$. Para análise entre os métodos de ensaio adotados para o módulo de elasticidade dinâmico, utilizou-se o teste de *Wilcoxon* para pares combinados. Além disso, mostram-se as correlações estabelecidas entre o módulo de elasticidade dinâmico e as demais propriedades analisadas no estudo, por meio da correlação de *Pearson*.

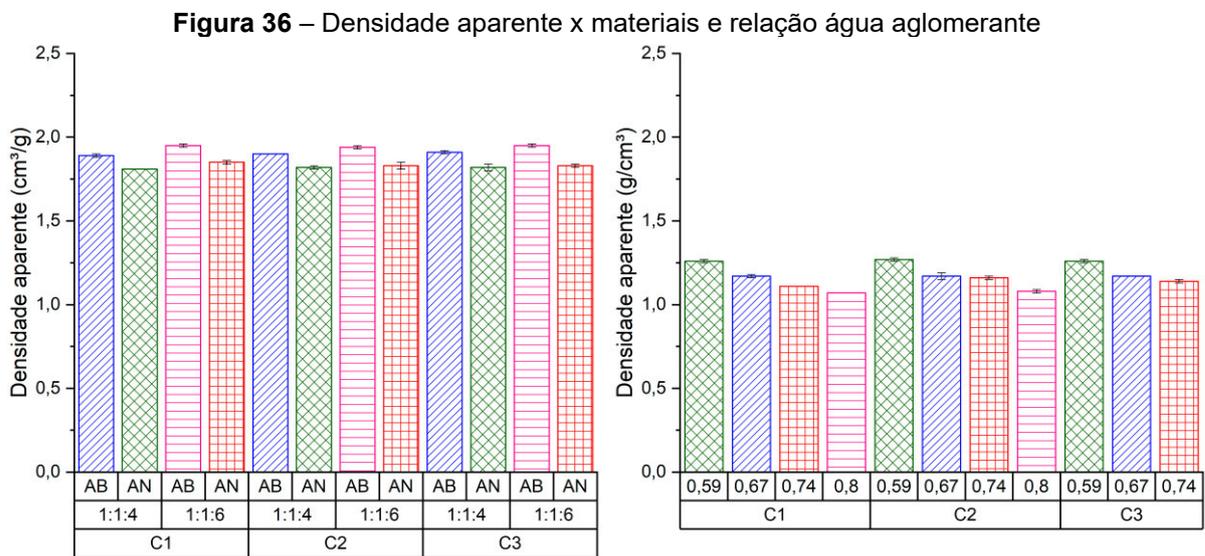
Por fim, é apresentada análise comparativa entre os resultados experimentais e teórico, a fim de avaliar se o modelo micromecânico adotado pode ser aplicado na estimativa do módulo de elasticidade dinâmico.

5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Tendo em vista que as propriedades no estado endurecido são responsáveis pelo desempenho dos revestimentos em uso, os resultados dos ensaios realizados neste estudo para caracterização das argamassas e pastas são apresentados no APÊNDICE C.

Na sequência, as propriedades mecânicas (densidade aparente, resistência à compressão e à tração na flexão, absorção por capilaridade e porosidade) são analisadas, levando em consideração os materiais utilizados na composição das pastas e argamassas, bem como a relação água/aglomerante adotada para a obtenção da consistência dentro do intervalo de 260 ± 5 mm.

Na Figura 36 (a) percebe-se que as argamassas produzidas com agregado britado apresentaram densidade aparente superior às produzidas com agregado natural, independente do teor de agregado utilizado ou do tipo de cimento. Resultado semelhante foi encontrado por Guacelli, Risson e Carbonari (2015) ao analisarem a substituição de areia de extração por areia de britagem para argamassa de revestimento, verificando que quanto maior o teor de agregado britado utilizado na mistura, maior a densidade das argamassas. Nas pastas (Figura 36 (b)), vê-se que a densidade diminui com o aumento da relação água/aglomerante, como esperado, independentemente do tipo de cimento empregado.



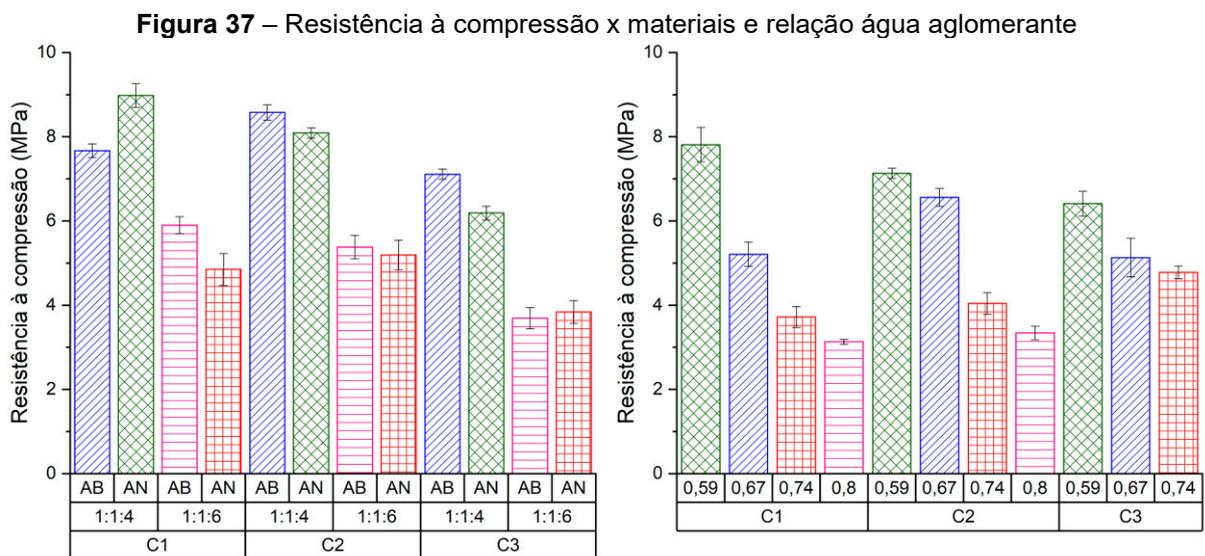
Fonte: Autor (2022)

Ainda, Diogenes e Cabral (2017), verificaram que o tipo do agregado britado pode influenciar na densidade no estado endurecido, uma vez que ao substituir o agregado natural por agregado de britagem de rocha ígnea, verificou densidade maior em argamassas quando usado dois tipos de agregado britado, os quais apresentavam grãos na sua maioria semicirculares, semialongados e subarredados. No entanto, argamassas com os agregados britados com características similares aos do agregado natural (grãos circulares e subarredados), mostraram-se menos densas, diferente do comportamento encontrado neste estudo, em que, mesmo apresentando características dos grãos semelhantes, as argamassas com agregado britado mostraram-se mais densas do que as com agregado natural.

Essa tendência de redução da densidade em argamassas com agregado natural se justifica pela menor massa específica ($2,43 \text{ g/cm}^3$) em relação ao

agregado britado ($2,64 \text{ g/cm}^3$). Além disso, temos uma distribuição granulométrica alternada entre grãos maiores e menores na areia britada, favorecendo o empacotamento dos grãos, uma vez que os grãos menores ocupam os vazios entre os grãos maiores, aumentando assim a compactidade do conjunto.

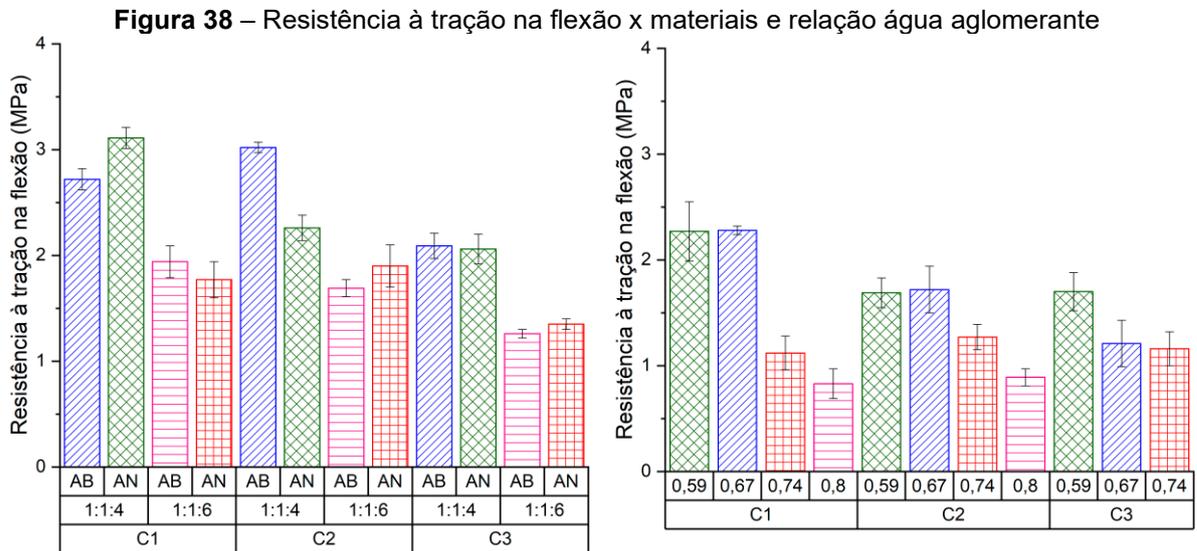
Na Figura 37 (a) têm-se os resultados da resistência à compressão das argamassas, as quais mostraram comportamento semelhante as suas matrizes (pastas), apresentadas na Figura 37 (b). Percebe-se que a resistência nas pastas diminui à medida que aumenta a relação água/aglomerante. Nas argamassas pode-se verificar que os resultados foram superiores nas amostras produzidas com menor quantidade de agregado (1:1:4) e com agregado britado, tirando as amostras produzidas com cimento CP II Z (C1), em que as argamassas com agregado natural apresentaram resistência superior às produzidas com agregado britado, o que pode estar atrelado a um menor volume e tamanho de poros, constatado tanto na baixa absorção apresentada pelas amostras com esse traço (Figura 39), quanto nas relações de volume e tamanho de poros (Figura 43).



Fonte: Autor (2022)

Em estudos realizados substituindo o agregado natural por agregado de britagem (PIVOTTO e ABREU, 2015; GUACELLI, RISSON e CARBONARI, 2015; DIOGENES e CABRAL, 2017) a resistência à compressão foi maior em argamassas com agregado britado aos 28 dias. Esse mesmo comportamento foi verificado por Costa e Silva e Silva (2017), ao substituir a areia natural por resíduo de pedras ornamentais.

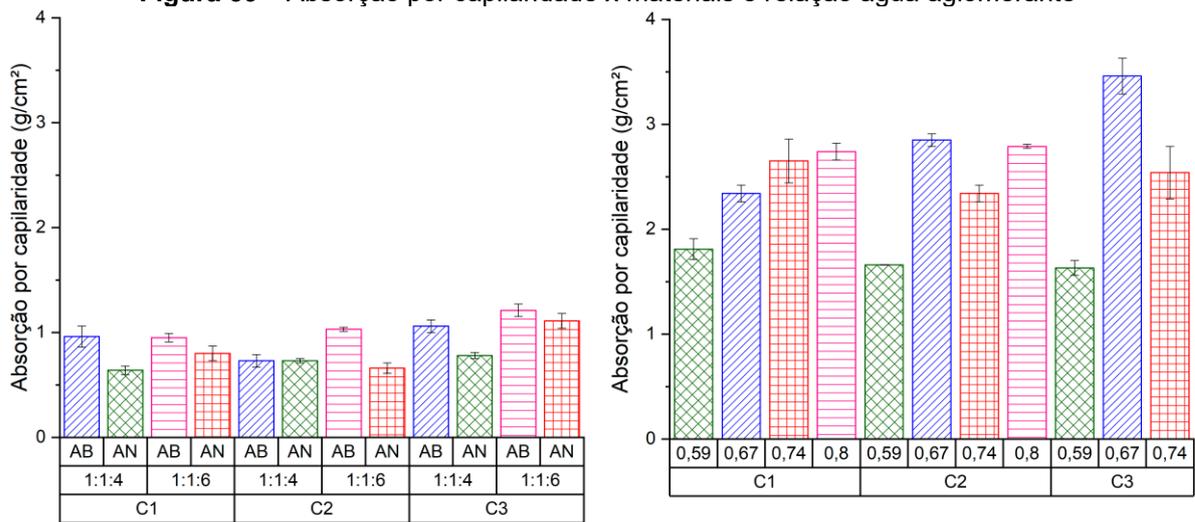
Os resultados da resistência à tração na flexão, Figura 38 (a) e (b), são similares aos obtidos na resistência à compressão, tanto para argamassas quanto para pastas.



Fonte: Autor (2022)

Uma das funções das argamassas de revestimento é a estanqueidade à água. Esse fenômeno pode ser compreendido por meio da movimentação da água pelos capilares das argamassas. Ao substituir a areia natural por areia britada Pivotto e Abreu (2015), verificaram que com o incremento da relação água/aglomerante e com o uso de agregado britado a absorção de água foi maior nas argamassas com essas características. O mesmo comportamento foi encontrado neste estudo, ou seja, percebe-se que há um aumento na absorção conforme aumenta a relação água/aglomerante, tanto nas argamassas, Figura 39 (a), quanto nas pastas, Figura 39 (b). Além disso, as argamassas com agregado britado apresentaram absorção maior do que as amostras com agregado natural.

Figura 39 – Absorção por capilaridade x materiais e relação água aglomerante

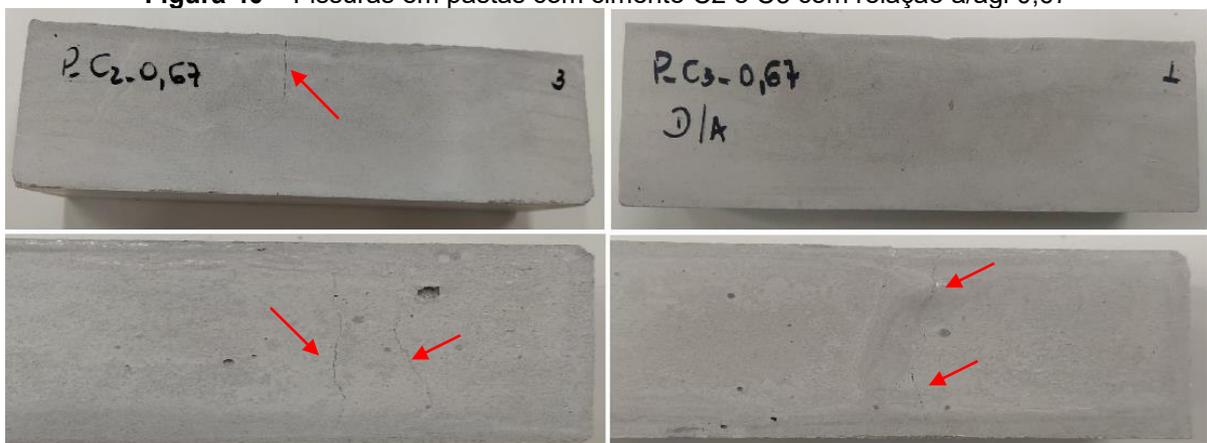


Fonte: Autor (2022)

Segundo Salomão e Bauer (2017), as argamassas com maior consumo de cimento tendem a absorver menos água, comportamento este que pode ser verificado neste estudo.

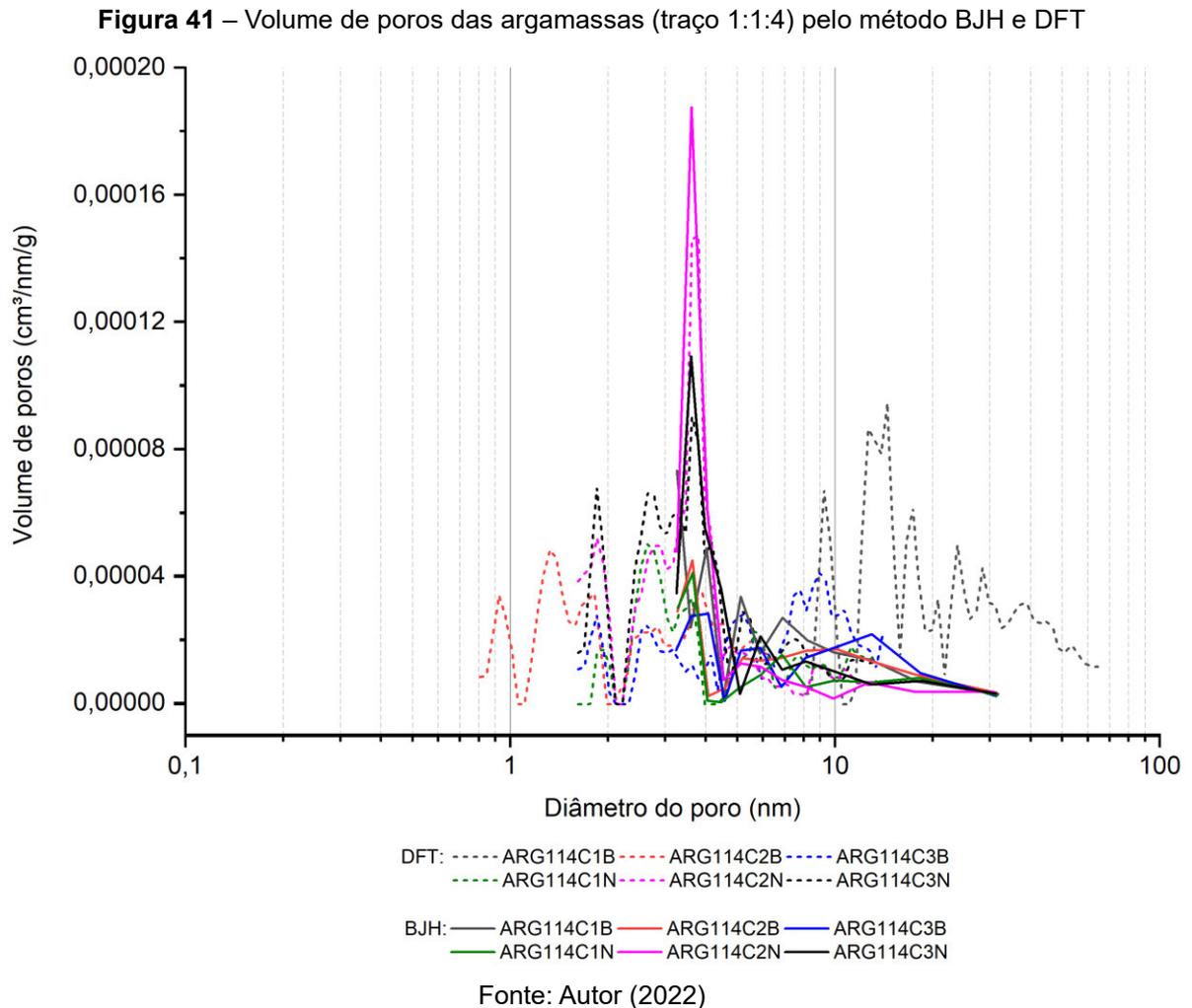
Nas pastas com cimento CP II F (C2) e CP IV (C3) vê-se que as pastas com relação 0,67 apresentaram absorção maior do que as com relação água/aglomerante 0,74. Constatou-se fissuras, possivelmente, devido à retração, em maior quantidade nas amostras confeccionadas com a relação 0,67 (Figura 40) do que com a relação 0,74, para ambos os cimentos. Sendo assim, os resultados do ensaio de absorção das pastas podem ter sido prejudicados.

Figura 40 – Fissuras em pastas com cimento C2 e C3 com relação a/agl 0,67



Fonte: Autor (2022)

Os resultados extraídos da técnica de BET para análise do diâmetro e volume dos poros, pelos métodos BJH e DFT, estão ilustrados na Figura 41 e na Figura 42.



Com relação às argamassas com traço 1:1:4 (Figura 41) verifica-se poros maiores nas amostras com areia britada e cimento C1 (CP II Z) e C3 (CP IV) e menores nas de areia natural. Em relação ao volume de poros, tem-se que as amostras com areia britada apresentaram volume maior do que as amostras com areia natural, para amostras com cimento C1 (CP II Z) e C2 (CP II F). As argamassas com cimento C3 (CP IV) apresentaram o mesmo volume de poros, não importando o tipo de agregado utilizado na composição.

Argamassas com traço 1:1:6 (Figura 42) mostraram diâmetro de poros maiores nas amostras com agregado britado e cimento C1 (CP II Z) e C2 (CP II F) e menores para agregado natural. Quanto ao volume de poros, as argamassas com

agregado britado e cimento C1 (CP II Z) e C3 (CP IV) mostraram ser maiores do que as argamassas com agregado natural, como pode ser verificado na Tabela 12 e na Figura 43.

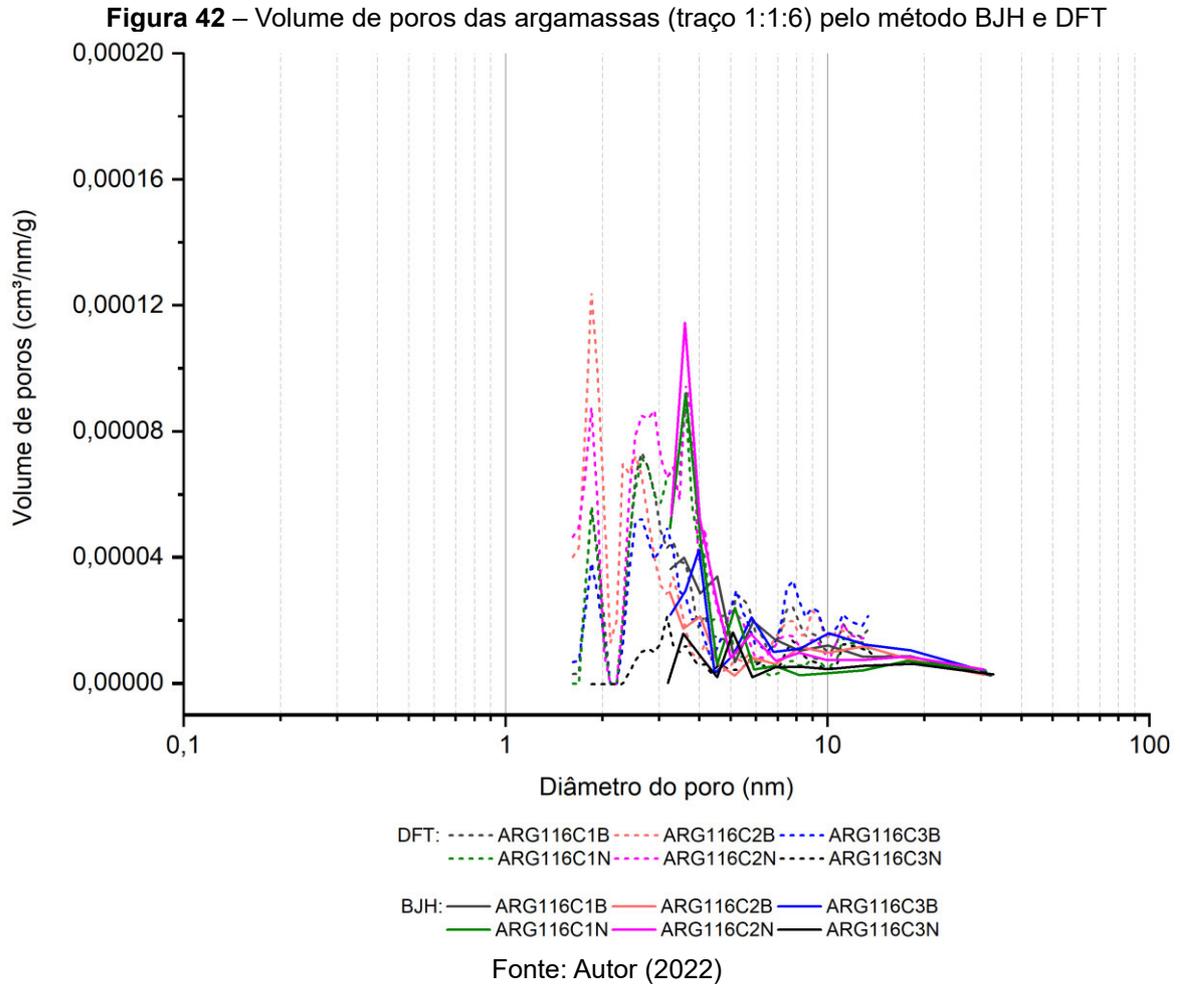
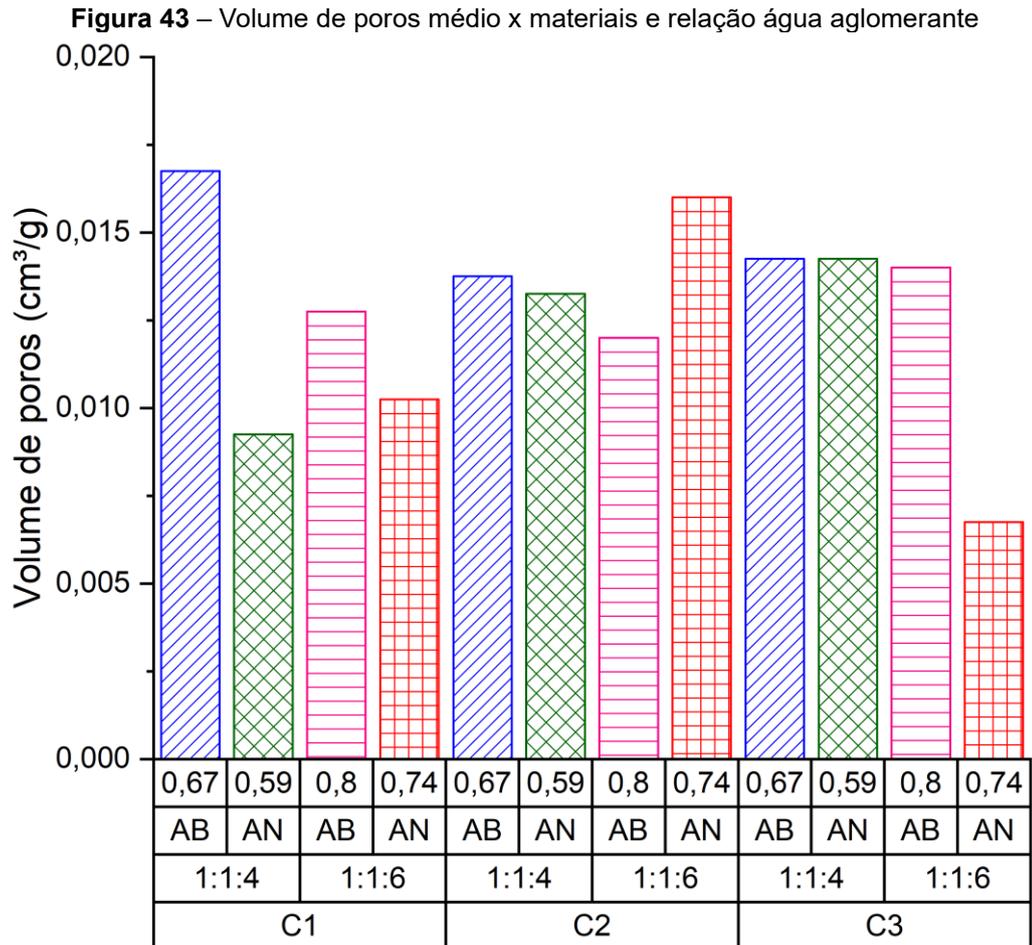


Tabela 12 – Propriedades dos poros

Amostra	S _{BET} (média) (m ² /g)	V _p (média) (cm ³ /g)	D _p (média) (nm)	Amostra	S _{BET} (média) (m ² /g)	V _p (média) (cm ³ /g)	D _p (média) (nm)
ARG114C1B	7.715	0,0168	6,39	ARG116C1B	5.854	0,0128	6,39
ARG114C2B	5.494	0,0138	4,13	ARG116C2B	6.448	0,0120	6,37
ARG114C3B	5.223	0,0143	6,50	ARG116C3B	5.558	0,0140	6,37
ARG114C1N	3.734	0,0093	6,38	ARG116C1N	5.063	0,0103	6,37
ARG114C2N	8.669	0,0133	6,36	ARG116C2N	9.482	0,0160	6,35
ARG114C3N	7.747	0,0143	6,38	ARG116C3N	2.141	0,0068	6,78

Fonte: Autor (2022)



Fonte: Autor (2022)

De maneira geral, pode-se dizer que as argamassas produzidas com agregado britado apresentaram volume de poros maiores do que as produzidas com areia natural. O fato de a técnica do BET analisar apenas microporos e mesoporos pode ter influenciado, uma vez que não foi possível verificar o volume de poros capilares maiores, os quais estão ligados à resistência, permeabilidade e durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014; HILÁRIO, 2019).

5.2 ANÁLISE DE COMPARAÇÃO

As variáveis quantitativas (Ed_{TEI} e Ed_{VPU}) foram submetidos à análise de normalidade por meio do teste de *Shapiro-Wilk* e *Kolmogorov-Smirnov*. Como as variáveis não atenderam ao teste para análises paramétricas, adotou-se análise, entre os diferentes grupos de variáveis independentes e as variáveis dependentes, pelo teste de *Kruskal-Wallis*, seguida pelo teste de comparações

múltiplas de *Dwass-Steel-Critchlow-Fligner*. O nível de significância adotado foi de 0,05 ($p < 0,05$). Os testes foram realizados utilizando o *software* livre *Jamovi*.

Para as variáveis independentes qualitativas têm-se a variável tipo de cimento, dividida em três níveis, cimento tipo 1, 2 e 3 (C1, C2 e C3), a variável tipo de agregado, dividida em areia natural (AN) e areia britada (AB), além do teor de agregado, dividida de acordo com a quantidade utilizada na composição (1:1:4 e 1:1:6).

A Tabela 13 mostra essas variáveis independentes e dependentes ordenadas em uma estatística descritiva que relaciona os níveis dos fatores adotados na pesquisa, com a mediana e o 1º e 3º quartil do módulo de elasticidade dinâmico (TEI e VPU), medidos durante os experimentos.

Tabela 13 – Estatística descritiva relacionando os fatores independentes com o módulo de elasticidade dinâmico

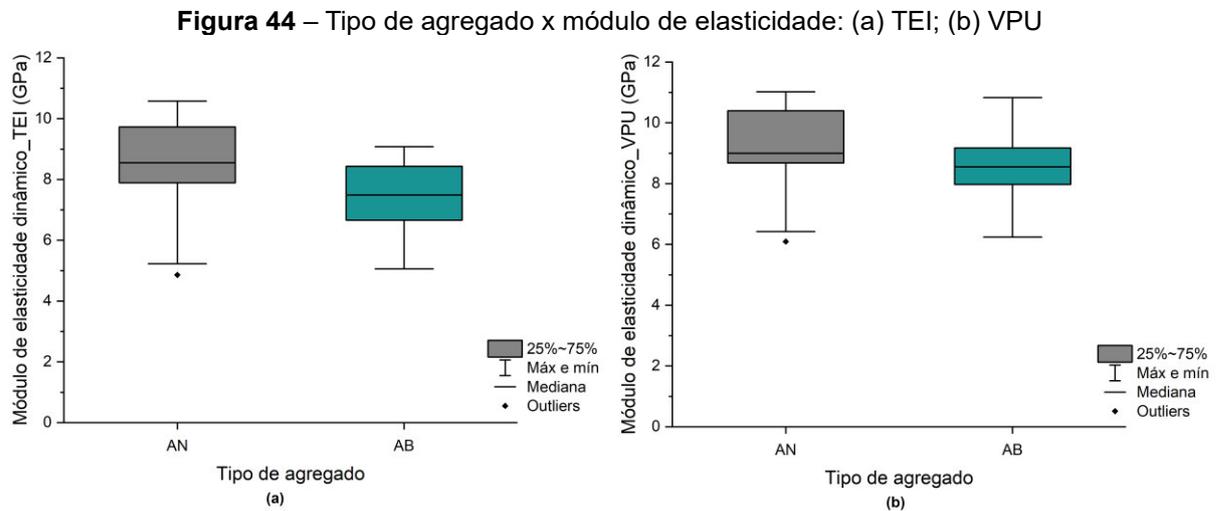
Tipo de cimento	Tipo de agregado	Teor do agregado	N	Ed_TEI		Ed_VPU	
				Mediana (GPa)	1º / 3º quartil (GPa)	Mediana (GPa)	1º / 3º quartil (GPa)
C1	AB	1:1:4	9	8,43	7,20 / 8,73	9,55	9,14 / 10,14
		1:1:6	9	7,53	7,39 / 7,80	8,54	8,45 / 8,69
	AN	1:1:4	9	10,33	10,01 / 10,44	10,91	10,50 / 11,02
		1:1:6	9	7,89	7,87 / 8,05	8,77	8,65 / 8,92
C2	AB	1:1:4	9	8,86	8,70 / 8,94	9,83	9,57 / 9,90
		1:1:6	9	6,65	6,43 / 6,66	8,09	7,90 / 8,18
	AN	1:1:4	9	9,73	9,58 / 9,79	10,39	10,24 / 10,56
		1:1:6	9	8,55	8,49 / 8,77	8,98	8,80 / 9,17
C3	AB	1:1:4	9	7,81	7,45 / 8,15	8,63	8,18 / 9,05
		1:1:6	9	5,68	5,26 / 6,23	6,56	6,44 / 6,58
	AN	1:1:4	9	8,53	8,39 / 8,84	8,93	8,70 / 9,04
		1:1:6	9	5,48	5,33 / 5,68	7,32	6,77 / 7,57

Fonte: Autor (2022)

Com base nos resultados obtidos, analisou-se individualmente a variação do módulo de elasticidade dinâmico (Ed_TEI e Ed_VPU) em relação as variáveis independentes, ou seja, o tipo de agregado, o teor de agregado e o tipo de cimento.

Na Figura 44 (a) relacionando o tipo de agregado com o módulo de elasticidade dinâmico medido pela técnica de excitação por impulso (TEI), observa-se que o módulo de elasticidade dinâmico é maior nas argamassas com areia natural do

que com areia britada, além disso percebe-se uma distribuição levemente assimétrica e um ponto discrepante na areia natural.



Fonte: Autor (2022)

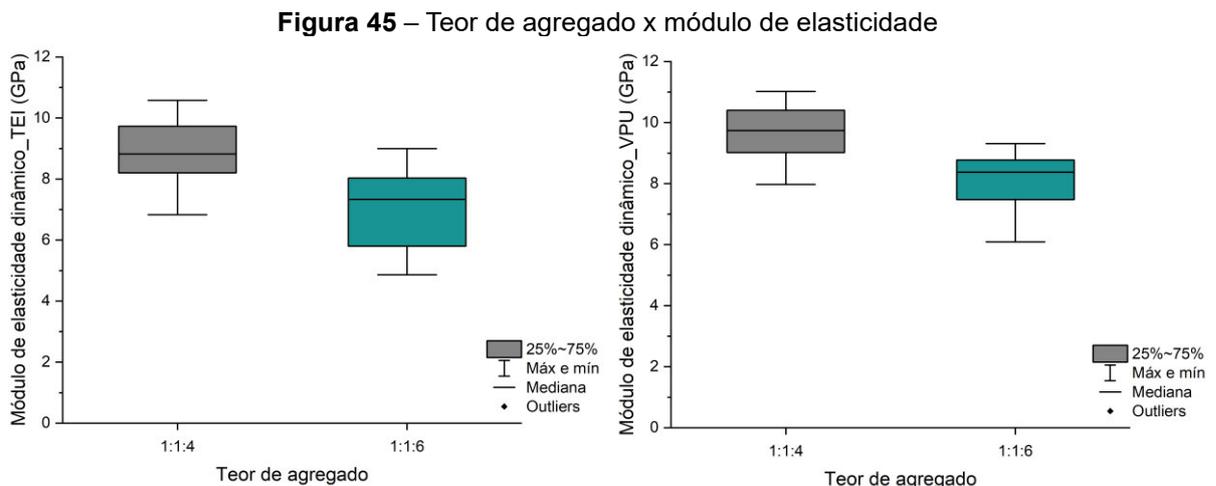
Na Figura 44 (b) verifica-se comportamento semelhante no módulo de elasticidade dinâmico pela velocidade de pulso ultrassônico (VPU), em que as argamassas com areia natural apresentaram maior módulo de elasticidade dinâmico em relação às argamassas com areia britada. Percebe-se uma distribuição assimétrica dos resultados e um ponto discrepante, já na areia britada os resultados mostram-se mais homogêneos.

Sendo assim, pode-se dizer que relacionado ao tipo de agregado, as argamassas com areia natural apresentaram maior módulo de elasticidade dinâmico do que as argamassas com areia britada, independentemente do método de medição utilizado. Diferente do resultado encontrado nesta pesquisa, nos estudos realizados por Guacelli, Risson e Carbonari (2015) e Santos et al. (2019), as argamassas com agregado britado apresentaram maiores módulos de elasticidade dinâmico. A diferença encontrada pode estar relacionada às características e propriedades físicas dos agregados empregados nas misturas. No entanto, Kazmierczak, Rosa e Arnold (2008) ao analisar a influência da adição de filer de areia britada no módulo de elasticidade dinâmico de argamassas de revestimento, não encontraram uma diferença significativa entre os valores do módulo das argamassas com areia natural e com as com adições de filer de areia britada.

Na Figura 45 (a) percebe-se que as argamassas com menor teor de agregado, indiferente do tipo, apresentaram valores do módulo de elasticidade

dinâmico mais homogêneos e maiores em relação a um teor maior de agregado, quando analisado pela técnica de excitação por impulso.

Com relação ao comportamento do módulo de elasticidade dinâmico medido pela velocidade de pulso ultrassônico, Figura 45 (b), percebe-se uma menor heterogeneidade entre os valores obtidos, indiferente do teor de agregado analisado. Assim como na TEI, os traços com o menor teor de agregado (1:1:4) apresentaram módulo de elasticidade dinâmico superior aos traços com maior teor (1:1:6).

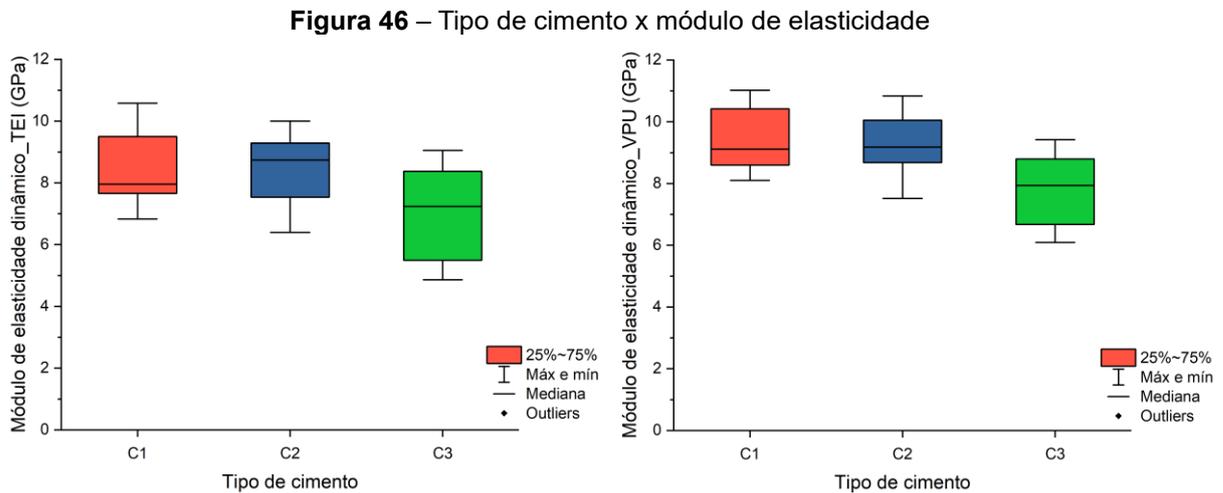


Fonte: Autor (2022)

Dessa maneira, nota-se que o módulo de elasticidade dinâmico teve valores maiores quando o teor do agregado utilizado foi menor, independentemente do método de medição empregado. Assim como indicado por Santos et al. (2019), as argamassas com maior quantidade de aglomerantes e menor teor de agregados apresentaram rigidez superior, em torno de 20%, ou seja, maior módulo de elasticidade dinâmico. Esse comportamento também foi verificado por Silva, Campiteli e Arnold (2008), ao verificarem a correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas mistas.

Ao analisar o módulo de elasticidade dinâmico (TEI) em relação ao tipo de cimento adotado na mistura (Figura 46 (a)), percebe-se que os valores são mais homogêneos quando utilizado o cimento C1 e C2, apresentando maior variabilidade dos dados quando empregado o cimento C3. Ainda, o módulo de elasticidade dinâmico foi maior no cimento C1 e C2 e menor no C3, conforme esperado, devido ao teor de pozolana no CP IV.

Resultados similares são encontrados ao analisar o módulo de elasticidade dinâmico (VPU) em relação ao tipo de cimento empregado (Figura 46 (b)). No entanto, percebe-se uma maior homogeneidade dos dados nas amostras com cimento C2 e uma maior variabilidade entre os dados de C1 e C3.



Fonte: Autor (2022)

Após análise realizada por meio dos gráficos *box-plot*, aplicou-se ANOVA de um fator, pelo teste de *Kruskal-Wallis* com comparações múltiplas, a fim de verificar se as variáveis influenciavam no módulo de elasticidade dinâmico medido, tanto pelo TEI quanto por VPU. Além disso, para as variáveis que apresentaram $p < 0,05$ utilizou-se o *post hoc* de comparação entre pares de *Dwass-Steel-Critchlow-Fligner* (DSCF).

A Tabela 14 mostra os resultados da análise estatística aplicada para verificar se há diferença significativa entre as comparações adotadas. A variável tipo de agregado apresentou diferença estatisticamente significativa entre os níveis AN e AB ($p < 0,001$), tanto para a TEI quanto para VPU. Resultado semelhante foi encontrado ao analisar o teor de agregado, entre os níveis 1:14 e 1:1:6.

Com relação aos tipos de cimento, o teste de *Kruskal-Wallis* apontou que existem diferenças significativas entre eles ($p < 0,001$). A fim de verificar entre quais cimentos há essa diferença, eles foram analisados em pares pelo *post hoc* de *Dwass-Steel-Critchlow-Fligner* (DSCF), constatando-se que existe diferença significativa entre os cimentos C1 – C3 e C2 – C3. No entanto, ao comparar C1 – C2 vê-se que não há diferença estatisticamente significativa entre eles.

Tabela 14 – Análise estatística da influência dos fatores independentes no módulo de elasticidade

Variáveis analisadas		ANOVA a um fator (não-paramétrica)				Comparações múltiplas	
Dependentes	Independentes	Kruskal-Wallis				Dwass-Steel-Critchlow-Fligner	
		χ^2	gl	p	ϵ^2	W	p
Ed_TEI	(Tipo de agregado) AN-AB	15,7	1	< 0,001	0,145	5,6	< 0,001
	(Teor de agregado) 1:1:4 - 1:1:6	44,4	1	< 0,001	0,415	-9,42	< 0,001
	(Tipo de cimento) C1 - C2					0,717	0,868
	(Tipo de cimento) C1 - C3	19,7	2	< 0,001	0,184	-4,539	0,004
	(Tipo de cimento) C2 - C3					-6,164	< 0,001
Ed_VPU	(Tipo de agregado) AN-AB	48,2	1	< 0,001	0,451	-9,82	< 0,001
	(Teor de agregado) 1:1:4 - 1:1:6	9,07	1	0,003	0,085	4,26	0,003
	(Tipo de cimento) C1 - C2					-0,398	0,957
	(Tipo de cimento) C1 - C3	30,6	2	< 0,001	0,286	-6,642	< 0,001
	(Tipo de cimento) C2 - C3					-6,865	< 0,001

Fonte: Autor (2022)

Verifica-se que os resultados estatísticos apontados pelos testes não-paramétricos adotados estão de acordo com os gráficos *box-plot* apresentados na Figura 44, na Figura 45 e na Figura 46, apontando que existem diferenças significativas entre o tipo e o teor de agregado empregados nas misturas, bem como em alguns tipos de cimento utilizados.

Para complementar o teste de significância, analisou-se também o tamanho de efeito (ϵ^2). Os valores adotados como referência para análise foram (BEZERRA, 2019):

- $0 < 0,01$: insignificante;
- $0,01 < 0,04$: fraco;
- $0,04 < 0,16$: moderado;
- $0,16 < 0,36$: relativamente forte;
- $0,36 < 0,64$: forte;
- $0,64 < 1,00$: muito forte.

Levando em consideração o exposto, a Tabela 15 mostra a significância e o efeito das variáveis no módulo de elasticidade dinâmico.

Tabela 15 – Análise da significância e tamanho do efeito das variáveis

Variáveis	TEI	VPU
	Significância e efeito	Significância e efeito
(Tipo de agregado) AN-AB	Significância moderada	Significância forte
(Teor de agregado) 1:1:4 - 1:1:6	Significância forte	Significância moderada
(Tipo de cimento) C1 - C2	Não significativa	Não significativa
(Tipo de cimento) C1 - C3	Significância relativamente forte	Significância relativamente forte
(Tipo de cimento) C2 - C3		

Fonte: Autor (2022)

Sendo assim, verifica-se que todas as variáveis foram classificadas com significância moderada, relativamente forte ou forte em ambos os métodos de medição do módulo de elasticidade dinâmico.

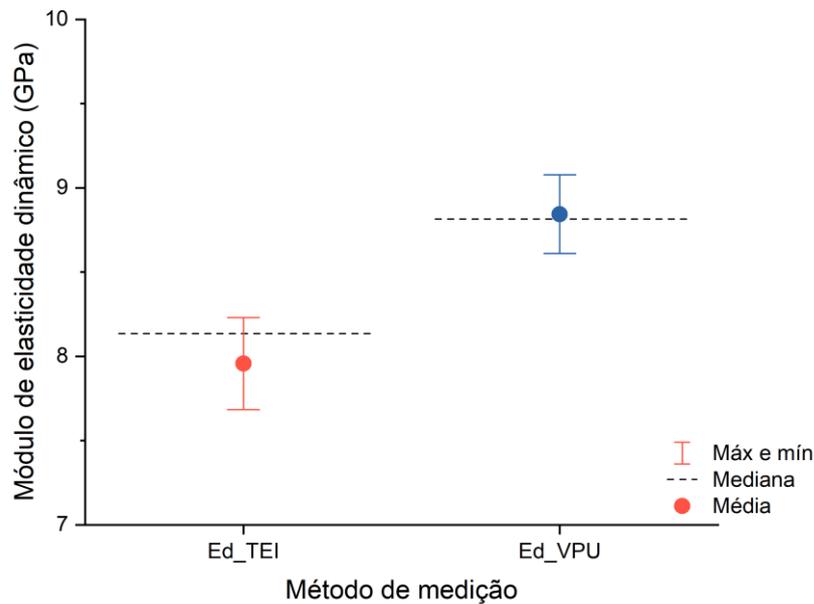
Para verificar se o módulo de elasticidade dinâmico medido pela técnica de excitação por impulso (TEI) e pela velocidade de pulso ultrassônico (VPU) apresentam a mesma distribuição aplicou-se o teste de *Wilcoxon* para pares combinados, utilizando o *software* livre *Jamovi*.

Tabela 16 – Análise da significância pelo teste de Wilcoxon

	n	Mediana	1º e 3º quartil	W de Wilcoxon	p
Ed_TEI	108	8,14	7,07 / 8,86	109	< 0,001
Ed_VPU	108	8,82	8,16 / 9,73		

Fonte: Autor (2022)

De acordo com a Tabela 16 percebe-se a diferença entre a mediana, primeiro e terceiro quartil, da TEI e VPU, confirmado pelo teste de significância de *Wilcoxon* ($p < 0,001$). Essa diferença pode ser visualizada na Figura 47, concluindo assim, que existe diferença significativa entre o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas, dependendo do tipo de ensaio realizado. No estudo realizado por Deniz e Erdogan (2015), constatou-se que na idade de 1 dia, o módulo de elasticidade dinâmico medido pelo VPU foi menor do que o medido pela TEI, no entanto, a partir da idade de 3 dias, os valores de Ed_VPU foram maiores do que de Ed_TEI para 7 de 8 argamassas analisadas. Essas diferenças podem estar relacionadas à calibração dos equipamentos utilizados, método de realização dos ensaios, influências do ambiente e do operador.

Figura 47 – Teste de *Wilcoxon* entre Ed_{TEI} e Ed_{VPU} 

Fonte: Autor (2022)

5.3 ANÁLISE DE RELAÇÃO

Com o objetivo de analisar a relação entre as propriedades mecânicas (resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção por capilaridade) e o módulo de elasticidade dinâmico, aplicou-se o coeficiente de correlação de *Pearson*, que nos permite avaliar o grau de relacionamento entre duas variáveis, as quais podem ser caracterizadas como fraca, moderada ou forte.

Para tal, realizou-se o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* conforme mostra a Tabela 17. Tendo em vista que os dados atenderam à normalidade ($p > 0,05$) foi possível realizar a correlação de *Pearson* (R), conforme mostra a Tabela 18.

Tabela 17 – Estatística descritiva e teste de normalidade das propriedades mecânicas

Propriedades	Estatística descritiva			Teste de Shapiro-Wilk	
	n	Média	Desvio Padrão	W	p
Resistência à compressão (MPa)	12	6,29	1,79	0,950	0,643
Resistência à tração na flexão (MPa)	12	2,10	0,59	0,937	0,459
Absorção por capilaridade (g/cm ²)	12	0,88	0,19	0,937	0,457
Módulo de elasticidade $_{TEI}$ (GPa)	12	7,92	1,47	0,945	0,571
Módulo de elasticidade $_{VPU}$ (GPa)	12	8,84	1,20	0,968	0,891

Fonte: Autor (2022)

O coeficiente de correlação de *Pearson* varia de -1 a 1 e os valores negativos de R indicam correlação do tipo inversa e valores positivos correlação

direta. Além disso, após determinar a existência de uma correlação é possível avaliá-la qualitativamente quanto à intensidade, usando o critério proposto por Callegari-Jacques (2009), em que:

- $R = 0$: correlação nula;
- $0 < R < 0,3$: correlação fraca;
- $0,3 < R < 0,6$: correlação regular;
- $0,6 < R < 0,9$: correlação forte;
- $0,9 < R < 1$: correlação muito forte;
- $R = 1$: correlação perfeita.

De acordo com o exposto na Tabela 18, verifica-se que o módulo de elasticidade dinâmico (TEI ou VPU) quando relacionado à resistência à compressão, resistência à tração na flexão e à absorção por capilaridade apresentam correlação forte entre si.

Tabela 18 – Correlação das propriedades com o módulo de elasticidade

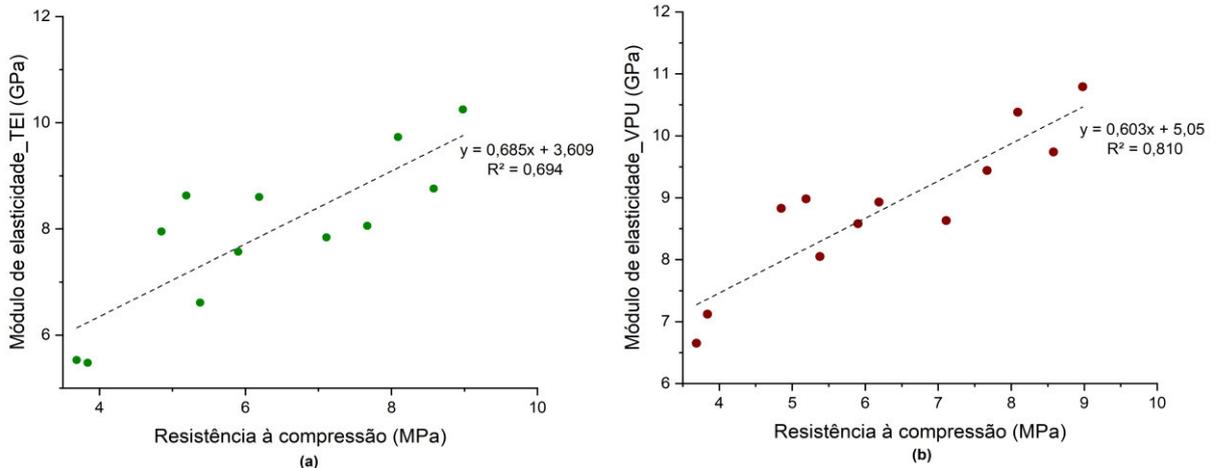
Matriz de correlações		Resistência à compressão	Resistência à tração na flexão	Absorção por capilaridade
Módulo de elasticidade_TEI	R de Pearson	0,833	0,804	-0,898
	p-valor	< 0,001	0,002	< 0,001
Módulo de elasticidade_VPU	R de Pearson	0,900	0,877	-0,847
	p-valor	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Fonte: Autor (2022)

Ao relacionar a resistência à compressão com o módulo de elasticidade dinâmico (Ed_{TEI}) e (Ed_{VPU}), Figura 48 (a) e Figura 48 (b), percebe-se que existe uma correlação direta entre as propriedades, ou seja, quanto maior a resistência, maior o módulo de elasticidade, sendo que 69,4% ($R^2 = 0,694$) das variações no módulo de elasticidade dinâmico (Ed_{TEI}) e 81% ($R^2 = 0,810$) em Ed_{VPU} podem ser explicadas pela variação na resistência à compressão das argamassas analisadas neste estudo. Sendo assim, pode-se dizer que as variações causadas pelo tipo de cimento, tipo e teor de agregado na resistência à compressão das argamassas podem influenciar no módulo de elasticidade dinâmico também.

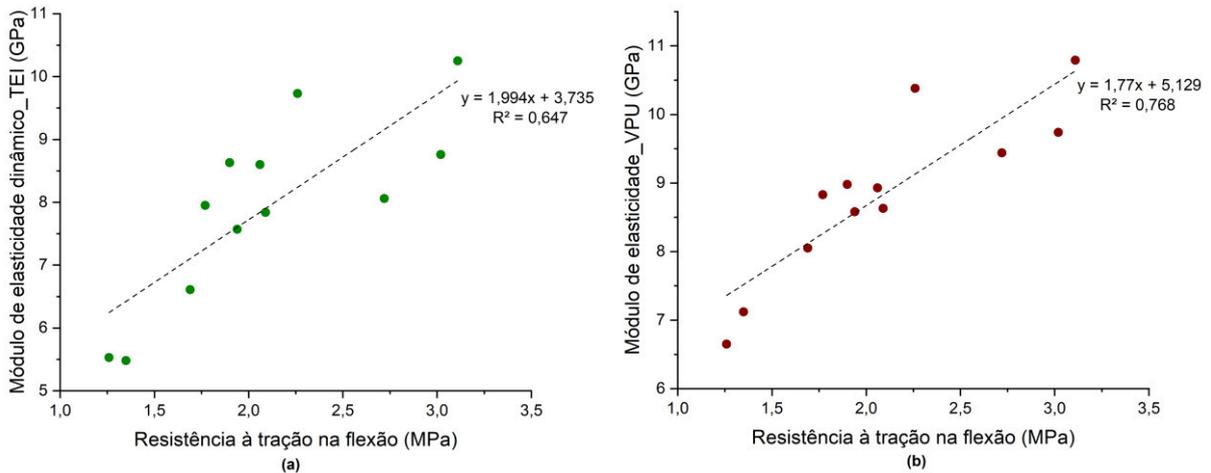
Comportamento semelhante é visto na Figura 49 (a) e (b), ao correlacionar a resistência à tração na flexão com o módulo de elasticidade dinâmico, tanto pela técnica de medição TEI quanto VPU.

Figura 48 – Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade: (a) Ed_TEI; (b) Ed_VPU



Fonte: Autor (2022)

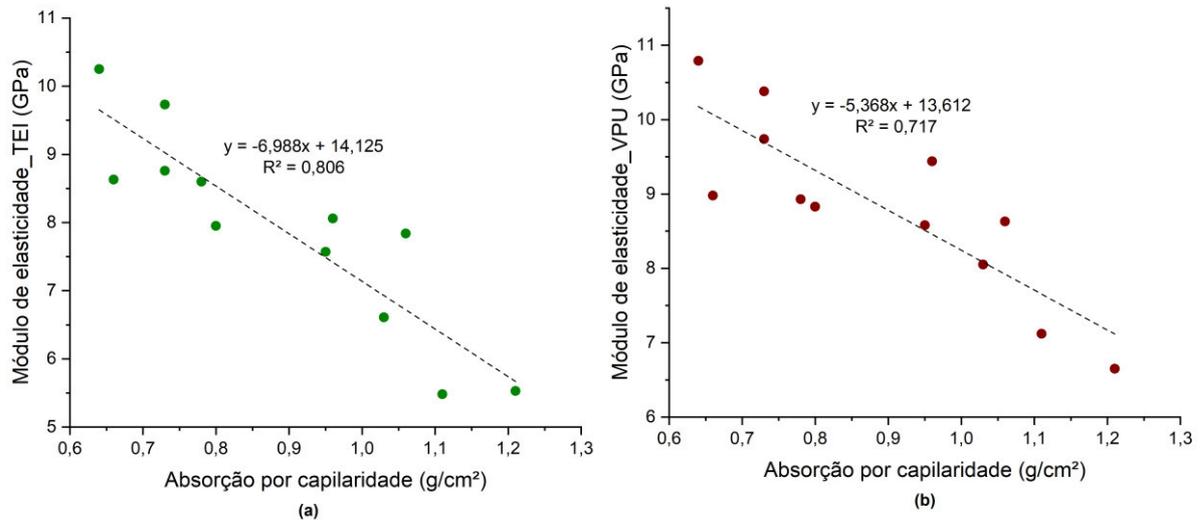
Figura 49 – Relação entre a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade: (a) Ed_TEI; (b) Ed_VPU



Fonte: Autor (2022)

No entanto, ao relacionar a absorção por capilaridade com o módulo de elasticidade dinâmico (Ed_TEI) e (Ed_VPU), Figura 50 (a) e Figura 50 (b), percebe-se que existe uma correlação indireta entre as propriedades, ou seja, quanto maior a absorção, menor será o módulo de elasticidade dinâmico da argamassa, conforme esperado.

Figura 50 – Relação entre a absorção por capilaridade e o módulo de elasticidade: (a) E_{d_TEI} ; (b) E_{d_VPU}



Fonte: Autor (2022)

5.4 ANÁLISE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO ESTIMADO PELA MICROMECAÂNICA E EXPERIMENTAL

Tendo em vista que um dos objetivos deste trabalho é relacionar os resultados do módulo de elasticidade dinâmico estimado pela micromecânica com os resultados obtidos nos ensaios experimentais, a Tabela 19 mostra os valores das propriedades calculadas, considerando as inclusões como esféricas e esferoides prolatos, e os valores das propriedades obtidas dos ensaios experimentais.

Os resultados considerando as inclusões como esferoides oblatos apresentaram resultados muito inferiores em relação aos demais, sendo assim, serão considerados para fins de análise, apenas os resultados obtidos considerando inclusões como esféricas e esferoides prolatos, o que vai de encontro com as propriedades analisadas dos agregados utilizados na pesquisa, quanto a forma e esfericidade.

O “passo a passo” completo da estimativa das propriedades elásticas por meio da micromecânica está disponível no APÊNDICE D.

Tabela 19 – Propriedades calculadas e experimentais das argamassas

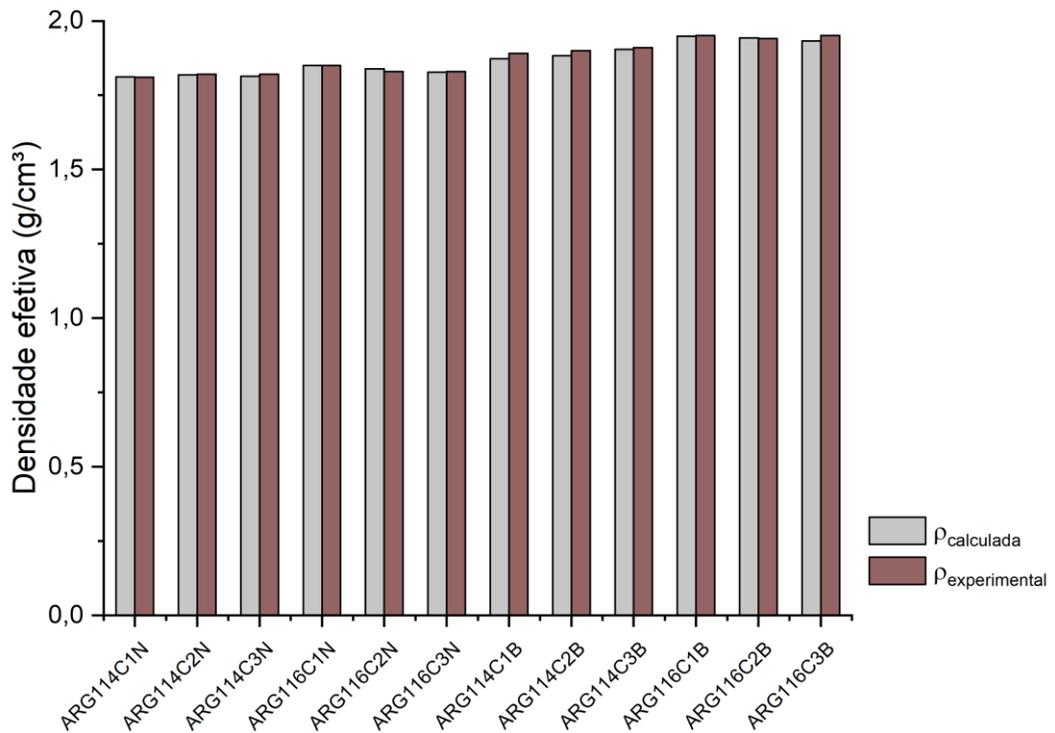
Amostras	Propriedades calculadas (inclusões esféricas)			Propriedades calculadas (inclusões esferoide prolato)			Propriedades experimentais		
	ρ (g/cm ³)	V _L (m/s)	Ed (GPa)	ρ (g/cm ³)	V _L (m/s)	Ed (GPa)	ρ (g/cm ³)	V _L (m/s)	Ed (GPa)
ARG114C1N	1,81	4493	13,14	1,81	4695	13,54	1,81	2574	10,79
ARG114C2N	1,82	4486	13,41	1,82	4692	13,82	1,82	2517	10,38
ARG114C3N	1,81	4484	11,91	1,81	4663	12,27	1,82	2335	8,93
ARG116C1N	1,85	4527	10,13	1,85	4659	10,46	1,85	2303	8,83
ARG116C2N	1,84	4546	11,61	1,84	4700	11,98	1,83	2335	8,98
ARG116C3N	1,83	4551	10,74	1,83	4691	11,09	1,83	2078	7,12
ARG114C1B	1,87	3574	10,31	1,87	4718	10,71	1,89	2354	9,44
ARG114C2B	1,88	3596	9,83	1,88	4710	10,17	1,90	2386	9,74
ARG114C3B	1,90	3621	8,54	1,90	4673	8,78	1,91	2240	8,63
ARG116C1B	1,95	3786	7,82	1,95	4684	8,00	1,95	2211	8,58
ARG116C2B	1,94	3786	8,68	1,94	4704	8,91	1,94	2147	8,05
ARG116C3B	1,93	N/C	N/C	1,93	N/C	N/C	1,95	1945	6,65

Fonte: Autor (2022)

A velocidade longitudinal estimada apresentou valores bem acima dos experimentais, tendo uma diferença mínima de 50,7% e máxima de 119% entre a velocidade estimada com inclusões esféricas e os valores experimentais, medidos pelo ultrassom. Com relação a velocidade estimada com inclusões esferoidais prolatas, a diferença mínima encontrada foi de 82,4% e máxima de 125,7% em relação aos valores experimentais.

Observa-se que a densidade efetiva calculada e a experimental apresentam resultados muito similares, conforme pode ser visto na Figura 51.

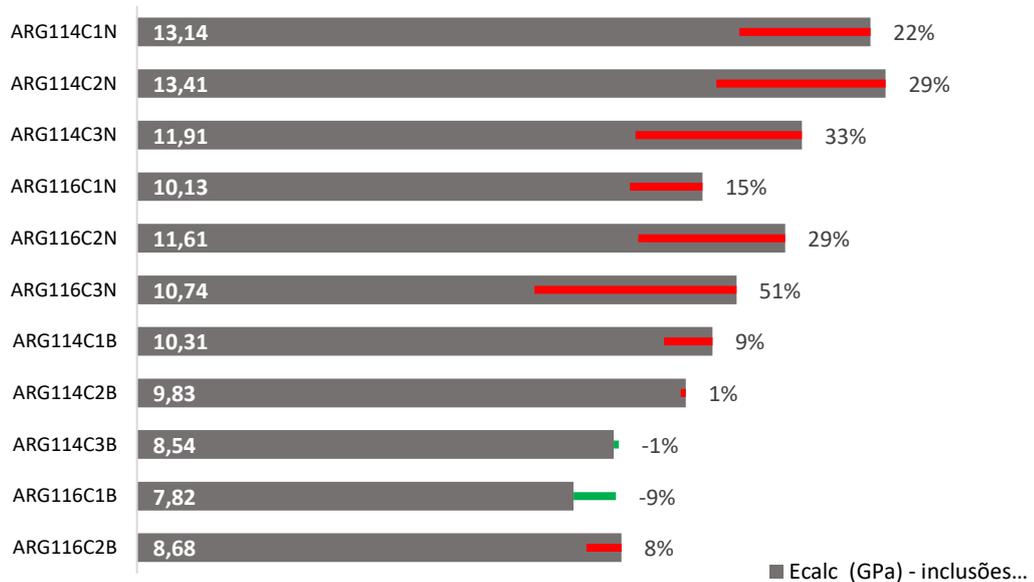
Figura 51 – Comparação entre a densidade calculada e experimental das argamassas



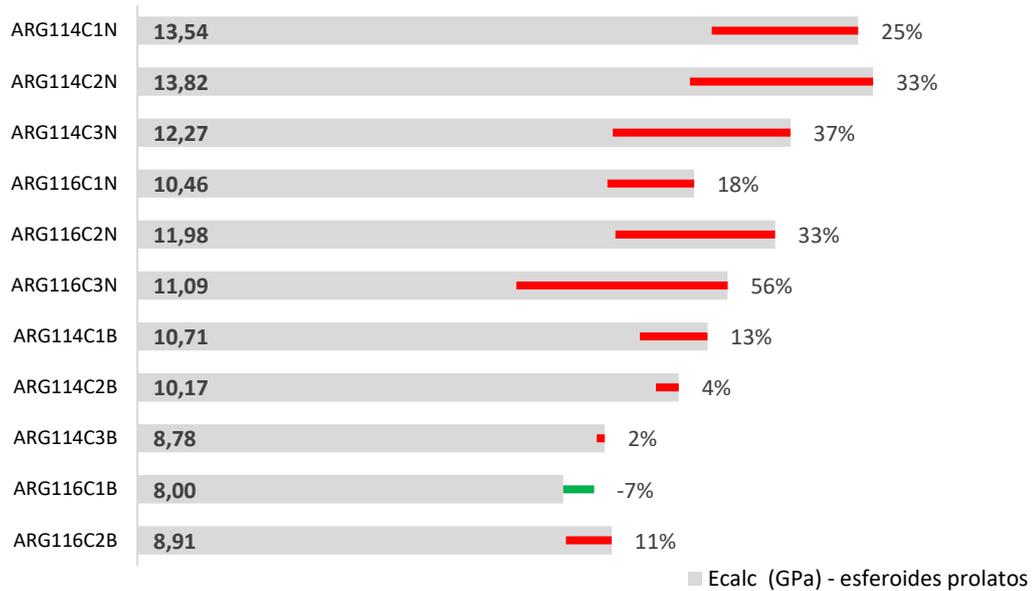
Fonte: Autor (2022)

Com relação ao módulo de elasticidade, encontraram-se diferenças maiores entre os valores calculados e os experimentais nas argamassas com uso de areia natural, indiferente do tipo de inclusão considerada nos cálculos, como pode ser verificado na Figura 52 e na Figura 53.

Figura 52 – Diferença percentual entre E_{cal} e E_{exp} com inclusões esféricas



Fonte: Autor (2022)

Figura 53 – Diferença percentual entre E_{cal} e E_{exp} com inclusões esféricas prolatas

Fonte: Autor (2022)

As diferenças mais significativas foram encontradas nas amostras ARG116C3N (51% e 56%), respectivamente, para inclusões esféricas e esferoidais prolatas. Para o modelo micromecânico adotado nos cálculos a matriz é considerada como um meio denso, ou seja, a porosidade não é considerada nos cálculos, isso pode ter influenciado nos resultados, sendo que tanto a matriz quanto o compósito (argamassa) são materiais porosos. O que vai ao encontro com o fato de as argamassas com areia britada terem apresentado resultados bem próximos ao calculado, uma vez que a densidade foi menor em argamassas com areia britada do que com a natural, de maneira geral.

Os estudos realizados por Hernández et al. (2002) e Hernández et al. (2006), utilizaram argamassas apenas com cimento como aglomerante, sendo assim os valores do módulo de elasticidade dinâmico encontrados neste estudo diferem dos realizados pelos autores. No entanto, percebe-se as seguintes semelhanças:

- A geometria da areia teve pouca influência no módulo de elasticidade;
- Um aumento nas constantes elásticas da areia, aumentam a velocidade e o módulo de elasticidade das argamassas;
- Menor teor de agregado gera um aumento na velocidade e no módulo de elasticidade, uma vez que aumenta a densidade do material.

Pode-se verificar que os valores estimados foram satisfatórios para as argamassas com agregado britado, no entanto, os valores estimados não foram bons para argamassas com agregado natural. O que mostra que a micromecânica analítica pode ser utilizada para estimar o módulo de elasticidade dinâmico de argamassas de revestimento, no entanto, deve-se atentar para as propriedades físicas e elásticas dos agregados, pois elas influenciam nas constantes elásticas que impactam no resultado.

Por fim, a principal vantagem da micromecânica é realizar testes virtuais para reduzir custo e tempo de uma campanha experimental. Tendo em vista que uma campanha experimental de materiais heterogêneos é muitas vezes cara e envolve muitas combinações, como: combinações de materiais constituintes com diversas características, frações volumétricas e o processamento deles. Por meio do estudo realizado, percebeu-se que uma vez conhecidas as propriedades dos materiais, as permutações podem ser simuladas em ambiente virtual, usando a micromecânica.

6. CONCLUSÃO

Na conclusão do presente trabalho são apresentadas as respostas aos objetivos propostos, assim como sugestões para pesquisas futuras.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O módulo de elasticidade dinâmico fornece valores de frequência, cujas variações podem ser utilizadas para identificar danos e para determinar a rigidez do material. Considerando que as argamassas de revestimento devem ser capazes de absorver deformações ao longo da sua vida útil (impactos de objetos, contrações e expansões pelas variações térmicas, entre outros), um menor módulo de elasticidade é um ganho interessante, pois indica uma possibilidade de deformação sem ruptura do revestimento.

Por esta razão, este trabalho buscou contribuir para o entendimento desta propriedade em argamassas de revestimento. Neste contexto, a partir dos resultados obtidos, os objetivos propostos são respondidos conforme segue:

- A) Em relação às variações do tipo de cimento e de agregados no módulo de elasticidade dinâmico, pode-se afirmar que** as argamassas com cimento CP II Z e CP II F apresentaram módulo de elasticidade dinâmico maior do que as argamassas com CP IV, o que pode estar atrelado à composição do CP IV. As argamassas com agregado britado apresentaram módulo de elasticidade menor em relação às argamassas com agregado natural. O que vai ao encontro com as características dos agregados, sendo que a finura excessiva da areia natural e sua alta esfericidade podem ter proporcionado um baixo empacotamento de partículas, enquanto na areia britada, o teor de finos juntamente com as demais partículas de tamanhos mais bem distribuídos, pode ter proporcionado uma organização melhor das partículas, proporcionando maior densidade às argamassas com areia britada.
- B) Quanto a proporção do agregado miúdo no módulo de elasticidade dinâmico, tem-se que** as argamassas com maior teor de agregado em sua composição apresentaram módulo de elasticidade dinâmico menor quando

comparados às argamassas com menor teor de agregado, independentemente do tipo de agregado empregado. Detectou-se que todas as variáveis consideradas (teor e tipo de agregado e tipo de cimento) influenciam significativamente no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de revestimento estudadas nesta pesquisa.

- C) Ao comparar o módulo de elasticidade dinâmico realizado pela Técnica de Excitação por Impulso (TEI) à Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) obteve-se que** os resultados obtidos pelos ensaios são diferentes entre si, sendo que o módulo de elasticidade dinâmico medido pela VPU é maior do que o medido pela TEI. É importante ressaltar que na TEI as amostras sofrem menos interferência do que nos ensaios do VPU, pois dependem menos do operador. No entanto, as leituras da TEI são mais sensíveis à ruídos no ambiente.
- D) A análise de correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e as demais propriedades mecânicas analisadas mostrou que** existe uma forte relação entre elas. Verificou-se que a resistência à compressão e à tração na flexão possuem relação direta, ou seja, com o aumento da resistência há um aumento no módulo de elasticidade dinâmico. Já a absorção por capilaridade possui relação inversa, sendo que ela aumenta à medida que o módulo de elasticidade dinâmico diminui.
- E) Ao estudar o módulo de elasticidade dinâmico experimental (realizado pela VPU) comparado ao estimado pela micromecânica pode-se verificar que** a diferença média entre o módulo de elasticidade dinâmico estimado e o experimental foi de 30 % para argamassas com agregado natural e de 2 % para argamassas com agregado britado, considerando a inclusão como esférica. Ao considerar a inclusão como esferóide prolato, obteve-se diferença média de 34 % para argamassas com agregado natural e de 5 % para agregado britado.

Percebe-se assim, que a estimativa por meio da micromecânica pode ser aplicada para prever o módulo de elasticidade dinâmico de argamassas de revestimento, no entanto apesar de ser um modelo relativamente simples de

ser empregado e que pode ser realizado por meio de uma planilha de processamento de dados, deve-se atentar para as particularidades que cada material possui, sendo que as características dos agregados e da matriz influenciam nas constantes elásticas, o que pode gerar resultados inconsistentes se não forem adotados valores parecidos com o que se pretende adotar na prática.

F) Observações complementares obtidas durante o estudo: de maneira geral, as argamassas com agregado britado apresentaram maior densidade aparente, maior resistência à compressão e à tração na flexão, maior volume de poros e maior absorção por capilaridade, além dos menores módulos de elasticidade dinâmico.

A argamassa com traço 1:1:6 com cimento CP II Z foi considerada a mais adequada do ponto de vista de que uma maior deformabilidade é positiva para um revestimento que seja capaz de se manter íntegro após sofrer impactos, ficar exposto a intempéries e variações térmicas. Além de apresentar comportamento adequado em relação à outras propriedades no estado endurecido. Ademais, esse traço apresentou menores diferenças entre os parâmetros analisados quando utilizado agregado britado ou natural.

Considerando os resultados obtidos nesta pesquisa, relacionadas às dificuldades em comparar dados com outras pesquisas, pois existe uma grande variabilidade de dosagens, materiais empregados e suas características físicas e mecânicas, proporções e tipos de ensaios, considera-se importante a implementação de um banco de dados com resultados experimentais, o qual poderia servir de base para pesquisadores, projetistas e construtores na hora de decidir/implementar o sistema de vedação nas construções.

Cabe ressaltar que as argamassas de revestimento fazem parte de um sistema e que para este ter um bom desempenho deve-se analisar o sistema na hora de definir qual o melhor traço e materiais a serem empregados de acordo com a localização da construção, materiais disponíveis na região, qualidade da mão de obra empregada, entre outros. Sendo assim, uma base de dados serviria como um balizador para tomadas de decisões e não uma fórmula pronta que se adequaria a todas as realidades. Ou seja, com base nas indicações encontradas num possível

banco de dados, ainda se faz necessário avaliar o meio em que essas argamassas seriam empregadas e, sempre que possível, realizar testes para validar e atualizar as referências.

Uma base de dados poderia auxiliar o construtor e projetista a prever o comportamento das argamassas de acordo com os materiais que estariam disponíveis na sua região. Como forma de contribuir para outros estudos e para o mercado da construção, elaborou-se tabela (Figura 54) com os principais resultados dessa pesquisa. São apresentados os tipos de materiais utilizados, sua origem e os traços adotados, os quais foram relacionados com o comportamento mecânico das argamassas estudadas.

Figura 54 – Compilado das propriedades das argamassas de revestimento

ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO												
COMPOSIÇÃO					PROPRIEDADES							
Cimento	Cal	Agregado	Origem agregado	Traço	Relação a/agl	Consistência (mm)	Densidade aparente (g/cm ³)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Absorção por capilaridade (g/cm ²)	Porosidade (volume de poros - g/cm ³)
CP II Z	CH III	britado	basáltica	1:1:4	0,67	260	↑	↓	↓	↓	↑	↑
CP II Z	CH III	natural	quartzosa	1:1:4	0,59	260	↓	↑	↑	↑	↓	↓
CP II F	CH III	britado	basáltica	1:1:4	0,67	265	↑	↑	↑	↓	↑	↑
CP II F	CH III	natural	quartzosa	1:1:4	0,59	263	↓	↓	↓	↑	↓	↓
CP IV	CH III	britado	basáltica	1:1:4	0,67	264	↑	↑	↑	↓	↑	≡
CP IV	CH III	natural	quartzosa	1:1:4	0,59	265	↓	↓	↓	↑	↓	≡
CP II Z	CH III	britado	basáltica	1:1:6	0,80	263	↑	↑	↑	↓	↑	↑
CP II Z	CH III	natural	quartzosa	1:1:6	0,74	262	↓	↓	↓	↑	↓	↓
CP II F	CH III	britado	basáltica	1:1:6	0,80	265	↑	↑	↓	↓	↑	↓
CP II F	CH III	natural	quartzosa	1:1:6	0,74	261	↓	↓	↑	↑	↓	↑
CP IV	CH III	britado	basáltica	1:1:6	0,80	258	↑	↓	↓	↓	↑	↑
CP IV	CH III	natural	quartzosa	1:1:6	0,74	258	↓	↑	↑	↑	↓	↓

Fonte: Autor (2022)

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseando-se nas observações realizadas durante o desenvolvimento deste estudo, serão apresentadas algumas sugestões que poderão contribuir com o assunto tratado:

- a) Analisar o comportamento das argamassas usando traços diferentes dos aqui estudados.
- b) Estudar o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas industrializadas;
- c) Executar medidas do módulo de elasticidade por meio de outros modelos de homogeneização e técnicas mais avançadas de modelagem (elementos finitos, rede neural, entre outros);
- d) Realizar ensaios de porosidade mais completos e relacionar com modelos micromecânicos para avaliar sua confiabilidade;
- e) Verificar se valores experimentais das propriedades dos agregados influenciam significativamente nas constantes elásticas;
- f) Associar outros tipos de ensaios não destrutivos com a micromecânica para análise de materiais cimentícios;
- g) Realização de banco de dados de argamassas, compilando os tipos de materiais utilizados e suas características com resultados de ensaios experimentais, para servir como material de consulta para pesquisadores, projetistas e construtores.

REFERÊNCIAS

ABAIMOV, S. G.; KHUDYAKOVA, A. A.; LOMOV, S. V. On the closed form expression of the Mori–Tanaka theory prediction for the engineering constants of a unidirectional fiber-reinforced ply. **Composite Structures**, v. 142, p. 1-6, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.001>. Acesso em: maio, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÕES (ABENDI). **Quem somos**: Ensaio não destrutivos e inspeções. Disponível em: <http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly=>. Acesso em: fev., 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

(ABNT). **ABNT NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

(ABNT). **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

(ABNT). **ABNT NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

(ABNT). **ABNT NBR 7218**: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

(ABNT). **ABNT NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

(ABNT). **ABNT NBR 9775**: Agregados miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

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

(ABNT). **ABNT NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

(ABNT). **ABNT NBR NM 30**: Agregados – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

(ABNT). **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

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

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

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

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

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

(ABNT). **ABNT NBR 7389-1**: Análise petrográfica de agregado para concreto – Parte 1: Agregado miúdo. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABOUDI, J.; ARNOLD, S. M.; BEDNARCYK, B. A. Fundamentals of the Mechanics of Multiphase Materials. *In: Micromechanics of Composite Materials*. [s.l.] Elsevier, 2013. p. 87–145. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397035-0.00003-3>. Acesso em: dez., 2020.

AGGELAKOPOULOU, E.; BAKOLAS, A.; MOROPOULOU, A. Lime putty versus hydrated lime powder: Physicochemical and mechanical characteristics of lime based mortars. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 633–641, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.218>. Acesso em: mar., 2021.

AGUIAR, C. B. Abordagem micromecânica da propagação de fraturas em meios elásticos e viscoelásticos. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/140531>. Acesso em: jan., 2022.

AILI, A.; MARUYAMA, I. Review of Several Experimental Methods for Characterization of Micro- and Nano-Scale Pores in **Cement-Based Material** **International Journal of Concrete Structures and Materials** Springer Science and Business Media LLC, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s40069-020-00431-y>. Acesso em: abr., 2022.

ALIGIZAKI, K. K. **Pore Structure of Cement-Based Materials**. Taylor & Francis Group:New York, 2006.

ALMEIDA, S. M. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/ISMS-96DR6D>. Acesso em: nov., 2020.

ALMEIDA, M. L. S. **Análise teórica da sensibilidade dos modos de propagação de ondas guiadas em função da espessura do material**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus, ES, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/961/An%C3%A1lise%20te%C3%B3rica%20da%20sensibilidade%20dos%20modos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: mai., 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **ASTM E 1876**: Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. ASTM, 2015.

(ASTM). **ASTM C 597**: Standard test method pulse velocity through concrete. ASTM, 2016.

ANDREUCCI, R. Ensaio por ultrassom: Aplicação industrial. **ABENDI**, 2014. Disponível em: [http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/US_maio-2014%20\(1\).pdf](http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/US_maio-2014%20(1).pdf). Acesso em: jan., 2021.

ANJOS, M. A. S. et al. Properties of self-leveling mortars incorporating a high-volume of sugar cane bagasse ash as partial Portland cement replacement. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101694, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101694>. Acesso em: mar., 2021.

ARAÚJO, S. S.; GUIMARÃES, G. N.; GEYER, A. L. B. Influence of the type of measuring device in determining the static modulus of elasticity of concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 5, p. 555–575, out. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952012000500001>. Acesso em: dez., 2020.

ARAÚJO, G. S.; BICALHO, K. V.; TRISTÃO, F. A. Análise de imagens na determinação da forma e textura de areias. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbcS20150274>. Acesso em: mai., 2022.

ASHBY, M.F; JONES, D. R. H. **Engineering Materials 1: An Introduction to Their Properties & Applications**. 2. ed. Great Britain: Butterworth Heinemann, 1996.

BADACHE, A. et al. Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE).

Construction and Building Materials, v. 163, p. 40–52, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.069>. Acesso em: mar., 2021.

BARBOSA, A. H.; LOPEZ-YANEZ, P. A.; CARNEIRO, A. M. P. Contribuição à obtenção do módulo de elasticidade do concreto utilizando modelagem micromecânica. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 4, n. 5, p. 863–881, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-4195201100050000>. Acesso em: maio, 2020.

BARBOSA, A. H. **Contribuição ao estudo sobre a obtenção do módulo de elasticidade do concreto utilizando modelagem micromecânica**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5128>. Acesso em: jan., 2021.

BASTOS, A. M. M. L. **Modelação micromecânica de propriedades de materiais compósitos: estudo numérico da influência do tipo de condições de fronteira**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Aveiro, Portugal, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10773/17054>. Acesso em: abr. 2022.

BAUER, R. J. F. Patologia em revestimentos de argamassa inorgânica. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2., 1997, Salvador. **Anais eletrônicos** [...]. Salvador, BA: UFBA, 1997. Disponível em: <https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/69-patologia-em-revestimento-de-argamassa-inorganica?start=20>. Acesso em: set., 2020.

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G. Materiais constituintes e suas funções. *In*: **Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades**. 2005.

BEDNARSKA, D.; KONIORCZYK, M. Comparison of various methods Applied in porous materials microstructure analysis in regard to hardened cement paste. *In*: MATEC Web of Conferences. 282, 2019, Praga. **Anais eletrônicos** [...] Praga: CESBP, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201928202043>. Acesso em: mai., 2022.

BELLEI, P. **Determinação do tempo de utilização por viscosimetria de argamassas colantes**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação Profissional em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7922>. Acesso em: abr., 2021.

BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/4523>. Acesso em: abr., 2021.

BERNARD, O.; ULM, F.-J.; LEMARCHAND, E. A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials.

Cement and Concrete Research, v. 33, n. 9, p. 1293–1309, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00039-5). Acesso em: abr., 2021.

BILESKY, P. C. **Contribuição aos estudos do módulo de elasticidade do concreto**. 2016. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: cassiopea.ipt.br/teses/2016_HAB_PEDRO_BILESKY.pdf. Acesso em: mar., 2021.

BOLORINO, H.; CINCOTTO, M. A. Adequação de traços de argamassa mista conforme o tipo de cimento. *In*. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 3., 1999, Vitória. **Anais eletrônicos** [...]. Vitória, ES: UFES, 1999. Disponível em: <https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/99-adequacao-de-tracos-de-argamassa-mista-conforme-o-cimento>. Acesso em: abr., 2021.

BOUMIZ, A.; VERNET, C.; TENOUDJI, F. C. Mechanical properties of cement pastes and mortars at early ages. **Advanced Cement Based Materials**, v. 3, n. 3–4, p. 94–106, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(96\)90042-5](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(96)90042-5). Acesso em: jan., 2021.

BRAGA, M.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 960–968, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.031>. Acesso em: mar., 2021.

BERSCH, J. D. et al. Diagnosis of Pathological Manifestations and Characterization of the Mortar Coating from the Facades of Historical Buildings in Porto Alegre — Brazil: A Case Study of Château and Observatório Astronômico. **International Journal of Architectural Heritage**. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/15583058.2020.1771475>. Acesso em: jul. 2022.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). **BSI-1200**: Specifications for building sands from natural sources, London, 1976.

BURYACHENKO, V. A. Generalized Mori–Tanaka Approach in Micromechanics of Peristatic Random Structure Composites. **Journal of Peridynamics and Nonlocal Modeling**, v. 2, n. 1, p. 26–49, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42102-019-00023-9>. Acesso em: dez., 2020.

CABRAL, L. M. C. **Análise comparativa do módulo de elasticidade calculado segundo diferentes normas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2014. Disponível em: <http://tede2.unicap.br:8080/handle/tede/64>. Acesso em: mar., 2021.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CARASEK, H. 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.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. *In*. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 4, 2001, Brasília. **Anais eletrônicos** [...]. Brasília, DF, 2001. Disponível em: <https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/452-sbta2001-carasek-cascudo-scartezini>. Acesso em: mai. 2022.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. DOI: 10.11606/T.3.2009.tde-21122009-125012. Acesso em: dez., 2020.

CARDOSO, F. A. et al. Caracterização física de argamassas de revestimento do mercado nacional. *In*. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 8., 2009, Curitiba. **Anais eletrônicos** [...]. Curitiba, PR: UFPR, 2009. Disponível em: <https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/384-caracterizacao-fisica-de-argamassas-de-revestimento-do-mercado-nacional?start=20>. Acesso em: fev., 2021.

CHADWICK, P.; VIANELLO, M.; COWIN, S. C. A new proof that the number of linear elastic symmetries is eight. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**. Elsevier BV, 2001. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-5096\(01\)00064-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-5096(01)00064-3). Acesso em: mai. 2022.

CHEN, H.-L. (ROGER); LEON, G. Direct Determination of Dynamic Elastic Modulus and Poisson's Ratio of Rectangular Timoshenko Prisms. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 145, n. 9, 2019. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001643](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001643). Acesso em: jan., 2020.

CHIES, J. A. **Ensaio não destrutivo em concreto: detecção de falhas no interior de estruturas de concreto com o uso de ultrassom**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2014. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/127927/000973959.pdf?sequence=1>. Acesso em: jan., 2022.

CHOUHAN, H. S. et al. Gainful utilization of dimensional limestone waste as fine aggregate in cement mortar mixes. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 363–374, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.097>. Acesso em: mar., 2021.

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**, v. 34, n. 1, 2004. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00230-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00230-8). Acesso em: abr., 2021.

COSTOYA, M. M. F. Effect of particle size on the hydration kinetics and microstructural development of tricalcium silicate. 2008. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) – École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suíça, 2008.

COPPOLA, L. et al. The combined use of admixtures for shrinkage reduction in one-part alkali activated slag-based mortars and pastes. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118-682, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118682>. Acesso em: mar., 2021.

COSTA E SILVA, A. J.; SILVA, C. J. V. Aplicação de resíduos de pedras ornamentais na produção de argamassas. *In*. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 12., 2017, São Paulo. **Anais eletrônicos** [...]. São Paulo, SP. 2017. Disponível em: <https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/611>. Acesso em: jul., 2022.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização. **SONELASTIC**. Disponível em: <https://sonelastic.com/images/RT03-ATCP.pdf>. Acesso em: fev., 2021.

DANTAS, D. A. C. **Abordagem micromecânica da resistência de meios porosos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2013. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=647409. Acesso em: jan., 2021.

DAS, A.; BASU, S.; KUMAR, A. Modelling of shale rock pore structure based on gas adsorption (A. Tarantino, E. Ibraim, Eds.) **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/20199215006>. Acesso em: mai., 2022.

DENIZ, S.; ERDOĞAN, S. T. Prediction of Elastic Moduli Development of Cement Mortars Using Early Age Measurements. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 1, 2015. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001025](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001025). Acesso em: jan., 2021.

DI BELLA, C. et al. Early-age elastic properties of cement-based materials as a function of decreasing moisture content. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 87–96, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.001>. Acesso em: jan., 2021.

DIOGENES, A. G.; CABRAL, A. E. B. Análise do comportamento de argamassas de revestimento com areia de britagem da região metropolitana de Fortaleza. *In*. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 12., 2017, São Paulo. **Anais eletrônicos** [...]. São Paulo, SP. 2017. Disponível em: <https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/580>. Acesso em: jul., 2022.

DJAYAPRABHA, H. S.; CHANG, T.-P.; SHIH, J.-Y. Comparison Study of Dynamic Elastic Moduli of Cement Mortar and No-cement Slag Based Cementitious Mortar Activated with Calcined Dolomite with Impulse Excitation Technique. **MATEC Web of Conferences**, v. 186, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818602004>. Acesso em: jan., 2021.

DUTRA, V. F. P. **Um modelo constitutivo para o concreto reforçado com fibras de aço via teoria da homogeneização**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia) –

Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/56585>. Acesso em: jan., 2021.

ESTÉVEZ, E. et al. Ultrasonic Pulse Velocity—Compressive Strength Relationship for Portland Cement Mortars Cured at Different Conditions. **Crystals**, v. 10, n. 2, p. 133, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cryst10020133>. Acesso em: jan., 2021.

FARINHA, C.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 194–206, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.028>. Acesso em: mar., 2021.

FILIPAK VANIN, D. V. et al. Cement pastes modified by cellulose nanocrystals: A dynamic moduli evolution assessment by the Impulse Excitation Technique. **Materials Chemistry and Physics**, v. 239, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122038>. Acesso em: maio, 2021.

GIDRÃO, G. M. S. **Propriedades dinâmicas do concreto e relações com sua microestrutura**. 2015. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em: [10.11606/D.18.2015.tde-03082015-083943](https://repositorio.usp.br/handle/111606/D.18.2015.tde-03082015-083943). Acesso em: jan., 2021.

GITMAN, I. M.; ASKES, H.; SLUYS, L. J. Representative volume: Existence and size determination. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 74, n. 16, p. 2518–2534, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.12.021>. Acesso em: jul., 2021.

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/37265/R%20-%20D%20-%20AND%20RESSA%20GOBBI.pdf?sequence=3>. Acesso em: mar., 2022.

GONÇALVES, T. et al. Mechanical and durability performance of mortars with fine recycled concrete aggregates and reactive magnesium oxide as partial cement replacement. **Cement and Concrete Composites**. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103420>. Acesso em: jul. 2022.

GOULARTE, R. M. **Módulo de elasticidade de materiais lamelares determinados com a técnica de indentação instrumentada**. 2014. TCC (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/127454>. Acesso em: dez. 2020.

GRANATO, A. P. M. B. **Procedimentos para antecipação dos problemas comuns, com soluções e dicas para a manutenção e recuperação de edifícios**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Programa de Pós-Graduação Lato Sensu da Escola de Engenharia – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São

Paulo, 2013. Disponível em: <http://dspace.mackenzie.br/handle/10899/325>. Acesso em: fev., 2021.

GROSS, D.; SEELIG, T. Micromechanics and homogeneization. *In*. _____. **Fracture Mechanics: with an introduction to micromechanics**. Springer Berlin Heidelberg, 2006.

GUACELLI, P. A. G.; RISSON, K. D. S.; CARBONARI, B. M. T. Substituição de areia de extração por areia de britagem para argamassa de revestimento. *In*. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 11., 2015, Porto Alegre. **Anais eletrônicos** [...]. Porto Alegre, RS. 2015. Disponível em: <https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/471>. Acesso em: jul., 2022.

GUPTA, L. K.; VYAS, A. K. Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 155–164, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.203>. Acesso em: mar., 2021.

HADDAD, L. D. O. et al. Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties. **Journal of Materials Research and Technology**. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.068>. Acesso em: jul. 2022.

HASHIN, Z.; MONTEIRO, P. J. M. An inverse method to determine the elastic properties of the interphase between the aggregate and the cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1291–1300, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00792-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00792-5). Acesso em: jan., 2021.

HASHIN, Z.; SHTRIKMAN, S. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 11, n. 2, p. 127–140, 1963. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(63\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(63)90060-7). Acesso em: jan., 2021.

HERNÁNDEZ, M. G. et al. Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE. **Ultrasonics**, v. 38, n. 1–8, p. 531–533, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(99\)00095-5](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(99)00095-5). Acesso em: maio, 2021.

HERNÁNDEZ, M. G. et al. Application of micromechanics to the characterization of mortar by ultrasound. **Ultrasonics**, v. 40, n. 1–8, p. 217–221, 2002. Disponível em: [10.1016/s0041-624x\(02\)00140-3](https://doi.org/10.1016/s0041-624x(02)00140-3). Acesso em: jan., 2021.

HERNÁNDEZ, M. G. et al.^a Formulation of a new micromechanic model of three phases for ultrasonic characterization of cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 4, p. 609–616, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.017>. Acesso em: jan., 2021.

HERNÁNDEZ, M. G. et al.^b Application of a micromechanical model of three phases to estimating the porosity of mortar by ultrasound. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 4, p. 617–624, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.018>. Acesso em: jan., 2021.

HILL, R. Theory of mechanical properties of fibre-strengthened materials—III. self-consistent model. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 13, n. 4, p. 189–198, 1965. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(65\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0022-5096(65)90008-6). Acesso em: abr., 2021.

HILÁRIO, H. G. C. **Análise da estrutura porosa de materiais cimentícios por meio da interação e associação de técnicas avançadas de caracterização**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

JEONG, H.; HSU, D. K. Quantitative estimation of material properties of porous ceramics by means of composite micromechanics and ultrasonic velocity. **NDT & E International**, v. 29, n. 2, p. 95–101, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(95\)00054-2](https://doi.org/10.1016/0963-8695(95)00054-2). Acesso em: jun., 2021.

JESUS, S. et al. Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 116-844, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116-844>. Acesso em: mar., 2021.

JR MEDEIROS, M. S. et al. The effects of diferente volume fraction distribution and micromechanics homogenization schemes on the mechanical behavior of FGM pressurized pipes. *In*. SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 13, 2018, Vitória. **Anais eletrônicos** [...]. Vitória, ES: UFES, 2018. Disponível em: <https://www.doity.com.br/anais/xiiisimmec2018/trabalho/70563>. Acesso em: maio, 2021.

KACHANOV, M.; SHAFIRO, B.; TSUKROV, I. **Handbook of Elasticity Solutions**. [s.l.] Springer Netherlands, 2003.

KALAGRI, A.; KARATASIOS, I.; KILIKOGLU, V. The effect of aggregate size and type of binder on microstructure and mechanical properties of NHL mortars. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 467–474, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.111>. Acesso em: mar., 2021.

KAMADA, T.; UCHIDA, S.; ROKUGO, K. Nondestructive Evaluation of Setting and Hardening of Cement Paste Based on Ultrasonic Propagation Characteristics. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 3, n. 3, p. 343–353, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.3151/jact.3.343>. Acesso em: maio, 2021.

KANIT, T. et al. Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach. **International Journal of Solids and Structures**, v. 40, n. 13–14, p. 3647–3679, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(03\)00143-4](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(03)00143-4). Acesso em: maio, 2021.

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. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000200076>. Acesso em: jul. 2022.

KESKIN, Ö. K.; YAMAN, İ. O.; TOKYAY, M. Effects of Experimental Parameters in Monitoring the Hydration of Cement Mortars by Ultrasonic Testing. *In: Nondestructive Testing of Materials and Structures*. [s.l.] Springer Netherlands, 2013. p. 437–443. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-007-0723-8_62. Acesso em: maio, 2021.

KRÖNER, E. Allgemeine Kontinuumstheorie der Versetzungen und Eigenspannungen. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, v. 4, n. 1, p. 273–334, 1959. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00281393>. Acesso em: maio, 2021.

LAFHAJ, Z. et al. Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 4, p. 625–633, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.009>. Acesso em: jan., 2021.

LANDERS, J.; GOR, G. YU.; NEIMARK, A. V. Density functional theory methods for characterization of porous materials. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.01.007>. Acesso em: mai., 2022.

LETELIER, V. et al. Combined use of waste concrete and glass as a replacement for mortar raw materials. *Waste Management*, v. 94, p. 107–119, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.041>. Acesso em: mar., 2021.

LORENCI, G. V. S. **Formulação micromecânica do comportamento proelástico de um meio rochoso fraturado**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/79809>. Acesso em: maio, 2021.

LOWELL, S. et al. **Characterization of porous solids and powders: Surface área, pore size and density**. Springer Netherlands, 2004.

MAALEJ, S. **Micromechanical model: correlation between hydraulic and acoustic parameters of cement-based materials**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) – Laboratoire de Mécanique de Lille, Université de Lille, 2010. Disponível em: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00590429>. Acesso em: jan., 2021.

MAALEJ, S.; LAFHAJ, Z.; BOUASSIDA, M. Micromechanical modelling of dry and saturated cement paste: Porosity assessment using ultrasonic waves. **Mechanics Research Communications**, v. 51, p. 8–14, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2013.03.002>. Acesso em: jan., 2021.

MAALEJ, S.; LAFHAJ, Z.; BOUASSIDA, M. Micromechanical assessment of ultrasound velocity in entrained air cement paste. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING*, 10, 2010, Moscou. **Anais eletrônicos [...]**. Moscou: ECNDT, 2010. Disponível em: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=9377>. Acesso em: jan., 2021.

MANTELLATO, S.; PALACIOS, M.; FLATT, R. J. Reliable specific surface area measurements on anhydrous cements. **Cement and Concrete Research**, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.009>. Acesso em: mai., 2022.

MARQUES, A. I. et al. Static Elasticity Modulus Analysis of Coating Mortars. **Procedia Structural Integrity**, v. 17, p. 1002–1009, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.09.001>. Acesso em: mar., 2021.

MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste. **Cement and Concrete Composites**, 2017. Disponível em: doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.005. Acesso em: mar., 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, C. F. **Avaliação comparativa da homogeneização de Mori-Tanaka utilizando o tensor de Eshelby em materiais bifásicos com diferentes formatos de inclusão**. 2015. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1884/48423>. Acesso em: dez. 2020.

MESQUITA, K. G. et al. Influence of Granulometry of the Small Aggregate on the Permeability of Wall Cement Coating. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22161/ijaers.611.65>. Acesso em: jul. 2022.

MOHAMMED, T. U.; RAHMAN, M. N. Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 832–841, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.102>. Acesso em: jan., 2021.

MOLERO, M. et al. Ultrasonic wave propagation in cementitious materials: A multiphase approach of a self-consistent multiple scattering model. **Ultrasonics**, v. 51, n. 1, p. 71–84, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2010.06.001>. Acesso em: abr., 2021.

MORAES, C. A. P. **Determinação do módulo de elasticidade dinâmico em concreto via técnica de excitação por impulso**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia dos Materiais – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <http://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/3225>. Acesso em: abr., 2021.

MORI, T.; TANAKA, K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. **Acta Metallurgica**, v. 21, n. 5, p. 571–574, 1973.

Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3). Acesso em: abr., 2021.

MURA, T. **Micromechanics of defects in solids**. [s.l.] Springer Netherlands, 1987.

OTANI, L. B.; PEREIRA, A. H. A. Determinação do módulo de elasticidade do concreto empregando a Técnica de Excitação por Impulso. **SONELASTIC**. 2017. Disponível em: 10.13140/RG.2.2.10513.33127. Acesso em: dez. 2020.

OLIVEIRA, L. A.; FONTENELLE, J. H.; MITIDIARI FILHO, C. V. Durabilidade de fachadas: método de ensaio para verificação da resistência à ação de calor e choque térmico. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 53-67, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/C8rdQYfMNYh6Rp7kpRjNmhj/?lang=pt>. Acesso em: jul., 2022.

PADMAVATHI, D. A. Potential Energy Curves & Material Properties. **Materials Sciences and Applications**. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2011.22013>. Acesso em: jul. 2022.

PIANEZZER, G. A. et al. Aplicação dos Métodos de Homogeneização para Obtenção das Propriedades Efetivas do Concreto. *In*. CNMAC 2016 - CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 36. SBMAC, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5540/03.2017.005.01.0170>. Acesso em: jan., 2021.

PIANEZZER, G. A. **Geração do elemento representativo do concreto com agregados graúdos em formato elíptico**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=101990. Acesso em: jan., 2021.

PICHLER, B.; HELLMICH, C.; EBERHARDSTEINER, J. Spherical and acicular representation of hydrates in a micromechanical model for cement paste: prediction of early-age elasticity and strength. **Acta Mechanica**, v. 203, n. 3–4, p. 137–162, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00707-008-0007-9>. Acesso em: jan., 2021.

PICHLER, B. et al. Effect of gel–space ratio and microstructure on strength of hydrating cementitious materials: An engineering micromechanics approach. **Cement and Concrete Research**, v. 45, p. 55–68, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.019>. Acesso em: maio, 2021.

PICHLER, B.; HELLMICH, C. Upscaling quasi-brittle strength of cement paste and mortar: A multi-scale engineering mechanics model. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 5, p. 467–476, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.010>. Acesso em: jan., 2021.

PIUMBINI, C. K. **Relação entre o transporte elétrico e a estrutura de poros no sistema $YBa_2Cu_3O_{7-y}$** . Tese (Doutorado em Física) – Pós-Graduação em Física, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2013.

PIVOTTO, E.; ABREU, A. G. Estudo de areia de rejeito basáltico para produção de argamassas. *In*. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 11., 2015, Porto Alegre. **Anais eletrônicos** [...]. Porto Alegre, RS. 2015. Disponível em: <https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/462>. Acesso em: jul., 2022.

POWERS, M, C. A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. **SEPM Journal of Sedimentary Research**. Society for Sedimentary Geology, 1953. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1306/D4269567-2B26-11D7-8648000102C1865D>. Acesso em: mai., 2022.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: 10.11606/T.3.2008.tde-15092008-153909. Acesso em: jul., 2021.

RATO, V. N. P. M. **Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova, Lisboa - Portugal, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/1126>. Acesso em: abr., 2021.

REUSS, A. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. **ZAMM - Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik**, v. 9, n. 1, p. 49–58, 1929. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/zamm.19290090104>. Acesso em: abr., 2021.

ROCHA, V. V. et al. Diferentes métodos de preparação de amostras para análise de distribuição de poros de pasta de cimento utilizando a técnica de condensação de nitrogênio. *In*. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 61, 2019, Fortaleza. **Anais eletrônicos** [...]. Fortaleza, CE, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/337439151_Analise_de_diferentes_metodos_de_secagem_para_resultados_de_distribuicao_de_poros_de_pasta_de_cimento_utilizando_a_tecnica_Brunauer_Emmett_e_Teller. Acesso em: mai., 2022.

SALOMÃO, M. C.; BAUER, E. Estudo da estrutura porosa de argamassas de revestimento e sua relação com a absorção de água por capilaridade. *In*. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 12., 2017, São Paulo. **Anais eletrônicos** [...]. São Paulo, SP. 2017. Disponível em: <https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/615>. Acesso em: jul., 2022.

SALVADOR, R. P. et al. Relation between ultrasound measurements and phase evolution in accelerated cementitious matrices. **Materials & Design**, v. 113, p. 341–352, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.022>. Acesso em: jun., 2021.

SANTOS, A. D. M. **Otimização das propriedades elásticas de materiais compósitos de microestrutura periódica**. 2016. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova, Lisboa - Portugal, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/20083>. Acesso em: dez. 2020.

SANTOS, W. J. et al. Study of the effects of excessive cemento or lime in mechanical properties and durability of the mortar coating. **International Journal of Development Research**. 2019. Disponível em: <https://www.journalijdr.com/study-effects-excessive-cement-or-lime-mechanical-properties-and-durability-mortar-coating>. Acesso em: jul. 2022.

SANTOS, W. J. et al. 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. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/3hYDmGWJW9whtMNwBNPjnDp/?lang=pt>. Acesso em: jul. 2022.

SCHMITT, M. **Caracterização do sistema poroso de rochas selantes combinando-se adsorção de nitrogênio e intrusão de mercúrio**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/106635/275458.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: mai. 2022.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH. **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. Taylor & Francis Group, 2016.

SILVA, F. B.; MARROS, M.S. B.; MONTE, R. Determinação do módulo de elasticidade de argamassas: avaliação dos métodos de ensaio e formatos de corpo-de-prova. In: ENTAC 2008: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., 2008, Fortaleza. **Anais eletrônicos** [...]. Fortaleza, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/302177011_Determinacao_do_modulo_de_deformacao_de_argamassas_avaliacao_dos_metodos_de_ensaio_e_formatos_de_corpo-de-prova. Acesso em: nov., 2020.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, 2006. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/4660>. Acesso em: fev., 2022.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C.; ARNOLD. Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 21-35. 2008. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/6386/4701>. Acesso em: jul. 2022.

SILVA, J. L.; LORDSLEEM, A. C., Jr. Influence of mixer type and mixing time on the multipurpose mortars properties. **Case Studies in Construction Materials**. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00562>. Acesso em: jul., 2022.

SOUZA, A. T. et al. The effects of mixture's components on the mechanical properties and durability indicators of mixed mortar using simplex network method.

Construction and Building Materials. 2020. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118740>. Acesso em: jul., 2022.

SOUZA A. T. et al. Evaluation of the mechanical performance of different coating mortars types after an accelerated aging process. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, 2021. Disponível em:

[http://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2021/January/29-41\(4\).pdf](http://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2021/January/29-41(4).pdf). Acesso em: jul., 2022.

SWAMY, N.; RIGBY, G. Dynamic properties of hardened paste, mortar and concrete. **Matériaux et Constructions**, v. 4, n. 1, p. 13–40, 1971. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/BF02473927>. Acesso em: nov., 2020.

TAVARES JUNIOR, J. F. **Influência do empacotamento da areia no desempenho dos compósitos cimentícios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Materiais e Construção – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TEIXEIRA, M.R. **Uma contribuição para a modelagem numérica da heterogeneidade do concreto com o método de Galerkin livre de elementos**.

2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2012. DOI: 10.11606/T.3.2011.tde-16052012-145155. Acesso em: abr., 2021.

TEIXEIRA, V. G.; COUTINHO, F. M. B.; GOMES, A. S. Principais métodos de caracterização da porosidade de resinas à base de divinilbenzeno. **Química Nova**, 2001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422001000600019>. Acesso em: mai., 2022.

TIMOSHENKO S.; GOODIER, J. N. **Theory of Elasticity**. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1951.

TREIBER, M. et al. Effects of sand aggregate on ultrasonic attenuation in cement-based materials. **Materials and Structures**, v. 43, n. S1, p. 1–11, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9587-7>. Acesso em: jan., 2021.

ULM, F.-J.; CONSTANTINIDES, G.; HEUKAMP, F. H. Is concrete a poromechanics materials? A multiscale investigation of poroelastic properties. **Materials and Structures**, v. 37, n. 1, p. 43–58, 2004. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/BF02481626>. Acesso em: jan., 2021.

VAN MIER, J. G. M. Microstructural Effects on Fracture Scaling in Concrete, Rock and Ice. In: **IUTAM Symposium on Scaling Laws in Ice Mechanics and Ice Dynamics**. [s.l.] Springer Netherlands, 2001. p. 171–182. Disponível em:

https://doi.org/10.1007/978-94-015-9735-7_15. Acesso em: jul., 2021.

- VAN VLIET M. R. A. **Size effect in tensile fracture of concrete and rock**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia) – Delf University of Technology, 2000. Disponível em: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:8e60211b-21c9-4821-81e1-51ab9b4cbad5>. Acesso em: jul., 2021.
- VERGARA, L. et al. NDE ultrasonic methods to characterise the porosity of mortar. **NDT & E International**, v. 34, n. 8, p. 557–562, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(01\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(01)00020-2). Acesso em: jun., 2021.
- VIEIRA, M. et al. Comparativo do efeito umidade no módulo de elasticidade dinâmico de argamassas. *In*. SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE REABILITAÇÃO DAS CONSTRUÇÕES, 2, 2019, Fortaleza. **Anais eletrônicos** [...]. Fortaleza, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/333982169_COMPARATIVO_DO_EFEITO_UMIDADE_NO_MODULO_DE_ELASTICIDADE_DINAMICO_DE_ARGAMASSAS. Acesso em: nov., 2020.
- VIGNOLI, L. L. **Modelos micromecânicos aplicados à análise multiescala de compósitos laminados**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2020.
- VOGT, J. C. **Estudo da influência de adições no módulo de elasticidade dinâmico, na resistência à fadiga e na tenacidade à fratura para concretos convencionais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/LMCA-75XKKQ>. Acesso em: fev., 2021.
- VOIGT, W. Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper. **Annalen der Physik**, v. 274, n. 12, p. 573–587, 1889. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/andp.18892741206>. Acesso em: abr., 2021.
- VOIGT, T.; SUN, Z.; SHAH, S. P. Comparison of ultrasonic wave reflection method and maturity method in evaluating early-age compressive strength of mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 4, p. 307–316, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.003>. Acesso em: jan., 2021.
- WANG, X.; SUBRAMANIAM, K. V. Ultrasonic monitoring of capillary porosity and elastic properties in hydrating cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 3, p. 389–401, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.11.001>. Acesso em: maio, 2021.
- WU, T. T. The effect of inclusion shape on the elastic moduli of a two-phase material. *International Journal of Solids and Structures*. 1966. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0020-7683\(66\)90002-3](http://dx.doi.org/10.1016/0020-7683(66)90002-3). Acesso em: fev., 2021.
- YEDRA, E. et al. New System to Determine the Evolution of the Dynamic Young's Modulus from Early Ages in Masonry Mortars. **Applied Sciences**, v. 10, n. 22, p. 8129, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10228129>. Acesso em: abr., 2021.

YILMAZ, T. et al. Assessment of strength properties of cemented paste backfill by ultrasonic pulse velocity test. **Ultrasonics**, v. 54, n. 5, p. 1386–1394, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.02.012>. Acesso em: maio, 2021.

ZANELATO, E. B. et al. Evaluation of roughcast on the adhesion mechanisms of mortars on ceramic substrates. **Materials and Structures**. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-019-1353-x>. Acesso em: jul., 2022.

ZHANG, M.; JIVKOV, A. P. Micromechanical modelling of deformation and fracture of hydrating cement paste using X-ray computed tomography characterisation. **Composites Part B: Engineering**, v. 88, p. 64–72, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.007>. Acesso em: maio, 2021.

ZHU, J. et al. Effects of air voids on ultrasonic wave propagation in early age cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 8, p. 872–881, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.005>. Acesso em: maio, 2021.

APÊNDICES

APÊNDICE A – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

AREIA NATURAL								
Peneiras		M ₁ (g)	300	M ₂ (g)	300	Médias		
Nº	mm	Massa retida (g)	% Retida	Massa retida (g)	% Retida	% Retida	% Retida acumulada	% Passante
4	4,8	0	0	0	0	0	0	100
8	2,4	2	1	2	1	1	1	99
16	1,2	12	4	11	4	4	5	95
30	0,6	36	12	35	12	12	17	83
50	0,3	43	15	43	15	15	32	68
100	0,15	129	45	132	46	46	78	22
Fundo	0,075	63	22	63	22	22	100	0
TOTAL		285	100	286	100	100	-	-
Dmáx. (mm)							1,20	
Módulo de finura							1,33	

AREIA BRITADA								
Peneiras		M ₁ (g)	300	M ₂ (g)	300	Médias		
Nº	mm	Massa retida (g)	% Retida	Massa retida (g)	% Retida	% Retida	% Retida acumulada	% Passante
4	4,8	0	0	0	0	0	0	100
8	2,4	49	17	64	22	19	19	81
16	1,2	59	20	67	23	22	41	59
30	0,6	49	17	42	14	15	56	44
50	0,3	32	11	27	9	10	66	34
100	0,15	34	12	30	10	11	77	23
Fundo	0,075	70	24	63	21	23	100	0
TOTAL		293	100	293	100	100	-	-
Dmáx. (mm)							2,40	
Módulo de finura							2,60	

APÊNDICE B – CONTROLE DE TEMPERATURA E UMIDADE DURANTE A CURA

Considerando que não há um ambiente próprio para a realização desse controle, alguns critérios foram adotados para poder ter um certo controle da temperatura e umidade relativa durante o processo de cura:

- Um ambiente específico foi utilizado, mantendo o ar-condicionado ligado e as portas fechadas.
- Um termômetro ficava no ambiente e 3 leituras eram realizadas diariamente, uma no início da manhã, uma ao meio-dia e outra no final do dia, assim uma média diária foi estimada.
- O período de cura ocorreu entre os meses de outubro, novembro e dezembro, sendo que a produção das pastas e argamassas ocorreram em dias aleatórios e não contínuos. Além disso, cabe evidenciar que nesses meses normalmente o clima é bastante quente e seco na região oeste do Paraná. Em alguns momentos, um umidificador foi ligado no ambiente para poder amenizar a umidade.

Média temperatura diária (°C)	Média umidade relativa diária (%)	Situação climática
20,7	75,7	Chuva
21,6	70,0	Nublado e quente
21,1	71,0	Nublado e quente
23,0	61,3	Ensolarado
22,2	74,3	Ensolarado
21,1	78,3	Chuva
20,6	70,7	Ensolarado
22,6	60,7	Ensolarado
20,4	67,3	Ensolarado
20,5	67,7	Ensolarado
21,0	64,3	Ensolarado
19,9	71,0	Ensolarado
21,5	58,5	Ensolarado
21,0	68,0	Ensolarado
21,2	76,0	Ensolarado
22,5	69,0	Ensolarado
21,9	66,0	Ensolarado
21,5	65,3	Ensolarado

Média temperatura diária (°C)	Média umidade relativa diária (%)	Situação climática
21,6	66,5	Ensolarado
21,7	63,3	Ensolarado
21,3	61,3	Ensolarado
21,3	61,5	Ensolarado
21,3	60,3	Nublado e quente
21,5	63,7	Ensolarado
23,5	57,0	Ensolarado e muito quente
22,3	55,3	Nublado e quente
21,4	58,5	Nublado e quente
20,0	55,3	Ensolarado
22,9	55,3	Ensolarado e muito quente
22,5	54,7	Ensolarado e muito quente
23,1	58,5	Ensolarado e muito quente
21,5	53,3	Ensolarado
21,8	54,0	Ensolarado e muito quente
21,1	49,0	Ensolarado e muito quente
21,9	47,3	Ensolarado e muito quente
22,3	49,0	Ensolarado e muito quente
22,6	50,5	Ensolarado e muito quente
22,8	44,3	Ensolarado e muito quente
21,7	47,0	Ensolarado e muito quente
21,8	47,0	Ensolarado e muito quente
21,0	50,0	Ensolarado e muito quente

APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Resultados ensaios no estado endurecido das pastas e argamassas com agregado natural

Argamassa e Pastas	Densidade no estado endurecido (g/cm ³)		Absorção por capilaridade (g/cm ²)		Resistência à compressão (MPa)		Resistência à tração na flexão (MPa)		Módulo de elasticidade_TEI (GPa)		Módulo de elasticidade_VPU (GPa)	
	Valor	CV (%)	Valor	CV (%)	Valor	CV (%)	Valor	CV (%)	Valor	CV (%)	Valor	CV (%)
ARG114C1N	1,81	0,11	0,64	6,96	8,98	3,12	3,11	3,22	10,25	2,47	10,79	2,48
P_C1_0,59	1,26	0,40	1,81	5,45	7,81	5,25	2,27	12,33	4,13	1,24	4,83	3,41
ARG114C2N	1,82	0,42	0,73	2,50	8,09	1,48	2,26	5,31	9,73	1,80	10,38	2,60
P_C2_0,59	1,27	0,78	1,66	0,12	7,13	1,68	1,69	8,28	4,39	2,06	4,95	3,47
ARG114C3N	1,82	1,12	0,78	4,26	6,19	2,58	2,06	6,80	8,60	4,10	8,93	3,23
P_C3_0,59	1,26	0,58	1,63	4,42	6,41	4,52	1,70	10,59	3,88	4,02	4,29	3,54
ARG116C1N	1,85	0,47	0,80	8,98	4,85	7,84	1,77	9,60	7,95	1,79	8,83	2,75
P_C1_0,74	1,11	0,12	2,65	7,90	3,72	6,72	1,12	14,29	2,51	5,67	3,10	3,84
ARG116C2N	1,83	1,29	0,66	6,85	5,19	6,74	1,90	10,53	8,63	2,01	8,98	2,24
P_C2_0,74	1,16	1,03	2,34	3,46	4,04	6,44	1,27	9,45	2,83	5,14	3,63	2,83
ARG116C3N	1,83	0,69	1,11	5,87	3,84	7,03	1,35	3,70	5,48	6,09	7,12	8,64
P_C3_0,74	1,14	0,82	2,54	9,93	4,78	3,14	1,16	13,79	3,08	23,99	3,32	6,47

Resultados ensaios no estado endurecido das pastas e argamassas com agregado britado

Argamassa e Pastas	Densidade no estado endurecido (g/cm ³)		Absorção por capilaridade (g/cm ²)		Resistência à compressão (MPa)		Resistência à tração na flexão (MPa)		Módulo de elasticidade_TEI (GPa)		Módulo de elasticidade_VPU (GPa)	
	Valor	CV (%)	Valor	CV (%)	Valor	CV (%)	Valor	CV (%)	Valor	CV (%)	Valor	CV (%)
ARG114C1B	1,89	0,68	0,96	10,20	7,67	2,09	2,72	3,68	8,06	10,21	9,44	9,69
P_C1_0,67	1,17	0,40	2,34	3,31	5,21	5,37	2,28	1,75	3,57	7,21	4,10	2,86
ARG114C2B	1,90	0,21	0,73	7,61	8,58	2,1	3,02	1,66	8,76	3,41	9,74	4,13
P_C2_0,67	1,17	0,40	2,85	1,96	6,56	3,2	1,72	12,79	3,36	3,6	3,87	1,78
ARG114C3B	1,91	0,56	1,06	5,57	7,11	1,69	2,09	5,74	7,84	5,99	8,63	5,33
P_C3_0,67	1,17	1,45	3,46	4,8	5,13	8,97	1,21	18,18	2,83	15,41	3,26	5,25
ARG116C1B	1,95	0,60	0,95	4,3	5,90	3,39	1,94	7,73	7,57	2,83	8,58	2,97
P_C1_0,80	1,07	0,14	2,74	2,88	3,13	1,92	0,83	16,87	2,17	5,09	2,60	4,10
ARG116C2B	1,94	0,42	1,03	1,75	5,38	5,2	1,69	4,73	6,61	2,61	8,05	4,06
P_C2_0,80	1,08	0,76	2,79	0,77	3,34	4,79	0,89	8,99	2,31	2,62	2,92	2,92
ARG116C3B	1,95	0,74	1,21	5,17	3,69	6,78	1,26	3,17	5,53	10,07	6,65	6,15
P_C3_0,80	Não foi possível realizar os ensaios											

APÊNDICE D – MICROMECAÂNICA

ETAPA 1

C1 - Dimensão do EVR e volume dos agregados e matriz no EVR

EVR (dimensões adotadas)	Traço argamassas	Volume agregado (cm ³) (EVR)	Volume matriz (cm ³) (EVR)	Fração de volume	
				v^i	v^m
EVR _{pasta} = 0,5 mm	1:1:4	0,772	0,956	0,45	0,55
EVR _{arg} = 5 x d _{máx} (agregado)	1:1:6	0,868	0,860	0,50	0,50
EVR _{arg} = 12 mm	1:1:4	0,710	1,018	0,41	0,59
Volume EVR _{arg} = 1728 mm ³	1:1:6	0,799	0,929	0,46	0,54

C2 - Volume e massa do EVR e densidade efetiva das argamassas

Amostra	V _{EVR} (cm ³)	V ⁱ (cm ³)	V ^m (cm ³)	M _{EVR} (g)	M ⁱ (g)	M ^m (g)	ρ^i (g/cm ³)	ρ^m (g/cm ³)	$\rho_{efetiva}$ (g/cm ³)
ARG114C1N	1728	0,77	0,96	3,13	1,88	1,255	2,43	1,31	1,812
ARG114C2N	1728	0,77	0,96	3,14	1,88	1,267	2,43	1,33	1,819
ARG114C3N	1728	0,77	0,96	3,13	1,88	1,259	2,43	1,32	1,814
ARG116C1N	1728	0,87	0,86	3,20	2,11	1,087	2,43	1,26	1,849
ARG116C2N	1728	0,87	0,86	3,18	2,11	1,067	2,43	1,24	1,838
ARG116C3N	1728	0,87	0,86	3,16	2,11	1,048	2,43	1,22	1,827
ARG114C1B	1728	0,71	1,02	3,24	1,88	1,361	2,64	1,34	1,173
ARG114C2B	1728	0,71	1,02	3,25	1,88	1,378	2,64	1,35	1,883
ARG114C3B	1728	0,71	1,02	3,29	1,88	1,415	2,64	1,39	1,904
ARG116C1B	1728	0,80	0,93	3,37	2,11	1,258	2,64	1,35	1,949
ARG116C2B	1728	0,80	0,93	3,36	2,11	1,247	2,64	1,34	1,942
ARG116C3B	1728	0,80	0,93	3,34	2,11	1,231	2,64	1,32	1,933

ETAPA 2 e 3

C3 - Velocidades e constantes elásticas da matriz

Amostra	Velocidade onda longitudinal experimental (m/s)	Velocidade onda transversal calculada (m/s)	E_médio (GPa)	G_médio (GPa)	K_médio (GPa)	ρ (g/cm ³)	C_{11}^m (GPa)	C_{44}^m (GPa)
P_C1_0,59	2060	1263	4,83	2,01	2,68	1,26	5,35	2,01
P_C2_0,59	2082	1275	4,95	2,06	2,75	1,27	5,50	2,06
P_C3_0,59	1944	1191	4,29	1,79	2,38	1,26	4,76	1,79
P_C1_0,67	1939	1191	4,10	1,71	2,28	1,21	4,55	1,71
P_C2_0,67	1916	1174	3,87	1,61	2,15	1,17	4,30	1,61
P_C3_0,67	1759	1077	3,26	1,36	1,81	1,17	3,62	1,36
P_C1_0,74	1760	1078	3,10	1,29	1,72	1,11	3,44	1,29
P_C2_0,74	1865	1142	3,63	1,51	2,02	1,16	4,03	1,51
P_C3_0,74	1799	1101	3,32	1,38	1,84	1,14	3,69	1,38
P_C1_0,80	1641	1005	2,60	1,08	1,44	1,07	2,88	1,08
P_C2_0,80	1733	1061	2,92	1,22	1,62	1,08	3,24	1,22

ETAPA 4

C4 - Constantes elásticas das inclusões

Tipo do agregado	E (GPa)	μ	G (GPa)	K (GPa)	C_{11}^i (GPa)	C_{44}^i (GPa)
Natural	75,8	0,16	32,6	37,2	80,7	32,6
Britado	62,8	0,25	25,1	41,8	75,3	25,1

Fonte: Hernández et al. (2006), Maalej et al. (2008), Silva (2008) e Nguyen et al. (2013)

ETAPA 5

C5 - Tensores de Wu e Eshelby para inclusões esféricas

TENSORES DE WU E DE ESHELBY - INCLUSÕES ESFÉRICAS										
Amostra	Tensor de Eshelby				Tensor de Wu					
	S ₁₁₁₁	S ₁₁₂₂	S ₁₁₃₃	S ₁₂₁₂	A	B	S ₁	T ₁₂₁₂	T ₁₁₁₁	T ₁₁₂₂
ARG114C1N	0,492	-0,016	-0,016	0,254	15,239	-2,10614	0,460	0,057	7,529	-1,2114
ARG114C2N					14,845	-2,05982		0,059	7,356	-1,1838
ARG114C3N					17,235	-2,35222		0,051	8,398	-1,3563
ARG116C1N					24,302	-3,28165		0,037	11,448	-1,8964
ARG116C2N					20,616	-2,82137		0,044	9,846	-1,6260
ARG116C3N					22,652	-3,06763		0,040	10,734	-1,7716
ARG114C1B	0,511	0,0222	0,0222	0,244	13,681	-4,48577	0,556	0,065	5,500	-2,1881
ARG114C2B					14,593	-4,77043		0,061	5,808	-2,3260
ARG114C3B					17,459	-5,63170		0,052	6,795	-2,7407
ARG116C1B					22,244	-7,10247		0,042	8,424	-3,4515
ARG116C2B					19,577	-6,26626		0,047	7,525	-3,0462
ARG116C3B					N/C	N/C		N/C	N/C	N/C

* N/C não foi possível calcular (amostras com problemas)

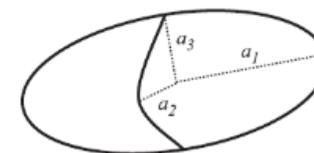
* Considerando o agregado em forma de esferas ($a_1 = a_2 = a_3 = a$)

C6 - Tensores de Wu e Eshelby para inclusões esferoides oblato

TENSORES DE WU E DE ESHELBY - INCLUSÕES COMO ESFEROIDES OBLATOS														
Amostra	Tensor de Eshelby								Tensor de Wu					
	$I_1 = I_2$	I_3	$I_{11} = I_{12}$	I_{13}	S_{1111}	S_{1122}	S_{1133}	S_{1212}	A	B	S_1	T_{1212}	T_{1111}	T_{1122}
ARG114C1N	-0,771	14,108	-1512,993	1071,284	-3,384	-1,095	0,113	-1,145	15,239	-0,78856	-4,366	-0,004	-47,128	-13,2429
ARG114C2N									14,845	-0,77489		-0,004	-45,854	-12,8710
ARG114C3N									17,235	-0,87093		-0,003	-53,523	-15,0686
ARG116C1N									24,302	-1,22868		-0,002	-75,879	-21,2454
ARG116C2N									20,616	-1,06998		-0,003	-64,097	-17,9018
ARG116C3N									22,652	-1,14855		-0,003	-70,645	-19,7885
ARG114C1B	-0,771	14,108	-262,672	185,987	-3,783	-1,234	0,119	-1,275	13,681	1,22339	-4,898	-0,004	-50,640	-20,3215
ARG114C2B									14,593	1,28931		-0,004	-54,014	-21,6077
ARG114C3B									17,459	1,55240		-0,003	-64,862	-25,8949
ARG116C1B									22,244	1,93704		-0,003	-82,737	-32,8144
ARG116C2B									19,577	1,75004		-0,003	-72,894	-29,0772
ARG116C3B									N/C	N/C		N/C	N/C	N/C

* N/C não foi possível calcular (amostras com problemas)

Considerando o agregado em forma de esferoide oblato ($a_1 = a_2 > a_3$)			
Agregado natural (D50)		Agregado britado (D50)	
a_1	0,125	a_1	0,3
a_3	0,042	a_3	0,1



Aspecto de forma (α)

Esferoide oblato: $\alpha = a_3 / a_1 < 1$

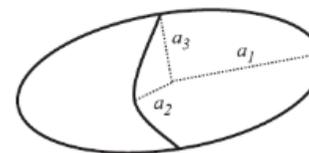
Esferoide prolato: $\alpha = a_1 / a_3 > 1$

C7 - Tensores de Wu e Eshelby para inclusões esferoides prolatos

TENSORES DE WU E DE ESHELBY - INCLUSÕES COMO ESFEROIDES PROLATOS														
Amostra	Tensor de Eshelby								Tensor de Wu					
	I_1	$I_2 = I_3$	I_{11}	$I_{12} = I_{13}$	S_{1111}	S_{1122}	S_{1133}	S_{1212}	A	B	S_1	T_{1212}	T_{1111}	T_{1122}
ARG114C1N	2,181	5,193	96,757	256,988	0,285	-0,023	-0,023	0,238	15,239	-0,78856	0,240	0,060	5,155	-0,5350
ARG114C2N									14,845	-0,77489		0,062	5,046	-0,5227
ARG114C3N									17,235	-0,87093		0,054	5,705	-0,6000
ARG116C1N									24,302	-1,22868		0,040	7,634	-0,8462
ARG116C2N									20,616	-1,06998		0,046	6,621	-0,7245
ARG116C3N									22,652	-1,14855		0,042	7,183	-0,7895
ARG114C1B	2,181	5,193	16,798	44,616	0,298	-0,005	-0,005	0,231	13,681	1,22339	0,289	0,066	5,193	-0,0173
ARG114C2B									14,593	1,28931		0,063	5,469	-0,0223
ARG114C3B									17,459	1,55240		0,053	6,349	-0,0243
ARG116C1B									22,244	1,93704		0,043	7,806	-0,0407
ARG116C2B									19,577	1,75004		0,048	7,001	-0,0250
ARG116C3B									N/C	N/C		N/C	N/C	N/C

* N/C não foi possível calcular (amostras com problemas)

Considerando o agregado em forma de esferoide prolato ($a_1 > a_2 = a_3$)			
Agregado natural (D50)		Agregado britado (D50)	
a_1	0,125	a_1	0,3
a_3	0,063	a_3	0,15



Aspecto de forma (α)

Esferoide oblato: $\alpha = a_3 / a_1 < 1$

Esferoide prolato: $\alpha = a_1 / a_3 > 1$

ETAPA 6

C8 - Constantes elásticas e resultados calculados: adotado inclusões esféricas

INCLUSÕES ESFÉRICAS														
Amostras	Constantes elásticas e tensores de Wu											Resultados calculados		
	ν^m	C_{11}^m	C_{44}^m	ν^i	C_{11}^i	C_{44}^i	T_{1111}	T_{1122}	T_{1212}	C_{11}	C_{44}	ρ (g/cm ³)	V _L (m/s)	E (GPa)
ARG114C1N	0,55	5,35	2,01	0,45	80,7	32,6	7,5290	-1,211	0,057	36,57	4,60	1,81	4493	13,14
ARG114C2N		5,5	2,06				7,3563	-1,184	0,059	36,60	4,70	1,82	4486	13,41
ARG114C3N		4,76	1,79				8,3978	-1,356	0,051	36,48	4,15	1,81	4484	11,91
ARG116C1N	0,50	4,55	1,29	0,50	80,7	32,6	11,4477	-1,896	0,037	37,90	3,49	1,85	4527	10,13
ARG116C2N		4,3	1,51				9,8456	-1,626	0,044	37,99	4,03	1,84	4546	11,61
ARG116C3N		3,62	1,38				10,7342	-1,772	0,040	37,85	3,71	1,83	4551	10,74
ARG114C1B	0,59	3,44	1,71	0,41	75,3	25,1	5,5003	-2,188	0,065	23,92	3,66	1,87	3574	10,31
ARG114C2B		4,03	1,61				5,8082	-2,326	0,061	24,35	3,47	1,88	3596	9,83
ARG114C3B		3,69	1,36				6,7947	-2,741	0,052	24,96	2,98	1,90	3621	8,54
ARG116C1B	0,54	2,88	1,08	0,46	75,3	25,1	8,4236	-3,451	0,042	27,94	2,70	1,95	3786	7,82
ARG116C2B		3,24	1,22				7,5248	-3,046	0,047	27,84	3,02	1,94	3786	8,68
ARG116C3B		N/C	N/C				N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	1,93	N/C	N/C

C9 - Constantes elásticas e resultados calculados: adotado inclusões esferoides oblatos

INCLUSÕES ESFEROIDES OBLATOS														
Amostras	Constantes elásticas e tensores de Wu											Resultados calculados		
	ν^m	C_{11}^m	C_{44}^m	ν^i	C_{11}^i	C_{44}^i	T_{1111}	T_{1122}	T_{1212}	C_{11}	C_{44}	ρ (g/cm ³)	V_L (m/s)	E (GPa)
ARG114C1N	0,55	5,35	2,01	0,45	80,7	32,6	-47,1283	-13,243	-0,004	39,89	1,82	1,81	4692	5,38
ARG114C2N		5,5	2,06				-45,8541	-12,871	-0,004	39,96	1,87	1,82	4687	5,51
ARG114C3N		4,76	1,79				-53,5229	-15,069	-0,003	39,59	1,62	1,81	4672	4,80
ARG116C1N	0,50	4,55	1,29	0,50	80,7	32,6	-75,8794	-21,245	-0,002	38,79	1,14	1,85	4580	3,38
ARG116C2N		4,3	1,51				-64,0967	-17,902	-0,003	39,07	1,33	1,84	4611	3,95
ARG116C3N		3,62	1,38				-70,6448	-19,788	-0,003	38,91	1,22	1,83	4615	3,62
ARG114C1B	0,59	3,44	1,71	0,41	75,3	25,1	-50,6400	-20,321	-0,004	44,32	1,57	1,87	4864	4,66
ARG114C2B		4,03	1,61				-54,0136	-21,608	-0,004	44,16	1,48	1,88	4843	4,39
ARG114C3B		3,69	1,36				-64,8625	-25,895	-0,003	43,79	1,25	1,90	4796	3,71
ARG116C1B	0,54	2,88	1,08	0,46	75,3	25,1	-82,7374	-32,814	-0,003	43,29	0,97	1,95	4713	2,90
ARG116C2B		3,24	1,22				-72,8939	-29,077	-0,003	43,48	1,10	1,94	4731	3,27
ARG116C3B		N/C	N/C				N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	1,93	N/C	N/C

C10 - Constantes elásticas e resultados calculados: adotado inclusões esféricas prolatas

INCLUSÕES ESFERÓIDES OBLATOS														
Amostras	Constantes elásticas e tensores de Wu											Resultados calculados		
	ν^m	C_{11}^m	C_{44}^m	ν^i	C_{11}^i	C_{44}^i	T_{1111}	T_{1122}	T_{1212}	C_{11}	C_{44}	ρ (g/cm ³)	V_L (m/s)	E (GPa)
ARG114C1N	0,55	5,35	2,01	0,45	80,7	32,6	5,1554	-0,535	0,060	39,93	4,72	1,81	4695	13,54
ARG114C2N		5,5	2,06				5,0463	-0,523	0,062	40,04	4,83	1,82	4692	13,82
ARG114C3N		4,76	1,79				5,7046	-0,600	0,054	39,44	4,26	1,81	4663	12,27
ARG116C1N	0,50	4,55	1,29	0,50	80,7	32,6	7,6338	-0,846	0,040	40,14	3,61	1,85	4659	10,46
ARG116C2N		4,3	1,51				6,6209	-0,724	0,046	40,60	4,15	1,84	4700	11,98
ARG116C3N		3,62	1,38				7,1826	-0,790	0,042	40,21	3,83	1,83	4691	11,09
ARG114C1B	0,59	3,44	1,71	0,41	75,3	25,1	5,1934	-0,017	0,066	41,69	3,69	1,87	4718	10,71
ARG114C2B		4,03	1,61				5,4692	-0,022	0,063	41,76	3,50	1,88	4710	10,17
ARG114C3B		3,69	1,36				6,3494	-0,024	0,053	41,59	3,01	1,90	4673	8,78
ARG116C1B	0,54	2,88	1,08	0,46	75,3	25,1	7,8059	-0,041	0,043	42,75	2,73	1,95	4684	8,00
ARG116C2B		3,24	1,22				7,0006	-0,025	0,048	42,97	3,05	1,94	4704	8,91
ARG116C3B		N/C	N/C				N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	1,93	N/C