



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

CAMILA CARVALHO NOBERTO

AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE ARGAMASSAS
UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS DE ENSAIO COM VISTAS A UMA
CARACTERIZAÇÃO QUANTO À FADIGA

FORTALEZA

2024

CAMILA CARVALHO NOBERTO

AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE ARGAMASSAS UTILIZANDO
DIFERENTES MÉTODOS DE ENSAIO COM VISTAS A UMA CARACTERIZAÇÃO
QUANTO À FADIGA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Construção Civil, concentração: Tecnologia dos Materiais e Sistemas Construtivos

Orientador: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Noberto, Camila Carvalho.

Avaliação do módulo de elasticidade de argamassas utilizando diferentes métodos de ensaio com vistas a uma caracterização quanto à fadiga / Camila Carvalho Noberto. – 2024.
107 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos.

1. Argamassa de revestimento externo. 2. Manifestações patológicas. 3. Módulo de elasticidade. 4. Fadiga. I. Título.

CDD 624.1

CAMILA CARVALHO NOBERTO

AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE ARGAMASSAS UTILIZANDO
DIFERENTES MÉTODOS DE ENSAIO COM VISTAS A UMA CARACTERIZAÇÃO
QUANTO À FADIGA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Construção Civil, concentração: Tecnologia dos Materiais e Sistemas Construtivos

Aprovada em: 30/11/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Silva Medeiros Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Rafael Giuliano Pileggi
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli/USP)

A Deus.

Aos meus amados pais, Heládia e Edson. À
minha querida avó (*in memoriam*), Maria da
Luz.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A Deus por me auxiliar e iluminar meus caminhos. À minha avó (*in memoriam*), por ser meu exemplo de força e humanidade.

Agradeço a minha querida mãe, Heládia, a meu pai Edson, e a meu irmão, Bruno, por serem minha fortaleza. À toda minha família, avó, tios e primos.

Ao professor Dr. Lucas Babadopulos, pela excelente orientação, por todas as colaborações, pelo empenho e dedicação. Por ser um orientador presente, comprometido, que está sempre disposto a auxiliar. Não tenho palavras para expressar tamanha gratidão.

À toda a equipe do PEC, em especial, aos professores: Eduardo Cabral, Marcelo Medeiros, Vanessa, Bertini, Esequiel Mesquita, Barros Neto por todo apoio durante o mestrado. Agradeço ainda à Diana e a Everton, da secretaria do PEC, por toda disponibilidade em sanar dúvidas.

Agradeço ao INCT, nas pessoas de Iolanda, Annie e Hermano. Aos meus colegas Lucas Sasaki e Jorge Lucas que me treinaram para realizar os ensaios de fadiga e módulo complexo. Agradeço também aos professores Juceline Bastos e Jorge Soares, por terem me permitido desenvolver parte essencial deste trabalho no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos. Agradeço também a todos os colegas trabalho do referido laboratório.

À toda equipe do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), nas pessoas de Helano, Manoel e Paulo Victor, por toda a ajuda durante a realização dos ensaios.

Agradeço a Wyoskynária (Wyo), a Karol, ao bolsista Abcael, a Daniel, e a minha mãe Heládia, que formaram uma força tarefa durante a moldagem dos corpos de prova, e por todo auxílio durante a realização dos ensaios. Gostaria de mais uma vez agradecer ao Abcael, que muito me ajudou nos ensaios, especialmente os de fadiga.

Gostaria de agradecer a toda equipe do IFCE *campus* Morada Nova, em especial, à minha diretora, Beatriz Claudino e seu substituto, Leonardo Galvão, e ao meu antigo chefe Julliano. Agradeço ainda a todos os meus queridos amigos: Patrícia, Clarycy, Ivana, Jonathan, Kuroski, Germana, Isadora e Alan, por todo suporte emocional, motivação e contribuições. Agradeço ainda à Vaíres, Geórgia e Fernanda por todo apoio e incentivo.

Aos meus amigos Laury, Camila, Ana Indira, Anna Luiza, Pedro Paulo, Dalgeany, por serem tão especiais na minha vida.

Não posso deixar de agradecer à “melhor turma do mestrado”, turma 2019.1, PEC-UFC. Composta por amigos que levarei para a vida, que ressignificaram a palavra ‘mestrado’ de uma forma muito especial, nutrindo um forte laço de amizade. Gostaria de agradecer-los por serem pessoas incríveis e, não tenho dúvidas que serão todos, excelentes profissionais nas áreas que escolherem atuar: Laury, Wandisley, Estevão, Amanda Machado, Amanda Fontenele, Wyoskynária, Éden, Matheus, Marcelo e Kayque.

Agradeço também aos Técnicos Administrativos da UFC, em especial à Diana e ao Everton, pelo excelente trabalho que desempenham no PEC, e à Érica, bibliotecária, por todas as contribuições e disponibilidade para me ajudar na conclusão dessa etapa.

Agradeço ainda, aos membros da banca, que aceitaram o convite para avaliar este trabalho e contribuir para seu aprimoramento, Jorge Soares, Marcelo Medeiros e Rafael Pileggi. E aos membros suplentes, Eduardo Cabral e Jorge Lucas, pela disponibilidade.

Agradeço também às empresas Cimento Apodi e da Votorantim pelo apoio para o desenvolvimento desta pesquisa.

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana.” (JUNG,1928).

RESUMO

No Brasil, é comum a existência de problemas relacionados à fadiga em argamassas de revestimento externo, particularmente em fachadas ensolaradas. Variações decorrentes da temperatura e da umidade podem resultar no aparecimento de tensões de tração, que, de maneira repetida, induzem o aparecimento de fissuras, devido ao fenômeno de fadiga. Este depende de propriedades dos materiais, tais quais o coeficiente de dilatação térmica, o módulo de elasticidade e a própria resistência à fadiga. Contudo, esse defeito não é comumente investigado, gerando lacunas pela falta de ensaios e de métodos de análise que seriam essenciais para avaliar os possíveis efeitos da fadiga para prever a falha e evitá-la com adequada seleção de materiais e dosagem. Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa é avaliar o módulo de elasticidade de argamassas de revestimento, considerando diferentes métodos de ensaio, com vistas a uma caracterização de fadiga, incluindo a montagem preliminar de um ensaio para tal fim. Ensaios de módulo de elasticidade e de fadiga, e um exemplo de estimação simplificada da vida útil das argamassas de revestimento externo foram propostos. O estudo incluiu duas argamassas distintas, sendo uma convencional (A) e uma industrializada (B), para cinco idades (3, 7, 14, 30 e 56 dias). Foram realizados ensaios dos seguintes tipos para determinação do módulo de elasticidade: ensaio estático, classicamente utilizado para concretos; ensaio quase-estático, com carregamento senoidal em diferentes níveis de amplitude de carregamento (10%, 20% e 30% da resistência estática); e ensaio de velocidade de pulso ultrassônico. Ademais, o ensaio de ultrassom, em alguns materiais, foi realizado de maneira intercalada entre os demais, com o intuito de evidenciar efeitos de dano, mesmo em amplitudes de carregamento consideradas pequenas. Os resultados demonstraram que o módulo complexo das argamassas de revestimento é influenciado pela frequência e pela amplitude de carregamento, o que deve ser considerado nas análises de fadiga em campo, que ocorre para carregamento de frequência mais baixa que o testado em laboratório. Além disso: o módulo de elasticidade aumenta com o aumento das idades; há evidência de dano nos ensaios de módulo para baixas idades (até 30 dias), enquanto, para idades mais avançadas, o dano decorrente do ensaio de módulo complexo é baixo, o que justifica considerá-lo como não-destrutivo. Ademais, um ensaio uniaxial de fadiga foi proposto como parte desta pesquisa. Espera-se que a existência de um protocolo de previsão de defeitos decorrentes da fadiga, como buscou contribuir este trabalho, possa auxiliar na redução da sua ocorrência, atuando ainda em fases de projeto.

Palavras-chave: argamassa de revestimento externo; manifestações patológicas; módulo de elasticidade; fadiga.

ABSTRACT

In Brazil, the existence of problems related to fatigue in external coating mortars is common, especially in sunny façades. Variations arising from temperature and humidity can result in the appearance of tensile stress, which, repeatedly, can induce the appearance of cracks in the mortar coating system, due to the phenomenon of fatigue. The phenomenon depends on material properties such as the coefficient of thermal expansion, the modulus of elasticity and the resistance to fatigue itself. However, this defect is not commonly investigated, creating gaps in its evaluation, due to the lack of tests and analysis methods that are important means of assessing the possible effects of fatigue and predict and avoid them with adequate selection of materials and material design. Then, the objective of the research is to evaluate the modulus of elasticity of coating mortars, considering different test methods, with regards to characterizing fatigue, including the preliminary assembly of a test for this purpose. Elastic modulus and fatigue tests, and an example of simplified estimation of the fatigue life of external coating mortars was proposed. The study included two different mortars, one conventional (A) and one industrialized (B), for five ages (3, 7, 14, 30 and 56 days). Tests of the following types were carried out to determine the modulus of elasticity: static test, classically used for concrete; quasi-static test, with sinusoidal loading at different levels of loading amplitude (10%, 20% and 30% of static resistance); and ultrasonic pulse velocity test. Furthermore, the ultrasound test, in some materials, was carried out in an intercalated manner between the other tests, with the aim of evaluating damage effects, even at loading amplitudes considered small. The results showed that the complex modulus of coating mortars is influenced by the frequency and amplitude of loading, which should be considered in fatigue analysis in the field, where loading frequency is much lower than in lab tests. Furthermore: the modulus of elasticity increases with increasing age; there is evidence of damage in the modulus tests at earlier ages (up to 30 days), while, for more advanced ages, the damage resulting from the complex module test is low, which justifies considering it as non-destructive. Furthermore, a uniaxial fatigue test was proposed as part of this research. It is expected that the existence of a protocol for predicting defects resulting from fatigue, as this work sought to contribute, can help to reduce their occurrence acting early in design phases.

Keywords: mortars external coating; pathological manifestations; modulus of elasticity; fatigue.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Sistema típico de revestimento externo com placas cerâmicas..... | 20 |
| Figura 2 – Adesão adequada entre o revestimento e o substrato..... | 22 |
| Figura 3 – Solicitações impostas à estrutura | 23 |
| Figura 4 – Deslocamento de revestimento cerâmico | 24 |
| Figura 5 – Deslocamento de revestimento argamassado | 24 |
| Figura 6 – Vesícula em revestimento argamassado..... | 26 |
| Figura 7 – Empolamento de revestimento argamassado | 27 |
| Figura 8 – Eflorescência constituída por um pó branco | 28 |
| Figura 9 – Fissuras em revestimento argamassado | 29 |
| Figura 10 – Definição de dano | 30 |
| Figura 11 – Gráfico típico do módulo de elasticidade em função da repetição de ciclos ao longo de ensaios de fadiga..... | 32 |
| Figura 12 – Curva S-N típica, que representa as amplitudes de carregamento no eixo y e o número de repetição de ciclos requerido para levar à ruptura por fadiga..... | 34 |
| Figura 13 – Normal climatológica do Brasil (1981-2010) | 36 |
| Figura 14 – Efeito de dois tipos de tensão de origem térmica: (a) auto-tensão (b) restrição de deformação | 39 |
| Figura 15 – Diagrama tensão-deformação de: (a) um material dúctil típico (b) um material frágil típico, como argamassas. | 41 |
| Figura 16 – Diagrama tensão-deformação típico de concretos | 41 |
| Figura 17 – Resultados do ensaio de fadiga da argamassa de emboço | 50 |
| Figura 18 – Curvas S-N de fadiga linearizadas para argamassa de emboço | 50 |
| Figura 19 – Fluxograma de atividades para realização desta pesquisa | 51 |
| Figura 20 – Curva granulométrica da areia | 52 |
| Figura 21 – Cura úmida dos CPs de argamassa..... | 55 |
| Figura 22 – Determinação da velocidade e do tempo de voo da onda ultrassônica, no corpo de prova de argamassa..... | 57 |
| Figura 23 – Montagem do CP para realização do ensaio de módulo complexo | 59 |
| Figura 24 – Realização do ensaio de módulo estático..... | 60 |
| Figura 25 – Etapa de colagem dos <i>endplates</i> | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 26 – Montagem do CP para realização do ensaio de fadiga | 63 |
| Figura 27 – Efeito da Técnica Experimental – idade 3 dias | 71 |
| Figura 28 – Efeito da Técnica Experimental – idade 7 dias | 72 |
| Figura 29 – Efeito da Técnica Experimental – idade 14 dias | 73 |
| Figura 30 – Efeito da Técnica Experimental – idade 30 dias | 74 |
| Figura 31 – Efeito da Técnica Experimental – idade 56 dias | 75 |
| Figura 32 – Comparativo entre módulo dinâmico determinado a partir dos tempos de voo para coeficiente de Poisson calculado (usando ondas P e S simultaneamente para o cálculo) e os demais módulos dinâmicos (determinados a partir de adoção de valor de coeficiente de Poisson hipotético) | 77 |
| Figura 33 – Relação entre os módulos dinâmicos após cada etapa de investigação do módulo e o módulo dinâmico inicial, para diferentes idades de argamassa A | 78 |
| Figura 34 – Relação entre os módulos dinâmicos após cada etapa de investigação do módulo e o módulo dinâmico inicial, para diferentes idades de argamassa B | 79 |
| Figura 35 – Relação entre os módulos dinâmicos após cada etapa de investigação do módulo e o módulo dinâmico inicial, para argamassas A e B, aos 56 dias | 80 |
| Figura 36 – Efeito das idades no módulo de elasticidade | 83 |
| Figura 37 – Efeito das idades na resistência à compressão | 84 |
| Figura 38 – Curva de degradação para a Argamassa A aos 100 dias | 87 |
| Figura 39 – Curva de degradação para a Argamassa A aos 117 dias | 88 |
| Figura 40 – Curva de degradação para a Argamassa B aos 224 dias | 88 |
| Figura 41 – Estimativa do número de ciclos até a falha em função da amplitude de variação de temperatura, considerando uma barra de argamassa com movimento das extremidades restringido..... | 92 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 – Componentes do sistema de revestimento externo..... | 21 |
| Quadro 2 – Ensaio de fadiga desenvolvidos na literatura..... | 48 |
| Quadro 3 – Parâmetros de entrada para determinação do módulo complexo | 58 |
| Quadro 4 – Ensaio de fadiga em CPs de argamassa A 1:1:5 | 85 |
| Quadro 5 – Ensaio de fadiga em CPs de argamassa B..... | 85 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Variações de temperaturas (°C) do ar na estação de Fortaleza-CE (1981 - 2010) . | 37 |
| Tabela 2 – Variações de temperaturas (°C) na estação de Campo Bom-RS (1981 - 2010) | 37 |
| Tabela 3 – Características físicas da areia | 53 |
| Tabela 4 – Traço unitário da argamassa A | 54 |
| Tabela 5 – Consumo de materiais para produção das argamassas | 54 |
| Tabela 6 – Resistência à compressão das argamassas | 56 |
| Tabela 7 – Resultados de módulo complexo obtidos para argamassa A, nas idades de 3, 7, 14, 30 e 56 dias | 66 |
| Tabela 8 – Resultados de módulo complexo obtidos para argamassa B, nas idades de 3, 7, 14, 30 e 56 dias | 67 |
| Tabela 9 – Resultados de módulo estático obtidos para as argamassas A e B, nas idades de 3, 7, 14, 30 e 56 dias | 68 |
| Tabela 10 – Resultados de módulo dinâmico obtidos para argamassa A, nas idades de 3, 7, 14, 30 e 56 dias | 69 |
| Tabela 11 – Resultados de módulo dinâmico obtidos para argamassa B, nas idades de 3, 7, 14, 30 e 56 dias | 70 |
| Tabela 12 – Propriedades materiais da argamassa de revestimento externo considerada no exemplo de análise simplificada de fadiga térmica | 89 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | Problema | 18 |
| 1.2 | Questões da pesquisa | 18 |
| 1.3 | Objetivos | 19 |
| <i>1.3.1</i> | <i>Objetivo Geral</i> | <i>19</i> |
| <i>1.3.2</i> | <i>Objetivos Específicos</i> | <i>19</i> |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 20 |
| 2.1 | Sistema de revestimento externo | 20 |
| 2.2 | Manifestações patológicas em sistemas de revestimento | 22 |
| 2.3 | Mecânica do dano contínuo | 29 |
| 2.4 | Fadiga e previsão da vida de fadiga | 31 |
| <i>2.4.1</i> | <i>Fadiga</i> | <i>31</i> |
| <i>2.4.2</i> | <i>Fadiga térmica</i> | <i>32</i> |
| <i>2.4.3</i> | <i>Diagrama S-N ou curva de Wöhler</i> | <i>33</i> |
| <i>2.4.4</i> | <i>Previsão da vida de fadiga</i> | <i>35</i> |
| 2.5 | Efeito da variação de temperatura | 36 |
| 2.6 | Generalidades sobre módulo de elasticidade | 40 |
| <i>2.6.1</i> | <i>Módulo de elasticidade em argamassas</i> | <i>42</i> |
| <i>2.6.2</i> | <i>Métodos de ensaio para determinar o módulo de elasticidade</i> | <i>44</i> |
| <i>2.6.2.1</i> | <i>Módulo de elasticidade estático</i> | <i>44</i> |
| <i>2.6.2.2</i> | <i>Módulo de elasticidade dinâmico</i> | <i>45</i> |
| <i>2.6.2.3</i> | <i>Coefficiente de Poisson</i> | <i>46</i> |
| <i>2.6.2.4</i> | <i>Módulo de elasticidade complexo</i> | <i>46</i> |
| 2.7 | Ensaio de fadiga | 47 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 51 |
| 3.1 | Materiais | 52 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 3.2 | Método de pesquisa..... | 53 |
| 3.2.1 | <i>Preparo das argamassas</i> | 53 |
| 3.2.2 | <i>Avaliação do módulo em argamassas.....</i> | 55 |
| 3.2.3 | <i>Rotina de ensaios de módulo de elasticidade</i> | 60 |
| 3.2.4 | <i>Ensaio de fadiga.....</i> | 61 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 65 |
| 4.1 | Módulo de elasticidade | 65 |
| 4.1.1 | <i>Efeito da técnica experimental</i> | 70 |
| 4.1.2 | <i>Estudo do efeito do coeficiente de Poisson calculado no módulo de elasticidade</i> | 76 |
| 4.1.3 | <i>Efeito do dano ao longo dos ensaios</i> | 77 |
| 4.1.4 | <i>Efeito do material e da idade na rigidez e na resistência</i> | 81 |
| 4.2 | Ensaio de fadiga em argamassa | 84 |
| 4.3 | Exemplos de análise de fadiga térmica simplificada | 89 |
| 5 | CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS | 93 |
| | REFERÊNCIAS | 97 |

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento das cidades nas últimas décadas e o aumento da população nos grandes centros urbanos, a necessidade de construções para suprir o déficit habitacional ficou cada vez maior. Atrelado ao crescimento da indústria da construção civil, e com o desenvolvimento das tecnologias construtivas, os edifícios verticais incorporaram um maior número de pavimentos para se tornarem mais competitivos (MONTEIRO, VERAS, 2017; SPODE *et al.*, 2021).

Na busca por mercado, as construtoras investiram na estética dos edifícios, em especial nos sistemas de revestimento externo, na intenção de criar uma certa identidade visual, refletindo assim, no modo como tais edifícios são vistos. Além disso, alguns desses sistemas de revestimento se destacam por melhorar o desempenho ambiental (BARTH; VEFAGO, 2007), tendo grande importância para a valorização do empreendimento, ao compor o espaço urbano e gerar destaque para a construção. Essas mudanças, aliadas ao desenvolvimento tecnológico, incidiram diretamente no modo como as construções são realizadas e em seus respectivos projetos.

Com a competitividade de mercado, é esperado que as edificações supram as exigências mínimas no que se refere ao desempenho e durabilidade, sendo capazes de resistir a condições ambientais adversas, suportar as variações climáticas, garantir a estabilidade, o conforto térmico e acústico, a resistência à umidade, a manutenibilidade e, até mesmo, a valorização imobiliária (BEZERRA *et al.*, 2018). A Norma Brasileira de Desempenho das Edificações Habitacionais – NBR 15575 – ganhou espaço por apresentar critérios e requisitos que as construções devem atender, para que possam garantir qualidade, conforto, manutenibilidade e durabilidade (ABNT, 2013). É esperado que as edificações sejam capazes de desempenhar as funções para as quais foram projetadas, durante um determinado período (ISRAEL, 2016).

Segundo Duarte (1998), os edifícios modernos apresentam sistemas de revestimento externo mais esbeltos, estando mais suscetíveis às movimentações decorrentes das variações de temperatura e umidade. Essas variações podem resultar no aparecimento de tensões de tração superiores às suportadas pelos materiais envolvidos, acarretando o aparecimento de fissuras. Assim, faz-se necessário conhecer os tipos mais frequentes de manifestações patológicas referentes ao sistema utilizado, os quais são fissuras, trincas, eflorescência, manchamento, deterioração do revestimento, que geram altos custos para

reparação e a própria degradação do imóvel (PACHECO; VIEIRA, 2017). Mesmo quando essas tensões não igualam a resistência estática dos materiais envolvidos, a repetição de ciclos pode ocasionar um fenômeno conhecido como fadiga (BEZERRA *et al.*, 2018).

Quando se trata de revestimento cerâmico, o efeito do deslocamento tem grande incidência, e suas causas vão desde a falta de aderência ao substrato até a expansão deste devido à umidade, às repetidas variações térmicas e à fadiga térmica, podendo afetar diretamente a vida útil da edificação, constituindo um fator de risco para as pessoas e bens circundantes (BEZERRA *et al.*, 2018). Para Grazzini (2018), na interface entre a argamassa e a alvenaria há ocorrência de várias tensões oriundas de ações termomecânicas, responsáveis por causar também a separação das camadas de argamassa.

No Brasil, é comum a existência de argamassas de revestimento externo que apresentam problemas relacionados à fadiga (Bezerra *et al.*, 2018). A ocorrência de tal fenômeno está associada ao conceito de dano (D) que, de acordo com Lemaitre (1985), é expresso como a densidade da superfície efetiva de fissuras ou cavidades, ou seja, refere-se à perda de seção resistente. Segundo Pastoukhov e Voorwald (1995), a falha de um componente por fadiga está associada a um de processo de deterioração que acontece por repetidas ações, como as provenientes de deformações excessivas, ação de carregamentos combinados ou isolados, das variações de temperatura e do próprio meio ambiente. Tais ações provocam tensões no material, que podem produzir efeitos significativos a longo prazo em função da repetição.

O desenvolvimento e a propagação de fissuras, nas argamassas de revestimentos externo, de edifícios, constituem anomalias bastante comuns, que podem contribuir para sua desintegração e descolamento, situação que pode ser agravada em consequência das influências das variações do clima (MARQUES *et al.*, 2020; ARAGÓN *et al.* 2019). O comportamento elástico da relação tensão-deformação é determinado pelo módulo de elasticidade, enquanto a razão de Poisson pode afetar a fluência, movimentos térmicos e a propagação de microfissuras (DENIZ, 2015; SWAMY, 1971). Dessa forma, torna-se imprescindível a análise e o controle das propriedades físicas e mecânicas das argamassas nas diferentes aplicações na construção civil (ARAGÓN *et al.* 2019; DENIZ, 2015).

Assim, conhecer as causas das manifestações patológicas e trabalhar para evitá-las se torna primordial. Apesar das tentativas de se desenvolverem melhorias nos sistemas de revestimento cerâmico, o aparecimento de defeitos relacionados à fissuração é diverso (LUZ, 2004). Contudo, esse defeito não é comumente investigado, gerando lacunas quanto a sua

avaliação, pela falta de ensaios e métodos de análise. Dessa forma, a existência de um protocolo de verificação de propriedades relacionadas à fadiga, tais como os ensaios de módulo e os próprios ensaios de vida de fadiga, auxiliaria na previsão da ocorrência de tal fenômeno. Conseqüentemente, contribuiria para mitigá-lo, pois funcionaria de maneira preventiva ao sistema de revestimento ainda na fase de projeto.

1.1 Problema

É difícil prever o tempo para se realizar manutenções preventivas nos revestimentos de fachada de edificações, o que pode gerar custos extras com manutenções corretivas, particularmente, considerando-se a inexistência de protocolos de avaliação de fadiga (um dos fenômenos sugeridos na literatura como causa da fissuração, particularmente em fachadas ensolaradas). Diante disso, os problemas que motivaram este trabalho foram: a grande incidência de manifestações patológicas nos sistemas de revestimento externo, principalmente, em edifícios; poucos estudos abordando a fadiga de argamassas e a influência de propriedades como seu módulo de elasticidade, na literatura; os riscos de acidentes associados às falhas dos componentes dos revestimentos. Dessa forma, torna-se imprescindível a existência de um protocolo de ensaio que avalie o módulo de elasticidade e a fadiga em argamassas. Devido ao fato de que as tensões atuantes no sistema de revestimento dependem do módulo de elasticidade das argamassas, e que diferentes métodos de ensaio podem gerar diferentes resultados, um foco especial no trabalho é dado neste tema. Adicionalmente, um ensaio é proposto para quantificar o tempo de durabilidade do sistema quanto ao desenvolvimento de fadiga em si.

O presente estudo contribui para gerar melhores recomendações ao setor da construção civil, propondo um método de verificações das propriedades mecânicas de argamassas de revestimento externo, de modo a possibilitar análises mais detalhadas, podendo fornecer dados que melhorem a escolha e a dosagem de materiais, evitando futuros problemas na edificação.

1.2 Questões da pesquisa

- Qual o efeito do tipo de ensaio de módulo de elasticidade nos resultados obtidos?
- É possível que haja dano inesperado em ensaios de determinação do módulo de elasticidade, mesmo em pequenas deformações?

- É possível montar um ensaio de fadiga uniaxial em argamassa?
- Qual o efeito do módulo de elasticidade na previsão simplificada de vida de fadiga de argamassas?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Contribuir para a proposição de método para avaliação de módulo de elasticidade, em argamassas, utilizando diferentes técnicas de ensaio, com vistas a uma caracterização quanto à fadiga.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar módulo de elasticidade em argamassas, considerando diferentes métodos de ensaio, com base na análise da influência da frequência, da amplitude de carregamento e das diferentes idades;
- Avaliar o efeito do dano associado aos ensaios quase-estático (módulo complexo) e estático;
- Implementar o ensaio de fadiga em argamassa, identificando os principais gargalos à sua execução;
- Aplicar os resultados de módulo de elasticidade para previsão simplificada da vida de fadiga de argamassas.

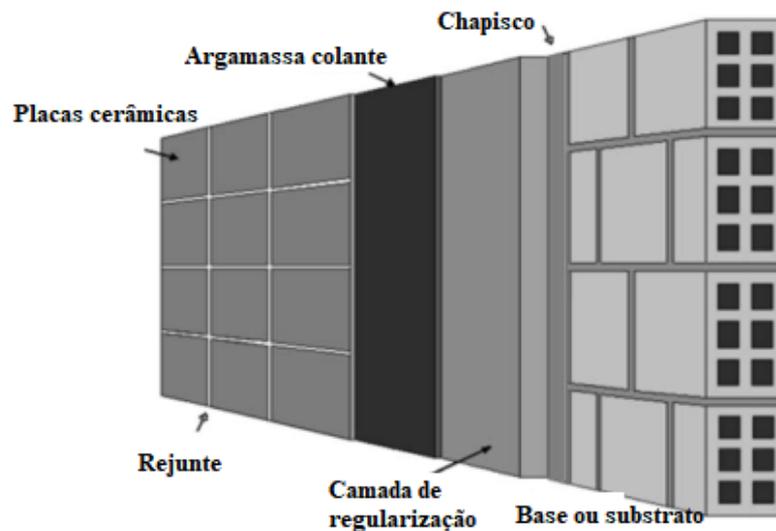
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta revisão bibliográfica abordará temas como sistema de revestimento externo; principais manifestações patológicas atuantes nesse sistema; fadiga térmica e previsão de vida de fadiga; além do principal deles, módulo de elasticidade.

2.1 Sistema de revestimento externo

O sistema de revestimento externo é composto por camadas que se sobrepõem, sejam elas estruturas de suporte, alvenarias, camadas sucessivas de argamassa e revestimento final, que são ligadas e se comportam em conjunto (Figura 1). Apresentando o papel de proteger a edificação contra as intempéries, fornecer o acabamento estético, além de oferecer proteção térmica e acústica, estanqueidade, proteção ao fogo, entre outros (ISRAEL, 2016).

Figura 1 – Sistema típico de revestimento externo com placas cerâmicas



Fonte: Adaptado Bezerra *et al.* (2018).

Na Figura 1 são apresentados os componentes do sistema de revestimento externo com placas cerâmicas. O sistema de revestimento externo argamassado possui os seguintes componentes: substrato (seja concreto, alvenaria, ou qualquer outro tipo de vedação), argamassa de preparo da base (ou chapisco), camada de regularização (emboço), este podendo ser constituído de uma camada única ou com uma camada de argamassa de acabamento (reboco) (SEGAT, 2006).

No Quadro 1 é possível analisar com mais detalhes os componentes do sistema de revestimento externo, com ou sem placa cerâmica, e as funções que desempenham.

Quadro 1 – Componentes do sistema de revestimento externo

| Elemento | Composição | Função |
|-----------------------|--|--|
| Base ou substrato | Constituído por superfície plana de parede, podendo ser de concreto armado ou alvenaria de bloco: cerâmico, de concreto, de concreto celular ou sílico calcário. | Vedação ou estrutural/ receber o revestimento de argamassa. |
| Chapisco | Argamassa de cimento areia e água, podendo ter aditivos. | Uniformizar a absorção da superfície da base/melhorar a aderência do revestimento. |
| Emboço | Mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânicos e água contendo ou não aditivos e adições, com propriedades de aderência e endurecimento. | Cobrir e regularizar a superfície da base ou chapisco corrigindo defeitos e irregularidades dela para receber o reboco ou revestimento decorativo ou acabamento final. |
| Reboco | | Cobrir o emboço para receber o revestimento decorativo ou acabamento. |
| Argamassa colante | Mistura constituída de agregado mineral, aglomerante(s) hidráulicos(s), aditivos(s) e água, formando uma massa viscosa, plástica e aderente. | Aderir as placas cerâmicas ao emboço. |
| Acabamento decorativo | Tinta ou placa cerâmica e argamassa de rejunte. | Contribuir para a definição estética do edifício e conferir a fachada resistência à penetração de água, isolamento, entre outros. |
| Argamassa de rejunte | Pode ser argamassa a base de cimento, areia e/ou outros agregados finos, inertes com adição de aditivos; nata de cimento; resina epóxi ou outro material específico para a função. | Preencher juntas de assentamento de placas cerâmicas. |

Fonte: Adaptado de ISRAEL (2016).

A NBR 13281, que especifica os requisitos mínimos exigíveis para argamassa utilizada em assentamento e revestimento de paredes e tetos, caracteriza a argamassa como uma mistura homogênea, composta por agregado miúdo, aglomerante inorgânico e água, podendo apresentar ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento. Além disso, pode ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada). Dentre os diferentes

tipos de argamassa, há a argamassa para revestimento externo. Esta é indicada para revestimento de fachadas, muros e outros elementos da edificação que estejam em contato com o ambiente externo, servindo como uma camada de regularização (ABNT, 2005).

2.2 Manifestações patológicas em sistemas de revestimento

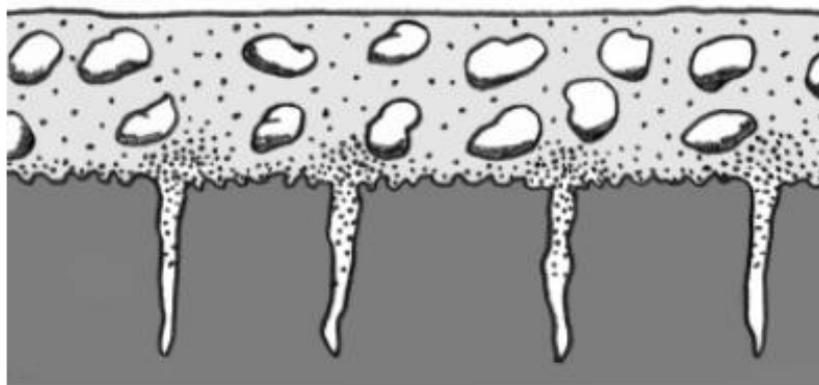
Para Israel (2016), têm sido frequentes problemas com revestimentos, principalmente, entre a argamassa e o substrato, resultando em deslocamento e fissuração, geralmente, associado a falhas na execução. De acordo com pesquisa feita por Leal (2003), envolvendo os projetistas, pesquisadores, fabricantes de argamassa e os aplicadores, constatou-se:

- Falta de consenso sobre de que trata um projeto de revestimento (projetistas);
- Pouca preocupação com a capacitação das equipes de obras, por parte dos construtores;
- Falta de conhecimento por parte dos fabricantes, sobre o comportamento dos revestimentos;
- Utilização de práticas inadequadas, tornando-se até errado o serviço de aplicação.

Bauer *et al.* (2015) destacam que o processo de degradação das argamassas de revestimento pode estar associado a técnicas construtivas, compatibilidade dos materiais constituintes do sistema de revestimento, degradação dos materiais e projeto.

A aderência da argamassa ao substrato está relacionada não só à garantia desses fatores, como também, da trabalhabilidade adequada, que auxiliará na fixação (Figura 2).

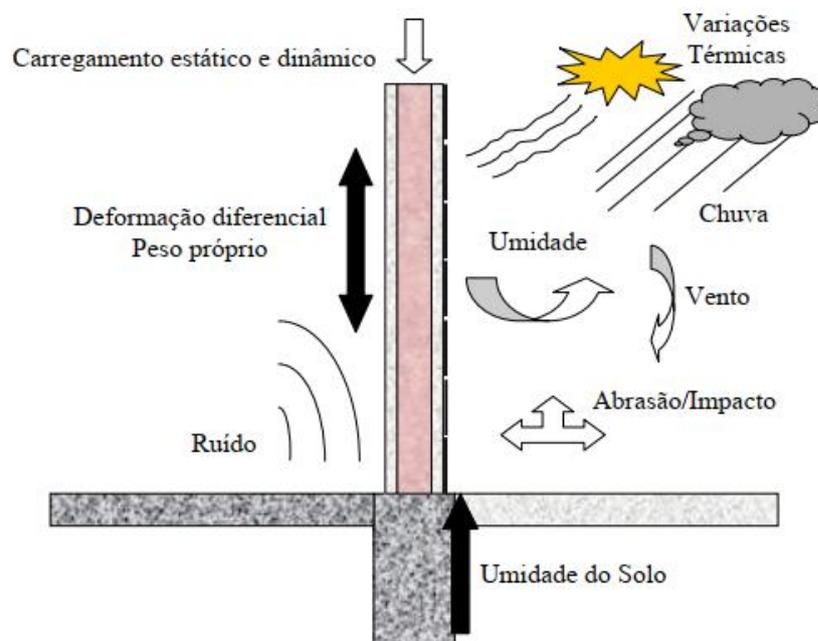
Figura 2 – Adesão adequada entre o revestimento e o substrato



Fonte: ABCP (2002).

Segundo Chagas (2009), as argamassas de revestimento apresentam fratura de natureza frágil e geralmente a superfície de fratura é perpendicular ao carregamento aplicado. A aplicação de ciclos de carregamento de baixa intensidade (relativamente à tensão admissível no material), absorvidos elasticamente, podem ainda assim produzir a ruptura por fadiga (LEMAITRE, 1996). Devido às ações de esforços mecânicos, higromecânicos (de origem higroscópica) e termomecânicos (originados pela dilatação térmica), podem-se gerar tensões que agem na interface das camadas entre a argamassa e o substrato, acarretando falha por fadiga (GRAZZINI, 2018). A Figura 3 ilustra as condições as quais uma estrutura está sujeita.

Figura 3 – Solicitações impostas à estrutura



Fonte: Uchôa (2007).

A ocorrência de manifestações patológicas pode estar associada a um desses fatores, ou ao conjunto deles, acarretando prejuízos à eficiência e ao desempenho da construção (FERREIRA; GARCIA, 2016). As principais manifestações patológicas no sistema de revestimento externo podem se classificar como:

a) Deslocamento

O revestimento cerâmico expande em maior ou menor grau de deformação em decorrência da umidade, da variação de temperatura do ambiente, assim como pelo aumento progressivo de esforços, gerando o rompimento (Figura 4) ou a desagregação do material

(UCHÔA, 2007). O deslocamento ocorre quando há a ruptura entre o substrato utilizado e o revestimento de argamassa (Figura 5), assim, ao serem submetidas aos ensaios de percussão, as placas apresentam som oco e, dependendo da manifestação, possui aspecto quebradiço, ou endurecido (BAUER, 2008).

Figura 4 – Deslocamento de revestimento cerâmico



Fonte: Sahade (2015).

Figura 5 – Deslocamento de revestimento argamassado



Fonte: Pinheiro (2019).

Bauer (2008), lista algumas possíveis causas para o aparecimento do deslocamento:

- Dimensão Máxima Característica (DMC) do agregado para preparação do chapisco;
- Base em que está sendo aplicada suja;
- Acabamento inadequado da camada intermediária;
- Cura inadequada;
- Aplicação de camadas de argamassas com resistências inadequadas.

b) Descolamento por Pulverulência

Bauer (2008) afirma que a pulverulência, além da característica de descolamento da argamassa, pode ser inferida pelo esfarelamento desta, ao ser pressionada, ainda que manualmente. De acordo com Cincotto (1998), o excesso de materiais pulverulentos (resíduos do processo de trituração de rochas para a produção da brita) presentes no agregado, traço reduzido em aglomerantes, ou com excesso de cal, tempo insuficiente destinado à carbonatação da cal, excesso de torrões de argila, presentes no agregado são os principais fatores para a ocorrência do descolamento por pulverulência.

c) Manchas

Normalmente, nota-se que os fungos são os agentes responsáveis pelo processo de aparecimento do mofo, ou bolor (GUERRA *et al.*, 2012). O crescimento desses organismos leva ao aparecimento de manchas (geralmente pretas, ou esverdeadas), resultando em processos químicos no interior da superfície, o que resulta na deterioração do material (SHIRAKAWA *et al.*, 1995).

Além da existência de nutrientes, na superfície estudada, pode-se notar que a umidade elevada do material torna este um ambiente essencial para o crescimento e desenvolvimento de fungos, de modo que o aparecimento dessa manifestação patológica é, comumente, verificado em regiões de baixa evaporação (sombreadas, geralmente), próximas ao solo (umidade ascendente), e detalhes arquitetônicos (SHIRAKAWA *et al.*, 1995).

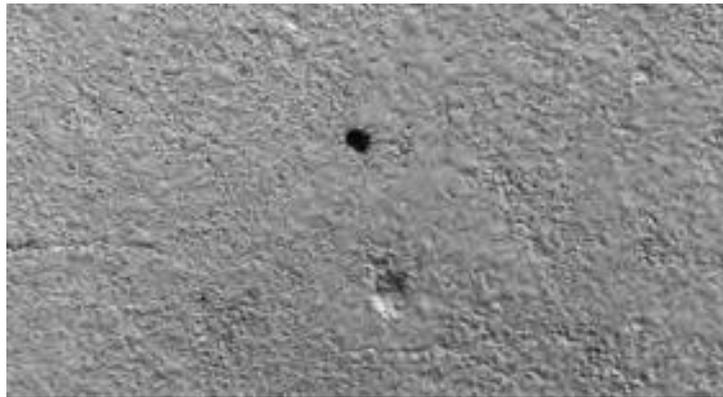
Somados aos danos estéticos na construção, por conta da penetração do micélio fúngico é a parte vegetativa do fungo, composto por hifas, que absorvem os nutrientes), ocorre a perda de coesão e, assim, a degradação do material (SHIRAKAWA, 1995; CANEVA *et al.*, 2000 *apud* GUERRA *et al.*, 2012).

d) Vesículas

A formação de vesículas se dá em decorrência da reação química que ocorre entre o óxido de cálcio (devido aos cales mal hidratados) e a água, esta, por ser expansiva, gera a formação de pequenos pontos que surgem no revestimento (Figura 6) e, ao inchar, destacam a pintura (CINCOTTO, 1988).

De acordo com Ferreira e Garcia (2016), o surgimento de vesículas está relacionado ao retardo na hidratação de cales, quando estas não são devidamente extintas antes de sua aplicação. A presença de matéria orgânica no agregado miúdo, e outras impurezas, como pirita e elementos ferruginosos, assim como a argila, podem estar associados a estas manifestações (BAUER, 2008; CAPORRINO, 2018).

Figura 6 – Vesícula em revestimento argamassado



Fonte: Caporrino (2018).

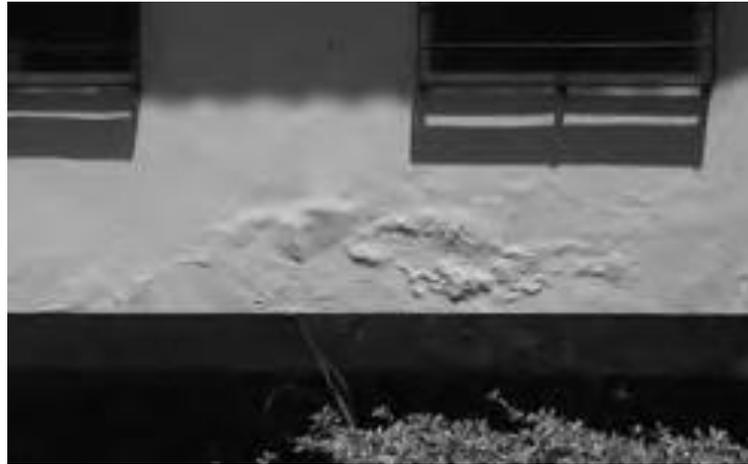
Um dos modos de reconhecer qual material, além do óxido de cálcio, está reagindo com a água ou oxigênio, é através da cor da parte interna da vesícula. Ao apresentarem uma coloração branca, é provável a existência da própria reação de óxido de cálcio com a água (hidratação retardada); a cor avermelhada representa a presença de materiais ferruginosos na areia; já a coloração mais escura, no caso, marrom ou preto, indica a presença de pirita ou matéria orgânica (CINCOTTO, 1988).

e) Empolamento

Para Carasek (2010), o empolamento está relacionado ao retardo na hidratação de, dessa vez, óxido de magnésio, este também presente na cal, cuja extinção não foi realizada

(Figura 7). Ocorrendo a formação de bolhas que tem seu volume aumentado progressivamente, e, semelhante à vesícula, é causado por reações entre os elementos presentes na argamassa e a água, ou oxigênio (CINCOTTO, 1988).

Figura 7 – Empolamento de revestimento argamassado



Fonte: Caporrino (2018).

f) Eflorescência

Segundo Bauer (2008), a eflorescência ocorre pela deposição de sais (estes solúveis) na interface do revestimento, de modo generalizado (vários pontos de ocorrência) ou concentrado (Figura 8). Este processo acontece quando há a dissolução de sais de metais alcalinos (potássio e sódio) e alcalino-terrosos (magnésio e cálcio) que estão presentes na argamassa ou no próprio substrato, que, quando em contato com a água são dissolvidos e alcançam a superfície. De acordo com Carasek (2010), a eflorescência ocorre quando há o depósito de sal formado na superfície do revestimento.

Figura 8 – Eflorescência constituída por um pó branco



Fonte: Caporrino (2018).

Por fim, para que se tenha um diagnóstico eficaz sobre a construção é necessário conhecimento aprofundado de todos os mecanismos e das manifestações possíveis que estão ligados a cada patologia que possa existir no objeto que está sendo estudado (FERREIRA; GARCIA, 2016).

g) Fissuras

A fissura é a principal manifestação de dano nas alvenarias (Figura 9), geralmente, originada quando as cargas atuantes excedem a capacidade resistente da estrutura em questão. As fissuras são originadas por tensões de tração, apresentando direção perpendicular ao esforço atuante. Essas tensões podem decorrer de esforços de compressão, tração direta ou cisalhamento, e a frequência dos ciclos de carregamento pode gerar fadiga, causando fissuração (DUARTE, 1998).

Figura 9 – Fissuras em revestimento argamassado



Fonte: Sahade (2005).

O aparecimento de fissuras, nos revestimentos de argamassa, pode ser causado por inúmeros fatores, dentre eles: movimentações térmicas, movimentações higroscópicas, retração restringida (shrinkage), deformações nas estruturas, recalques de fundação, alterações químicas (reações adversas) dos materiais, retração nos produtos de base cimentícia (SILVA, 2007; MONTE *et al.*, 2018). As variações de temperatura e umidade podem provocar deslocamentos ou deformações no material, resultando no aparecimento de tensões de tração e cisalhamento. Mesmo que uma variação não seja capaz de fissurar o material, que costuma possuir resistência última suficiente para não romper em um ciclo, a repetição dessas variações leva à ruptura por fadiga. A expansão decorrente de reações químicas, da ação de sulfatos e hidratação de cales, também podem gerar quebras e fissuras em tijolos e argamassas (DUARTE, 1998).

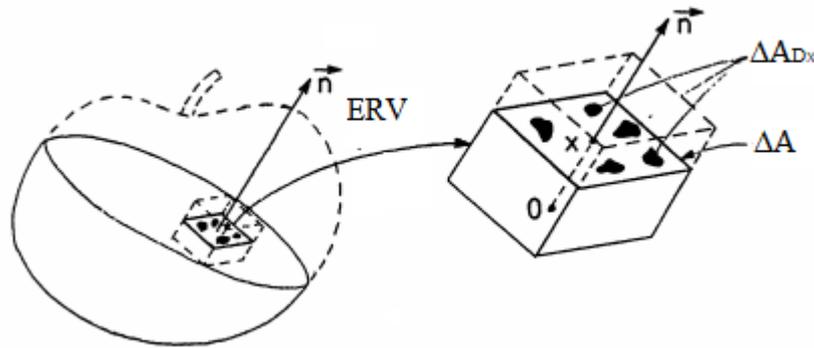
2.3 Mecânica do dano contínuo

O conceito de dano para a mecânica dos materiais está relacionado ao aparecimento e ao crescimento de microfissuras que possam causar microscopicamente uma descontinuidade em uma determinada região, considerada contínua em larga escala. Do ponto de vista físico, o dano está relacionado a deformações irreversíveis e, mais comumente, a uma dissipação de deformação que ocorre tanto em nível de Elemento Representativo de Volume (ERV) – que está relacionado ao menor volume capaz de representar um conjunto maior, para os quais valerão as hipóteses típicas utilizadas para definição das propriedades dos materiais, como

módulo de elasticidade, capacidade térmica, ou coeficiente de dilatação linear térmica – quanto em microescala (LEMAITRE; DESMORAT, 2005).

Na Figura 10 é apresentado um corpo danificado e um ERV, onde ΔA representa a área da superfície de intersecção com o plano orientado pelo vetor normal (\vec{n}), já ΔA_D corresponde à área efetiva das intersecções de todas as microfissuras ou microcavidades situadas nessa superfície.

Figura 10 – Definição de dano



Fonte: Lemaitre (1996).

Kachanov (1958) foi pioneiro no conceito de dano ao definir a variável conhecida como “continuidade”, que se refere à área que efetivamente contribui com a resistência. Esse termo é representado como sendo $1 - D$, onde D é o dano que, de acordo com Lemaitre (1985), é expresso como a densidade da superfície efetiva de fissuras ou cavidades, ou seja, refere-se à perda de seção resistente, representada pela Equação 1.

$$D = \frac{\Delta A_D}{\Delta A} \quad (1)$$

Onde D pode assumir valores que variam de 0 a 1. Quando $D = 0$, indica um estado não danificado; se $D = 1$, representa que o houve uma ruptura do elemento em duas partes; já quando D assume valores entre 0 e 1, caracteriza o estado danificado.

Em materiais elásticos com dano, costuma-se associar a presença do dano (correspondente microscopicamente a perdas de ligação no material, e macroscopicamente à perda de área transversal resistente a uma dada carga) a decréscimos de rigidez, que pode ser medida macroscopicamente. Onde as ligações ainda não foram perdidas, o módulo de elasticidade no ponto material (considerando uma análise homogênea onde as propriedades no material podem ser bem representadas por propriedades “médias” nos volumes e nas

superfícies) deve ser o mesmo módulo de elasticidade original. Porém, como há uma perda de área efetiva, isso se traduz em uma perda aparente de módulo a nível do volume material como um todo. Sendo assim, o módulo de elasticidade do material danificado é dado pela Equação 2.

$$\tilde{E} = E (1 - D) \quad (2)$$

Onde:

\tilde{E} : Módulo danificado (GPa);

E: Módulo de elasticidade inicial (GPa);

D: Dano (adimensional).

Babadopulos *et al.* (2019) sugerem que é importante estudar tanto a evolução do dano no material quanto a quantidade de ciclos necessários para a ruptura. Enquanto a evolução do dano permite considerar os valores aparentes de módulo de elasticidade ao longo do processo, a quantidade de ciclos, em diferentes níveis de deformação, permite a previsão de vida de fadiga.

2.4 Fadiga e previsão da vida de fadiga

2.4.1 Fadiga

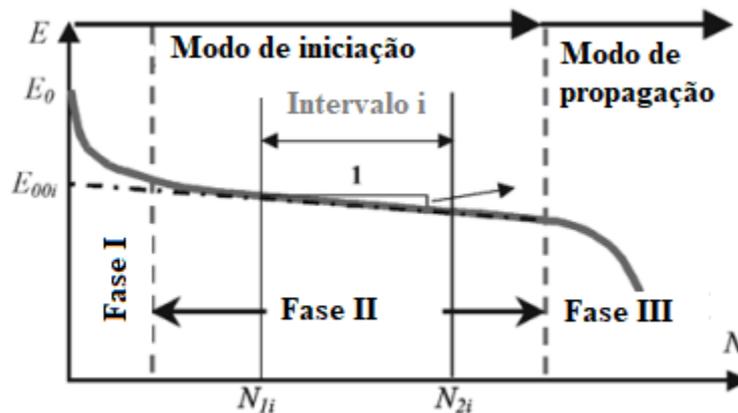
A definição apresentada por Schön (2009) diz que fadiga “é um processo de degradação das propriedades mecânicas de um material que se caracteriza pelo crescimento lento de uma ou mais trincas sob a ação de carregamento cíclico, levando eventualmente à fratura”. Para Lemaitre (1996), dano por fadiga gera uma mudança na rigidez aparente (cf. Equação 2) do material e ocorre de forma distribuída pelo seu volume. É um fenômeno que acarreta perda de seção resistente, produzindo em nível microscópico, uma descontinuidade no material, conforme detalhado anteriormente, na seção 2.3. Balbo (2000), que focou em materiais cimentícios, também relaciona a microfissuração progressiva aos danos causados em peças constituídas dos materiais danificados.

Diante disso, a fadiga pode ser entendida como um fenômeno físico, caracterizado pelo desgaste, ou deterioração, progressivo e irreversível do material, em decorrência de carregamentos repetidos (LEE; BARR, 2004). O processo de fadiga pode ser verificado após a

aplicação de determinado número de carregamentos (ciclos de carregamentos), que causem fissura ou rompimento do material (BAUER *et al.*, 2012).

Di Benedetto *et al.* (2004) afirmaram que em materiais viscoelásticos, a fissuração por fadiga é constituída por, pelo menos, duas fases (iniciação e propagação) correspondentes ao processo de degradação (Figura 11). Possivelmente, para materiais de comportamento mais próximos da elasticidade (sem muito atraso entre sinais de carregamento e de deformação), como materiais cimentícios, a fase de iniciação pode ser pouco perceptível. A Fase I, conhecida como fase de iniciação, é manifestada pelo início e pela propagação de microfissuras que resultam na redução mais rápida do módulo de elasticidade. Já na Fase II, propagação, o acúmulo contínuo das microfissuras pode ser observado através da mudança mais gradual de módulo de elasticidade. Há, portanto, a concentração de microfissuras que resultam na formação de microfissuras, que se propagam pelo material. Quando isso ocorre, entra-se na terceira fase do comportamento, que não pode ser utilizada para avaliar propriedades do material no contexto da Mecânica do Contínuo.

Figura 11 – Gráfico típico do módulo de elasticidade em função da repetição de ciclos ao longo de ensaios de fadiga



Fonte: Adaptado de Di Benedetto *et al.* (2004).

2.4.2 Fadiga térmica

De acordo com Uchôa (2007), a fadiga pode ocorrer durante os primeiros ciclos de carga, após uma grande quantidade de ciclos aplicados, ou até mesmo nunca ocorrer durante a vida útil do sistema de revestimento, a depender do carregamento. No caso das argamassas de

revestimento externo, as principais patologias existentes são, basicamente, a fissuração, os descolamentos cerâmicos e os descolamentos das camadas de argamassa (BAUER *et al.*, 2011).

Bauer *et al.* (2011) perceberam que as argamassas de revestimento externo, que estão sujeitas a maior taxa de incidência solar, apresentaram maior frequência de patologias ligadas às propriedades físico-mecânicas. Dessa forma, a partir das observações diárias, pode-se estabelecer uma relação direta com a ocorrência das patologias, concluindo que o processo pelo qual as rupturas ocorrem não é um processo estático, mas sim, de fadiga.

Deve-se considerar, segundo Bauer *et al.* (2012), o efeito dos carregamentos cíclicos, como é o caso da radiação solar (carregamento térmico), que gera maior amplitude térmica e números de ciclos. A exposição a ciclos de carregamentos repetidos acarreta diminuição da rigidez do material, o que pode levar à falha por fadiga (LEE; BARR, 2004).

2.4.3 Diagrama S-N ou curva de Wöhler

Segundo Norton (2004), o fenômeno de falha por fadiga foi observado, pela primeira vez, no início do século XIX, quando os eixos de um vagão ferroviário começaram a apresentar defeitos. August Wöhler então, começou a realizar uma investigação científica sobre o fenômeno que havia ocorrido, que foi chamado de falha por fadiga. Wöhler, por um período de 12 anos, realizou testes, em laboratório, em eixos até que houvesse a falha por repetição do carregamento. Com suas descobertas foi possível identificar que o colapso de um material era resultado de uma determinada quantidade de ciclos de tensão aplicados. Além disso, sugeriu-se a existência de uma tensão limite de resistência à fadiga, abaixo da qual o material seria capaz de aguentar indefinidamente a aplicação de ciclos de uma tensão alternada (PRAVIA, 2003).

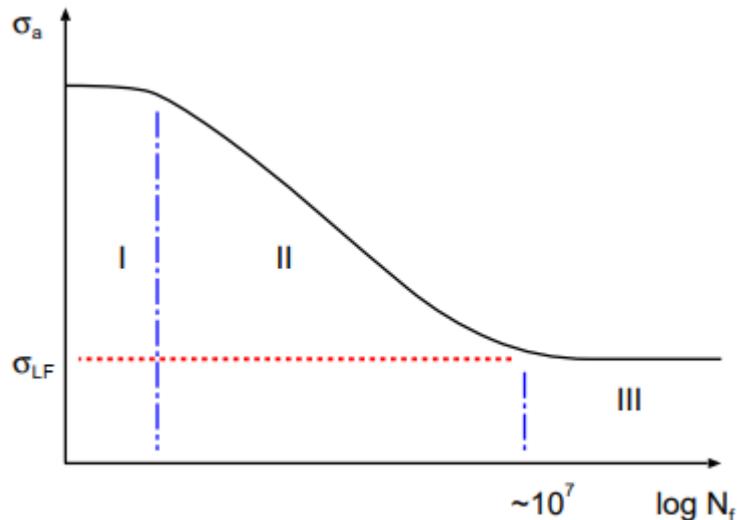
Wöhler fez três proposições em 1860, que ainda têm bastante relevância atualmente:

- I – Um material pode ser induzido a falhar pela múltipla repetição de tensões, que isoladamente são menores que a da resistência estática (ou seja, dos limites de escoamento e de resistência).
- II – A amplitude de tensão é decisiva para a destruição da coesão do metal.
- III – A tensão máxima influencia apenas no sentido de que quanto maior ela for, menores são as amplitudes de tensão que levam à falha (ou seja, um aumento da tensão média reduz a resistência à fadiga do material para uma dada amplitude de tensão) (SCHÖN, 2009).

Considerando essas proposições, foi criado o diagrama S-N (ou Curva de Wöhler), que se tornou a ferramenta padrão para caracterizar o comportamento de materiais sob o efeito

de solicitações alternadas quanto à fadiga. O efeito da amplitude de tensão é representado pela curva de Wöhler (Figura 12), que associa a amplitude de solicitação ao número de ciclos necessários para a falha por fadiga. A curva de Wöhler pode ser obtida a partir de experimentos em tensão-compressão, a amplitude constante, relacionando os níveis de solicitação ao número de ciclos observados até a ruptura (PRAVIA, 2003; LEMAITRE; DESMORAT, 2005). Outros ensaios são frequentemente utilizados (DI BENEDETTO *et al.*, 2004), em diversos materiais.

Figura 12 – Curva S-N típica, que representa as amplitudes de carregamento no eixo y e o número de repetição de ciclos requerido para levar à ruptura por fadiga



Fonte: Adaptado de Schön (2009).

Como apresentado na Figura 12, a curva S-N pode ser dividida em três setores:

I - Para amplitudes de tensão próximas ao valor da resistência estática (ou seja, do limite de resistência) a curva apresenta um patamar de saturação, ou seja, se a falha não ocorre no primeiro ciclo é provável que ela venha a ocorrer apenas muito mais tarde (por exemplo, após 100 ciclos).

II - Para amplitudes de tensão intermediárias há um aumento da resistência à fadiga com a diminuição da amplitude de tensão. Este é o domínio usual de trabalho da maioria dos materiais.

III - Para amplitudes de tensão menores que um dado valor mínimo (conhecido como limite de fadiga, σ_{LF}) a fratura passa a ocorrer num valor virtualmente infinito de ciclos. (SCHÖN, 2009).

O limite de fadiga (σ_{LF}) é a tensão abaixo da qual, teoricamente, nenhum dano por fadiga ocorre no material. Contudo, nem sempre é possível determiná-la experimentalmente, isso porque há casos em que o trecho horizontal da curva S-N se estabiliza em um nível de

amplitude de tensão correspondente a um número muito elevado de ciclos, inviabilizando essa determinação experimental em laboratório (LEMAITRE; DESMORAT, 2005; SCHÖN, 2009).

2.4.4 Previsão da vida de fadiga

É comum observar estruturas que estão sujeitas a carregamentos de amplitude variável. Como afirma Takahashi (2014), a maioria das estruturas mecânicas é submetida a carregamentos deste tipo, assim como suspensão de automóveis, rotor, biruta e pás de um aerogerador, que estão expostos ao vento e em contato direto com vibração. Este também é o caso de argamassas em revestimentos externos, sujeitas às variações de temperatura, de umidade, e ainda acompanhando o movimento natural do edifício. Em outras palavras, há carregamentos alternados em argamassas de revestimento, e o risco de fadiga dependerá das propriedades dos materiais empregados e das condições ambientais.

Para poder analisar o dano que as estruturas irão sofrer, por conta das tensões aplicadas, de diversas amplitudes, é preciso um modelo que transforme as amplitudes de carregamento variáveis em amplitudes de carregamento constante. Segundo Ferreira (2011), normalmente é difícil encontrar, em uma situação real, uma estrutura que esteja submetida a variações cíclicas de mesma amplitude em todos os pontos e com frequência constante. Dessa forma, a curva S-N (Wöhler) não pode ser utilizada para se calcular diretamente o tempo de vida por fadiga, pois é obtida para condições constantes de frequência e amplitude. Nesses casos com diferentes condições de carregamento, a regra de Palmgren-Miner permite a adaptação e uma previsão de fadiga para carregamentos de amplitudes variáveis. Esse método de cálculo do acúmulo de danificação (em termos de consumo de vida de fadiga) relaciona o somatório das razões entre os números de ciclos de fato aplicados de uma determinada amplitude de tensão e o número de ciclos que essa mesma amplitude de tensão precisaria para gerar falha por fadiga no material. Ou seja, o dano por fadiga pode ser considerado como a soma dos danos correspondentes, decorrentes de diferentes carregamentos aplicados, até que seja alcançado o limite de falha do material (consumo total da vida de fadiga), como descrito pela Equação 3.

$$C(t) = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (3)$$

onde:

C(t): consumo de vida de fadiga até o instante t;

k: número de níveis de tensão no espectro de blocos de carregamento;

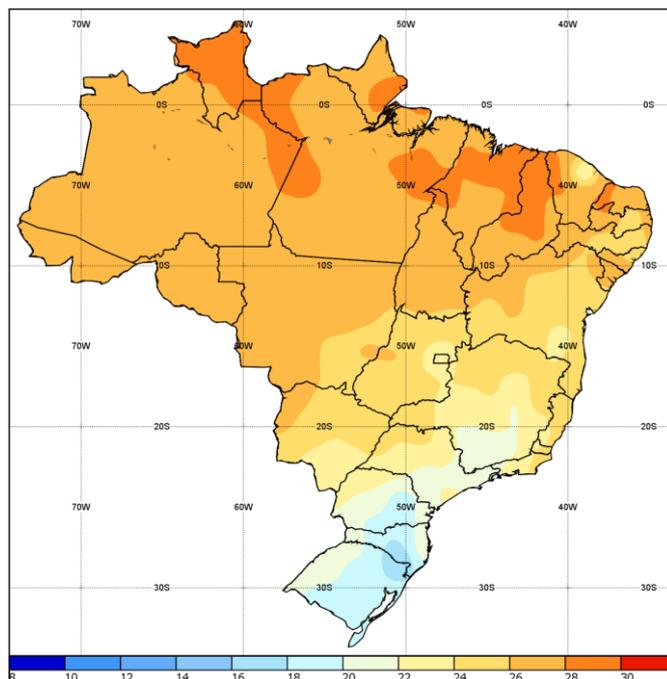
n_i : i-ésimo número de ciclos realizados sob determinada amplitude de tensão até o instante t ;
 N_f : i-ésimo número de ciclos para a falha da amplitude de tensão utilizada.

Cada uma desses elementos somados representa ciclos a uma dada amplitude de carregamento, que contribuem, em um determinado nível de tensão, com a mesma quantidade de dano (em termos de consumo da vida de fadiga do material). Para que ocorra falha, segundo este método, o somatório do número de ciclos em uma amplitude de tensão específica sobre o número de ciclos para a falha, nesta mesma tensão, deve ser igual a 1. O valor 1 representa o consumo de toda a capacidade de fadiga do material, enquanto 0 representa que nenhum avanço no consumo da vida de fadiga do material ocorreu.

2.5 Efeito da variação de temperatura

As intempéries interferem bastante no comportamento dos materiais, modificando suas propriedades, seja pelo efeito da chuva, do vento, da radiação solar, da temperatura, da umidade, atuando de forma isolada ou concomitante. A temperatura do ambiente é suscetível a variações, seja ao longo de períodos curtos ou maiores. No Brasil, este fenômeno se distribui de forma diferente, principalmente, ao longo das regiões e da época do ano, como é possível observar na Figura 13, que identifica as várias faixas de temperatura média do Brasil.

Figura 13 – Normal climatológica do Brasil (1981-2010)



Fonte: INMET (2018).

Mesmo em um clima fixo, há relevantes variações de temperatura, que podem interferir no comportamento dos materiais. As variações de temperatura do ar registradas no município de Fortaleza/CE, por exemplo, que tem um clima tropical, no período de 1981 a 2010, estão dispostas na Tabela 1, e servirão de base para este estudo.

Tabela 1 – Variações de temperaturas (°C) do ar na estação de Fortaleza-CE (1981 - 2010)

| T | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Média |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Máxima | 31,0 | 30,9 | 30,4 | 30,3 | 30,4 | 30,1 | 30,3 | 30,8 | 31,0 | 31,2 | 31,5 | 31,5 | 30,8 |
| Mínima | 24,5 | 24,3 | 23,9 | 23,8 | 23,7 | 23,1 | 22,7 | 22,9 | 23,5 | 24,2 | 24,7 | 24,9 | 23,9 |

Fonte: Adaptado INMET (2018).

Com base nas informações dispostas na Tabela 1, percebe-se que a temperatura do ar máxima média do município de Fortaleza/CE foi de 30,8 °C, já a temperatura do ar mínima média foi por volta de 23,9 °C, para o período considerado. É relativamente uma pequena amplitude térmica do ar comparada a outras regiões no Brasil.

Considerando o Município de Campo Bom-RS, que apresenta clima subtropical, é possível observar as variações térmicas, no período de 1981 a 2010 (Tabela 2). Esses dados também servirão de base para o estudo, por apresentar uma amplitude térmica relativamente grande, se comparada a outras localidades do país.

Tabela 2 – Variações de temperaturas (°C) na estação de Campo Bom-RS (1981 - 2010)

| T | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Média |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Máxima | 32,2 | 31,6 | 30,6 | 27,2 | 23,1 | 20,9 | 20,5 | 22,7 | 23,5 | 26,8 | 29,4 | 31,6 | 26,7 |
| Mínima | 19,4 | 19,4 | 18,5 | 15,4 | 11,7 | 10,0 | 9,0 | 10,2 | 11,8 | 14,5 | 16,2 | 18,1 | 14,5 |

Fonte: Adaptado INMET (2018).

É importante notar que as variações de temperatura apresentadas pelas tabelas anteriores se referem à temperatura do ar. Contudo, o comportamento térmico depende da intensidade da radiação solar incidente e das características térmicas dos materiais componentes do sistema de revestimento externo, incluindo a própria cor. Essas características são influenciadas pela posição e orientação da fachada da edificação, coeficiente de absorção térmica do material, condutância da superfície, propriedades como calor específico, massa específica, condutibilidade térmica, coeficiente de dilatação térmica (UCHÔA, 2007).

Uma maneira de realizar o monitoramento das temperaturas atingida em fachadas é por meio da termografia de infravermelho. Esse método, segundo Bauer e Pavón (2015),

permite ainda observar e mapear fissuras, identificar heterogeneidades, através das imagens termográficas coletadas. Outra maneira, se dá pela utilização de termopares, podendo ser instalados nas diferentes camadas do sistema de revestimento argamassado. O monitoramento das variações de temperatura, torna-se indispensável, visto que, as amplitudes térmicas podem assumir valores da ordem de 60°C a 70°C em alguns casos, gerando tensões internas que podem oferecer riscos à durabilidade deste sistema de revestimento.

A mudança de temperatura em um material implica na variação dimensional do mesmo, ocorrendo a dilatação com o aumento da temperatura, e a retração com a diminuição da temperatura. A propriedade dos materiais que governa essas mudanças, é chamada de coeficiente de dilatação linear térmica (α).

Quando há influência da temperatura, como é o caso dos sistemas de revestimento externo, que estão suscetíveis a essas variações, é necessário considerar o efeito da dilatação térmica, que ocasiona deformações no material, caso esteja com extremidades livres, ou então tensões de origem térmica, caso haja impedimento às livres deformações. A deformação térmica, decorrente da variação de temperatura, é dada pela Equação 4:

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T \quad (4)$$

onde:

ε_T : deformação de origem térmica;

α : coeficiente de dilatação térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$);

ΔT : variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Como o material apresentado estava livre para se deformar, não houve o aparecimento de tensões relacionadas com a tendência de deformação de origem térmica. Contudo, ao se considerar uma superfície que possua restrições nas extremidades, surgirá uma tensão associada à tendência de deslocamento ou de deformação, decorrente da variação de temperatura. Essas tensões correspondem à tensão mecânica necessária para produzir deformação de igual intensidade e oposta à tendência de deformação esperada devido à variação de temperatura.

Sendo assim, a partir do conhecimento do módulo, da deformação de origem térmica (Equação 4), é possível calcular as tensões decorrentes da variação de temperatura pela Equação 5:

$$\sigma = -E\alpha\Delta T \quad (5)$$

onde:

σ : tensão (MPa);

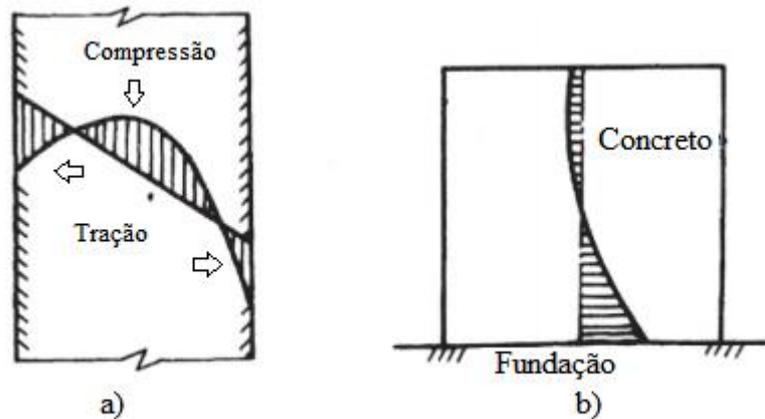
E: módulo de elasticidade (MPa);

α : coeficiente de dilatação térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$);

ΔT : variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Sublinha-se que para grandes planos de fachada, por exemplo, gradientes térmicos aparecem em seu volume, o que, na prática, corresponde a impedimentos internos de variação dimensional. Isso ocorre porque cada parte do volume tende a variar de tamanho em diferentes intensidades, o que fica impedido, gerando tensões de origem térmica, resultando em fissuras, caso haja restrição ao deslocamento, como exposto na Figura 14. Amin *et al.* (2009) destacam que a influência da variabilidade do material, dentre outros fatores, a evolução do módulo elástico e o coeficiente de dilatação térmica devem ser incorporados na medição de tensões térmicas.

Figura 14 – Efeito de dois tipos de tensão de origem térmica: (a) auto-tensão (b) restrição de deformação



Fonte: Bofang (2014).

Quanto ao desenvolvimento das manifestações patológicas presentes nos sistemas de revestimento externo, devem ser considerados os carregamentos cíclicos. Segundo Bauer *et al.* (2012), o mais evidente dos carregamentos cíclicos é o devido a efeitos térmicos provenientes da radiação solar intermitente. Essas incidências térmicas afetam direta (no caso da interface superficial) e indiretamente (no caso das interfaces entre as camadas) o

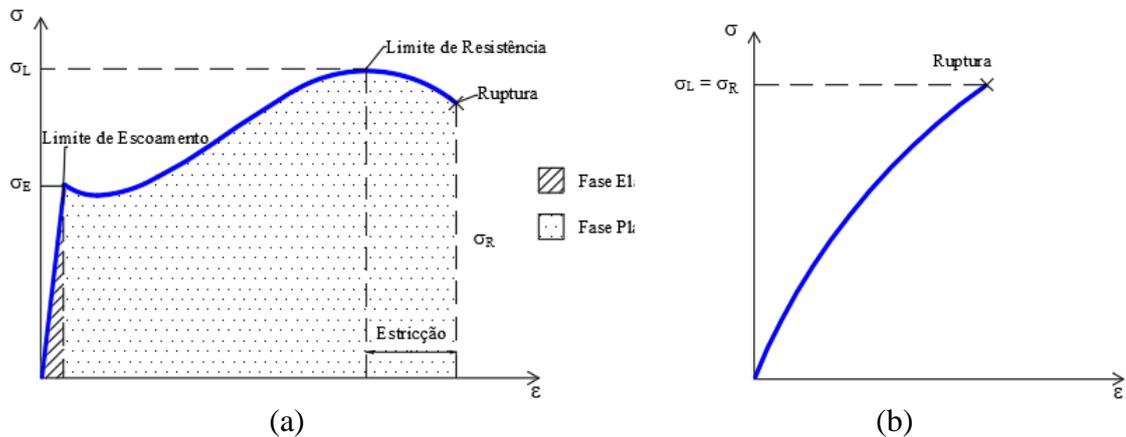
comportamento do material, tanto por tenderem a produzir deformações e tensões, quanto por induzirem nos materiais diferentes propriedades mecânicas. Trata-se, então, de um problema termomecânico acoplado.

2.6 Generalidades sobre módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, também chamado de módulo de Young ou módulo de deformação, é a propriedade de materiais elásticos lineares dada pela razão de proporcionalidade entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante, apresentando uma medida de resistência à deformação elástica do material, estando associado a uma propriedade mecânica do material que indica sua rigidez. Materiais muito rígidos, como o aço, podem apresentar valores da ordem de 200 GPa; já materiais esponjosos, como a borracha, podem apresentar valores mais baixos, próximos a 0,70 MPa (HIBBELER, 2010). Mesmo quando não se trata de materiais elásticos lineares perfeitos, aproximações são úteis utilizando o modelo elástico linear, com vistas a avaliar tensões e deformações pequenas, teoricamente no domínio elástico.

Com base na tensão (σ) e na deformação (ϵ) determinadas em ensaios mecânicos, é possível obter o diagrama tensão-deformação, que fornece informações importantes acerca das propriedades do material, como o módulo de elasticidade. Os diagramas tensão-deformação permitem classificar os materiais em duas categorias: dúcteis e frágeis. Os materiais dúcteis são capazes de acumular deformações apreciáveis antes da ruptura. Após um valor crítico de tensão de escoamento (σ_E), há um grande crescimento da deformação com um aumento relativamente pequeno da carga aplicada (Figura 15a). A tensão (σ_L) corresponde ao limite de resistência, ou seja, carga máxima aplicada ao elemento. A tensão de resistência à ruptura (σ_R) se refere ao valor nominal de resistência, que não corresponde à tensão real aplicada no material, decorrendo, normalmente, de um fenômeno de excesso localizado de deformação, conhecido como estrição (BEER *et al.*, 2011), mais perceptível em ensaios em metais. Já materiais cimentícios convencionais, como argamassas, apresentam comportamento frágil, frequentemente não linear (Figura 15b).

Figura 15 – Diagrama tensão-deformação de: (a) um material dúctil típico (b) um material frágil típico, como argamassas.

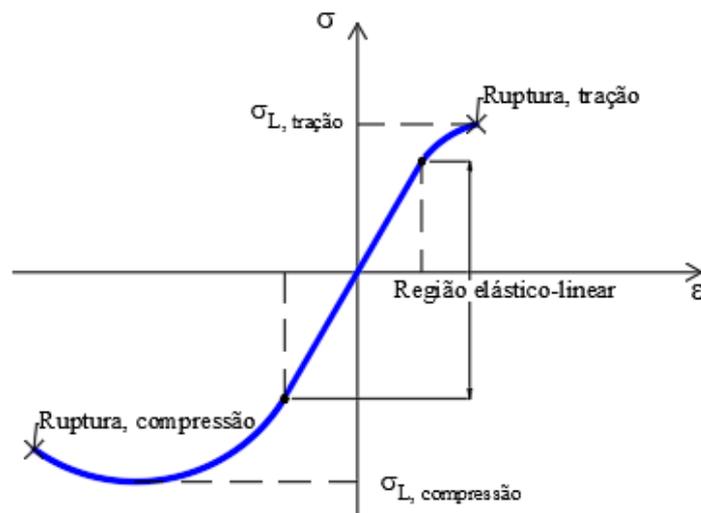


Fonte: Adaptado de Beer *et al.* (2011).

Nos materiais frágeis, a ruptura ocorre sem acúmulo significativo de deformação plástica, não havendo distinção clara entre o limite resistência (σ_L) e a resistência à ruptura (σ_R). A deformação no instante da ruptura acaba sendo muito menor que em materiais dúcteis. Um material pode ainda se comportar de maneira elástica ou plástica. Se a deformação aparece instantaneamente acompanhando a tensão, e desaparece integralmente e instantaneamente ao cessar o carregamento, o material é considerado elástico. O comportamento plástico se dá quando o limite de escoamento é atingido e, ao retirar a força aplicada, a deformação não desaparece completamente. Na

Figura 16, é apresentado o comportamento do concreto quanto à tração e quanto à compressão. Pela curva, é possível observar o limite de resistência à compressão como maior que o de tração, o que é costumeiro em materiais frágeis.

Figura 16 – Diagrama tensão-deformação típico de concretos



Fonte: Beer *et al.* (2011).

O módulo de elasticidade corresponde à inclinação da curva tensão-deformação em sua zona elástico-linear. Verifica-se que o módulo é igual tanto para a tração quanto para compressão. Essa parte do diagrama obedece à lei de Hooke, na qual a tensão é proporcional à deformação em 1 dimensão, conforme apresentado na Equação 6.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6)$$

onde:

σ : tensão (MPa);

E: Módulo de elasticidade de Young (MPa);

ε : deformação (m/m).

A partir da análise das deformações, as quais uma estrutura está sujeita, é possível não só determinar as tensões atuantes, como também minimizar seus avanços.

2.6.1 Módulo de elasticidade em argamassas

Para Bauer *et al.* (2012), a composição dos materiais, que fazem parte do sistema de revestimento externo argamassado, é a formação de camadas justapostas, de argamassa de emboço e reboco, placas cerâmicas e argamassas colantes, entre outros sistemas. Eles são dispostos com uma camada de contato entre si, além de possuírem propriedades mecânicas diferentes, principalmente quanto à resistência mecânica e ao módulo de elasticidade. Assim, quando todo o conjunto for submetido a variações dimensionais, como as devidas a variações térmicas, tais camadas serão solicitadas de formas diferentes e, do mesmo modo, responderão de formas diferentes, sendo as superfícies, os locais que mais apresentam falhas, como o descolamento, por exemplo. Por este motivo, se faz importante investigar o módulo de elasticidade, pois a durabilidade do revestimento de argamassa está diretamente associada à sua capacidade de absorver deformações (SILVA; CAMPITELI, 2008).

Silva e Campiteli (2008) avaliaram a influência da resistência mecânica e das proporções de cimento, cal e areia, no módulo dinâmico. Utilizaram dois tipos de areia, a britada e a natural, e perceberam que a areia britada teve grande influência no aumento do módulo de elasticidade, o que resultou também no surgimento de um maior número de fissuras no revestimento. Já Silva *et al.* (2009) investigaram o efeito da geometria dos corpos de prova nos ensaios de módulo estático e módulo dinâmico, em argamassas, e concluindo que a geometria cilíndrica apresenta resultados menos variáveis que a prismática.

Por se tratar de um tema pouco abordado em argamassas, optou-se por desenvolvê-lo com bases nos estudos existentes para concretos. Considerações feitas para este material serão, portanto, expandidas para argamassa.

Em trabalhos como os de Zhao e Chen (1998); Wu *et al.* (1999); Wu *et al.* (2001); Nadeau (2003), Beshr *et al.* (2003), e Al-Oraimi *et al.* (2006), é apontado que o módulo de deformação do concreto depende do tipo de agregados utilizados e da estrutura da pasta de cimento. Segundo Wight (2009), o concreto, mesmo sendo composto de materiais elásticos e frágeis, apresenta curva de tensão-deformação não-linear e, se assemelha um pouco à de materiais dúcteis. Isso se deve à formação de microfissuras que podem ocorrer na zona de transição (entre a pasta e o agregado), tal região possui propriedades mecânicas inferiores ao restante do material analisado, com uma presença maior de poros e espaços vazios, o que está diretamente ligado a uma diminuição na resistência à compressão do concreto e, logo, o seu módulo de elasticidade (BARBOSA, 2010). De acordo com Shannag (2000) a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto são propriedades físicas interligadas, mas por haver uma relação não linear entre elas, o crescimento observado para a resistência não é proporcional ao crescimento do módulo de elasticidade.

O concreto é um material elástico até determinado ponto. Um dado material é considerado perfeitamente elástico quando a deformação surge e desaparece, no carregamento e no descarregamento, respectivamente, de maneira instantânea e totalmente reversível. Contudo, vale ressaltar que esse fator não implica numa relação linear, entre tensão-deformação, visto que o comportamento elástico também pode ser verificado em relação não-lineares, como no caso do vidro e de algumas rochas.

Segundo Aragón *et al.* (2019) uma das características importantes de se avaliar, quanto à resistência à fissuração superficial, é o módulo de elasticidade. Este módulo pode ser determinado por meio de ensaio estático, ensaio dinâmico por meio da propagação de ondas ultrassônicas e por meio de ensaio dinâmico por análise de carregamento cíclico (ARAGÓN *et al.*, 2019). Deste modo, a rigidez e a capacidade de deformação prévia à ruptura da argamassa são características que necessitam de avaliação para evitar fissuração do material, durante sua vida útil (SWAMY, 1971; DENIZ, 2015).

2.6.2 Métodos de ensaio para determinar o módulo de elasticidade

Métodos de ensaios destrutivos e não-destrutivos vêm sendo utilizados para obter relações com as propriedades mecânicas dos materiais. A informação da resistência é um parâmetro de entrada para os ensaios de módulo estático, NBR 8522 (ABNT, 2017) e módulo complexo, DNIT 416 (IPR, 2019), determinado para carregamentos senoidais, pois define o nível das amplitudes de carregamento a serem consideradas no ensaio de maneira a buscar se manter no domínio elástico-linear de comportamento mecânico. Enquanto isso, ensaios dinâmicos (que produzem efeitos inerciais), como os ensaios de determinação de velocidade de pulso ultrassônico NBR 15630 (ABNT, 2008) produzem tensões e deformações muito pequenas nos materiais.

Possan *et al.* (2020) utilizaram o modelo de Popovics (2008) para obter correlações entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico em concretos, e concluíram que é possível estimar o módulo estático por meio do módulo dinâmico, implicando grandes vantagens por se tratar de um ensaio não-destrutivo, rápido e de baixo custo.

Para concretos, a razão entre o módulo de elasticidade estático e o módulo dinâmico é sempre inferior a 1, assumindo valores maiores quanto maior for o valor da resistência (NEVILLE, 2016).

2.6.2.1 Módulo de elasticidade estático

Módulo de elasticidade, a rigor, só pode ser usado para se referir à parte reta da curva de tensão-deformação ou, no caso de não haver um trecho reto, à tangente da curva na origem. O módulo de elasticidade tangente inicial pode ser determinado por meio de ensaios estáticos. Tal módulo se aplica somente a variações muito pequenas de cargas. Já o módulo de elasticidade secante é um módulo estático, determinado de forma experimental, por meio da aplicação de carga em corpos de prova cilíndrico, obtendo-se a relação tensão-deformação (NEVILLE, 2016).

Atualmente, não há instruções normativas que orientem a obtenção do módulo estático em argamassas. Por esse motivo, neste trabalho foi considerada a NBR 8522 (ABNT, 2017), desenvolvida originalmente para concretos, para uso em argamassas. Manteve-se o fluxo geral do procedimento de ensaio e a geometria recomendada, modificando-se apenas o material testado. Para se obter o módulo de elasticidade, inicialmente, realiza-se a determinação da

resistência à compressão (resistência a ruptura), obtida pela média dos resultados de pelo menos dois corpos de prova (CP). A referida norma prescreve duas metodologias, uma considerando um patamar de tensão controlada para medição da deformação e a outra considerando um patamar de deformação controlada para medição da tensão necessária.

2.6.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado pela vibração de um corpo de prova a partir da aplicação de uma tensão considerada insignificante (NEVILLE, 2016). De acordo com Neville (2016), o módulo dinâmico do concreto é semelhante ao módulo tangente inicial (devido às pequenas tensões), este por sua vez é consideravelmente maior que o módulo secante para maiores deformações.

O procedimento experimental para determinação do módulo dinâmico para argamassas é descrito pela NBR 15630 (ABNT, 2008), que trata da determinação deste módulo por meio da propagação de onda ultrassônica de compressão (onda P). O módulo pode ser obtido através da Equação 7, conforme NBR 15630 (ABNT, 2008):

$$E_{din} = v_p^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (7)$$

onde:

E_{din} : Módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

v_p : é a velocidade de propagação da (onda P) ultrassônica, expressa em milímetros por microssegundos (mm/ μ s);

ρ : é a densidade de massa aparente do corpo-de-prova, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

μ : é o coeficiente de Poisson. Devido à falta de equações suplementares, com vistas a determinar um valor estimado de módulo, costuma-se adotar nesta equação o valor 0,2 para o coeficiente de Poisson, o que evidentemente pode diferir da realidade, conforme discutido a seguir.

No intuito de se determinar o módulo de elasticidade dinâmico e o coeficiente de Poisson de maneira simultânea, uma solução é se utilizar da velocidade do pulso de onda P, e da velocidade de pulso ultrassônico com ondas de cisalhamento (onda S). O procedimento experimental para determinação do módulo dinâmico para argamassas é descrito pela Equação 8, em que é utilizado o coeficiente de Poisson calculado conforme a Equação 9.

$$E_{din} = v_p^2 \rho \frac{(1 + \mu_c)(1 - 2\mu_c)}{1 - \mu_c} \quad (8)$$

$$\mu_c = \frac{(1/2)(v_p/v_s)^2 - 1}{(v_p/v_s)^2 - 1} \quad (9)$$

onde:

E_{din} : Módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

v_p : é a velocidade de propagação da (onda P) ultrassônica, expressa em milímetros por microssegundos (mm/μs);

v_s : é a velocidade de propagação da (onda S) ultrassônica, expressa em milímetros por microssegundos (mm/μs);

ρ : é a densidade de massa aparente do corpo-de-prova, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

μ_c : é o coeficiente de Poisson calculado.

2.6.2.3 Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson é entendido pela relação entre a deformação transversal e a deformação longitudinal para um carregamento uniaxial. Tais deformações são oriundas da aplicação de uma carga uniaxial aplicada a um determinado CP. Em concretos, o coeficiente é influenciado pelo agregado utilizado, assumindo valores entre 0,15 e 0,22 (NEVILLE, 2016). Swamy (1971) verificou que não há diferenças significativas para coeficiente de Poisson para concretos úmidos e secos, na faixa de 0,15 - 0,32; e para argamassas úmidas e secas, na faixa de 0,17 - 0,30.

2.6.2.4 Módulo de elasticidade complexo

Módulo de elasticidade complexo considera a relação entre as amplitudes de tensão e deformação (valor absoluto do módulo complexo, por vezes conhecido como módulo dinâmico, apesar da inexistência de efeitos inerciais) e o atraso (ângulo de fase entre a tensão e a deformação), em um regime permanente, para um carregamento harmônico (DI BENEDETTO *et al.*, 2011). No teste de módulo complexo, há aplicação de uma carga de

compressão e obtenção das deformações, por exemplo com uso de *Linear Variable Differential Transformers* (LVDTs) – sensores usados para medir deslocamento lineares – instalados na amostra. É possível realizar o ensaio para diferentes temperaturas e diferentes frequências de carregamentos. Geralmente, utiliza-se de amostras de 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura. A referência normativa existente para avaliação do módulo complexo no Brasil é a norma DNIT ME 416 (IPR, 2019), que trata da determinação do módulo dinâmico e do ângulo de fase de misturas asfálticas. Devido ao tipo de carregamento alternado típico do fenômeno investigado neste trabalho, decidiu-se incluir no estudo o método de determinação de módulo com carregamentos senoidais, utilizando-se a referência do DNIT ME 416 (IPR, 2019).

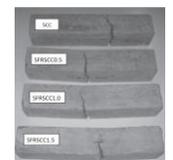
2.7 Ensaio de fadiga

Lee e Barr (2004) estudaram o comportamento do concreto (um material cimentício como a argamassa que inclui também agregados graúdos) sob fadiga. Os referidos autores elencaram alguns parâmetros que influenciam no comportamento de fadiga, tais como: condições de carregamento, frequência de carga, condições de contorno, nível de tensão, número de ciclos, composição da matriz e razão de tensão.

Medeiros *et al.* (2015) verificaram o efeito da frequência no comportamento da fadiga de concretos sob compressão. Observaram que a vida de fadiga (números de ciclos até a falha), para frequências inferiores a 4 Hz, é menor do que para frequências maiores. Deve-se sublinhar, porém, a grande dispersão observada nos resultados.

Pela carência de estudos voltados à fadiga em argamassa, utilizou-se como base, trabalhos realizados em outros materiais (como por exemplo, argamassa de cimento asfáltico e concreto) para auxiliar no desenvolvimento deste trabalho. No Quadro 2 é possível observar os diferentes ensaios de fadiga desenvolvidos na literatura, para diferentes geometrias, frequências e amplitudes de carregamento. Na Universidade Federal do Ceará, para materiais de betuminosos (mas possivelmente adaptável a outros materiais de construção), Babadopulos (2014) e, posteriormente, Lucas Júnior (2018) implementaram uma metodologia de avaliação de fadiga. O ensaio é realizado utilizando-se uma máquina servo-hidráulica de modelo UTM 25 com célula de carga de 25 kN, podendo ser realizado entre as frequências de 0,1Hz e 10Hz, sendo esta última a frequência comumente empregada.

Quadro 2 – Ensaios de fadiga desenvolvidos na literatura

| Características do CP | Dimensões | Ensaio | Carregamento | Freq. | Amplitude | Vantagem | Desvantagem | Autor |
|--|--|--|---|-------|--|---|--|---|
|  Argamassa | Prismático com entalhes Largura = 12cm Espessura = 12 cm | MTS 810 capacidade de 1 kN a 100 kN | Carregamento senoidal - tensão alternada | 5 Hz | 12, 10, 8 e 6 kN | Garante o rompimento no centro do CP. | Dificuldade de eliminar a excentricidade. Ensaio não-homogêneo. | Uchôa (2007) |
|  Concreto Asfáltico | Cilíndrico 10x15 cm | UTM - 25 | Tração-compressão (deslocamento controlado no atuador) Carregamento senoidal | 10 Hz | 200, 350 e 500 $\mu\epsilon$. 200, 300 e 400 $\mu\epsilon$. | Geometria permite boa acoplagem dos LVDTs**. Poucos problemas com excentricidade. Ensaio homogêneo. | Processo de colagem, das placas de acoplagem, demorado. Rompimento nem sempre ocorre no centro, geralmente associado à presença de vazios no CP. | Babadopulos (2014) Lucas Júnior (2018) |
|  Argamassa | Cilíndrico 10x20 cm | MTS 810 capacidade de 100 kN | Cíclico – compressão pura | 4 Hz | 32 kN | Ensaio homogêneo. Poucos problemas com excentricidade. | Não garante rompimento no centro, divergência de valores. | Chagas (2009) |
|  Concreto | Prismático 10x10x50 cm | SCA | Ensaio de flexão de quatro pontos. Amplitude constante. Carregamento senoidal. | 10 Hz | Razão de tensões 0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65 | Facilidade na elaboração do CP, ensaio homogêneo. | Dispersão nos valores obtidos. Vasto números de corpos de prova. | Goel; Singh (2014) |

Quadro 2 – Ensaios de fadiga desenvolvidos na literatura (continua)

| | | | | | | | | |
|---|------------------------|---------------------|--|------------------------------|--|---|---|-------------------------------|
|  Asfalto | Prismático 7x7x28cm | MTS 810 | Ensaio de flexão de quatro pontos tensão controlada. Carregamento senoidal. | 10 Hz | Razão de tensões 0.90, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65 e 0.55 | Os resultados sugerem que o modelo é adequado para descrever o comportamento termo-mecânico de fadiga | Modelo não aplicado à materiais que sofrem mudanças morfológicas em decorrência da temperatura. | Qiu <i>et al.</i> (2013) |
|  Concreto | Cilíndrico 10x30cm | - | Carregamento de compressão cíclico | 5 Hz | - | Aplicado a qualquer histórico de carregamento por fadiga. | Não apresenta uma previsão segura, quanto ao uso da regra de Palmgren-Miner. | Baktheer <i>et al.</i> (2019) |
|  Argamassa | Prismático 4x4x16cm | MTS 810 – 250 kN | Carregamento de compressão cíclico | 1,3 Hz | 70% do carregamento estático. | Metodologia foi adequada para interpretar o comportamento à longo prazo. | Acoplagem deve ser feita com dois materiais de módulo semelhantes, para evitar deslocamentos | Grazzini (2018) |
|  Concreto | Cúbico 10x10x10cm | STM | Carregamento de compressão - senoidal | 4 Hz, 1 Hz, 1/4 Hz e 1/16 Hz | Baseado nos resultados de resistência à compressão | Facilidade na elaboração do CP, ensaio homogêneo. | Grande dispersão nos resultados de fadiga. | Medeiros <i>et al.</i> (2015) |

*CP – Corpo de Prova

** LVDTs - *Linear Variable Differential Transformers* – sensor usados para medir deslocamento lineares.

Fonte: Autoria própria (2024).

No ensaio realizado por Uchôa (2007), foi utilizada uma máquina servo-hidráulica de modelo MTS 810 (*Material Test System*), com célula de carga variando de 1 a 100 kN. Foi considerado o ensaio cíclico à tração, variando os valores de amplitude de tensão. A tensão alternada variou de 0 até o valor absoluto da tensão desejada (1,29 MPa; 1,08 MPa; 0,86 MPa; 0,65 MPa e 0,55 MPa), utilizando frequência de 5 ciclos por segundo (Figura 17). Para esta situação, utilizou-se como parâmetro de parada, para o caso de ensaios longos, o número de repetições de 10^6 ciclos (que equivale a 74 h, considerando a frequência de 5 Hz).

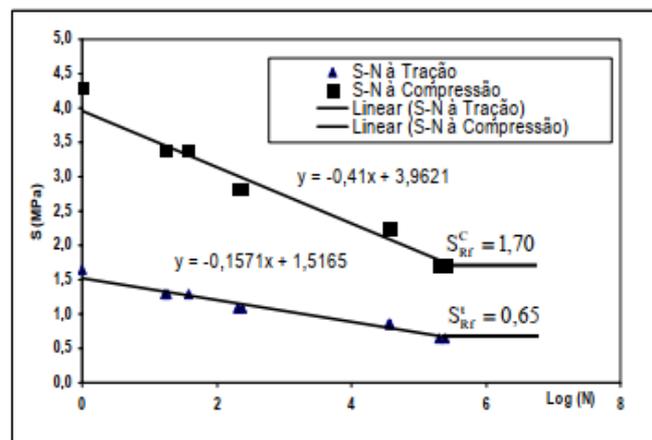
Figura 17 – Resultados do ensaio de fadiga da argamassa de emboço

| CP | Força (kN) | Tensão (MPa) | Vida (ciclos) |
|----|------------|--------------|---------------|
| 1 | 12 | 1,29 | 18 |
| 2 | 12 | 1,29 | 17 |
| 3 | 12 | 1,29 | 39 |
| 4 | 10 | 1,08 | 198 |
| 5 | 10 | 1,08 | 240 |
| 6 | 10 | 1,08 | 210 |
| 7 | 8 | 0,86 | 35714 |
| 8 | 8 | 0,86 | 37482 |
| 9 | 8 | 0,86 | 35203 |
| 10 | 6 | 0,65 | 200934 |
| 11 | 6 | 0,65 | 251000 |
| 12 | 5 | 0,55 | 1336000 |

Fonte: Uchôa (2007).

Diante dos resultados do ensaio, foi possível determinar a curva Wöhler para argamassa sob tração e, utilizando-se método baseado nos trabalhos de Tepfers e Kutti (1979), que considera o paralelismo das curvas, encontrou-se a curva Wöhler correspondente à compressão. Os resultados das curvas S-N obtidas são apresentados a seguir (Figura 18).

Figura 18 – Curvas S-N de fadiga linearizadas para argamassa de emboço

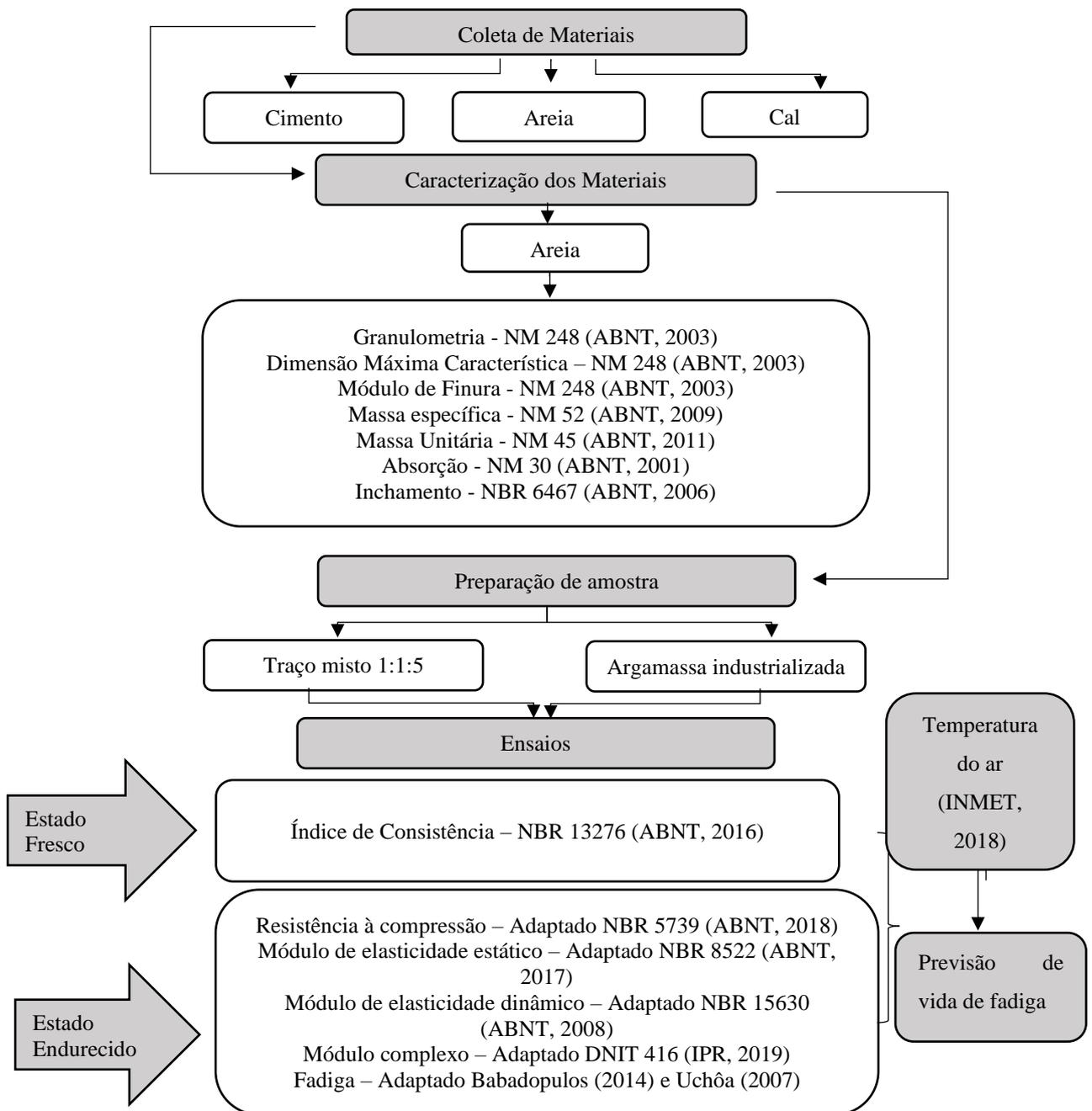


Fonte: Uchôa (2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 19 é possível observar o fluxograma de atividades para realização desta pesquisa. O fluxograma trata da caracterização dos materiais e dos ensaios que foram realizados. Os ensaios de módulo de elasticidade e de fadiga serão detalhados mais adiante, visto que, necessitarão de adaptações específicas para este trabalho, com uso pioneiro para argamassas.

Figura 19 – Fluxograma de atividades para realização desta pesquisa



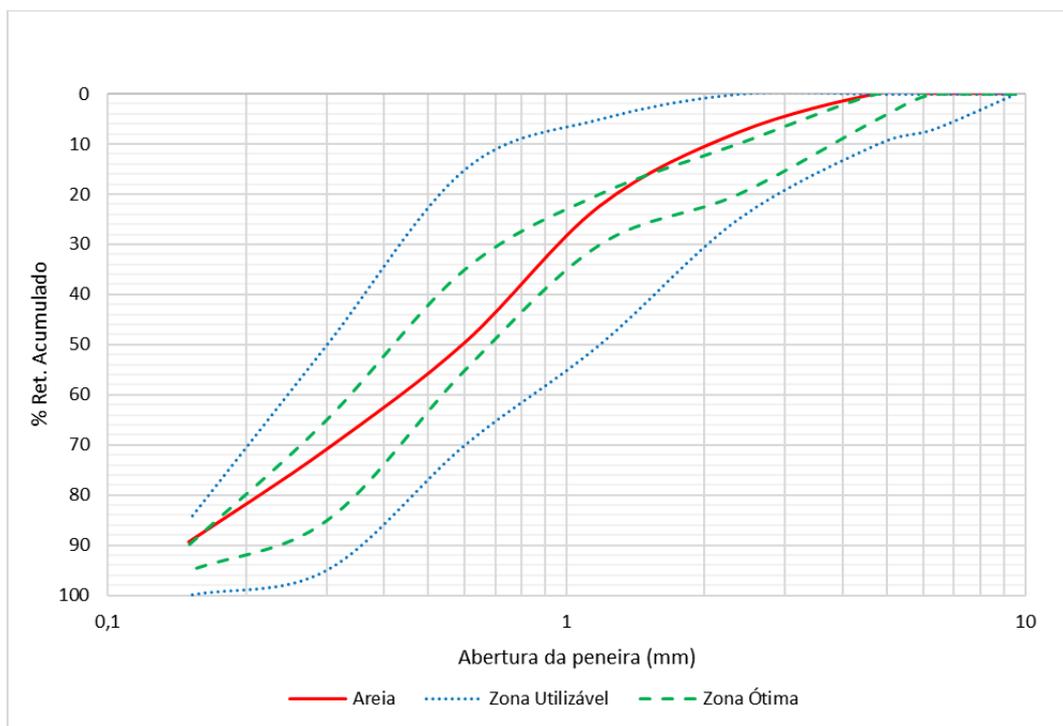
Fonte: Autoria própria (2024).

3.1 Materiais

Nesta pesquisa, foram utilizadas duas argamassas de revestimento externo, uma comum (A), dosada em obra; e outra industrializada (B), Matrix Sistema Revestimento, 2202 Revestimento Fachada, cedida pela Votorantim, própria para rebocar paredes externas.

Para o preparo da argamassa A, utilizou-se Cimento Portland Composto (CP II-F-32), cedido pela APODI. A massa específica do cimento foi de $3,17 \text{ g/cm}^3$. A cal hidratada tipo I, CH-I, da fabricante Carbomil, apresentou massa específica de $2,54 \text{ g/cm}^3$. O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural, proveniente da Região Metropolitana de Fortaleza. A curva granulométrica (Figura 20) caracterizou a maior parte do agregado como pertencente à zona ótima e a outra parte ficou contemplada na zona utilizável. Na Tabela 3, é apresentado resultados dos ensaios de caracterização realizados com o agregado miúdo.

Figura 20 – Curva granulométrica da areia



Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 3 – Características físicas da areia

| Ensaio | Norma | Unidade | Areia |
|------------------|------------------------|-------------------|-------|
| DMC | NM248 (ABNT, 2003) | mm | 4,75 |
| Módulo de finura | NM248 (ABNT, 2003) | - | 2,40 |
| Massa específica | NBR NM 52 (ABNT, 2009) | g/cm ³ | 2,57 |
| Massa unitária | NBR NM 45 (ABNT, 2011) | g/cm ³ | 1,50 |
| Absorção de água | NM 30 (ABNT, 2001) | % | 0,77 |
| Inchamento | NBR 6467 (ABNT, 2006) | - | 1,28 |

Fonte: Autoria própria (2024).

No preparo das argamassas, foi utilizada água potável, fornecida pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), responsável pelo abastecimento água no município de Fortaleza. Os ensaios foram realizados na Universidade Federal do Ceará, *campus* do Pici, Fortaleza-CE, especificamente, no Laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) e no Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Materiais para Infraestrutura (INCT – Infra).

3.2 Método de pesquisa

3.2.1 Preparo das argamassas

O traço da argamassa A, considerado nesta pesquisa, foi de 1:1:5 (traço misto), constituído por de 1 saco de cimento (50 kg), 1 saco de cal (20 kg) e 5 padiolas de areia (40 L cada). A escolha deste traço misto se deu por ser, usualmente, empregado nas argamassas de revestimento externo de Fortaleza-CE. Assim como a argamassa B que teve seu uso bastante difundido em edifícios da cidade.

O preparo da argamassa A seguiu as recomendações da NBR 16541 (ABNT, 2016), que trata do preparo da mistura para realização de ensaios em argamassas, e recomenda que o seu índice de consistência deve ser de 260 mm \pm 5 mm. O ensaio para obtenção do índice de consistência é regido pela NBR 13276 (ABNT, 2016), que especifica que a medição do espalhamento da argamassa deve ser realizada após a moldagem e retirada do cone, e da aplicação de 30 golpes na mesa de consistência. A partir do resultado da consistência, foi possível determinar o fator água/cimento da mistura de maneira a obter uma consistência padronizada em todas as amostras de argamassa preparadas para os ensaios.

Para a argamassa A, foi obtido um espalhamento de 265 mm para um fator água/cimento de 1,05. Foram realizadas a moldagem de 30 corpos de prova, cilíndricos, nas dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de comprimento. Na Tabela 4, é possível observar a composição e as proporções do traço em massa e, na Tabela 5, é possível observar o consumo de materiais para o preparo das argamassas.

Tabela 4 – Traço unitário da argamassa A

| Traço unitário em massa (kg) | | | |
|------------------------------|-----|-------|------|
| Cimento | Cal | Areia | a/a |
| 1 | 0,4 | 5,98 | 1,05 |

Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 5 – Consumo de materiais para produção das argamassas

| Consumo de materiais (kg) | | | |
|---------------------------|------|--------|-------|
| Cimento | Cal | Areia | Água |
| 12,95 | 5,18 | 77,484 | 19,04 |

Fonte: Autoria própria (2024).

Para o preparo da argamassa B, foram utilizados três sacos de 25 kg, totalizando 75 kg da argamassa “2202 Revestimento Fachada – Matriz”, da Votorantim, própria para rebocar paredes externas. Foram seguidas as recomendações contidas na embalagem, de que se deveria adicionar de 3,5 L a 3,8 L de água por saco de argamassa. Inicialmente foram adicionados 3,5 L por saco, e o restante (para completar os 3,8 L, portanto 300mL) foi adicionado aos poucos. O índice de consistência obtido ao final do processo foi de 230 mm. Foram moldados 25 CPs da argamassa B.

A moldagem dos CPs para ambas as argamassas foi realizada em duas camadas, aplicando-se 12 golpes por camada, em seguida bateu-se levemente na face externa dos moldes para eliminar eventuais vazios, conforme recomendações da norma NBR 5738, para moldagem de corpos de prova de concreto (ABNT, 2016), que apresentam as dimensões dos CPs necessárias para a investigação pretendida nesta pesquisa com os ensaios de módulo e de fadiga. Após a desforma dos CPs de argamassa, estes foram colocados em cura úmida (Figura 21), onde permaneceram até um dia antes da realização dos ensaios. Posteriormente à cura, os CPs foram deixados secando ao ar, por 24h, de modo a evitar que a umidade interferisse nas medições.

Figura 21 – Cura úmida dos CPs de argamassa



Fonte: A autoria própria (2024).

3.2.2 Avaliação do módulo em argamassas

Como são escassas as recomendações para avaliação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em argamassas, foram incorporadas algumas orientações destinadas ao concreto, para que se pudesse realizar a análise das propriedades mecânicas das argamassas. Desta feita, a escolha da geometria adotada para os ensaios foi a cilíndrica, com 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, seguindo recomendações da Comité Euro-International du Béton (CEB) e da NBR 5738 (ABNT, 2016), que consideram que os CPs cilíndricos devem ter relação altura/diâmetro maior ou igual a 2.

Os testes com argamassas A e B ocorreram para 5 idades (3, 7, 14, 30 e 56 dias). Não foi viabilizada a realização do ensaio aos 28 dias por conta da logística de uso do laboratório, por este motivo, considerou-se a idade de 30 dias, sem prejuízo para os objetivos desta pesquisa e considerando-se que não há exigência normativa de controle aos 28 dias para argamassas. Para cada idade, foram considerados 5 CPs. Destes, dois foram empregados no ensaio de resistência à compressão (ensaio destrutivo); e os demais foram utilizados nos ensaios de determinação do módulo dinâmico (com pulso ultrassônico, ensaio não-destrutivo), do módulo complexo (com sinais senoidais, ensaio considerado não-destrutivo) e, por fim, do módulo estático (com patamares de tensão, ensaio considerado destrutivo pelo fato de finalizar com a ruptura do CP para verificação da resistência estática). Nas idades de 14, 30 e de 56 dias, além do que já foi apresentado, os ensaios de velocidade de pulso ultrassônico, para determinação do módulo dinâmico, foram utilizados de maneira intercalada para avaliar se haveria evidência de dano nos carregamentos para determinação do módulo nos demais ensaios realizados, utilizando-se os mesmos CPs ao longo do processo com os diferentes ensaios. No

caso da idade de 56 dias, além disso, outro tipo de onda ultrassônica (onda S) também foi utilizada, de maneira a se evitar a necessidade de adoção por hipótese de valor de coeficiente de Poisson.

a) Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão seguiu as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018), originalmente desenvolvida para concreto. Foi realizado em prensa eletromecânica EMIC, que é uma prensa universal com célula de carga com capacidade máxima de 300 kN, e limite inferior de 30 kN. Fora deste intervalo, o equipamento não é capaz de revelar, com segurança, o valor da resistência medida, o que será importante na discussão dos resultados. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 6, que apresenta a média das resistências medidas, por argamassa, nas 5 idades consideradas (3, 7, 14, 30 e 56 dias).

Tabela 6 – Resistência à compressão das argamassas

| Idade | A (MPa) | | | B (MPa) | | |
|---------|---------|------|-------|---------|------|-------|
| | R1 | R2 | Média | R1 | R2 | Média |
| 3 dias | 2,70 | 2,57 | 2,639 | 2,34 | 2,44 | 2,388 |
| 7 dias | 3,45 | 3,19 | 3,316 | 3,95 | 3,81 | 3,883 |
| 14 dias | 3,52 | 3,08 | 3,303 | 1,57* | 3,82 | 3,820 |
| 30 dias | 4,53 | 4,28 | 4,406 | 5,28 | 4,26 | 4,769 |
| 56 dias | 5,75 | 5,49 | 5,618 | 5,42 | 6,38 | 5,900 |

*dado desconsiderado por erro no ajuste da máquina; Argamassa Comum (A), Argamassa Industrializada (B).

Fonte: Autoria própria (2024).

b) Módulo de elasticidade dinâmico determinado através da propagação de onda ultrassônica

A metodologia de ensaio empregada para o estudo tomou como base a NBR 15630 (ABNT, 2008), que trata da estimação do módulo de elasticidade dinâmico através da determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Utilizou-se o equipamento Pundit Lab, da marca Proceq, com transdutores de ondas de compressão de 54 kHz de frequência nominal (Figura 22). A densidade de massa aparente do corpo de prova foi obtida conforme orienta a NBR 13280 (ABNT, 2005). Conforme apontado na Seção 2.6.2.2, os coeficientes de Poisson de argamassas podem variar, evoluir com o tempo etc., havendo

incerteza no valor dessa propriedade. Sendo assim, diferentes coeficientes de Poisson foram adotados para a estimação do módulo de elasticidade dinâmico conforme a Equação 7, sendo eles: 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4. Com esses dados, foi possível determinar diferentes valores de módulo de elasticidade dinâmico para as argamassas, para as diferentes idades. Os resultados serão apresentados de maneira conjunta ao valor adotado de coeficiente de Poisson. Para os ensaios, foram testados três CPs de cada argamassa, para cada idade. A Figura 22 apresenta a realização de um ensaio, após calibração do sinal com contato entre o emissor e o receptor.

Figura 22 – Determinação da velocidade e do tempo de voo da onda ultrassônica, no corpo de prova de argamassa



Fonte: Autoria própria (2024).

c) Módulo complexo

Para a determinação do módulo complexo em argamassas, tomou-se como base a norma DNIT 416 (2019). Para a realização dos ensaios foi utilizada a prensa universal servo-hidráulica UTM-25. Os dados de entrada fornecidos ao equipamento para realização dos ensaios estão dispostos no Quadro 3. Os ensaios foram realizados em três etapas: a primeira considerou a tensão máxima igual à 10% da resistência à compressão da argamassa; a segunda, 20% da resistência; e a terceira, 30% da resistência. Isso foi feito com vistas a avaliar se há efeito da amplitude de carregamento no módulo medido, mesmo para tensões consideradas baixas (abaixo de 30% f_c). Foi considerado o valor médio da resistência à compressão (f_c) para escolha das cargas a serem aplicadas. Com isso, foi possível determinar os módulos complexos para as três faixas de amplitudes de carregamento adotadas. Percebe-se a presença de uma carga

de contato no valor de 5%fc, necessária para a adequada realização do ensaio, sem perda de contato da prensa com o CP. Além disso, variou-se a frequência e a contagem de ciclos em todas as etapas, de maneira a avaliar se a frequência de carregamento é um fator importante, visto que em campo as frequências são da ordem de um ciclo por dia, enquanto em laboratório as frequências variam de 0,062Hz a 10Hz. Foi considerada temperatura fixa de $27^{\circ}\text{C} \pm 1$. Foram testados três CPs de cada argamassa, para cada idade.

Quadro 3 – Parâmetros de entrada para determinação do módulo complexo

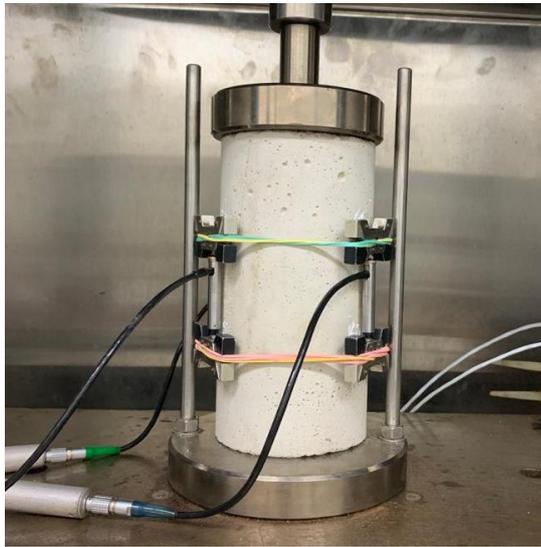
| ETAPA I | | | | | | |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Frequência (Hz) | 10 | 5 | 1 | 0,5 | 0,1 | 0,062 |
| Nº ciclos | 30 | 10 | 10 | 5 | 5 | 5 |
| Tensão Máx (kPa) | 10% de fc |
| Tensão Mín (kPa) | 5% de fc |
| ETAPA II | | | | | | |
| Frequência (Hz) | 10 | 5 | 1 | 0,5 | 0,1 | 0,062 |
| Nº ciclos | 30 | 10 | 10 | 5 | 5 | 5 |
| Tensão Máx (kPa) | 20% de fc |
| Tensão Mín (kPa) | 5% de fc |
| ETAPA III | | | | | | |
| Frequência (Hz) | 10 | 5 | 1 | 0,5 | 0,1 | 0,062 |
| Nº ciclos | 30 | 10 | 10 | 5 | 5 | 5 |
| Tensão Máx (kPa) | 30% de fc |
| Tensão Mín (kPa) | 5% de fc |

*fc – Resistência à compressão

Fonte: Autoria própria (2024).

Os CPs cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura passaram por um processo de retificação, finalizados a cerca de 194 mm de altura. Posteriormente, fixaram-se os *targets*, que são os pinos onde se acoplam os LVDTs (usados para medir os deslocamentos). Então, montou-se o ensaio na prensa e prosseguiu-se com sua realização (Figura 23).

Figura 23 – Montagem do CP para realização do ensaio de módulo complexo



Fonte: Autoria própria (2024).

d) Módulo de Elasticidade Estático

O ensaio de módulo estático em argamassa foi adaptado da norma NBR 8522 (ABNT, 2017), originalmente desenvolvida para concreto. Foi considerado o valor médio da resistência à compressão (f_c) para escolha das cargas a serem aplicadas. Utilizou-se, para a determinação do módulo de elasticidade (Figura 24), a metodologia da tensão fixa. Isso consistiu na aplicação de um carregamento e descarregamento, a uma velocidade de $(0,45 \pm 15)$ MPa/s, em quatro etapas, com patamares de 60s. Na primeira etapa, aplicou-se uma carga igual a de 30% da resistência à ruptura, por 60 s, e efetuou-se o descarregamento. Na segunda, carregou-se o CP novamente, mas dessa vez, com carga igual a 0,5 MPa, por 60 s e, em seguida, aplicou-se um carregamento correspondente à 30% da tensão de ruptura, pelo mesmo período, e efetuou-se o descarregamento. A terceira etapa se deu da mesma forma da segunda. Já na quarta etapa, efetuou-se novamente o carregamento de 0,5 MPa, mantendo-se por 60 s, fez-se a leitura da deformação “a”. Posteriormente, elevou-se a tensão, equivalente a 30% da resistência de ruptura, por 60 s; fez-se a leitura da deformação “b”. A partir dessas informações, foi possível obter o módulo de elasticidade, dado em GPa. Assim como nos ensaios anteriores, foram testados três CPs de cada argamassa, por idade.

Figura 24 – Realização do ensaio de módulo estático



Fonte: Autoria própria (2024).

3.2.3 Rotina de ensaios de módulo de elasticidade

Nas idades de 3 e 7 dias, o processo de avaliação dos módulos de elasticidade, dos corpos de prova (CPs) de argamassas A e B, se deu em 4 etapas:

1ª: Realização dos ensaios de rutura simples para obtenção da resistência à compressão (2 CPs). Ensaio destrutivo.

2ª: Realização dos ensaios de módulo dinâmico, utilizando o equipamento de ultrassom (3 outros CPs). Ensaio não-destrutivo (o CP continua sendo utilizado nos ensaios subsequentes).

3ª: Realização dos ensaios de módulo complexo, na UTM-25, com amplitude de carga de 30% da resistência à compressão, utilizando os mesmos 3 CPs do ensaio anterior. Ensaio não-destrutivo (o CP continua sendo utilizado nos ensaios subsequentes).

4ª: Realização dos ensaios de módulo estático, na EMIC, utilizando os mesmos 3 CPs dos ensaios anteriores. Ensaio considerado destrutivo (pois finaliza com a ruptura simples dos CPs).

A partir da idade de 14 dias, os ensaios de módulo complexo e módulo estático passaram a ser intercalados com o ensaio de módulo dinâmico, de tal modo que os testes ocorreram nas seguintes etapas:

1ª: Realização dos ensaios de ruptura simples para obtenção da resistência à compressão (2 CPs). Ensaio destrutivo.

2ª: Realização dos ensaios de módulo dinâmico, utilizando o equipamento de ultrassom (3 CPs). Ensaio não-destrutivo (o CP continua sendo utilizado nos ensaios subsequentes).

3ª: Realização dos ensaios de módulo complexo, na UTM-25, com amplitude de carga de 30% da resistência à compressão, utilizando os mesmos 3 CPs do ensaio anterior. Ensaio não-destrutivo (o CP continua sendo utilizado nos ensaios subsequentes).

4ª: Realização dos ensaios de módulo dinâmico, com o equipamento de ultrassom, utilizando os mesmos 3 CPs testados nos ensaios de módulo complexo. Ensaio não-destrutivo (o CP continua sendo utilizado nos ensaios subsequentes).

5ª: Realização da primeira parte dos ensaios de módulo estático (antes da ruptura), na EMIC, utilizando os mesmos 3 CPs dos ensaios anteriores. Ensaio não-destrutivo (o CP continua sendo utilizado nos ensaios subsequentes).

6ª: Realização dos ensaios de módulo dinâmico, com o equipamento de ultrassom, utilizando os mesmos 3 CPs testados no ensaio de módulo estático, antes da ruptura). Ensaio não-destrutivo (o CP continua sendo utilizado no ensaio subsequente).

7ª: Ruptura simples dos CPs para finalizar o ensaio de módulo estático (Ensaio destrutivo).

Somente para a idade de 56 dias, foram realizados também os ensaios de módulo dinâmico com propagação de onda de cisalhamento (transversal), em adição à onda de compressão longitudinal. Esses ensaios foram acrescentados na 2ª, 4ª e 6ª etapas descritas anteriormente, evitando-se a necessidade de adoção de valor de coeficiente de Poisson por hipótese, e permitindo-se avaliar o efeito da consideração de ambos os pulsos (onda P e onda S) simultaneamente para calcular o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade a partir do ensaio.

3.2.4 Ensaio de fadiga

Para o ensaio de fadiga, em materiais cimentícios, ainda não foram desenvolvidas referências normativas. Contudo, no INCT – Infra, ensaios de tração-compressão direta em concretos asfálticos são corriqueiramente realizados, desde 2013 (Babadopulos, 2014).

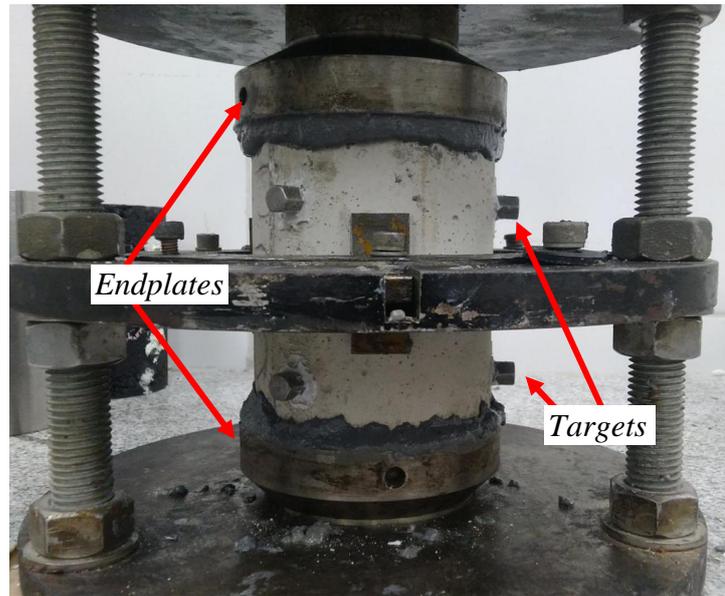
O ensaio consiste na aplicação de ciclos de carregamento e descarregamento, obtendo-se o número de ciclos que o material suporta até se romper, além da variação de rigidez ao longo da repetição de ciclos. O ensaio é atualmente realizado na UTM-25, presente no LMP, laboratório que lidera o INCT – Infra (Laboratório de Mecânica dos Pavimentos - LMP), *cluster* de laboratórios do qual o LMCC também faz parte. A aplicação de carga cíclica no material gera dados brutos que, quando tratados, permitem construir duas curvas principais: (i) curva de degradação, que mostra o módulo em função do número de ciclos para cada ensaio de fadiga; e (ii) curva de Wöhler (curva S-N), que relaciona, para um conjunto de ensaios fadiga em vários corpos-de-prova, a amplitude de tensão e o número de ciclos necessários para a falha por fadiga.

Enquanto a primeira curva fornece a evolução do dano no material ao longo de ensaios de fadiga, a segunda permite obter a tensão limite de resistência (abaixo da qual o material não se rompe) e, mais genericamente, estimar a vida de serviço da argamassa para diferentes amplitudes de tensão. O que é essencial para associar com as amplitudes de tensão correspondentes a variações térmicas compatíveis com o campo em diferentes regiões do Brasil.

Para os ensaios de fadiga foram utilizados corpos de prova cilíndricos, com dimensões 100 mm de diâmetro por 130 mm de altura. Esta altura é utilizada para diminuir as chances de uma ruptura fora das zonas de medida dos LVDTs, o que prejudicaria a avaliação de módulo ao longo do carregamento.

Para obter os CPs, amostras de argamassa foram moldadas em formas de 100 mm de diâmetro por 200 mm, sendo eles, posteriormente, serrados e retificados, igualmente, nas duas extremidades, até ficarem com altura próxima de 130 mm. Posteriormente, os CPs passaram por um processo de colagem, para fixação dos *targets* (pinos onde se acoplam os LVDTs), e dos *endplates* (placas colocadas nas extremidades dos CPs), conforme Figura 25. Recomenda-se que o adesivo epóxi, utilizado na fixação dos *endplates*, seque por pelo menos 24h. Com o CP colado adequadamente, realizou-se a montagem e prosseguiu-se com a realização do ensaio de fadiga (Figura 26).

Figura 25 – Etapa de colagem dos *endplates*



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 26 – Montagem do CP para realização do ensaio de fadiga



Fonte: Autoria própria (2024).

Para este trabalho, as propriedades térmicas da argamassa, como coeficiente de dilatação térmica linear, foram extraídas da literatura, visto que, segundo Esquivel (2009), é comum adotar valores médios para argamassas, que varia de 10 a 12 x 10⁻⁶ °C⁻¹, conforme considerado por Fiorito (1994). Experimentalmente, Saraiva (1998) e Childs (2007) obtiveram valores pertencentes ao mesmo intervalo, para argamassas com diferentes composições. Diante disso, será considerado o valor médio, de 11,5 x 10⁻⁶ °C⁻¹, para permitir o cálculo de tensões de origem térmica, resultantes das tendências de deformação. Em combinação com as curvas de fadiga, seria teoricamente possível avançar na previsão de desempenho das argamassas quanto à fadiga. Reitera-se que, neste trabalho, o foco é a avaliação das propriedades de rigidez, proposição de um ensaio cíclico para argamassas e uma abordagem para prever risco de fadiga.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados resultados dos testes envolvendo módulo de elasticidade e fadiga em argamassas de revestimento. Além disso, será apresentado um exemplo simplificado de avaliação de fadiga térmica em argamassa de revestimento externo, para sublinhar a importância de futuros estudos na área de fadiga de argamassas.

4.1 Módulo de elasticidade

São apresentados os resultados dos módulos de elasticidade de duas argamassas (A e B), para diferentes idades (3, 7, 14, 30 e 56 dias). Tais resultados, foram obtidos pela realização de testes de módulo complexo, módulo estático e módulo dinâmico.

Na Tabela 7 e na Tabela 8, têm-se os resumos dos resultados médios (± 1 desvio padrão), considerando três amostras, obtidos para os ensaios de módulo complexo. Os ensaios consideraram diferentes amplitudes de carregamento, correspondentes à 10%, 20% e 30% da resistência à compressão, e seis faixas de frequências (0,062 Hz, 0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 5 Hz e 10 Hz). Para as idades de 3 dias, da argamassa A, e de 3 e 7 dias, para a argamassa B, foram consideradas apenas uma amplitude de carregamento, correspondente a 30%. Isso se deveu à dificuldade de controlar bem os ensaios na prensa, com amplitudes muito pequenas de carregamento, quando o material ainda tem módulo mais baixo. A partir da idade de 14 dias, todas as argamassas consideraram as três amplitudes de carregamento (10%, 20% e 30%). De modo geral, observou-se que o módulo complexo tem relação direta com a idade; inversa, com a frequência e, inversa com a amplitude de carregamento.

Tabela 7 – Resultados de módulo complexo obtidos para argamassa A, nas idades de 3, 7, 14, 30 e 56 dias

| Idade | Módulo Complexo (GPa) ** | Amplitudes | | |
|---------|--------------------------|------------|-----------|-----------|
| | | 10% | 20% | 30% |
| 3 dias | E* (10) | * | * | 6,08±0,45 |
| | E* (5) | * | * | 6,05±0,45 |
| | E* (1) | * | * | 5,92±0,43 |
| | E* (0,5) | * | * | 5,87±0,42 |
| | E* (0,1) | * | * | 5,65±0,39 |
| | E* (0,062) | * | * | 5,56±0,40 |
| 7 dias | E* (10) | 8,02±0,26 | 7,58±0,22 | 7,12±0,23 |
| | E* (5) | 8,00±0,28 | 7,55±0,24 | 7,09±0,23 |
| | E* (1) | 7,94±0,32 | 7,45±0,26 | 6,95±0,24 |
| | E* (0,5) | 7,96±0,33 | 7,40±0,27 | 6,90±0,25 |
| | E* (0,1) | 7,85±0,40 | 7,32±0,30 | 6,78±0,27 |
| | E* (0,062) | 7,79±0,46 | 7,27±0,31 | 6,72±0,28 |
| 14 dias | E* (10) | 8,44±0,60 | 8,02±0,51 | 7,61±0,51 |
| | E* (5) | 8,39±0,62 | 7,99±0,51 | 7,57±0,52 |
| | E* (1) | 8,29±0,55 | 7,87±0,51 | 7,43±0,52 |
| | E* (0,5) | 8,25±0,52 | 7,81±0,50 | 7,38±0,52 |
| | E* (0,1) | 8,19±0,54 | 7,70±0,52 | 7,24±0,54 |
| | E* (0,062) | 8,13±0,54 | 7,65±0,52 | 7,18±0,54 |
| 30 dias | E* (10) | 9,58±0,38 | 8,85±0,27 | 8,43±0,22 |
| | E* (5) | 9,60±0,39 | 8,82±0,26 | 8,38±0,22 |
| | E* (1) | 9,53±0,45 | 8,69±0,26 | 8,22±0,21 |
| | E* (0,5) | 9,48±0,46 | 8,63±0,27 | 8,16±0,22 |
| | E* (0,1) | 9,53±0,57 | 8,52±0,26 | 8,00±0,22 |
| | E* (0,062) | 9,57±0,65 | 8,48±0,26 | 7,94±0,23 |
| 56 dias | E* (10) | 9,48±0,69 | 9,26±0,69 | 8,95±0,65 |
| | E* (5) | 9,45±0,70 | 9,22±0,70 | 8,91±0,64 |
| | E* (1) | 9,28±0,65 | 9,06±0,70 | 8,74±0,63 |
| | E* (0,5) | 9,24±0,63 | 8,99±0,70 | 8,69±0,62 |
| | E* (0,1) | 9,06±0,52 | 8,80±0,70 | 8,54±0,60 |
| | E* (0,062) | 9,04±0,50 | 8,72±0,71 | 8,47±0,59 |

*: ensaios não realizados devido à baixa amplitude de carregamento e consequente dificuldade de controle na prensa.

** : Módulo complexo (E*) escrito em função das frequências (10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,1 Hz, 0,062 Hz). O percentual das amplitudes de carregamento é em relação à resistência à compressão da argamassa (fc). Os dados numéricos representam as médias dos módulos complexos, seguidas dos desvios-padrão das amostras.

Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 8 – Resultados de módulo complexo obtidos para argamassa B, nas idades de 3, 7, 14, 30 e 56 dias

| Idade | Módulo Complexo (GPa) ** | Amplitudes | | |
|-------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| | | 10% | 20% | 30% |
| 3 dias | E* (10) | * | * | 5,99 ±0,22 |
| | E* (5) | * | * | 5,96 ±0,21 |
| | E* (1) | * | * | 5,89 ±0,21 |
| | E* (0,5) | * | * | 5,87±0,22 |
| | E* (0,1) | * | * | 5,79±0,22 |
| | E* (0,062) | * | * | 5,77±0,21 |
| 7 dias | E* (10) | * | * | 6,59±0,17 |
| | E* (5) | * | * | 6,55±0,17 |
| | E* (1) | * | * | 6,41±0,16 |
| | E* (0,5) | * | * | 6,35±0,15 |
| | E* (0,1) | * | * | 6,24±0,13 |
| | E* (0,062) | * | * | 6,20±0,12 |
| 14 dias | E* (10) | 8,20±0,32 | 8,10±0,44 | 7,92±0,55 |
| | E* (5) | 8,17±0,31 | 8,04±0,46 | 7,88±0,59 |
| | E* (1) | 8,01±0,36 | 7,91±0,51 | 7,71±0,63 |
| | E* (0,5) | 8,04±0,41 | 7,86±0,53 | 7,65±0,65 |
| | E* (0,1) | 7,94±0,44 | 7,76±0,55 | 7,52±0,69 |
| | E* (0,062) | 7,75±0,42 | 7,73±0,55 | 7,49±0,72 |
| 30 dias | E* (10) | 9,33±0,47 | 9,52±1,04 | 9,40±0,89 |
| | E* (5) | 9,27±0,43 | 9,48±1,05 | 9,34±0,91 |
| | E* (1) | 9,18±0,37 | 9,34±1,09 | 9,20±0,94 |
| | E* (0,5) | 9,12±0,31 | 9,29±1,13 | 9,11±0,95 |
| | E* (0,1) | 9,05±0,14 | 9,19±1,18 | 8,89±0,98 |
| | E* (0,062) | 9,05±0,16 | 9,16±1,19 | 8,95±1,00 |
| 56 dias *** | E* (10) | 10,45±0,14 | 10,39±0,12 | 10,01±0,17 |
| | E* (5) | 10,40±0,12 | 10,35±0,15 | 9,94±0,19 |
| | E* (1) | 10,22±0,01 | 10,16±0,21 | 9,73±0,23 |
| | E* (0,5) | 10,16±0,02 | 10,07±0,23 | 9,61±0,23 |
| | E* (0,1) | 10,07±0,05 | 9,90±0,27 | 9,41±0,25 |
| | E* (0,062) | 9,99±0,06 | 9,87±0,30 | 9,35±0,27 |

*: ensaios não realizados devido à baixa amplitude de carregamento e consequente dificuldade de controle na prensa.

** : Módulo complexo (E*) escrito em função das frequências (10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,1 Hz, 0,062 Hz). O percentual das amplitudes de carregamento é em relação à resistência à compressão da argamassa (fc). Os dados numéricos representam as médias dos módulos complexos, seguidas dos desvios-padrão das amostras.

***: Para a idade de 56 dias, a média do módulo foi obtida por apenas duas amostras, visto que a terceira apresentou resultados muito discrepantes.

Fonte: Autoria própria (2024).

Os resultados de módulo estático para ambas as argamassas estão expostos na Tabela 9. Os módulos foram obtidos pela média de três amostras. Contudo, alguns resultados não atenderam ao critério de reprodutibilidade, especificado na norma NBR 8522 (ABNT, 2017), que recomenda que “a diferença entre dois resultados individuais e independentes, obtidos a partir de uma mesma amostra, mesma betonada e mesma moldagem) submetida a ensaio, por dois operadores em laboratórios diferentes em um curto intervalo de tempo, deve ser igual ou menor que 10 %”. Deste modo, visando atender ao critério estabelecido, para a idade de 3 dias da argamassa A, foi considerado apenas um dos valores de módulo estático, correspondente ao valor intermediário. Já para as demais idades sinalizadas com um asterisco, os resultados foram obtidos pela média de dois valores. Analisando os resultados, observou-se um aumento do módulo com a idade, para as duas argamassas.

Tabela 9 – Resultados de módulo estático obtidos para as argamassas A e B, nas idades de 3, 7, 14, 30 e 56 dias

| Idade | Módulo Estático (GPa) | |
|---------|-----------------------|------------|
| | A | B |
| 3 dias | 4,67* | 5,29±0,28 |
| 7 dias | 5,52±0,26* | 5,68±0,30 |
| 14 dias | 5,97±0,32* | 6,41±0,02 |
| 30 dias | 6,86±0,27* | 6,52±0,35* |
| 56 dias | 6,91±0,35 | 6,68±0,35 |

Os dados numéricos representam as médias dos módulos estáticos, seguidas dos desvios-padrão das amostras. *Valores corrigidos para atender ao princípio de reprodutibilidade da NBR 8522 (ABNT, 2017).

Fonte: Autoria própria (2024).

Os resultados dos ensaios de módulo dinâmico, para as argamassas A e B, estão apresentados na Tabela 10 e na Tabela 11, respectivamente. Esses foram separados pela ordem de leitura. A primeira leitura se refere ao ensaio de módulo dinâmico inicial (primeiro teste realizado nos CPs de argamassa); a segunda se refere à medição realizada após o ensaio de módulo complexo; e a terceira, à medição realizada após o ensaio de módulo estático. Foram adotados, para gerar diferentes valores determinados de módulo, quatro coeficientes de Poisson (0,1; 0,2; 0,3; 0,4), visto que há incerteza sobre esse coeficiente, que impacta o valor estimado de módulo. A partir das análises dos dados, notou-se que, assim como nos demais ensaios, a relação do módulo dinâmico com as idades é notável.

Tabela 10 – Resultados de módulo dinâmico obtidos para argamassa A, nas idades de 3, 7, 14, 30 e 56 dias

| Idade | Módulo Dinâmico (GPa) | Leituras | | |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|
| | | I | II | III |
| 3 dias | E (0,1) | 8,58±0,88 | * | * |
| | E (0,2) | 7,90±0,81 | * | * |
| | E (0,3) | 6,52±0,67 | * | * |
| | E (0,4) | 4,10±0,42 | * | * |
| 7 dias | E (0,1) | 10,17±0,23 | 9,86±0,25 | 9,14±0,17 |
| | E (0,2) | 9,36±0,21 | 9,08±0,23 | 8,41±0,15 |
| | E (0,3) | 7,73±0,17 | 7,49±0,19 | 6,95±0,13 |
| | E (0,4) | 4,85±0,11 | 4,71±0,12 | 4,36±0,08 |
| 14 dias | E (0,1) | 11,75±0,80 | 11,12±0,92 | 10,39±0,87 |
| | E (0,2) | 10,82±0,74 | 10,23±0,85 | 9,56±0,80 |
| | E (0,3) | 8,93±0,61 | 8,45±0,70 | 7,89±0,66 |
| | E (0,4) | 5,61±0,38 | 5,31±0,44 | 4,96±0,42 |
| 30 dias | E (0,1) | 12,32±0,20 | 11,86±0,05 | 11,01±0,15 |
| | E (0,2) | 11,34±0,18 | 10,92±0,05 | 10,14±0,14 |
| | E (0,3) | 9,36±0,15 | 9,01±0,04 | 8,37±0,12 |
| | E (0,4) | 5,88±0,09 | 5,66±0,02 | 5,26±0,07 |
| 56 dias | E (0,1) | 12,47±0,22 | 12,31±0,39 | 11,49±0,32 |
| | E (0,2) | 11,48±0,20 | 11,33±0,35 | 10,57±0,29 |
| | E (0,3) | 9,47±0,17 | 9,35±0,29 | 8,43±0,24 |
| | E (0,4) | 5,95±0,10 | 5,87±0,18 | 5,48±0,15 |

Módulo dinâmico (E) escrito em função dos coeficientes de Poisson adotados (0,1; 0,2; 0,3; 0,4). Os dados numéricos representam as médias dos módulos dinâmicos, seguidas dos desvios-padrão das amostras.

*: ensaios sequenciais de propagação de onda ultrassônica não realizados.

Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 11 – Resultados de módulo dinâmico obtidos para argamassa B, nas idades de 3, 7, 14, 30 e 56 dias

| Idade | Módulo Dinâmico (GPa) | Leituras | | |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|
| | | I | II | III |
| 3 dias | E (0,1) | 8,66±0,23 | * | * |
| | E (0,2) | 7,97±0,21 | * | * |
| | E (0,3) | 6,58±0,17 | * | * |
| | E (0,4) | 4,13±0,11 | * | * |
| 7 dias | E (0,1) | 9,21±0,16 | * | * |
| | E (0,2) | 8,48±0,15 | * | * |
| | E (0,3) | 7,00±0,12 | * | * |
| | E (0,4) | 4,40±0,08 | * | * |
| 14 dias | E (0,1) | 11,43±1,16 | 10,73±0,06 | 10,54±0,03 |
| | E (0,2) | 10,52±1,07 | 9,87±0,06 | 9,70±0,03 |
| | E (0,3) | 8,69±0,88 | 8,15±0,05 | 8,01±0,03 |
| | E (0,4) | 5,46±0,55 | 5,12±0,03 | 5,03±0,02 |
| 30 dias | E (0,1) | 11,80±0,24 | 11,64±0,08 | 11,48±0,18 |
| | E (0,2) | 10,86±0,22 | 10,71±0,08 | 10,57±0,16 |
| | E (0,3) | 8,97±0,18 | 8,84±0,06 | 8,72±0,14 |
| | E (0,4) | 5,63±0,12 | 5,55±0,04 | 5,48±0,09 |
| 56 dias | E (0,1) | 12,84±0,21 | 12,48±0,20 | 12,07±0,22 |
| | E (0,2) | 11,82±0,19 | 11,48±0,18 | 11,11±0,20 |
| | E (0,3) | 9,75±0,16 | 9,48±0,15 | 9,17±0,17 |
| | E (0,4) | 6,13±0,10 | 5,95±0,09 | 5,76±0,10 |

Módulo dinâmico (E) escrito em função dos coeficientes de Poisson adotados (0,1; 0,2; 0,3; 0,4). Os dados numéricos representam as médias dos módulos dinâmicos, seguidas dos desvios-padrão das amostras.

*: ensaios sequenciais de propagação de onda ultrassônica não realizados.

Fonte: Autoria própria (2024).

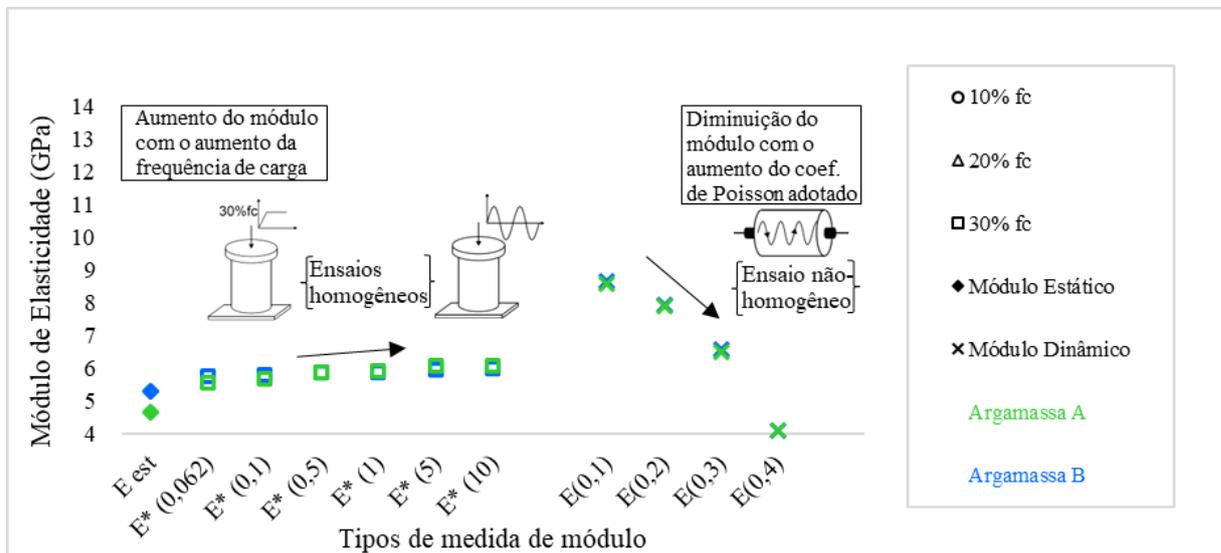
4.1.1 Efeito da técnica experimental

Neste subtópico, realizou-se a análise do efeito dos três métodos de ensaios de módulo de elasticidade considerados neste trabalho: módulo estático, módulo dinâmico e módulo complexo. Considerou-se duas argamassas A e B, e foram realizadas análises para diferentes idades (3, 7, 14, 30 e 56 dias). Os ensaios de módulo complexo foram realizados considerando seis faixas de frequência (0,062 Hz, 0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 5 Hz e 10 Hz) e três amplitude de carregamento (10%, 20% e 30% da resistência à compressão). Já para o cálculo do módulo dinâmico, foram adotados 4 coeficientes de Poisson (0,1; 0,2; 0,3; 0,4).

Inicialmente, para a idade de 3 dias, observou-se que as argamassas A e B apresentaram valores próximos para os módulos de elasticidade, tendo em algumas medições, valores quase idênticos (Figura 27). Além disso, percebeu-se uma tendência positiva entre o módulo complexo (E^*) e as frequências testadas, no experimento. Quanto ao módulo dinâmico, foi identificada uma tendência oposta: viu-se que quanto maior o coeficiente de Poisson adotado, menor eram os valores de módulo de elasticidade encontrados. Evidencia-se que há um efeito notável e que a adoção direta do valor de 0,2 produz efeito na estimativa de módulo.

Os resultados obtidos para os 4 valores de Poisson adotados (0,1; 0,2; 0,3 e 0,4) foram bastante diferentes. Entretanto, quando comparados com as demais medidas de módulo, pode-se perceber que o coeficiente de Poisson de 0,3 foi o que mais se assemelhou aos resultados obtidos nos testes de módulos de elasticidade estático e complexo (para 30% da resistência à compressão). Vale ressaltar que o parâmetro de entrada para os ensaios (estático e complexo) foi a resistência à compressão; e para a idade de 3 dias, os CPs apresentaram resistência inferior ao intervalo de confiança de medição da máquina. Dessa forma, os resultados para esta idade devem ser interpretados com cautela.

Figura 27 – Efeito da Técnica Experimental – idade 3 dias

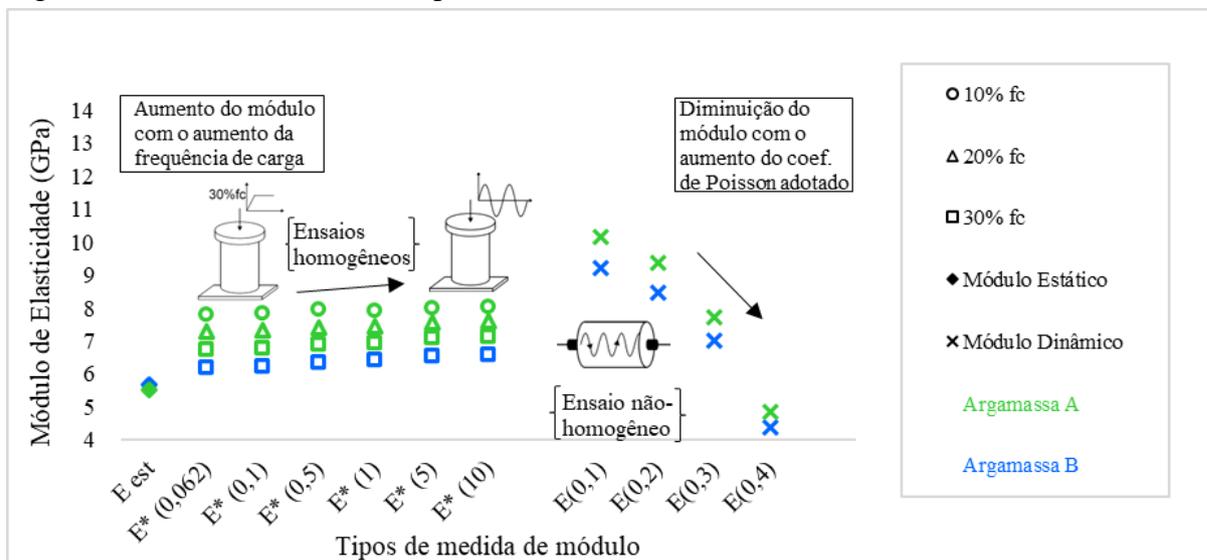


Fonte: Autoria própria (2024).

Para a idade de 7 dias (Figura 28), observou-se que o módulo estático para argamassa A apresentou valores similares ao da argamassa B. Assim como para a idade de 3 dias, houve um aumento do módulo complexo com o aumento da frequência. Com relação aos ensaios de módulo dinâmico, ao sétimo dia, também se observou a mesma tendência do terceiro dia, tendo o módulo diminuído à medida que o coeficiente de Poisson adotado aumentava.

Verificou-se também que o intervalo do coeficiente de Poisson, que mais se assemelha com os outros dois ensaios (módulo estático e complexo), está entre 0,3 e 0,4. Vale destacar que, a partir desta idade, foi dado início a avaliação do módulo de elasticidade complexo (E^*) para três níveis de amplitudes (10%, 20% e 30% da resistência à compressão), contudo, foi avaliado inicialmente apenas para a argamassa A. Os resultados obtidos com os testes em diferentes amplitudes demonstraram que há uma relação inversa entre o módulo complexo e a amplitude testada, conforme esperado para materiais não lineares.

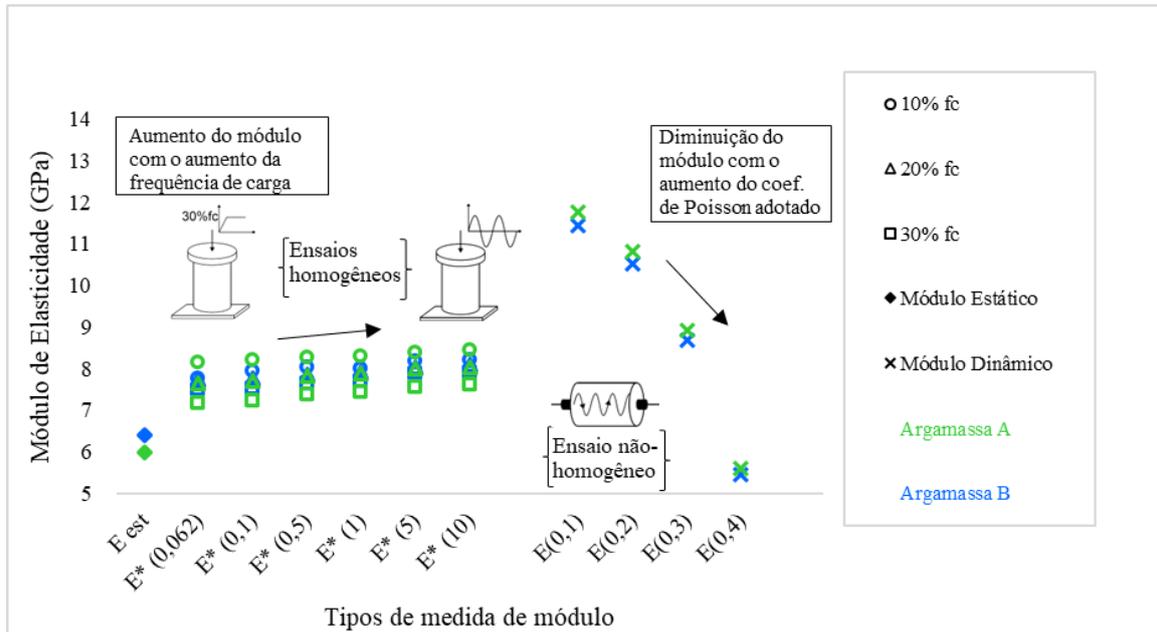
Figura 28 – Efeito da Técnica Experimental – idade 7 dias



Fonte: Autoria própria (2024).

Aos 14 dias (Figura 29), notou-se que, para ambas as argamassas, registrou-se um aumento do módulo complexo com o aumento da frequência, este efeito é esperado para materiais viscoelásticos (Ferry, 1980). Também se observou uma diminuição do módulo com o aumento da amplitude de carregamento (não linearidade). Também houve diminuição do módulo dinâmico com o aumento do coeficiente de Poisson adotado. Além disso, foi possível verificar que o intervalo do coeficiente de Poisson, que mais se assemelha com os outros dois ensaios (módulo estático e complexo) varia de 0,3 a 0,4, assim como o encontrado com sete dias.

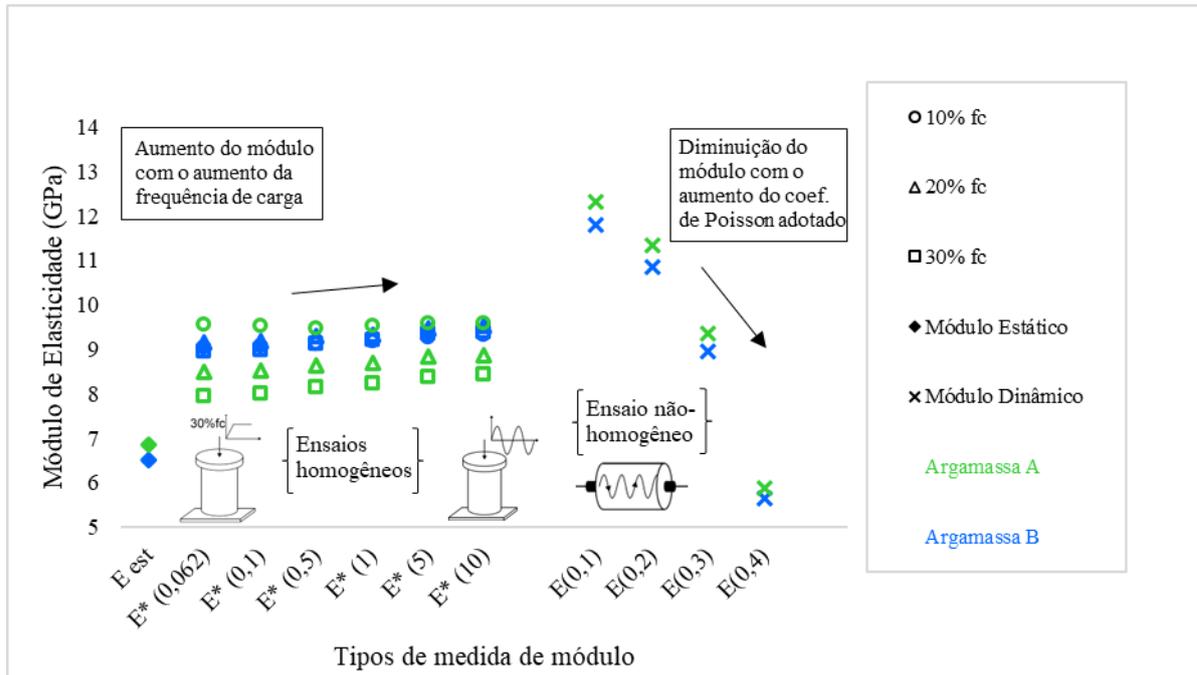
Figura 29 – Efeito da Técnica Experimental – idade 14 dias



Fonte: Autoria própria (2024).

Observou-se que, para a idade de 30 dias, houve uma inversão no comportamento do módulo estático com relação as idades anteriores, no qual a argamassa A apresentou valor de módulo 5% superior ao da argamassa B (Figura 30). De modo geral, houve aumento do módulo complexo com o aumento da frequência. Contudo, houve uma inversão no comportamento do módulo para a argamassa B, na idade de 30 dias, em que o módulo complexo aumentou com o aumento da amplitude, apresentando valores mais expressivos nas amplitudes de 10% a 20%, em que esse aumento chegou a 2%. Já para argamassa A, na idade de 30 dias, o comportamento permaneceu coerente com os resultados das idades anteriores. Notou-se, também, um decaimento do módulo dinâmico à medida que o coeficiente de Poisson adotado aumentava. Percebeu-se que os valores de módulo estático estiveram mais próximos aos valores de módulo dinâmico correspondentes ao coeficiente de Poisson de 0,4. Já os valores de módulo complexo, ficaram mais próximos aos correspondentes ao Poisson de 0,3.

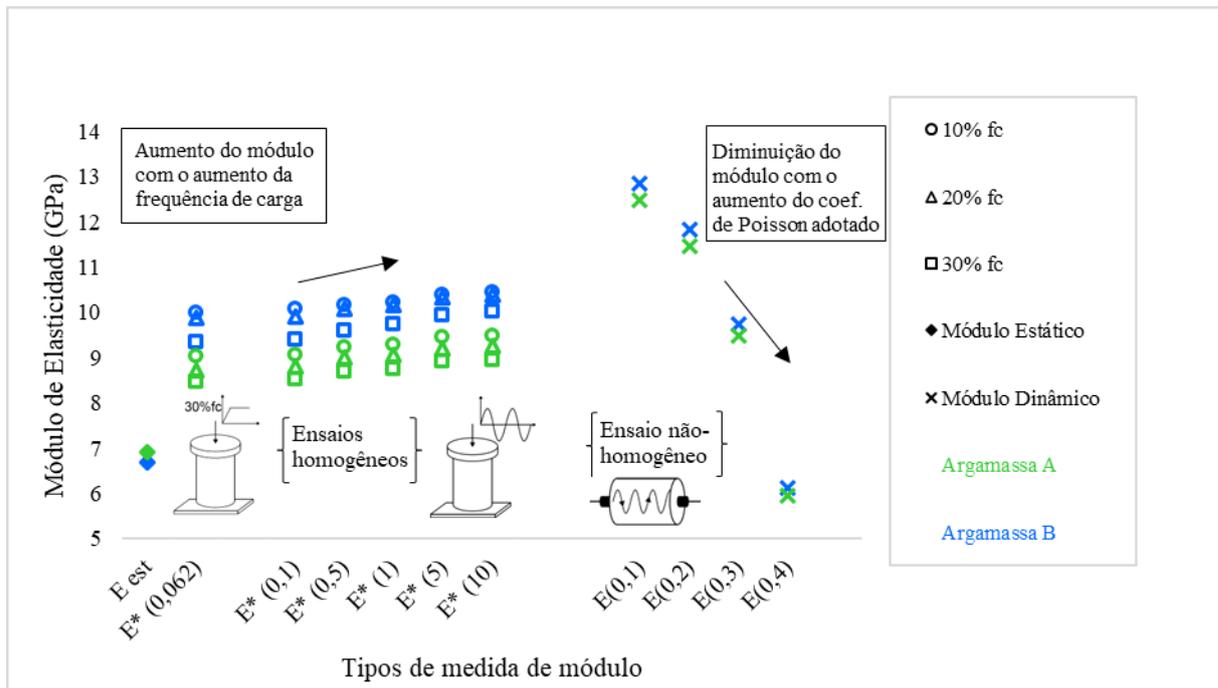
Figura 30 – Efeito da Técnica Experimental – idade 30 dias



Fonte: Autoria própria (2024).

Para a idade de 56 dias, os módulos estáticos das argamassas A e B apresentaram valores inferiores aos de módulos complexos e dinâmicos, com exceção aos de módulos dinâmicos para o coeficiente de Poisson de 0,4 (Figura 31). Com relação ao módulo complexo, foi observado um aumento com o aumento da frequência. Para baixas amplitudes de carregamento, o módulo complexo se mostrou maior. Para os ensaios de módulo dinâmico, observou-se uma diminuição do módulo com o aumento do coeficiente de Poisson adotado. Além disso, percebeu-se que os resultados obtidos com o módulo estático foram próximos aos valores de módulo dinâmico, considerando o coeficiente de Poisson de 0,4 para as argamassas. Outra observação importante é a de que os valores de módulo complexo ficaram próximos aos de módulo dinâmico para coeficiente de 0,3.

Figura 31 – Efeito da Técnica Experimental – idade 56 dias



Fonte: Autoria própria (2024).

Percebeu-se, ainda, que a metodologia utilizada para a análise do módulo influencia nos resultados obtidos, visto que, variando-se o ensaio, obteve-se resultados distintos mesmo quando testados no mesmo CP. Shkolnik (2008) afirma que o módulo dinâmico, do concreto é sempre superior ou igual ao módulo estático por conta do seu comportamento não-linear. Esta afirmação corrobora com os resultados obtidos para as diferentes amplitudes. Além disso, Monte e Figueiredo (2007), observaram que a correlação entre ensaios de módulo dinâmico e resistência à compressão é maior ($R^2 = 0,96$), já para módulo estático e resistência à compressão foi menor ($R^2 = 0,6479$), o que pode revelar uma maior variabilidade dos ensaios estáticos, trazendo menor acurácia para previsões empíricas entre uma propriedade de rigidez e outra de ruptura.

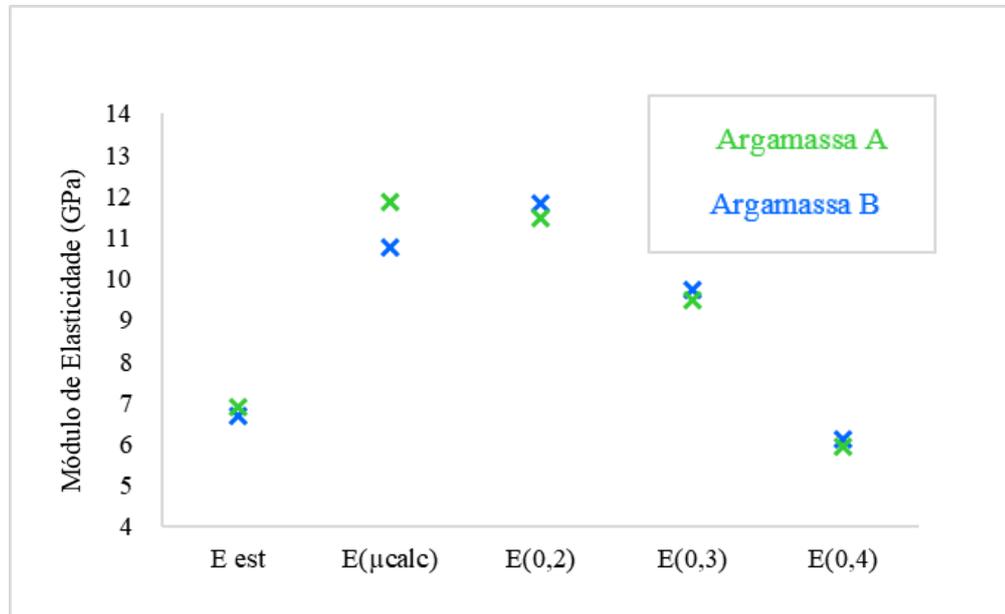
De modo geral, para todas as idades consideradas e tipos de argamassa, houve aumento do módulo complexo com a frequência, o que é compatível com um comportamento viscoelástico. Esse comportamento também é observado para o concreto, em que a rigidez aumenta com o aumento da taxa de deformação (SANTOS, 2008). Além disso, verificou-se uma redução do módulo complexo com o aumento das amplitudes de carregamento, o que é compatível com um comportamento não linear.

4.1.2 Estudo do efeito do coeficiente de Poisson calculado no módulo de elasticidade

Com base nas Equações 8 e 9, apresentadas no subitem 2.6.2.2, relacionando os valores de tempo de voo e de velocidades com os de módulo dinâmico e de coeficiente de Poisson considerando simultaneamente os tempos de voo da onda S e da onda P, foi possível obter dois valores médios de coeficientes de Poisson sem adoção de hipótese sobre seu valor. Isso foi feito na idade de 56 dias para ambas as argamassas investigadas. Os valores obtidos foram de, aproximadamente, 0,16 para argamassa A e de 0,26 para argamassa B. Tais valores, estão próximos às faixas de 0,17 a 0,30, obtidas por Swamy (1971), para argamassas úmidas e secas.

A Figura 32 apresenta o comparativo do módulo dinâmico (calculado com base no coeficiente de Poisson determinado simultaneamente com uso das ondas P e S) com os módulos estático e dinâmico para os coeficientes de Poisson adotados por hipótese iguais a 0,2; 0,3 e 0,4. Percebeu-se que os valores de módulo, para o coeficiente de Poisson calculado, foram relativamente próximos (menos de 4% para a argamassa A e menos de 9% de erro para argamassa B) aos módulos para o coeficiente de 0,2, corroborando com o valor recomendado pela NBR 15630 (ABNT, 2008). Contudo, verificou-se, também, que tais valores, referentes ao módulo para o coeficiente de Poisson calculado, divergiram dos demais módulos (estático e dinâmico para 0,3 e 0,4). Além disso, um aprofundamento desta questão é apresentado a seguir, na Seção 4.1.3, quanto ao efeito da avaliação de dano nos demais ensaios de módulo.

Figura 32 – Comparativo entre módulo dinâmico determinado a partir dos tempos de voo para coeficiente de Poisson calculado (usando ondas P e S simultaneamente para o cálculo) e os demais módulos dinâmicos (determinados a partir de adoção de valor de coeficiente de Poisson hipotético)



Fonte: Autoria própria (2024).

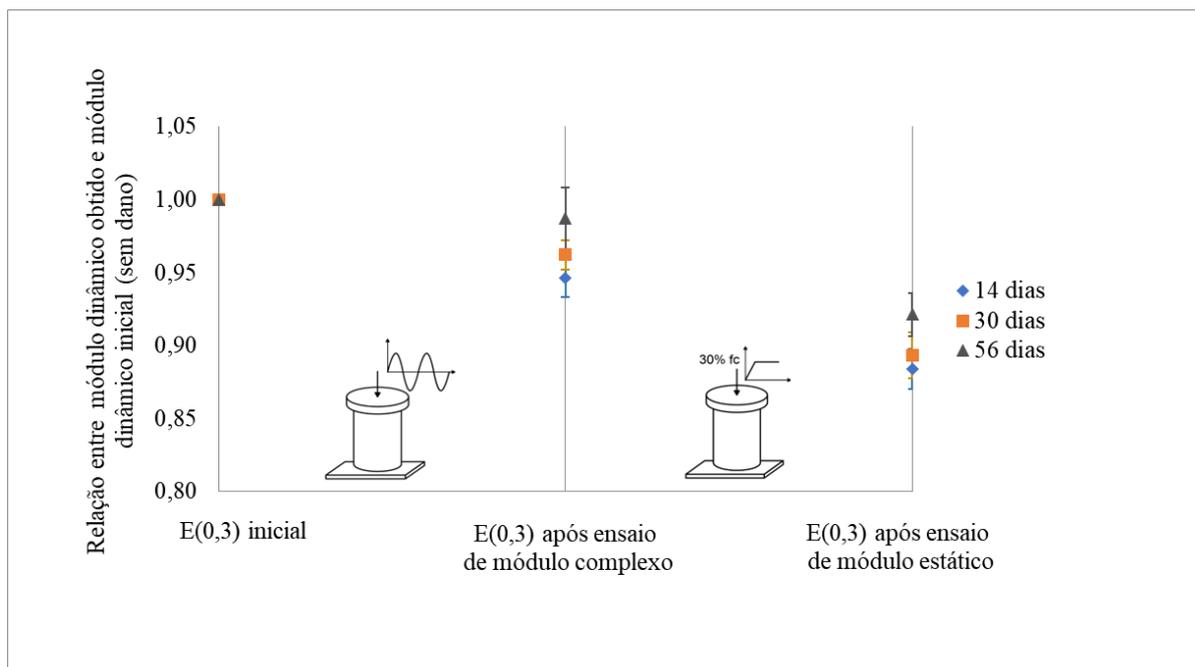
4.1.3 Efeito do dano ao longo dos ensaios

Para investigar se houve dano ao longo da realização dos ensaios de módulo complexo e de módulo estático, considerados teoricamente com ensaios em pequenas deformações que não causariam dano, optou-se por realizar o ensaio de módulo dinâmico (através da propagação de onda ultrassônica), antes dos testes de módulos complexo e estático, e após a realização de cada um deles, intercalando os ensaios com uma nova realização de ensaio de pulso ultrassônico. As curvas obtidas com a realização desses ensaios foram separadas por argamassa (A e B), para as três idades avaliadas (14 dias, 30 dias e 56 dias) quanto à produção de dano. Para esta avaliação, adotou-se o valor de coeficiente de Poisson de 0,3 de maneira a estimar o módulo dinâmico a partir da velocidade de propagação da onda ultrassônica de compressão (Equação 7), seção 2.6.2.2.

Para a argamassa A, o efeito do dano ocorreu de forma mais evidente para as idades de 14 dias e 30 dias (Figura 33). As reduções no módulo dinâmico foram por volta de 5%, após a realização do ensaio de módulo complexo (que aplica ciclos de carregamentos em 3 diferentes amplitudes, de 10%fc, 20%fc e 30%fc); e de mais 7% após o ensaio de módulo estático. A

redução total é de, aproximadamente, 12% no módulo dinâmico, quando se analisa a primeira e a última medição deste, para 14 dias. Para a idade de 30 dias, a primeira redução foi de, aproximadamente, 4% (após o ensaio de módulo complexo), e a segunda, foi por volta de 7% (após o módulo estático). Já para a idade de 56 dias, o ensaio de módulo complexo quase não afetou os resultados de módulo dinâmico, gerando uma redução de apenas 1% neste, o que justifica considerá-lo como não destrutivo para idades mais avançadas. Já o ensaio estático contribuiu para uma diminuição de cerca de 7%, no módulo dinâmico dos corpos de prova da argamassa A, o que ainda põe em prova a consideração de que o ensaio é não destrutivo. Além disso, os resultados sugerem que a argamassa A se danificou com mais facilidade com o carregamento cíclico (o efeito do material é investigado em maior detalhe na Seção 4.1.4, a seguir).

Figura 33 – Relação entre os módulos dinâmicos após cada etapa de investigação do módulo e o módulo dinâmico inicial, para diferentes idades de argamassa A



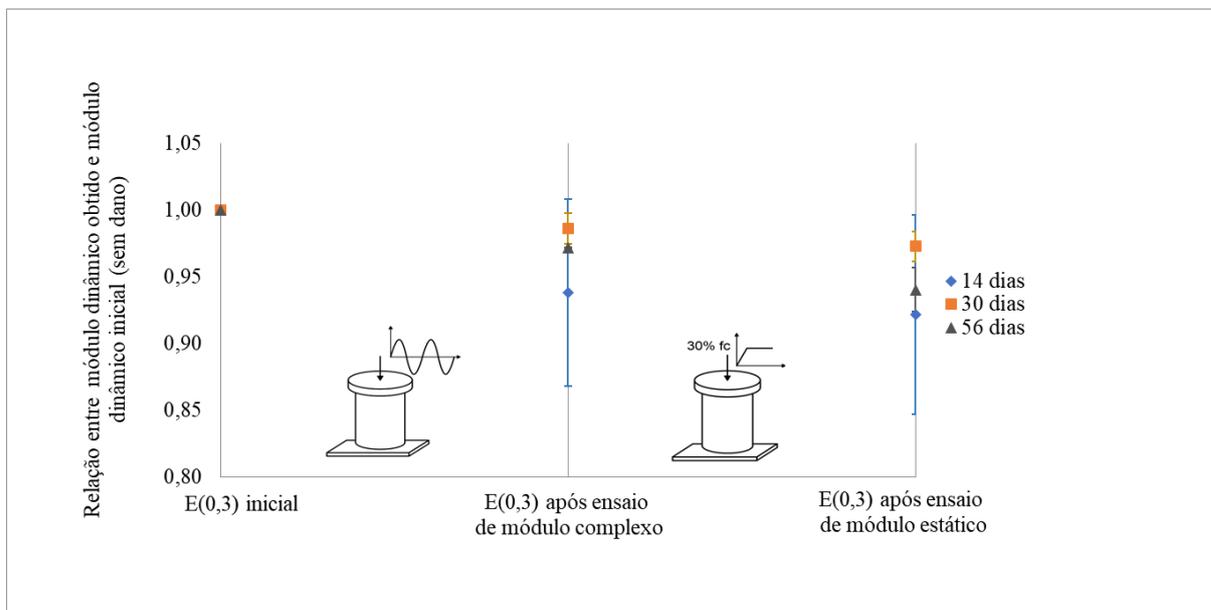
*Os bigodes representam o valor de 1 desvio-padrão nas medidas realizadas.
Fonte: Autoria própria (2024).

Já para a argamassa B, os módulos dinâmicos mais afetados, pela realização dos ensaios de módulo complexo e de módulo estático, foram os correspondentes às idades de 14 dias e 56 dias (Figura 34), porém no caso de 56 dias o valor total de variação foi de cerca de 6%, o que pode ser considerado desprezível. Para a idade de 14 dias, houve diminuição de cerca de 6% no módulo dinâmico, após a realização do ensaio de módulo complexo, e de mais 2%

após o ensaio de módulo estático. Somando-se, aproximadamente, 8% de redução no módulo dinâmico ao final dos ensaios. Para os 30 dias, os ensaios de módulo complexo e estático pouco afetaram no módulo dinâmico, contribuindo para uma redução total de aproximadamente 3%, considerada negligenciável. Para 56 dias, houve diminuição de cerca de 3% no módulo dinâmico, após o ensaio de módulo complexo; e de mais cerca 3% após o estático, o que ainda pode ser considerado desprezível.

De modo geral, através da análise do módulo dinâmico (com ondas ultrassônicas), de maneira intercalada entre os demais ensaios, observou-se que os ensaios de módulo complexo (quase-estático) e de módulo estático podem contribuir para a degradação das amostras. Para esta avaliação, considerou-se que, assim como apontado por Lamaitre (1985), quando o dano assume valores entre 0 e 1, o material atinge o estado danificado. Contudo, considerou-se a margem de erro de 10%, uma vez que houve variação nos valores obtidos entre as amostras. Dessa forma, para a argamassa A, a degradação foi observada além desse limite (para o conjunto de ambos os ensaios) para os materiais até os 30 dias. Para a argamassa B a degradação foi menos pronunciada, devendo-se considerar que foi observada variabilidade nos resultados. Além disso, comparando-se os ensaios de módulo complexo com o de módulo estático, o ensaio estático produziu evidência mais clara de danificação.

Figura 34 – Relação entre os módulos dinâmicos após cada etapa de investigação do módulo e o módulo dinâmico inicial, para diferentes idades de argamassa B

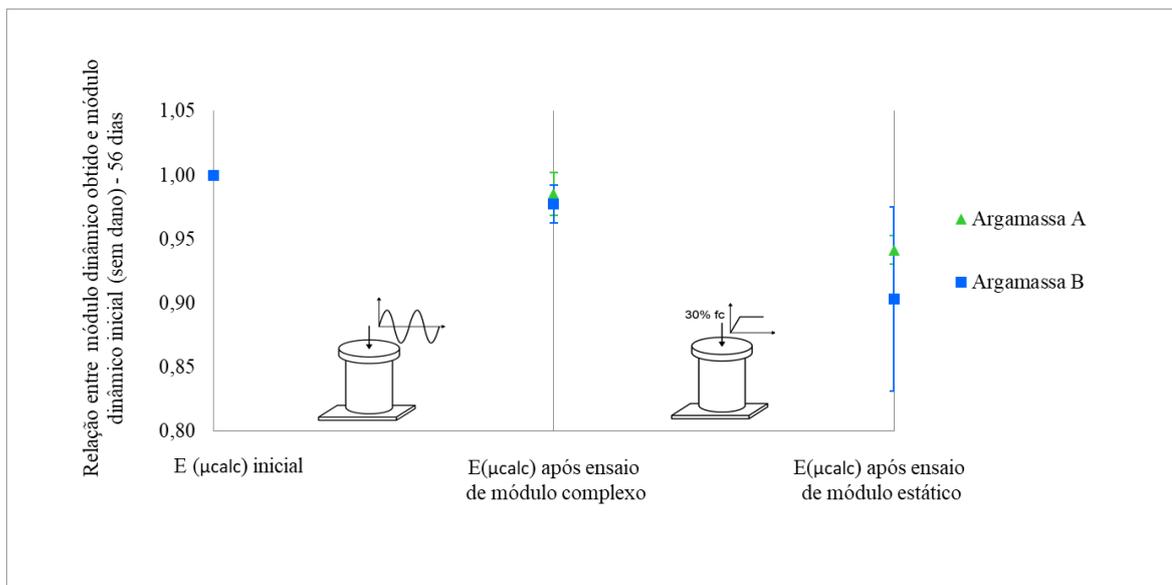


*Os bigodes representam o valor de 1 desvio-padrão nas medidas realizadas.

Fonte: Autoria própria (2024).

Para a idade de 56 dias, foi realizado ensaios de módulo dinâmico considerando também a onda S, de modo a se determinar o coeficiente de Poisson calculado (μ_{calc}), obtido de forma experimental sem adoção, por hipótese, de seu valor. Dessa forma, avaliou-se novamente o efeito do dano, para as argamassas A e B, na referida idade, conforme resultados apresentados na Figura 35. Para a argamassa A, o ensaio de módulo complexo quase não afetou os resultados de módulo dinâmico, gerando uma redução de apenas 1%, o que novamente justifica considerá-lo como não destrutivo para idades mais avançadas, mesmo aplicando diferentes amplitudes de carregamento. Já o ensaio estático contribuiu para uma diminuição de cerca de 6%. Notou-se que esses resultados foram bastante coerentes aos encontrados para a mesma idade, com a consideração da onda P, representados na Figura 33. Já para a argamassa B, houve diminuição de cerca de 2% no módulo dinâmico, após o ensaio de módulo complexo; e de mais cerca 8% após o estático. Apesar de as conclusões terem sido globalmente semelhantes, observa-se que houve inversão na detecção de qual argamassa se danificou mais, visto que houve mais erro no coeficiente de Poisson, adotado por hipótese, em relação à argamassa B, comparativamente à argamassa A. Isso pode justificar o uso do ensaio mais criterioso, combinando ondas P e ondas S para determinar o módulo dinâmico e o coeficiente de Poisson sem adoção por hipótese do valor deste último.

Figura 35 – Relação entre os módulos dinâmicos após cada etapa de investigação do módulo e o módulo dinâmico inicial, para argamassas A e B, aos 56 dias



Fonte: Autoria própria (2024).

4.1.4 Efeito do material e da idade na rigidez e na resistência

Monte *et al.* (2007) consideraram importantes para avaliação das argamassas as análises da densidade de massa no estado fresco, o teor de ar, a densidade de massa no estado endurecido, a resistência mecânica e o módulo de elasticidade. Já Mayer (2022) avaliou as propriedades mecânicas das argamassas (o módulo de elasticidade dinâmico, a resistência à tração na flexão e à compressão), a densidade aparente, a absorção por capilaridade e a distribuição dos tamanhos dos poros. Em 2023, foi lançada a atualização da NBR 13281-1, que trata sobre "argamassas inorgânicas – requisitos e métodos de ensaios para argamassas de revestimentos de paredes e tetos". Tal norma aponta os requisitos classificatórios e informativos aos quais as argamassas inorgânicas para revestimento devem atender integralmente, o que constitui um marco importante para avaliações de argamassas de revestimento.

Os requisitos classificatórios descritos na NBR 13281-1 focam no estado endurecido e englobam os ensaios de: resistência potencial de aderência à tração ao substrato, resistência potencial à tração superficial, módulo de elasticidade dinâmico e variação dimensional (retração ou expansão linear). Os requisitos informativos para o estado fresco envolvem ensaios de retenção de água, densidade de massa no estado fresco, teor de ar incorporado e tempo de uso. Também foram incluídos requisitos informativos no estado endurecido: densidade de massa no estado endurecido, resistência à tração na flexão, coeficiente de absorção de água por capilaridade e fator de resistência à difusão de vapor de água. Os referidos ensaios devem atender aos limites estabelecidos na referida norma (ABNT, 2023).

Neste trabalho, o foco não foi comparar as argamassas de revestimentos, mas sim a avaliação de diferentes métodos de ensaio para avaliação de módulo de elasticidade, que é um dos pontos centrais considerados requisitos classificatórios pela nova norma de argamassas. Por este motivo, ensaios como teor de ar incorporado, absorção por capilaridade, densidade de massa, não foram realizados. Contudo, destaca-se a importância de serem considerados em novos estudos que foquem na comparação de materiais.

I-Tipos de argamassas

Para a idade de 30 dias (Figura 36), a argamassa A apresentou maiores valores de módulo de elasticidade em todos os ensaios considerados, com exceção do ensaio de módulo

complexo. Entretanto, para a idade de 56 dias, houve uma inversão e a argamassa A só se manteve maior para o ensaio de módulo estático. Embora as argamassas apresentassem traço e composição diferentes, seus resultados foram bastante similares para determinadas idades e ensaios. Segundo Monte *et al.* (2018) o aumento do teor de ar incorporado, em argamassas, resulta numa menor rigidez; tal aumento no teor de ar incorporado pode ter ocorrido nas argamassas B, que apresentaram menor quantidade de água em sua matriz. Para a fadiga térmica, sublinha-se que um alto valor de módulo não seria desejável, pois produziria maiores amplitudes de tensões de origem térmica (cf. Equação 5). Além disso, Monte *et al.* (2018) identificaram elevada correlação do módulo de elasticidade com abertura de fissuras em argamassas de revestimento, então uma argamassa com módulo de elasticidade alto, não seria interessante.

II-Envelhecimento/ Hidratação

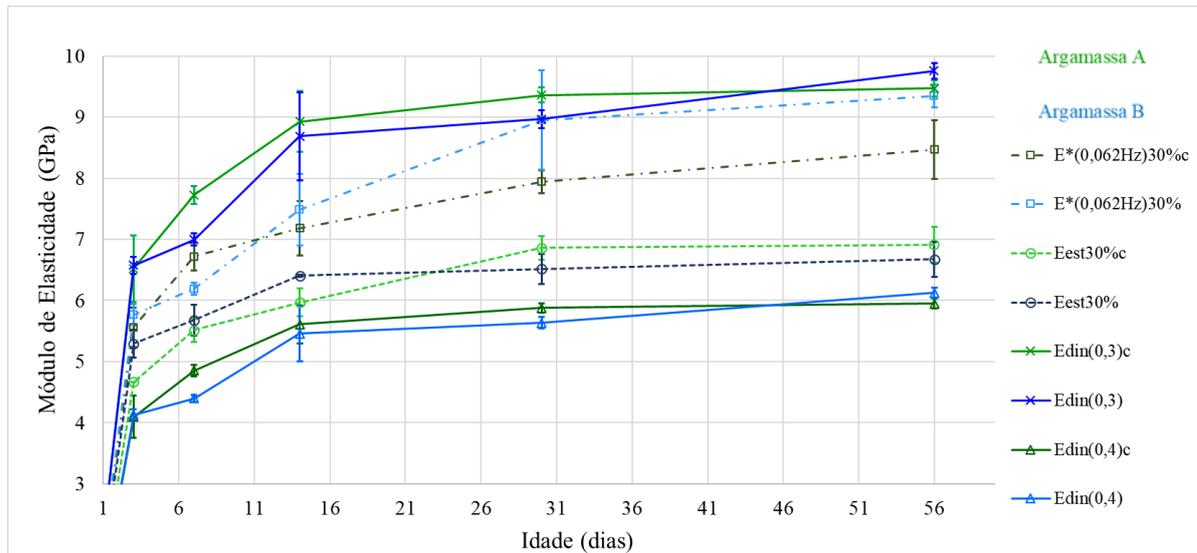
A Figura 36 apresenta as variações de módulo no decorrer das idades; para duas argamassas (A e B) e, três métodos de avaliação de módulo adotados (estático, dinâmico e complexo).

Os resultados evidenciaram um aumento do módulo estático com o passar dos dias de experimento (idade do material, que favorece a progressão das reações de hidratação que dão resistência à argamassa). Para a argamassa B, houve um acréscimo de 26% no módulo com 56 dias quando comparado com 7 dias. Já para argamassa A, considerando o mesmo ensaio, houve um aumento de 48% no módulo. Por volta da idade de 23 dias, notou-se que houve um ponto de intersecção, a partir do qual a argamassa A apresentou valores superiores, para as demais idades. Reitera-se que para a fadiga térmica, um alto valor de módulo não seria desejável, pois produziria maiores amplitudes de tensões de origem térmica (cf. Equação 5).

Optou-se por plotar a curva do módulo complexo correspondente a uma frequência de 0,062 Hz, com amplitude de 30% da resistência à compressão, pois são as condições que mais se aproximam às do ensaio de módulo estático, também representado na Figura 36. Para a argamassa B, verificou-se um aumento de 62% do módulo complexo, considerando a primeira e a última idade; já para argamassa A o aumento foi de 52%. Observou-se, ainda, que o comportamento deste módulo se mostrou o inverso do módulo estático, em que por volta da idade de 12 dias houve um novo ponto de intersecção, no qual a argamassa B apresentou valores superiores aos da argamassa A, diferença que chegou a ser maior que 10% para as duas últimas idades. Apesar das diferenças sublinhadas entre os valores médios, percebe-se uma notável

semelhança entre as argamassas estudadas quanto ao módulo de elasticidade, considerando-se o desvio-padrão das medidas, também representado na Figura 36. Há notável diferença de medidas entre a propriedade/método considerado(a), mas pouca diferença entre ambos os materiais investigados.

Figura 36 – Efeito das idades no módulo de elasticidade

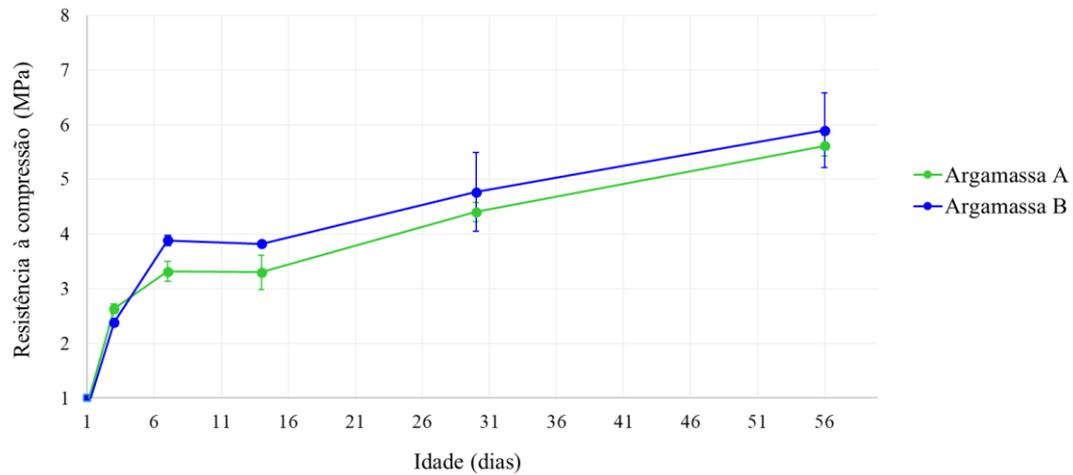


Fonte: Autoria própria (2024).

Para o caso do módulo dinâmico, optou-se por considerar os dois intervalos que mais se assemelharam aos ensaios de módulo estático e complexo, adotando-se, portanto, os coeficientes de Poisson de 0,3 e 0,4. Percebeu-se que, considerando o coeficiente de Poisson de 0,3, os valores de módulo dinâmico se mantiveram superiores em relação aos demais módulos. Para a argamassa B, percebeu-se um aumento de 48% no módulo dinâmico (Poisson de 0,3), considerando a primeira e a última idade. A argamassa A apresentou aumento de 45%. Por fim, para o coeficiente Poisson de 0,4, observou-se que o módulo dinâmico foi inferior aos módulos estático e complexo.

Dessa forma, houve um aumento gradativo dos módulos no decorrer das idades, o que é comumente observado na literatura para a resistência mecânica (KUMMER, 2016). Este aumento pode estar associado ao ganho de resistência dos corpos de prova de argamassa com o tempo, como pode ser observado na Figura 37, em que há uma evolução da resistência à compressão com a idade, para as argamassas A e B.

Figura 37 – Efeito das idades na resistência à compressão



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2 Ensaios de fadiga em argamassa

Foi proposto um ensaio de fadiga e os testes foram realizados utilizando corpos de prova (CPs) cilíndricos de argamassa A e de argamassa B, com aproximadamente 100 mm de diâmetro e 130 mm de altura. Os ensaios foram realizados utilizando a prensa servo-hidráulica, UTM-25, com controle da célula de carga e carregamento senoidal (tração-compressão). Foi utilizada uma frequência constante de 10 Hz, e os testes ocorreram em temperatura ambiente, de cerca de 27°C (medido no equipamento). As amplitudes de carregamento adotadas foram com base nos valores de resistência à compressão, obtidos nos ensaios anteriores, para a idade de 56 dias. Considerando que a resistência à tração é da ordem de 10% da resistência à compressão, as razões de tensão de tração ($\sigma_{\text{mín}}/\sigma_{\text{máx}}$) foram de 0,45, no primeiro ensaio e de 0,68 no segundo ensaio para argamassa A. Os valores foram de 0,55; 0,88 e 0,99, para argamassa B, nos 3 ensaios realizados. Esta etapa buscou a montagem de um ensaio de fadiga para argamassas e ainda requer mais aprofundamento no futuro, sendo a contribuição deste trabalho a proposta do ensaio e as primeiras análises.

Abaixo estão apresentados (Quadro 4 e Quadro 5) os números de ciclos e as formas de rupturas obtidas nos ensaios de fadiga, para diferentes idades. Os dados obtidos através dos testes foram bastante heterogêneos, com relação aos valores de números de ciclos, o que sugere a necessidade de aperfeiçoamento do ensaio para argamassas.

Quadro 4 – Ensaios de fadiga em CPs de argamassa A 1:1:5

| Idade | Sinal da onda | Frequência | Amplitude | Nº de ciclos | Tipo de Ruptura | Imagem |
|----------|------------------------------|------------|-------------|--------------|-----------------|---|
| 100 dias | Senoidal (Tração-compressão) | 10 Hz | 3 kN; -3 kN | 77 | Centro |  |
| 117 dias | Senoidal (Tração-compressão) | 10 Hz | 2 kN; -2 kN | 50000* | Centro |  |

*: Precisou-se forçar a ruptura para finalizar o ensaio.

Fonte: Autoria própria (2024).

Quadro 5 – Ensaios de fadiga em CPs de argamassa B

| Idade | Sinal da onda | Freq. (Hz) | Amplitude de Carregamento | Nº de ciclos | Tipo de Ruptura | Imagem |
|----------|------------------------------|------------|---|-------------------------|-----------------|---|
| 60 dias | Senoidal (Tração-compressão) | 10 | 4 kN; -4 kN | 10 | Centro |  |
| 182 dias | Senoidal (Tração-compressão) | 10 | 2,5 kN; -2,5 kN | 100.000* | Topo |  |
| 198 dias | Senoidal (Tração-compressão) | 10 | 4 kN; -4 kN | 5290 | Base |  |
| 224 dias | Senoidal (Tração-compressão) | 10 | 4,5 kN; -4,5 kN (I) 4,5 kN; -4,5 kN (II) | 70000 (I) 57900 (II) | Centro |  |

*: Precisou-se forçar a ruptura para finalizar o ensaio. (I) primeira parte do ensaio. (II) segunda parte do ensaio.

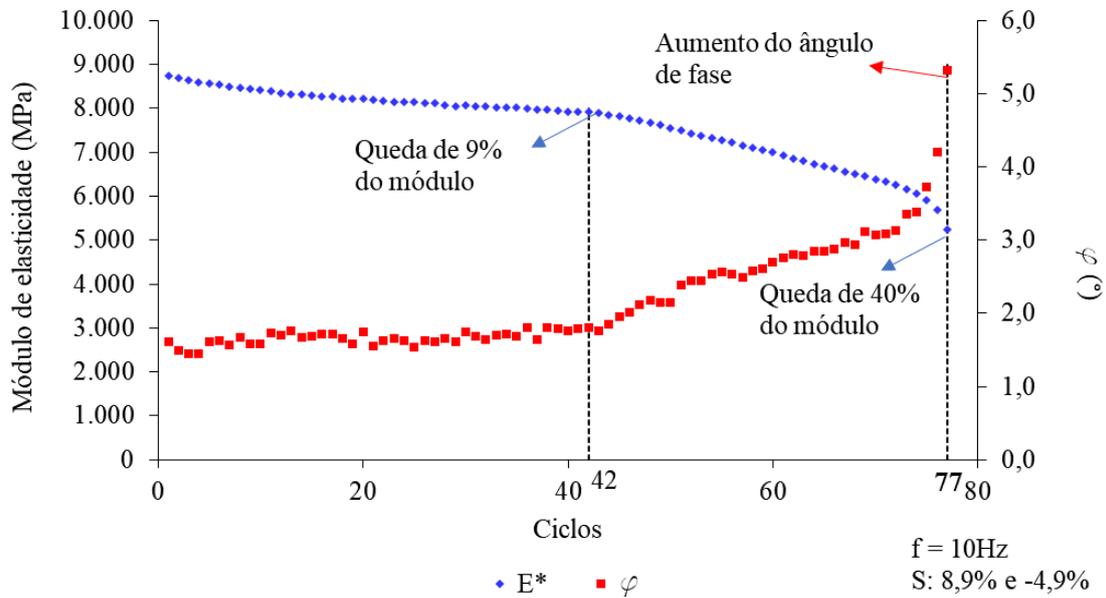
Fonte: Autoria própria (2024).

Os testes de fadiga que apresentaram ruptura no terço médio do CP (local de colocação dos LVDTs) permitiram que os dados de deslocamento no CP fossem registrados. Após o tratamento dos dados, foi possível obter as curvas de degradação do módulo em função do número de ciclos, com registro do ângulo de fase, que consiste na diferença de tempo entre os picos de tensão e deformação (Figura 38, Figura 39 e Figura 40).

Para a argamassa A, aos 100 dias, aplicou-se um carregamento máximo de 3 kN e mínimo de -3 kN (Quadro 4). Com base na Figura 38 é possível identificar a existência de três regimes: no primeiro, o ângulo de fase se mostra constante, apresentando pequenos defeitos; no segundo, há uma queda de 9% do módulo de elasticidade, após 42 ciclos, o ângulo de fase começa a elevar-se, revelando a provável existência de microtrincas ao longo do CP. Já no terceiro regime, nota-se uma redução de 42% no módulo e um aumento acelerado do ângulo de fase, após 77 ciclos, indicando a união de microtrincas (coalescência), aumentando a fissuração, e caracterizando a ruptura do material (FRISE, 1992). Visto que um aumento ou redução rápida do ângulo de fase caracteriza a gravidade do dano, ou seja, revela o colapso do material (BARRA, 2009).

Para a argamassa A, aos 100 dias, aplicou-se um carregamento máximo de 3 kN e mínimo de -3 kN (Quadro 4). Com base na Figura 38 é possível identificar a existência de três regimes: (i) no primeiro, o ângulo de fase se mostra constante e pequeno (entre 1° e 2°), o que pode corresponder ao comportamento quase-elástico (pouca presença de efeito diferido entre sinais de tensão e deformação) e a uma degradação de módulo (da ordem 9% ao longo dos 42 primeiros ciclos), bastante distribuída no volume do material, sem efeito no ângulo de fase; (ii) no segundo, após 42 ciclos, o ângulo de fase começa a se elevar gradativamente, revelando a provável existência de microtrincas ao longo do CP, que estão aumentando de tamanho continuamente e modificando o ângulo de fase; (iii) no terceiro, nota-se uma redução mais abrupta (de 42%) no módulo e um aumento acelerado do ângulo de fase, culminando em uma ruptura aos 77 ciclos, conseqüente da união das microtrincas em uma macrotrinca (coalescência) (FRISE, 1992).

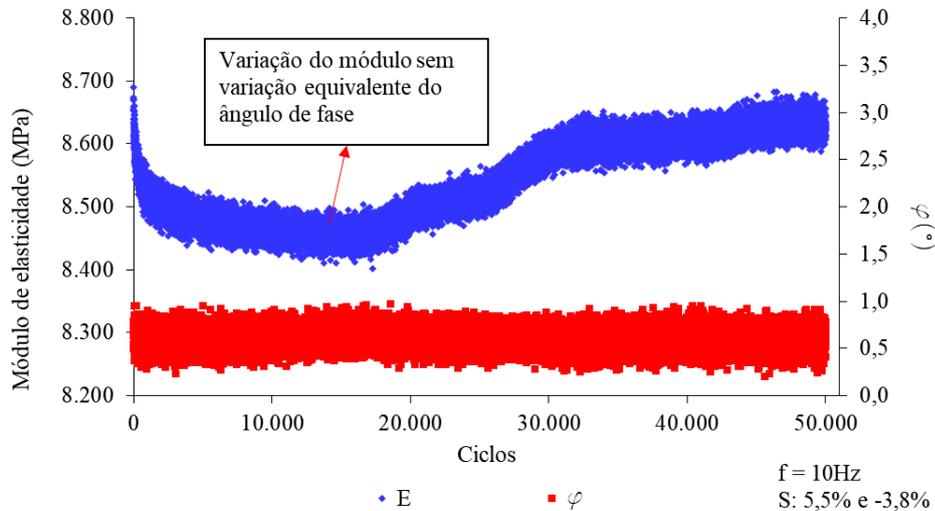
Figura 38 – Curva de degradação para a Argamassa A aos 100 dias



Fonte: Autoria própria (2024).

Como a argamassa anterior (Figura 38) apresentou ruptura para um baixo número de ciclos (77), optou-se por realizar o ensaio, na idade de 117 dias (argamassa A), com uma amplitude de carregamento menor, com valores máximos e mínimos de 2 kN e -2 kN, respectivamente (Quadro 4). A partir dos resultados obtidos (Figura 39), notou-se que houve uma ligeira (menos de 2,3%) variação no módulo (que pode estar associada a um efeito “parasita” da cola usada nos *targets* ou a pequenas variações de propriedade do material, em decorrência de mudanças na temperatura e na umidade na câmara ao longo do ensaio), mas que não foi acompanhada de variação do ângulo de fase. Posteriormente, houve uma ligeira recuperação do módulo (retornando ao valor inicial), sugerindo que não houve alteração significativa na microestrutura do material até os 50.000 ciclos iniciais. A variação, de cerca de 200 MPa (a comparar com, aproximadamente, 8700 MPa da argamassa inicialmente) é pequena e pode se dever a variações de umidade e/ou de temperatura na amostra e na cola usada para posicionar os *targets*. Após essa primeira etapa de ensaio, foi realizada mais uma segunda etapa, que fixou o tempo de parada do teste em 30.000 ciclos, considerando um carregamento de (3 kN; -3 kN). Terminado o ensaio, novamente o CP não apresentou sinais de ruptura. Como o teste precisaria ser finalizado, optou-se por romper o CP de maneira forçada e verificar onde ocorreria a ruptura.

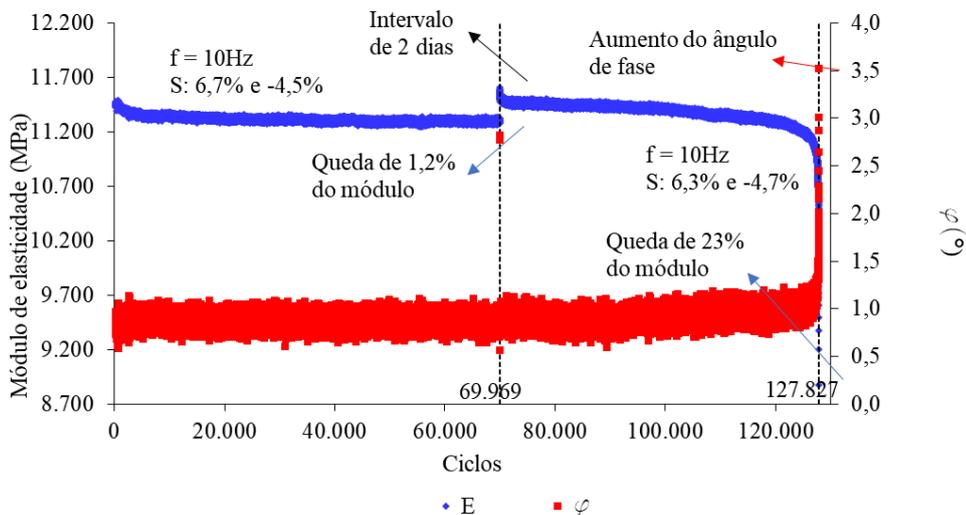
Figura 39 – Curva de degradação para a Argamassa A aos 117 dias



Fonte: Autoria própria (2024).

Para a argamassa B, foi possível obter apenas uma curva de degradação, correspondente à idade de 224 dias (Figura 40). O ensaio foi realizado em duas etapas, ambas com amplitude de carregamento de (4 kN; -4 kN), conforme Quadro 5. A primeira etapa, considerou, como critério de parada do teste, 70.000 ciclos. Após essa etapa, o ensaio finalizou sem perdas significativas de módulo. A segunda etapa do teste foi realizada após dois dias, e verificou-se que o CP rompeu com 127.827 ciclos, constatado através da queda de, aproximadamente 23% do módulo e, um crescimento considerável no ângulo de fase.

Figura 40 – Curva de degradação para a Argamassa B aos 224 dias



Fonte: Autoria própria (2024).

A repetição de ensaios, em diferentes níveis de amplitude de tensão e/ou deformação permitiria representar as falhas em curvas de Wöhler. Esta é uma atividade que deverá ser aprofundada quando do aperfeiçoamento do ensaio proposto, em pesquisas futuras.

4.3 Exemplos de análise de fadiga térmica simplificada

De maneira a ilustrar a importância da investigação da fadiga térmica de argamassas, propõe-se uma análise de fadiga térmica simplificada, aqui fornecida como exemplo. Foram utilizadas informações sobre propriedades materiais (módulo de elasticidade, coeficiente de dilatação térmica linear e curva S-N) obtidas na literatura. Como este trabalho se propõe a avaliar o efeito da fadiga em argamassa de revestimento externo, são apresentadas algumas considerações para esse sistema, ao final do exemplo de análise. A Tabela 12 expressa as propriedades materiais requeridas para a análise simplificada com a camada de argamassa de emboço.

Tabela 12 – Propriedades materiais da argamassa de revestimento externo considerada no exemplo de análise simplificada de fadiga térmica

| Material | Módulo de Elasticidade (GPa) | Coeficiente de Dilatação Térmica Linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) | Curvas S-N |
|----------|------------------------------|---|--|
| Emboço | 5,499 | $11,5 \times 10^{-6}$ | Obtidas de Uchôa (2007) e replicadas na Equação 11 |

Fonte: Uchôa (2007).

1) Para a argamassa sob tração

$$\begin{cases} S = -0,1571(\log Nf) + 1,5165; Nf < 2 \times 10^5 \\ S = 0,65 \text{ MPa}; Nf > 2 \times 10^5 \end{cases} \quad (10)$$

2) Para argamassa sob compressão

$$\begin{cases} S = -0,41(\log Nf) + 3,9621; Nf < 2 \times 10^5 \\ S = 1,70 \text{ MPa}; Nf > 2 \times 10^5 \end{cases} \quad (11)$$

a) Variação de temperatura considerando apenas as temperaturas do ar para duas cidades com climas distintos

Para materiais abrigados da incidência da radiação solar serão consideradas variações diárias de temperatura compatíveis com os climas descritos pelas Tabela 1 e Tabela 2. Foi adotado, portanto, uma situação crítica para o município de Fortaleza-CE em que as temperaturas máxima e mínima diferissem de $30,3^{\circ}\text{C} - 22,7^{\circ}\text{C} = 7,6^{\circ}\text{C}$ (Tabela 1). Para uma situação hipotética, em que uma barra de argamassa de emboço se encontra com movimento restringido nas extremidades, a amplitude de tensão proveniente dessa variação térmica, é obtida pela Equação 5 ($\sigma = - E \cdot \alpha \cdot \Delta T$). Esse será o procedimento de cálculo simplificado de amplitude de tensão para os exemplos aqui apresentados. Deve-se frisar que, na realidade, o estado de tensões a que fica submetida a camada de argamassa é bastante mais complexo, outros modelos devem ser considerados, posteriormente, para esses cálculos. Substituindo os valores de módulo, coeficiente de dilatação térmica e variação de temperatura (Tabela 12), tem-se que a amplitude de tensão de origem térmica ($|\sigma_t|$) é de $|\sigma_t| = (5,49 \text{ GPa}) * (11,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}) * (7,6 \text{ }^{\circ}\text{C}) \Rightarrow |\sigma_t| = 0,48 \text{ MPa}$.

Com base nas curvas S-N, apresentadas na Figura 18 e na Equação 10, é possível perceber que o limite de fadiga é igual a 0,65 MPa para ciclos de tração, que são os mais severos conforme figura apresentada. Significa, portanto, que abaixo desse nível de tensão, o número de ciclos, que poderia causar comprometimento da vida de fadiga, é bastante maior que 2×10^5 . Ou seja, como a tensão de origem térmica obtida (0,48 MPa) é inferior ao limite de fadiga considerado (0,65 MPa); ela, sozinha (sem contribuições de variações de umidade e da movimentação da estrutura, e ainda considerando temperaturas do ar – excluindo efeito de insolação, ainda não considerado), não acarretaria prejuízos ao material, para essa faixa de variação de temperatura. Então, à princípio, usando-se o material testado por Uchôa (2007) e o cálculo simplificado aqui proposto, não parece haver risco de fadiga térmica.

Para uma segunda situação, levando-se em conta o mesmo raciocínio, e considerando dados do município de Campo Bom-RS (Tabela 2), seria plausível considerar variações de temperatura da ordem de $20,5^{\circ}\text{C} - 9,0^{\circ}\text{C} = 11,5^{\circ}\text{C}$. Encontra-se uma amplitude de tensão térmica igual a $|\sigma_t| = (5,49 \text{ GPa}) * (11,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}) * (11,5 \text{ }^{\circ}\text{C}) \Rightarrow |\sigma_t| = 0,726 \text{ MPa}$. Diante desse valor de amplitude de tensão (0,726 MPa), e considerando novamente a Equação 10, o número de ciclos correspondente seria de $10^{5,032}$. Em outras palavras, seriam necessários 107.647 ciclos para acarretar comprometimento da vida de fadiga do material apenas com tensões de origem térmica, decorrentes das variações de temperatura do ar (desconsiderando efeitos de insolação). Isso equivaleria a quase 300 anos de ciclos diários com essa variação de temperatura.

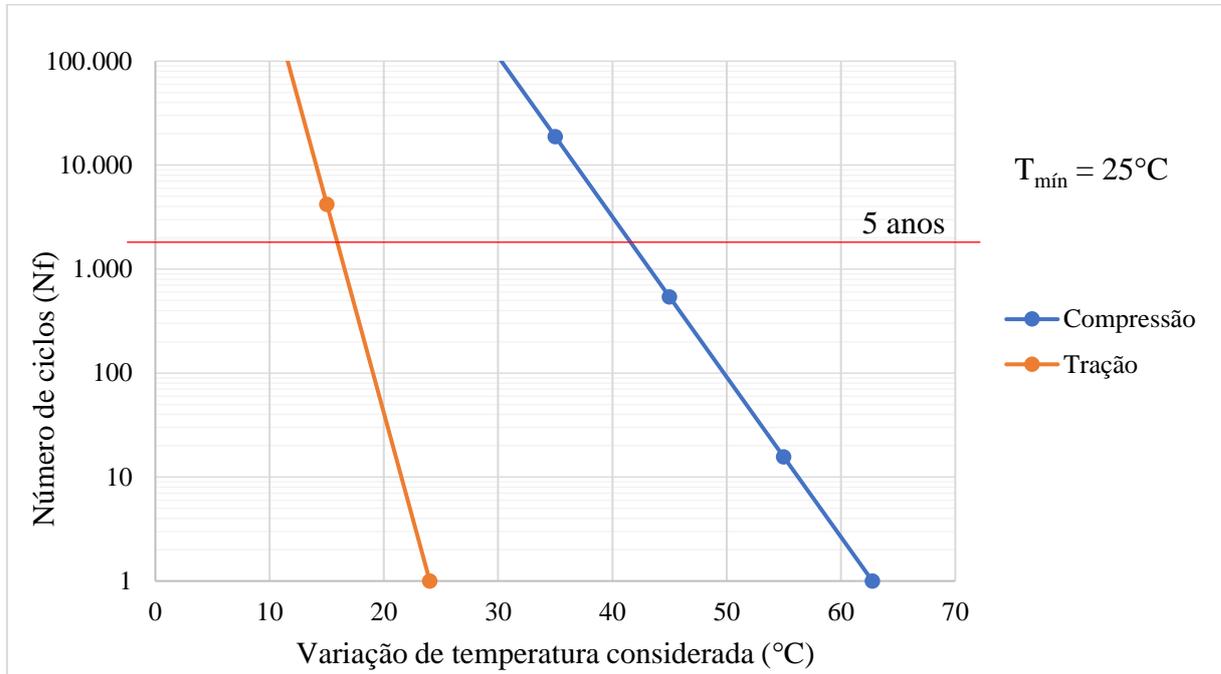
b) Variação de temperatura considerando efeitos da radiação solar

Saraiva *et al.* (2002), utilizando a definição de temperatura equivalente, determina que, para uma fachada constituída por elemento cerâmico, de cor escura, com absorção térmica de 0,95 e para as condições de Brasília-DF, apresenta temperatura de 63,1°C. Considerando-se a temperatura em fachadas com insolação da ordem de 70°C, em Fortaleza, nos horários mais quentes (às tardes), a amplitude de variação de temperatura passa a ser da ordem de 45°C (com relação a uma temperatura mais baixa da ordem de 25°C), e as correspondentes amplitudes de tensão seriam $|\sigma_t| = (5,49 \text{ GPa}) * (11,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}) * (45 \text{ }^\circ\text{C}) \Rightarrow |\sigma_t| = 2,841 \text{ MPa}$. Com base, novamente, na Equação 10, para tensões de tração; verificou-se que apenas um ciclo seria o suficiente para provocar a ruptura. Claro, isso corresponde a uma barra homogeneamente aquecida e com o movimento das extremidades totalmente restrito e sem qualquer efeito de relaxação ao longo de um dia. Esse conjunto de hipóteses é evidentemente uma condição extrema, mas útil para o propósito deste texto que é sublinhar os riscos de fadiga térmica e o efeito das variações de temperatura na vida de fadiga prevista.

Repetindo o mesmo procedimento, mas agora considerando a Equação 11, com tensões de compressão, obtém-se um número de repetições até a falha da ordem de 10^3 , o que requereria apenas cerca de 3 anos para se concretizar. As demais variações foram plotadas na Figura 41. Esse cálculo realizado considerou apenas tensões de origem térmica (desconsiderando efeitos de umidade e de movimentação de estrutura), evidencia o risco de fadiga com um cálculo simplificado, e justifica a investigação mais a fundo desse fenômeno. Sublinha-se com esses exemplos, conceitualmente, o risco de fadiga, que existirá em algumas fachadas em função da argamassa e do revestimento utilizado, além das conduções de clima e insolação.

Diante dessas considerações, optou-se por realizar a análise das influências de variações de temperatura, no número de ciclos suportados pelo material, com base no Município de Fortaleza-CE. Para tanto, as temperaturas máximas analisadas variaram de 40°C até pouco mais de 85°C; foi adotada temperatura mínima fixa de 25°C. O procedimento aplicado para essa análise segue o mesmo para as demais faixas de temperaturas apresentadas na Figura 41.

Figura 41 – Estimativa do número de ciclos até a falha em função da amplitude de variação de temperatura, considerando uma barra de argamassa com movimento das extremidades restringido



Fonte: Autoria própria (2024).

Com base na Figura 41, foi possível perceber que, para tensões tração, a variação de temperatura suportada (pela barra de argamassa de emboço com movimento restringido nas extremidades), foi inferior à 25°C. Ou seja, a partir dessa variação de temperatura diária, o material romperia com apenas um ciclo. Já para o caso da compressão, o mesmo material suportaria variação de temperatura de 60°C, aproximadamente.

Sabe-se que o estado de tensões na camada de revestimento é bem mais complexo do que o considerado neste exercício, de análise simplificada. O intuito dessa análise não foi a de ser algo exato, mas sim de elucidar que existe um risco associado (ARAGÓN *et al.* 2019; DENIZ, 2015; MARQUES *et al.*, 2020). Reitera-se que esse exercício analisou barras com variação de tamanho impedida. Na realidade, há amplitudes de tensão diferentes em função da profundidade da camada de revestimento, além de que partes podem estar sob compressão e outras partes sob tração.

Observe-se, ainda, que valores maiores de módulo de elasticidade e/ou de coeficiente de dilatação linear e/ou teriam produzido previsões de falha mais precoces. O aprofundamento dessas questões e a proposição de um modelo de fadiga mais realista são sugestões de pesquisas futuras.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

A avaliação do módulo de elasticidade é um passo importante para realizar análise das deformabilidades, às quais os sistemas de revestimentos argamassados estão sujeitos, de modo a propiciar a minimização de uns dos defeitos mais comuns nesses sistemas, as fissuras. Este trabalho investigou diferentes métodos de caracterização de módulo de elasticidade de argamassas, desde os valores obtidos com cada técnica, até a evidências de que há dano incorrido com a realização de alguns deles. O valor do módulo de elasticidade pode ser particularmente importante no caso da previsão de fadiga, algo também abordado neste trabalho por meio da montagem de um ensaio de fadiga de argamassas. Além disso, uma estimativa simplificada de vida de fadiga de fachadas argamassas também foi apresentada como ilustração do uso potencial dos resultados obtidos com vistas a uma previsão de comportamento em campo.

O estudo do módulo, por diferentes métodos de ensaio, permitiu observar algumas diferenças entre os resultados, o que pode contribuir para futuras correlações entre eles. Além disso, viu-se que a frequência e a amplitude de carregamento contribuem para o aumento e para a diminuição do módulo complexo, respectivamente. Observou-se ainda, através da análise do módulo dinâmico (com ondas ultrassônicas) de maneira intercalada entre os demais ensaios, que os ensaios de módulo complexo (quase-estático) e de módulo estático, contribuem para a degradação das amostras de idades até 30 dias. Isso, em conjunto com não linearidades físicas da argamassa, pode ter contribuído, ainda, para que nos testes de módulo estático, os valores obtidos fossem sempre inferiores aos das demais medidas.

Os ensaios de fadiga foram realizados de forma preliminar, contudo verificou-se que ainda há bastante dificuldade em se garantir o rompimento da amostra no terço médio, que por sua vez, permite a obtenção da curva de degradação da argamassa. Há ainda uma dificuldade em estabelecer uma razão de tensão apropriada para os ensaios, visto que os níveis de carregamento afetam de maneira muito dispersa o número de ciclos obtidos, dificultando a obtenção de resultados interpretáveis. Observou-se, também, que o efeito da excentricidade (devido a falhas no processo de colagem), apresentado em algumas amostras, pode ter influenciado no seu rompimento precoce, comprometendo a análise dos dados. Entretanto, é um ensaio importante para se conhecer a vida de fadiga de um determinado componente, e segue-se na busca pela instalação de um ensaio confiável para avaliação da fadiga, com melhorias futuras sendo necessárias para a aplicação em argamassas.

A fadiga térmica de argamassa é um fenômeno que requer atenção especial, pois ocorre de forma cíclica e contínua, particularmente em paredes com revestimentos de argamassa, expostas à radiação solar. Como apresentado na análise de fadiga térmica simplificada, proposta neste trabalho, as variações de temperatura podem afetar consideravelmente o ciclo de vida do material. Um estudo para argamassas considerando o clima de Fortaleza-CE e outro mais frio foi apresentado, de maneira a elucidar a importância do estudo e desse tipo de análise. Dependendo do material e das condições ambientais (principalmente de amplitudes térmicas), há possibilidade de aparecimento de problemas por fadiga. Desse modo, torna-se necessário prever adequadamente esse fenômeno, o que auxiliará na implementação de medidas que possam evitar o comprometimento do material, por exemplo, com uso de técnicas de caracterização para seleção de materiais adequados, tema em que este trabalho buscou contribuir.

As principais conclusões itemizadas, que se pode retirar do trabalho, foram:

- Os módulos aumentaram de maneira gradativa no decorrer das idades, o que corroborou com o comumente observado na literatura, para a resistência mecânica;
- O módulo complexo aumentou com o aumento da frequência, e reduziu com o aumento das amplitudes, sendo compatível com o comportamento viscoelástico e com o comportamento não-linear, respectivamente. Isso sugere a importância de considerar esses comportamentos, visto que os carregamentos em campo ocorrem em condições diferentes do laboratório (frequências mais baixas);
- Foi possível verificar que dentre os coeficientes de Poisson adotado (0,1; 0,2; 0,3 e 0,4) para o cálculo do módulo dinâmico, os que mais se assemelharam com os outros dois ensaios (módulo complexo e estático) foram os de 0,3 e 0,4;
- Através dos ensaios de módulo dinâmico, evidenciou-se que há uma diferença notável entre os valores de coeficientes de Poisson adotados (0,1; 0,2; 0,3 e 0,4) e os que podem ser determinados experimentalmente (μ_{calc}). Dentre estes, o coeficiente de 0,2 foi o que mais se assemelhou ao determinado experimentalmente, no entanto a adoção direta do valor de 0,2 pode produzir uma alteração na estimativa do módulo em relação ao μ_{calc} (de 4% para a argamassa A e 9% para a argamassa B).

- Foi possível investigar o efeito do dano decorrente dos ensaios de módulo complexo e módulo estático, utilizando os dados provenientes dos ensaios de módulo dinâmico. Através disso, notou-se que para a argamassa B não houve degradação significativa no módulo; já para a argamassa A, viu-se que para idades mais elevadas, a aplicação do carregamento dos ensaios de módulo complexo quase não afeta os resultados de módulo dinâmico, o que justifica considerá-lo como não destrutivo para idades mais avançadas (a partir de 30 dias).
- Para a argamassa A, foi observada degradação nos módulos dinâmicos (após a realização dos ensaios complexo e estático), com base nos limites adotados (10%), para a idade de até 30 dias. Para a argamassa B, a degradação foi menos pronunciada, devendo-se considerar que foi observada variabilidade nos resultados. Além disso, comparando-se os ensaios de módulo complexo com o de módulo estático, o ensaio estático produziu evidência mais clara de danificação.
- Foi possível realizar ensaios de fadiga em argamassas de revestimento, mas ainda há bastante variabilidade nos valores de número de ciclos e nas formas de ruptura, necessitando de aperfeiçoamento do ensaio para argamassas;
- Observou-se, também, que avaliação de módulo de elasticidade é fase fundamental para previsão da vida de fadiga em argamassas de revestimento.

Finalmente, como sugestões de pesquisas futuras que surgiram a partir do desenvolvimento desta pesquisa, sublinham-se:

- Melhor adaptar o ensaio de fadiga de argamassas;
- Realizar repetição de ensaios de fadiga, considerando diferentes níveis de amplitude de tensão e/ou deformação, de modo a permitir a obtenção da curva de Wöhler e identificar possíveis falhas;
- Investigar maior variação de materiais, visto que ambas as argamassas testadas tiveram comportamentos de módulos muito semelhantes;
- Investigar a relação entre o teor de ar incorporado e o módulo de elasticidade de argamassas;

- Investigar umidade no momento dos ensaios e avaliar o efeito no módulo medido;
- Investigar como considerar a interface, no ensaio ou na modelagem (WUFI).

REFERÊNCIAS

- AMIN, M. N.; KIM, J.; LEE, Y.; KIM, J. Simulation of the thermal stress in mass concrete using a thermal stress measuring device. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 39, n. 3, p. 154-164, mar. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.12.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884608002378?via%3Dihub>. Acesso em: 31 jul 2019.
- AL-ORAIMI, S., TAHA, R., & HASSAN, H. The effect of the mineralogy of coarse aggregate on the mechanical properties of high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, London, v. 20, p. 499-503, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.12.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006180500067X>. Acesso em: 13 out. 2021.
- ARAGÓN, G.; ARAGÓN, Á.; SANTAMARÍA, A.; ESTEBAN, A.; FIOL, F. Physical and mechanical characterization of a commercial rendering mortar using destructive and non-destructive techniques. **Construction and Building Materials**, London, v. 224, p. 835–849, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.034>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819316976>. Acesso em: 15 nov. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de revestimentos de argamassa**. 1. ed. São Paulo, SP, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. São Paulo, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467** – Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522** – Concreto – Determinação de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528** – Revestimento de paredes de argamassa inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575** – Edificações Habitacionais: Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30** – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45** – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52** – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248** – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BABADOPULOS, L. F. A. L.; OROZCO, G.; SAUZÉAT, C.; DI BENEDETTO, H. Reversible phenomena and fatigue damage during cyclic loading and rest periods on bitumen. **International Journal of Fatigue**, London, v. 124, p. 303-314, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.03.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112319300891?via%3Dihub>. Acesso em: 17 set. 2020.

BABADOPULOS, L. F. A. L. **A contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

BAKTHEER, A.; HEGGER, J.; CHUDOBA, R. Enhanced assessment rule for concrete fatigue under compression considering the nonlinear effect of loading sequence. **International Journal of Fatigue**, London, v. 126, p. 15, 2019. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2019.04.027](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.04.027). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112319301513>. Acesso em: 11 ago. 2021.

BALBO, J. T. Fatos, mitos e falácias sobre os modelos experimentais de fadiga. *In*: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32, 2000, Brasília. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2000. v. 1. p. 391-404.

BARBOSA, A. H. **Contribuição ao estudo sobre a obtenção do módulo de elasticidade do concreto utilizando modelagem micromecânica**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5128>. Acesso em: 21 mar. 2020.

BARRA, B. S. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/93198?show=full>. Acesso em: 21 mar. 2020.

BARTH, F.; VEFAGO, L. H. M. **Tecnologia de fachadas pré-fabricadas**. Florianópolis: Editora Letras Contemporâneas, 2007.

BAUER, E.; BEZERRA, L. M.; UCHÔA, J. C. B.; CHAGAS, S. V. M. Estudo do comportamento à fadiga das argamassas e sua relação com as patologias e danos nas fachadas. *In: CONGRESO DE PATOLOGIA Y REHABILITACIÓN DE EDIFÍCIOS*, 4., 2012, Santiago de Compostela. **Actas** [...]. Santiago de Compostela, 2012. p. 63-68. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4194378>. Acesso em: 21 mar. 2020.

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; LEAL, F. E.; ANTUNES, G.R. Identification and quantification of failure modes of new buildings façades in Brasília. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS*, 12., 2011, Porto - Portugal. **Anais** [...]. Porto, 2011. v. 1. p. 1-3. Disponível em: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB22461.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2020.

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; SILVA, M. N. B. Estimativa da degradação de fachadas com revestimento cerâmico: estudo de caso de edifícios de Brasília. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, p. 358, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581786>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/rgJWnSMXFDHBx5tZgFcgNRn/?lang=pt>. Acesso em: 13 out. 2021.

BAUER, E.; PAVÓN, E. Termografia de infravermelho na identificação e avaliação de manifestações patológicas em edifícios. **Concreto & Construção**, São Paulo, v. 79, p. 93-98, 2015. Disponível em: https://ibracon.org.br/site_revista/concreto_construcoes/ebook/edicao79/files/assets/basic-html/page93.html. Acesso em: 14 fev. 2020.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2008, v. 2.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos materiais**. 5° ed. Porto Alegre: Ed. AMGH Editora Ltda, 2011.

BEZERRA, L. M.; UCHÔA, J. C. B.; ARAÚJO, J. A.; BONILLA, J. Experimental and numerical investigation of fatigue in base-rendering mortar used in façades undergoing thermal cycles. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Washington, v. 30, 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002319](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002319). Disponível em:

<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002319>. Acesso em: 14 fev. 2020.

BESHR, H., ALMUSALLAM, A., & MASLEHUDDIN, M. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. **Construction and Building Materials**, London, v. 17, p. 97-103, 2003. DOI: 10.1016/S0950-0618(02)00097-1. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061802000971>. Acesso em: 13 out. 2020.

BOFANG, Z. Introduction. **Thermal stresses and temperature control of mass concrete**, Colombia, p. 1-10, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-407723-2.00001-4>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780124077232000014>. Acesso em: 13 out. 2020.

CAPORRINO, C. F. **Patologias em alvenarias**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000746845>. Acesso em: 18 jun. 2020.

CARASEK, H. Argamassas. *In*: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010, p. 886-930.

CHAGAS, S. V. M. **Estudo e proposta de um modelo de resistência à fadiga de argamassas de revestimento em estado plano e tridimensional de tensões**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <https://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/dissertacoes/M09-15A-Suelendas-Chagas.pdf>. Acesso em: 17 set. 2019.

CHILDS, P.; WONG, A. C. L.; GOWRIPALAN, N.; PENG, G. D. Measurement of the coefficient of thermal expansion of ultra-high strength cementitious composites using fibre optic sensors. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 37, p. 789-795, 2007. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.02.015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607000518?via%3Dihub>. Acesso em: 17 set. 2019.

CINCOTTO, M. A. Patologia das argamassas de revestimento: análise e recomendações. *In*. **Tecnologia das Edificações**. São Paulo: Pini/IPT, 1988.

DENIZ, S.; ERDOĞAN, S.T. Prediction of elastic moduli development of cement mortars using early age measurements. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Washington, v. 27, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001025. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001025>. Acesso em: 03 mar. 2020.

DI BENEDETTO, H.; LA ROCHE, C. de; BAAJ, H.; PRONK, A.; LUNDSTRÖM, R. (2004). Fatigue of Bituminous mixtures. **Materials and Structures**, Netherlands, v. 37, p

202-216, 2004. <http://doi.org/10.1007/BF02481620>. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02481620>. Acesso em: 03 mar. 2020.

DI BENEDETTO, H.; OLARD F.; SAUZE\ AT, C.; DELAPORTE, B. Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: from binders to mixes. **International Journal of Road Materials and Pavement Design**, London, p. 163–202, 2004. DOI: 10.1080/14680629.2004.9689992. Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14680629.2004.9689992>. Acesso em: 19 out. 2019.

DUARTE, R. B. **Fissuras em alvenaria**: causas principais, medidas preventivas e técnicas de recuperação. Porto Alegre: CIENTEC, 1998. (Boletim Técnico, 25).

ESQUIVEL, J. F. T. **Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em:
<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-03092009-162624/pt-br.php>. Acesso em: 17 set. 2019.

FERREIRA, D. M., GARCIA, G. C. **Patologia de revestimentos históricos de argamassa: o caso da ação da água na Igreja de São Francisco da Prainha, Rio de Janeiro**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016. Disponível em:
https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/PATOLOGIA_DE_REVESTIMENTOS_HIST%3%93RICOS_DE_ARGAMASSA_-_O_caso_da_a%C3%A7%C3%A3o_da_%C3%A1gua_na_Igreja_de_S%C3%A3o_Francisco_da_Prainha__Rio_de_Janeiro.pdf. Acesso em: 17 set. 2019.

FERREIRA, R. P. **Desenvolvimento de um software para o cálculo da vida em fadiga de um riser submetido a VIV**. 2011. Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. – São Paulo, 85 p, 2011. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2011/Artigos/Art_TCC_051_2011.pdf. Acesso em: 17 set. 2019.

FERRY, J. D. **Viscoelastic properties of polymers**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1980. Disponível em:
<https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/Properties/Books/Viscoelastic%20Properties%20of%20Polymers%20Ferry.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2020.

FRISE, P.R; BELL, R. Modelling fatigue crack growth and coalescence in notches. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Netherlands, v. 51, p. 107-126, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(92\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0308-0161(92)90008-4). Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0308016192900084>. Acesso em: 18 jan. 2020.

GRAZZINI, A. Experimental fatigue test for pre-qualification of repair mortars applied to historical masonry. **Aidy A, Advanced Engineering Testing**. London: IntechOpen, 2018, p. 3-22. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.79543>. Disponível em:
<https://www.intechopen.com/chapters/62486>. Acesso em: 28 mar. 2020.

GOEL, S.; SINGH, S. P. Fatigue performance of plain and steel fibre reinforced self-compacting concrete using S–N relationship. **Engineering Structures**, United Kingdom, v. 74, p. 65-73, 2014. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.05.010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029614002971?via%3Dihub>. Acesso em: 10 jan. 2021.

GUERRA, F. L.; CUNHA, E. G.; SILVA, A. C.; KNOP, S. Análise das condições favoráveis à formação de bolor em edificação histórica de Pelotas, RS, Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 7-23, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000400002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/b9rRtqsrPpNFWjKW8YF7GBx/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 14 jul. 2020.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. **DNIT 416** – Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação do módulo dinâmico – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL. **Normais climatológicas (1981/2010)**. Brasília - DF, 2018. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal>. Acesso em: 21 abr. 2020.

ISRAEL, M. C. **Ensaio não destrutivo à avaliação e controle de revestimentos de argamassa**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-15072016-150954/pt-br.php>. Acesso em: 20 set. 2019.

JUNG, C. **Contributions to analytical psychology**. London: Routledge & Kegan Paul, 1928.

KACHANOV, L.M. Rupture time under creep conditions. **International Journal of Fracture**, Netherlands, v. 97, p. 11–18, 1999. Translated from Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie tekhnicheskikh nauk, Russian, n. 8, p. 26–31, 1958. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1018671022008>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1018671022008>. Acesso em: 11 nov. 2019.

KUMMER, L. M. **Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos de uma central dosadora de concreto de Lajeado/RS**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2016. Disponível em: <https://www.univates.br/bdu/items/603311e2-8fca-48de-8546-81db56c3103d>. Acesso em: 15 abr. 2020.

LEAL, U. Fachadas e paredes estão doentes: apesar da maior oferta de argamassas e do compromisso dos fabricantes com a qualidade dos produtos, mais trincas e fissuras são visíveis nas edificações. **Téchne** – A Revista do Engenheiro Civil, São Paulo, v. 11, n. 76, p. 48-52, 2003.

LEE, M. K.; BARR, B. I. G. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, United Kingdom, v. 26, n. 4, p.

299-305, 2004. DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00139-7. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946502001397?via%3Dihub>. Acesso em: 17 mar. 2020.

LEMAITRE, J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture. **Journal of Engineering Materials and Technology**, United States, v. 107, p. 83-89, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3225775>. Disponível em: <https://hal.science/hal-03609806/document>. Acesso em: 12 fev. 2020.

LEMAITRE, J. **A Course on damage mechanics**. 2. ed. New York: Springer, 1996.

LEMAITRE, J.; DESMORAT, R. **Engineering damage mechanics**. France: Cachan, 2005.

LUCAS JÚNIOR, J. L.O. **Influência da adesividade agregado-ligante no trincamento por fadiga de misturas asfálticas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/34068>. Acesso em: 15 abr. 2020.

LUZ, M. A. **Manifestações patológicas em revestimentos cerâmicos de fachada em três estudos de caso na cidade de Balneário Camboriú**. 2004. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/87309>. Acesso em: 15 abr. 2020.

MARQUES, A. I.; MORAIS, J.; MORAIS, P.; VEIGA, M. R.; SANTOS, C.; CANDEIAS, P.; FERREIRA, G. Modulus of elasticity of mortars: static and dynamic analyses. **Construction and Building Materials**. London, v. 232, p. 117-216, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117216>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819326686?via%3Dihub>. Acesso em: 14 fev. 2021.

MAYER, D. **Previsibilidade do módulo de elasticidade de argamassa de revestimento usando micromecânica**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/bitstream/handle/123456789/6789/Previsibilidade%20do%20M%C3%B3dulo%20de%20Elasticidade%20de%20Argamassa%20de%20Revestimento%20usando%20Micromec%C3%A2nica?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 abr. 2020.

MEDEIROS, A.; ZHANG, X.; RUIZ, G.; YU, R. C.; VELASCO, M. S. L. Effect of the loading frequency on the compressive fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete. **International Journal of Fatigue**, London, v. 70, p.342-350, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.08.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112314002102?via%3Dihub>. Acesso em: 21 out. 2019.

MONTE, R.; BARROS, M. M. S. B.; FIGUEIREDO, A. D. de. Evaluation of early age cracking in rendering mortars with polypropylene fibers. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 21-32, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000200240>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ac/a/9tXrgRMC8jSMc4NyKf5DdXB/?lang=en>. Acesso em: 15 mar. 2022.

MONTE, R.; SILVA, A. C. M. A.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação da influência do teor de ar no módulo de elasticidade de argamassas. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS*, 7., 2007, Recife. **Anais [...]**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2007. p. 1-10. Disponível em: <https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/340-avaliacao-da-influencia-do-teor-de-ar-no-modulo-de-elasticidade-de-argamassas>. Acesso em: 12 jan. 2022.

MONTEIRO, A. R.; VERAS, A. T. R. A questão habitacional no Brasil. **Mercator**, Fortaleza, v. 16, p. 1-13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4215/RM2017.E16015>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mercator/a/ZkVrVHZqbHWQwK6HRpGrcXN/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 18 jan. 2021.

NADEAU, J. A multiscale model for effective moduli of concrete incorporating itz water-cement ratio gradients, aggregate size distributions, and entrapped voids. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 33, p. 103-113, 2003. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00931-6. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884602009316>. Acesso em: 13 out. 2021.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5a ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

PACHECO, C. P.; VIEIRA, G. L. Análise quantitativa e qualitativa da degradação das fachadas com revestimento cerâmico. **Cerâmica**, São Paulo, v. 63, n. 368, p. 432-445, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633682156>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/FvQ37tJLwYc4ZMS3JgbzKLb/>. Acesso em: 13 out. 2021.

PASTOUKHOV, V. A.; VOORWALD, H. J. C. **Introdução à mecânica da integridade estrutural**. São Paulo: UNESP, 1995.

POPOVICS, J. S. A study of static and dynamic modulus of elasticity of concrete. **American Concrete Institute**, Urbana-Champaign, 2008. Disponível em: https://www.acifoundation.org/Portals/12/Files/PDFs/CRC_43.pdf. Acesso em: 15 mai. 2020.

POSSAN, E.; ALVES, H.; HELENE, P.; BILESKY, P.; CARRAZEDO, R.; CURTI, R. Módulo de elasticidade dinâmico do concreto: por que utilizar. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 62, 2020, Florianópolis. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2020. v. 2, p. 1-15. Disponível em: https://www.sonelastic.com/images/Modulo_Dinamico_Concreto_Por_Que_Utilizar_62CBC.pdf. Acesso em: 14 set. 2023.

PRAVIA, Z. M. C. de. **Estabilidade de estruturas de pontes metálicas com fraturas**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

QIU, K.; CHEN, H.; YE, H.; HONG, J.; SUN, W.; JIANG, J. Thermo-mechanical coupling effect on fatigue behavior of cement asphalt mortar. **International Journal of Fatigue**, London, v.51, p.116-120, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.01.001>.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112313000157?via%3Dihub>. Acesso em: 11 ago. 2021.

SARAIVA, A. G. **Contribuição ao estudo de tensões de natureza térmica em sistemas de revestimento cerâmico de fachada**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 1998. Disponível em: <https://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/dissertacoes/M98-4A-Ana-Saraiva.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2020.

SARAIVA, A. G.; BAUER, E.; BEZERRA, L. M. Análise das tensões entre argamassa colante e placas cerâmicas submetidas a esforços de natureza térmica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 47-56, 2002. Disponível em:

<https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3417>. Acesso em: 19 abr. 2020.

SANTOS, R. M. **Comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com CFC sujeitas a carga de impacto**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica (PUC), Rio de Janeiro, 2008. Disponível em:

<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=13063@1>. Acesso em: 15 abr. 2020.

SCHÖN, C. G. **Mecânica dos materiais**: apostila redigida para uso nos cursos “PMT2405- mecânica dos materiais” e “PMT5860- teoria da plasticidade e da fratura dos materiais”. 4 ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009.

SEGAT, G. T. **Manifestações patológicas observadas em revestimentos de argamassa: estudo de caso em conjunto habitacional popular na cidade de Caixas do Sul (RS)**. 2006. Trabalho de conclusão (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006. Disponível em:

<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/10139>. Acesso em: 14 mai. 2020.

SHANNAG, M. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. **Cement and Concrete Composites**, United Kingdom, v. 22, p. 399-406, 2000. DOI:

[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00037-8). Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946500000378>. Acesso em: 14 mai. 2020.

SHIRAKAWA, M. A.; MONTEIRO, M. B. B.; SELMO, S. M. S.; CINCOTTO, M. A. Identificação de fungos em revestimentos de argamassa com bolor evidente. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ARGAMASSAS, 1., 1995, Goiânia. **Anais [...]**, Goiânia, 1995. p. 402-410. Disponível em: <https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/36-identificacao-de-fungos-em-revestimentos-de-argamassa-com-bolor-evidente?start=20>. Acesso em: 31 jul. 2019.

SHKOLNIK, I. E. Influence of high strain rates on stress–strain relationship, strength and elastic modulus of concrete. **Cement and Concrete Composites**, United Kingdom, v. 30, p.

1000-1012, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.10.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095894650700162X>. Acesso em: 21 abr. 2020.

SILVA, A. F. **Manifestações patológicas em fachadas com revestimentos argamassados: Estudo de caso em edifícios em Florianópolis**. 2007. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/30370929.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2020.

SILVA, F. B.; BARROS, M. M. B. de; MONTE, R. Módulo de deformação de argamassas: avaliação dos métodos e principais fatores intervenientes. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS*, 8., 2009, Curitiba. **Anais** [...]. Curitiba, 2009, p. 1-12. Disponível em: <https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/380-modulo-de-deformacao-de-argamassas-avaliacao-dos-metodos-de-ensaio-e-principais-fatores-intervenientes>. Acesso em: 14 fev. 2021.

SILVA, F. B.; MONTE, R.; BARROS, M. M. S. B. Avaliação do módulo de deformação em materiais cimentícios: ensaios estáticos ou dinâmicos? *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais** [...]. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2007. p. 160-175. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/302177254_Avaliacao_do_modulo_de_deformacao_em_materiais_cimenticios_ensaios_estaticos_ou_dinamicos. Acesso em: 13 out. 2021.

SILVA, N.G., CAMPITELI, V. C. Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassa 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>. Acesso em: 14 out. 2020.

SPODE, P.; COSTA, I. T.; AGUIAR, P. A importância do processo de verticalização urbana para o ensino de Geografia. **Conhecimento e meio ambiente**, Santa Catarina, v. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21166/metapre.v4i.2243>. Disponível em: <https://publicacoes.ifc.edu.br/index.php/metapre/article/view/2243>. Acesso em: 14 mai. 2020.

SWAMY, R.N. Dynamic Poisson's ratio of Portland cement paste, mortar and concrete. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 1, p. 559-58, 1971. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(71\)90060-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(71)90060-3). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884671900603>. Acesso em: Acesso em: 14 mai. 2020.

TAKAHASHI, B. X. **Metodologia moderna para análise de fadiga baseada em elementos finitos de componentes sujeitos a fadiga uni e multiaxial**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-19032015-173219/pt-br.php>. Acesso em: 14 mai. 2020.

UCHÔA, J. C. B. **Procedimento numérico e experimental para a avaliação da resistência à fadiga em sistema de revestimento**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007. Disponível em: <https://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/dissertacoes/M07-2A-Jo%C3%A3o-Uch%C3%B4a.pdf>. Acesso em: 20 set. 2019.

WIGHT, J. K.; RICHART, F. E.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced concrete**: mechanics and design, global edition. 6th ed. United States: Pearson Higher Education & Professional Group, 2012.

WU, K. R.; CHEN, B.; YAO, W.; ZHANG, D. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 31, p. 1421-1425, 2001. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00588-9. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884601005889?via%3Dihub>. Acesso em: 13 mai. 2021.

WU, K.R.; LIU, J.-Y.; ZHANG, D.; YAN, A. Rupture probability of coarse aggregate on fracture surface of concrete. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 29, p. 1983-1987, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00183-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00183-0). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884699001830?via%3Dihub>. Acesso em: 13 mai. 2021.

ZHAO, X.-H., & CHEN, W. Effective elastic moduli of concrete with interface layer. **Computers Structures**, California, v. 66, p. 275-288, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(97\)00056-4](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(97)00056-4). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794997000564>. Acesso em: 14 mar. 2020.