



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

– MESTRADO/DOUTORADO –

–

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE DE ADESÃO DE ARGAMASSAS
COLANTES EM PLACAS CERÂMICAS SOB CARREGAMENTO
ESTÁTICO E DINÂMICO**

Por

Janaina Salustio da Silva

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Doutor*

João Pessoa – Paraíba

Março de 2024



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO/DOCTORADO –**

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE DE ADESÃO DE ARGAMASSAS
COLANTES EM PLACAS CERÂMICAS SOB CARREGAMENTO
ESTÁTICO E DINÂMICO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor.

Janaina Salustio da Silva

Orientador: Prof. Dr. Sandro Marden Torres

João Pessoa – Paraíba

Março de 2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586a Silva, Janaina Salustio da.

Análise da integridade de adesão de argamassas colantes em placas cerâmicas sob carregamento estático e dinâmico / Janaina Salustio da Silva. - João Pessoa, 2024.

169 f. : il.

Orientação: Sandro Marden Torres.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Argamassas. 2. Descolamento de revestimento. 3. Propagação de fissura. 4. Curvas MMF. 5. Frequência de ressonância. 6. Energia crítica de fratura. I. Torres, Sandro Marden. II. Título.

UFPB/BC

CDU 666.971(043)

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE DE ADESÃO DE ARGAMASSAS COLANTES EM
PLACAS CERÂMICAS SOB CARREGAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO**

Janaina Salustio da Silva
Tese aprovada em 27 de março de 2024.
Período Letivo: 2023.2

Documento assinado digitalmente
 **SANDRO MARDEN TORRES**
Data: 01/04/2024 16:06:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Sandro Marden Torres – UFPB
Orientador(a)

Documento assinado digitalmente
 **ANGELO VIEIRA MENDONÇA**
Data: 03/04/2024 21:18:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Ângelo Vieira Mendonça – UFPB
Examinador(a) Interno(a)

Documento assinado digitalmente
 **RENNIO FELIX DE SENA**
Data: 02/04/2024 15:17:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Rennio Felix de Sena – UFPB
Examinador(a) Interno(a)

Documento assinado digitalmente
 **ANGELO JUST DA COSTA E SILVA**
Data: 02/04/2024 22:59:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Ângelo Just da Costa e Silva – UNICAP
Examinador(a) Externo(a)

Documento assinado digitalmente
 **MARIA DAS VITORIAS VIEIRA ALMEIDA DE SA**
Data: 01/04/2024 18:54:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – UFRN
Examinador(a) Externo(a)

João Pessoa/PB
2024

ABSTRACT

Despite the various technological advances achieved in the facade technology sector and the updating of normative documents that specify criteria for the use of cladding materials, it is still possible to see that a serious problem persists in modern constructions: ceramic detachment. The majority of these detachments occur at the interface between the adhesive mortar and the ceramic tile, as this is the region most stressed by simultaneous tensile and shearing efforts when considering the thermo-hygroscopic effects of the materials. Sudden temperature variations generate stresses that act on the adhesive mortar, leading to the appearance of damage through the action of thermomechanical fatigue. Despite this, in Brazil, the methodology adopted to evaluate adhesion in coatings consists of a test that only evaluates direct tensile strength. In this sense, this research aims to investigate the adhesion of mortar joints using destructive and non-destructive crack propagation tests, subjecting the samples to the combined action of tensile and shearing efforts. For this, sandwich-type samples were molded made up of two ceramic plates joined by adhesive mortar. The presence of cracks, in different sizes, was simulated at the mortar/ceramic interface. Two types of adhesive mortar were also used, differentiated by their adhesion capacity. The test results were analyzed according to load and energy parameters. The mixed-mode flexure test confirmed the importance of interface contact conditions on the fracture resistance of the material, pointing to an increase in the crack propagation speed the smaller the contact area of the materials. The use of the resonance technique proved to be efficient in identifying the presence of damage in samples, and guidelines for identifying damage based on the material's resonance response were established. The analysis of the resonance spectra made it possible to determine which were the regions of influence of the component materials and the representative peak of the effect of the crack on the mortar-ceramic interface. When comparing the two test methods, a good agreement between their results was observed and the critical energy required for crack propagation was established within the average of $0.056\text{J} \pm 0.036\text{J}$.

KEYWORDS: coating detachment, crack propagation, MMF, resonance frequency, critical fracture energy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO DA PESQUISA	4
3	REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1	Aderência Substrato-Matriz Cimentícia	5
3.1.1	Aderência Química	7
3.1.2	Aderência Mecânica	10
3.1.2.1	Contato substrato-matriz cimentícia	14
3.2	Ensaio de Avaliação da Aderência.....	18
3.3	Danos em Materiais Cimentícios	23
3.3.1	Métodos de Avaliação de Danos	27
3.3.1.1	Testes Destrutivos.....	27
3.3.1.2	Testes Não Destrutivos	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1	Procedimento Experimental.....	40
4.2	Caracterização dos Materiais	42
4.2.1	Placa Cerâmica	42
4.2.1.1	Determinação da Absorção, Porosidade e Densidade Aparente.....	43
4.2.1.2	Análise Química da Massa Cerâmica	45
4.2.2	Argamassa Colante	45
4.3	Ensaio de Propagação de Fissura.....	47
4.3.1	Preparação das Amostras	47
4.3.2	Ensaio Mixed Mode Flexure (MMF) – Carga Estática	48
4.3.2.1	Definições Iniciais	50
4.3.2.2	Configuração Experimental do Ensaio	51
4.3.2.3	Tipos de Amostras	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES - PARTE 1.....	57
5.1	Caracterização dos Materiais	57
5.1.1	Ensaio de Absorção, Porosidade e Densidade Aparente das Placas Cerâmicas	57
5.1.2	Análise Química da Cerâmica.....	57
5.1.3	Ensaio Mecânico da Argamassa Colante.....	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES - PARTE 2.....	60
5.2	Análise da Aderência sob Carregamento Estático (Ensaio de Modo Misto).....	60
5.2.1	Influência do Tamanho da Pré-Fissura	62
5.2.2	Influência do Tempo de Cura.....	66
5.2.3	Influência do Tipo de Argamassa Colante.....	70
5.2.4	Determinação da Força Máxima das Curvas ACTB 45mm	72
5.2.5	Análise da Integridade da Aderência por Parâmetros de Energia	75
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES - PARTE 3.....	82

5.3 Definição do Espectro Padrão e Implementação da Metodologia de Ensaio (Ensaio Piloto).....	82
5.3.1 Espectros de Frequência	82
5.3.2 Investigação dos Efeitos – Análise Estatística	87
5.4 Conclusões Parciais a Partir do Ensaio Piloto	92
5.5 Análise da Aderência sob Carregamento Dinâmico - Frequências de Ressonância (Ensaio Final).....	93
5.5.1 Influência do Tamanho da Fissura Prévia.....	99
5.5.2 Influência do Tempo de Cura.....	105
5.5.3 Influência do Tipo da Argamassa.....	108
5.5.4 Análise Estatística dos Parâmetros de Frequência e Amplitude dos Espectros	109
5.5.5 Análise da Aderência por Parâmetros de Energia	113
5.5.5.1 Efeito da Fissura	114
5.5.5.2 Efeito do Tempo de Cura	119
5.5.5.3 Efeito do Tipo de Argamassa Colante	121
5.6 Comparação dos Resultados MMF e Ressonância	122
6 CONCLUSÕES	127
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
APÊNDICES	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do mecanismo de aderência mecânica entre adesivo/substrato: (a) imperfeições do substrato; (b) porosidade aberta do substrato (Fonte: Costa, 2014).....	11
Figura 2 - Microestrutura da zona de transição entre o substrato e (a) argamassa de controle sem adição de resina; (b) argamassa com adição de 4,5% resina epóxi e 0% de TiO ₂ ; (c) uma imagem ampliada da região marcada com linhas tracejadas da Figura 2(b) (Fonte: Guo et al, 2021).....	14
Figura 3 – Modos de solicitação ao fraturamento e respectivas esquematizações de testes de propagação: (a) modo I, teste DCB; (b) modo II, teste ENF; (c) modo III, teste MMF (Fonte: Ferreira, 2019 e Barros e Champaney, 2009).	28
Figura 4 – Esquematização do ensaio realizado na pesquisa de Melo et al. (2020) (Fonte: Silva, 2018).....	29
Figura 5 – Geometria das amostras confeccionadas (Fonte: Garpelli et al., 2022).	31
Figura 6 – Energia total envolvida durante o primeiro ciclo de carga e descarga de um material ideal (Fonte: Autora, adaptado de Spooner, 1975).	33
Figura 7 – Energia dissipada durante o primeiro ciclo de carga e descarga de um material ideal (Fonte: Spooner, 1975).	33
Figura 8 – Área representativa da energia necessária para fazer uma trinca se propagar em relação a um comprimento inicial da trinca, a (Fonte: Barros e Champaney, 2009). .	34
Figura 9 – Representação gráfica das amostras usadas nos ensaios com dimensões em mm (Fonte: Autora, 2024).	42
Figura 10 – Esquema de corte das placas cerâmicas menores ou iguais a 400cm ² para o ensaio (Fonte: Adaptado NBR ISO 10545-3:2020).	43
Figura 11 – Sequência do ensaio de absorção, porosidade e densidade aparente: (a) resfriamento das placas no dessecador; (b) sistema de evacuação; (c) submersão em água; (d) medição da massa submersa; (e) medição da massa saturada (Fonte: Autora, 2022).....	45
Figura 12 – Esquematização do uso de espaçadores (Fonte: adaptado de Silva, 2018).	48
Figura 13 – Posicionamento da amostra sanduíche na máquina para o ensaio MMF (Fonte: Autora, 2022).	49
Figura 14 – Etapas de construção do ensaio de ressonância (Fonte: Autora, 2024).	50
Figura 15 – Equipamentos necessários à produção e aplicação da carga na amostra (Fonte: Autora, 2022).	52
Figura 16 – Configuração de ensaio da amostra tipo sanduíche: (a) detalhe frontal do posicionamento da amostra com acelerômetro centralizado; (b) detalhe lateral do posicionamento; (c) detalhe lateral da amostra com sensor na parte superior (Fonte: Autora, 2022).	52
Figura 17 – Tipos de amostras ensaiadas: (a) cerâmica; (b) argamassa colante; (c) amostra sanduíche (Fonte: Autora, 2022).....	54
Figura 18 – Esquematização da curva MMF das amostras sanduíche (Fonte: Autora, 2023).	60
Figura 19 – Comparativo das curvas MMF entre amostras sanduíches e placas cerâmicas (Fonte: Autora, 2023).	61
Figura 20 – Curvas MMF da argamassa ACTA em função dos tamanhos de fissura em diferentes idades (Fonte: Autora, 2023).	63
Figura 21 – Curvas MMF da argamassa ACTB em função dos tamanhos de fissura em diferentes idades (Fonte: Autora, 2023).	64

Figura 22 – Efeito da fissura sobre a força máxima das amostras com ACTA em diferentes tempos de cura. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora, 2023).....	65
Figura 23 – Efeito da fissura sobre a força máxima das amostras com ACTB em diferentes tempos de cura. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora, 2023).....	65
Figura 24 – Curvas MMF da argamassa ACTA em função da idade para os diferentes tamanhos de fissura (Fonte: Autora, 2023).....	67
Figura 25 – Curvas MMF da argamassa ACTB em função da idade para os diferentes tamanhos de fissura (Fonte: Autora, 2023).....	67
Figura 26 – Efeito da idade sobre a força máxima das amostras com ACTA nos diferentes tamanhos de fissura. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora, 2023).	68
Figura 27 – Efeito da idade sobre a força máxima das amostras com ACTB nos diferentes tamanhos de fissura. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos (Fonte: Autora, 2023).	69
Figura 28 – Curvas de propagação de fissura em função do tipo de argamassa colante, para os diferentes tamanhos de fissura prévia: (a) 7dias, (b) 14 dias, (c) 28dias (Fonte: Autora, 2023).	71
Figura 29 – Curvas ACTB 28d 0mm: (a) Força x deslocamento; (b) Derivada primeira versus deslocamento (Fonte: Autora, 2023).	73
Figura 30 – Curvas ACTB 28d 45mm: (a) Força x deslocamento; (b) Derivada primeira x deslocamento (Fonte: Autora, 2023).	74
Figura 31 – Energia elástica das amostras em função do tamanho da fissura: (a) 7 dias; (b) 14 dias; (c) 28 dias (Fonte: Autora, 2023).....	77
Figura 32 – Espectros de Frequências de amostras cerâmicas (C) para cada um dos três níveis de aperto (AP) e acelerômetro posicionado na parte central do vão livre da placa (Fonte: Autora, 2022).	83
Figura 33 – Espectros de frequências de amostras cerâmicas (C) para cada um dos três níveis de aperto (AP) e acelerômetro posicionado na parte superior da placa (Fonte: Autora, 2022).	83
Figura 34 – Espectros de frequências de amostras de argamassa (A) do tipo ACTA: (a) acelerômetro centralizado; (b) acelerômetro na parte superior da amostra (Fonte: Autora, 2022).	84
Figura 35 – Espectros de frequências de amostras de argamassa (A) do tipo AC TB: (a) acelerômetro centralizado; (b) acelerômetro na parte superior da amostra (Fonte: Autora, 2022).	84
Figura 36 – Espectros de frequências de amostras sanduíche (S) com argamassa ACTA para cada um dos três níveis de aperto (AP) e posições central (CEN) e superior (SUP) do acelerômetro (Fonte: Autora, 2022).....	85

Figura 37 – Espectros de frequências de amostras sanduíche (S) com argamassa ACTB para cada um dos três níveis de aperto (AP) e posições central (CEN) e superior (SUP) do acelerômetro (Fonte: Autora, 2022).....	85
Figura 38 – Espectros de ressonância de amostras sanduíche de argamassa ACTA, com idade de 7 dias, para os diferentes tamanhos de fissura prévia (Fonte: Autora, 2023).	94
Figura 39 – Espectros de ressonância de amostras sanduíche de argamassa ACTB, com idade de 7 dias, para os diferentes tamanhos de fissura prévia (Fonte: Autora, 2023).	95
Figura 40 – Espectros de ressonância de amostras sanduíche de argamassa ACTA, com idade de 14 dias, para os diferentes tamanhos de fissura prévia (Fonte: Autora, 2023).	96
Figura 41 – Espectros de ressonância de amostras sanduíche de argamassa ACTB, com idade de 14 dias, para os diferentes tamanhos de fissura prévia (Fonte: Autora, 2023).	97
Figura 42 – Espectros de ressonância de amostras sanduíche de argamassa ACTA, com idade de 28 dias, para os diferentes tamanhos de fissura prévia (Fonte: Autora, 2023).	98
Figura 43 – Espectros de ressonância de amostras sanduíche de argamassa ACTB, com idade de 28 dias, para os diferentes tamanhos de fissura prévia (Fonte: Autora, 2023).	99
Figura 44 – Alteração do padrão ressonante do material em razão da presença de fissura de interface de 45mm em amostra com ACTA (Fonte: Autora, 2023).	100
Figura 45 – Alteração do padrão ressonante do material em razão da presença de fissura de interface de 45mm em amostra com ACTB (Fonte: Autora, 2023).....	100
Figura 46 – Comparação das regiões de frequência ressonante entre 8000 e 9000Hz dos espectros de ACTA-0 e ACTA- 45mm para observação do amortecimento (Fonte: Autora, 2023).	101
Figura 47 – Comparação das regiões de frequência ressonante entre 8000 e 9000Hz dos espectros de ACTB-0 e ACTB- 45mm para observação do amortecimento (Fonte: Autora, 2023).	102
Figura 48 – Valores médio de amplitude do pico situado na frequência de 10.000Hz em função do tamanho da fissura e da posição do sensor acelerômetro de amostras ACTA aos 28 dias (Fonte: Autora, 2023).	103
Figura 49 – Valores médio de amplitude do pico situado na frequência de 10.000Hz em função do tamanho da fissura e da posição do sensor acelerômetro de amostras ACTB aos 28 dias (Fonte: Autora, 2023).	103
Figura 50 – Alteração dos espectros ao longo da idade das amostras com ACTA para cada tamanho de fissura: (a)7d, 14d e 28d - 0mm; (b) 7d, 14d e 28d - 15mm; (c) 7d, 14d e 28d -30mm e (d) 47d, 14d e 28d - 45mm (Fonte: Autora, 2023).	106
Figura 51 – Alteração dos espectros ao longo da idade das amostras com ACTB para cada tamanho de fissura: (a)7d, 14d e 28d - 0mm; (b) 7d, 14d e 28d - 15mm; (c) 7d, 14d e 28d -30mm e (d) 47d, 14d e 28d - 45mm (Fonte: Autora, 2023).	107
Figura 52 – Efeito do tamanho da fissura sobre a frequência de ressonância do pico 1 para os dois tipos de argamassa. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman (p -valor < 0,05), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023)	111
Figura 53 – Efeito do tamanho da fissura sobre a frequência de ressonância do pico 2 para os dois tipos de argamassa. As letras dentro de cada barra indicam diferenças	

estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023)	111
Figura 54 – Efeito do tipo de AC sobre a amplitude do pico 1 para os diferentes tamanhos de fissura, aos 14d. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023)	113
Figura 55 – Identificação dos parâmetros de picos de ressonância (Fonte: Autora, 2023).	114
Figura 56 – Efeito do tamanho da fissura sobre a largura de banda do pico 3 em diferentes idades. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023).....	116
Figura 57 – Efeito do tamanho da fissura sobre o amortecimento do pico 3 em diferentes idades. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023).....	116
Figura 58 – Efeito do tamanho da fissura sobre a energia potencial elástica do pico 3 em diferentes idades. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023)	118
Figura 59 – Efeito do tamanho da fissura sobre a energia potencial elástica do pico 4, captadas pelo sensor superior, em diferentes idades. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023).....	118
Figura 60 – Efeito do tempo de cura sobre a energia elástica do pico 1 nos diferentes tamanhos de fissura. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023)	120
Figura 61 – Efeito da idade sobre a energia elástica do pico 2 nos diferentes tamanhos de fissura. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023).....	120
Figura 62 – Comparativo entre as energias dissipadas em relação as amostras referência, dos sanduíches com ACTB: (a) 7 dias; (b) 14 dias e (c) 28 dias (Fonte: Autora, 2023).	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais características de diferentes métodos de ensaio de resistência de aderência à tração (Fonte: Vaz e Carasek, 2019).....	21
Tabela 2 – Critérios e valores mínimos normativos de resistência de aderência (Fonte: Adaptado de Vaz e Carasek, 2019).	22
Tabela 3 – Variáveis consideradas no programa experimental (Fonte: Autora, 2024).	41
Tabela 4 – Características das cerâmicas (Fonte: Elizabeth Revestimentos, 2022).	43
Tabela 5 – Propriedades Fundamentais para classificação das argamassas colantes (Fonte: NBR 14081-1:2012).	46
Tabela 6 – Características das argamassas utilizadas na pesquisa (Fonte: Quartzolit, 2022).	46
Tabela 7 – Fluxograma do ensaio piloto de frequência de ressonância para caracterização do perfil das amostras (Fonte: Autora, 2022).	55
Tabela 8 – Valores de absorção (Abs), porosidade (P) e densidade aparente (D) do revestimento cerâmico usado na pesquisa (Fonte: Autora, 2022).	57
Tabela 9 – Compostos químicos presentes na matéria prima da massa cerâmica (Fonte: Cerâmica Elizabeth, 2022).....	58
Tabela 10 – Ensaio de Caracterização da Argamassa Colante Tipo A (ACTA) (Fonte: Autora, 2023).	58
Tabela 11 – Ensaio de Caracterização da Argamassa Colante Tipo B (ACTB) (Fonte: Autora, 2023).	58
Tabela 12 – Ensaio de tração direta <i>versus</i> MMF (Fonte: Autora, 2023).....	70
Tabela 13 – Energia dissipada (Ed) das amostras (Fonte: Autora, 2023).	79
Tabela 14 – Energia Crítica de Fratura (Fonte: Autora, 2023).....	80
Tabela 15 – Energia Crítica de Fratura de diferentes materiais (Fonte: Autora, 2023).....	80
Tabela 16 - Dados estatísticos dos valores de frequência e amplitude de amostras cerâmicas (Fonte: Autora, 2022).....	88
Tabela 17- Dados estatísticos dos valores de frequência e amplitude de amostras da argamassa ACTA (Fonte: Autora, 2022).....	88
Tabela 18 - Dados estatísticos dos valores de frequência e amplitude de amostras da argamassa ACTB (Fonte: Autora, 2022).....	88
Tabela 19 - Dados estatísticos dos valores de frequência e amplitude de amostras sanduíche com ACTA (Fonte: Autora, 2022).....	89
Tabela 20 - Dados estatísticos dos valores de frequência e amplitude de amostras sanduíche com ACTB.	89
Tabela 21 - Dados estatísticos dos valores de FWHM, amortecimento e área de amostras sanduíche com ACTA (Fonte: Autora, 2022).....	90
Tabela 22 - Dados estatísticos dos valores de FWHM, amortecimento e área de amostras sanduíche com ACTB (Fonte: Autora, 2022).....	91
Tabela 23 – Avaliação dos efeitos posição do acelerômetro, nível de aperto e tipo de AC através de testes de hipótese para os diferentes tipos de amostras (Fonte: Autora, 2022).....	91
Tabela 24 – Valores comparativos da 1ª frequência natural entre as argamassas ACTA e ACTB nas três idades em estudo (Fonte: Autora, 2023).....	108
Tabela 25 – Resultado do teste de hipótese Kruskal-Wallis sobre as frequências e amplitudes dos picos (Fonte: Autora, 2023).....	110
Tabela 26 – Resultado do teste de Spearman sobre as frequências e amplitudes dos picos (Fonte: Autora, 2023).....	110

Tabela 27 – Resultado do teste de hipótese Kruskal-Wallis para avaliação da interferência das variáveis AC, fissura e idade sobre os parâmetros de pico (Fonte: Autora, 2023).	115
Tabela 28 – Resultado do teste de Spearman (Fonte: Autora, 2023).	115
Tabela 29 – Resultados do teste estatístico Mann Whitney (Fonte: Autora, 2023).	121
Tabela 30 – Comparação da taxa de energia liberada entre os métodos de ensaio para as amostras com argamassa ACTA (Fonte: Autora, 2024).	125
Tabela 31 - Comparação da taxa de energia liberada entre os métodos de ensaio para as amostras com argamassa ACTB (Fonte: Autora, 2024).....	125
Tabela 32 – Comparativo dos valores de energia crítica obtidos pelos dois tipos ensaio para ambos os tipos de argamassa (Fonte: Autora, 2024).....	126

1 INTRODUÇÃO

O estabelecimento do uso placas cerâmicas em revestimentos externos data do século XIII. A intensificação do uso ocorreu a partir do século XVI, época na qual a maior parte dos revestimentos externos dos edifícios públicos da Itália e Espanha, bem como das igrejas e dos palácios da alta burguesia de Portugal eram em azulejos. A partir da descoberta do “novo mundo”, a América, o uso de placas cerâmicas de revestimento se difundiu para as colônias onde eram utilizadas para decorar as igrejas das missões e casas da população rica, devido ao seu custo elevado (Goldeberg, 1998).

No Brasil, o sistema de revestimento cerâmico desponta principalmente, nas regiões costeiras do país, como uma das principais alternativas para a proteção das fachadas, apresentando características positivas tais como a estanqueidade, durabilidade, valorização do empreendimento, conforto térmico e acústico, dentre outros (Silva, 2018).

As produções industriais em larga escala de peças cerâmicas e o desenvolvimento de adesivos à base de cimento Portland são os dois aspectos principais que contribuíram para o desenvolvimento tecnológico desses revestimentos para uso em fachada (Silva, 2018).

A introdução deste tipo de sistema utilizando argamassas colantes, iniciada na década de 60, mas intensificada no Brasil a partir de meados dos anos 80 resultou, como toda nova tecnologia, em uma série de patologias. A formação de um conhecimento ao longo dos anos de sua utilização, o desenvolvimento e publicação de normas para o sistema (NBR 13755/2017 – Revestimentos de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante - Procedimento), para as placas cerâmicas (NBR 13818/1997 - Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaio) e argamassa colante (NBR 14081/2012 - Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Especificação) resultaram em uma diminuição dos problemas, mas eles ainda continuam acontecendo (Mansur, 2007).

Dentre as manifestações patológicas ocorridas nos revestimentos, a que mais preocupa é o descolamento do revestimento. Os destacamentos de revestimentos das fachadas podem ocorrer com o desprendimento da cerâmica por ruptura adesiva, nas interfaces entre os diversos estratos que compõe o revestimento ou, por ruptura coesiva no interior de qualquer uma destas camadas.

Em um levantamento realizado por Mansur, Nascimento e Mansur (2012), sobre manifestações patológicas em revestimentos com placas cerâmicas, foi observado que em 84% dos edifícios analisados houve o descolamento com ruptura adesiva na interface placa

cerâmica/argamassa colante. A explicação para a frequência de ocorrências do deslocamento nesta interface, é de que essa região do sistema de revestimento é a mais solicitada por esforços de cisalhamento, quando considerados efeitos térmicos e de expansão higroscópica das placas cerâmicas.

Apesar disso, no Brasil, a metodologia adotada para avaliação da aderência em revestimentos consiste em um ensaio que avalia somente a resistência à tração direta. Em Łukasik, Michałowski e Michalak (2020) encontra-se uma breve menção a críticas com relação a adoção de avaliação da resistência de aderência somente em função da resistência à tração ao invés do cisalhamento. Segundo os autores, a avaliação por meio da resistência ao cisalhamento retrataria melhor as forças as quais as argamassas colantes estão sujeitas, classificando melhor seu desempenho em serviço.

Nos revestimentos, as tensões de cisalhamento ocorrem especialmente em razão das movimentações térmicas, que deformam os estratos que o compõe em razão dos seus diferentes coeficientes de dilatação. As variações térmicas ocorridas geram tensões de tração e compressão no revestimento cerâmico. O surgimento da tração entre as camadas de materiais diferentes dá origem também a tensões de cisalhamento entre o tardo das peças e a argamassa colante, resultando em empenamento da placa cerâmica ou estufamento pela perda gradual de resistência. A maior diferença de módulo de elasticidade se dá entre as argamassas colantes e as placas cerâmicas, portanto esta interface pode ser considerada a mais crítica em um sistema de revestimento cerâmico (Silva, 2018).

Na avaliação dos efeitos causadores do descolamento de revestimentos em razão da evolução de seus danos, a identificação dos parâmetros de adesão da camada de interesse é um ponto crucial para entender o seu mecanismo de falha. Nesse sentido, é possível ver em Champaney e Barros (2009) os testes de propagação de fissuras sendo destacados como os mais indicados na identificação desses parâmetros e úteis para auxiliar na avaliação da qualidade das juntas adesivas.

Em Bauer et al (2012) é mencionado que o mecanismo de descolamento do revestimento possui características que se assemelham e muito com o comportamento de fadiga, sendo importante, portanto, que no entendimento do mecanismo da falha de aderência dos revestimentos, a simulação desse comportamento possa ser considerado.

Nesse sentido, a presente pesquisa objetiva contribuir no entendimento do problema de descolamento de fachadas a partir da avaliação da integridade da adesão argamassa

colante ao substrato, sujeitando as amostras a uma combinação de esforços de tração e cisalhamento a partir da aplicação de cargas estáticas e dinâmicas. Ensaio de propagação de fissura foram empregados e critérios de análise com base em análise de carga e energia foram utilizados.

É importante ainda destacar, que quanto a análise da integridade de aderência de revestimentos por meio de ensaio de frequência de ressonância mecânica, não foram encontrados estudos experimentais que fizessem uso da técnica em revestimentos de argamassa. Houve também dificuldade de se encontrar trabalhos em que técnicas destrutivas e não destrutivas, que simulassem a ação combinada dos esforços aos quais as camadas do revestimento estão sujeitas, fossem aplicadas. Esse fato ressalta a originalidade da proposta aqui apresentada.

2 OBJETIVO DA PESQUISA

Avaliar a integridade da aderência de argamassas colantes em placas cerâmicas, a partir de testes de propagação de fissura de flexão de modo misto (MMF com carga estática) e de frequência de ressonância mecânica (carga dinâmica).

Como objetivos específicos foram definidos:

- Classificar os tipos de argamassas colantes usadas através dos ensaios normatizados pela NBR 14081;
- Caracterizar o substrato em função de sua absorção por capilaridade, porosidade, densidade aparente;
- Avaliar quantitativamente o comportamento da resistência mecânica à propagação de fissuras de amostras formada pelo conjunto substrato/argamassa colante em diferentes idades e comprimentos iniciais de fissuras prévia;
- Definir o perfil dinâmico das respostas vibracionais das argamassas, substrato cerâmico e do conjunto;
- Estabelecer diretrizes que ajudem na identificação da presença de falha de aderência nas amostras, por meio de ensaio de ressonância;
- Realizar análise da integridade da aderência através de parâmetros de energia tanto por meio do ensaio MMF quanto pelo ensaio de ressonância;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo está estruturado em três partes, de maneira que toda a teoria e revisão bibliográfica apresentada possa embasar a justificativa e relevância da pesquisa, fundamentando a metodologia proposta, a fim de alcançar os resultados desejados. Na primeira parte será realizada uma revisão dos conceitos acerca de como ocorre o mecanismo de aderência substrato-matriz cimentícia. A segunda parte abordará os métodos disponíveis para avaliação da propriedade de aderência, trazendo uma análise crítica do método atualmente mais empregado e apresentando suas limitações. A terceira parte traz a conceituação de dano e de que maneira a eficiência de aderência poderia ser avaliada a partir de princípios da mecânica da fratura e de parâmetros de energia do material. Em cada uma das partes que constituem o referencial, serão apresentadas pesquisas relacionadas com a discussão proposta, com vistas a enriquecer a discussão e o entendimento sobre o tema.

3.1 Aderência Substrato-Matriz Cimentícia

A NBR 13528-1 (ABNT, 2019, p.5) define aderência como sendo “a propriedade do revestimento de resistir tensões atuantes na superfície ou na interface com o substrato”. Segundo Carazek (1996) o termo aderência é usado para descrever a resistência e a extensão de contato entre argamassa e uma base porosa ou substrato (alvenaria de tijolos cerâmicos, blocos de concreto, blocos sílico-calcário ou estrutura de concreto), sendo um fenômeno mecânico associado à penetração da argamassa nos poros ou na rugosidade do substrato.

Vaz e Carasek (2019) ressaltam ainda, que sendo ela uma propriedade do revestimento de resistir às tensões atuantes na interface com o substrato, a aderência, não se trata, portanto, de uma propriedade da argamassa, mas uma interação entre as camadas do sistema de revestimento.

Wu (1932 *apud* Costa, 2014, p. 26), conhecido por ser um dos autores mais citados no tema, define a aderência como “o estado no qual duas fases mantêm-se unidas por contato interfacial, de forma que forças mecânicas ou trabalho possam ser transferidos através da interface”.

Dessa forma, tem-se que a propriedade de aderência vai muito além de ser um fenômeno explicado somente do ponto de vista mecânico, ela está relacionada a um fenômeno químico que, segundo Kendall (2001), envolve a interação intermolecular na interface entre duas superfícies.

Existem diversas teorias que tentam explicar o mecanismo de formação de aderência, Costa (2014), sumariza essas teorias em: teoria do intertravamento mecânico, ocorrida pela penetração do material adesivo nas imperfeições da superfície do sólido (poros e rugosidade); teoria das ligações químicas, quando o nível de aderência é definido pelas ligações químicas primárias e secundárias formadas na interface e cuja intensidade das ligações depende do contato entre as fases e, quanto maior o contato, maior a intensidade da ligação; teoria da zona de transição, que explica o fenômeno da aderência por meio da formação de uma interface na região de contato adesivo-substrato; teoria termodinâmica ou adsorção que propõe que o adesivo adere ao substrato devido às forças interatômicas e intermoleculares estabelecidas na interface após “molhagem” do substrato pelo adesivo, esta última teoria engloba também os conceitos de reologia, molhamento e energia de superfície; além destas, tem também as teorias eletrostática e de difusão utilizadas para sistemas de materiais que fogem o escopo deste trabalho.

Para Petit et al. (2016), é muito difícil discernir a contribuição de cada mecanismo de adesão, pois vários mecanismos de adesão muitas vezes contribuem para ligação do adesivo ao substrato. Mas, de maneira geral, a estrutura e propriedades do substrato e do adesivo ditam a ocorrência de cada um desses mecanismos.

A respeito da aderência na interface cerâmica/argamassa colante, é conhecido que ela é derivada de vários fenômenos físicos e químicos que, segundo Petit et al. (2016), é afetada por uma série de fatores, tais como: a absorção de água dos ladrilhos cerâmicos, composição e proporções dos insumos usados na produção da argamassa, bem como da ação do intemperismo (variações térmicas de umidade), tamanho da cerâmica e grau de hidratação do cimento.

Segundo Gutowski (1987), a aderência pode ser considerada ainda como um sistema termodinâmico e, o seu desempenho pode ser analisado pela determinação da energia interfacial entre as fases. Neste caso, em se tratando de adesivos, o processo de aderência deve ser considerado como dinâmico, pois suas propriedades de consistência, viscosidade, energia de superfície, resistência, módulo de elasticidade e massa específica, alteram-se com o tempo e condições ambientais (temperatura, umidade e pressão).

Portanto, a explicação do mecanismo de aderência entre dois materiais em contato é complexo e envolve muitas teorias e muitos fenômenos de modo que a elaboração de uma teoria única é difícil. Desta forma, este trabalho irá discutir alguns conceitos relacionados

com o tema de aderência afim de analisar os parâmetros que influenciam no contato substrato-matriz cimentícia.

3.1.1 Aderência Química

Começando pela aderência química, ela é entendida como sendo resultante de forças de atração moleculares (primárias e secundárias) entre as fases. As forças secundárias, como a de van der Waals formada principalmente entre moléculas de um material, são as principais responsáveis pela aderência de materiais multifásicos, embora possuam menor energia de ligação que as ligações primárias. Ainda assim, essas ligações são fortes o suficiente para explicar a aderência, não sendo necessário a ocorrência de ligações primárias entre os dois materiais para garantir a estabilidade dos mesmos (Costa, 2014).

A utilização de polímeros em compósitos cimentícios, chapiscos, pinturas e argamassas colantes tem sido estudada por ser conhecida a sua capacidade de melhorar a aderência destes produtos (Costa, 2014).

São cinco os tipos de compostos poliméricos mais comumente empregados em misturas à base de cimento: látices ou dispersões poliméricas, pós redispersíveis, polímeros solúveis em água, monômeros e resinas líquidas. Atualmente, os polímeros mais utilizados pela indústria de argamassas colantes são os éteres de celulose solúveis em água e os pós redispersíveis (Oliveira, 2004).

De acordo com Petit et al. (2016), os polímeros de látex têm sido usados como modificadores de propriedade de sistemas de cimento, sendo os de vinil à base de acetato com álcool polivinílico (PVA), os compostos poliméricos mais usados em argamassas colantes.

Ainda segundo os autores, estes polímeros fornecem excelente adesão a superfícies de cerâmica, vidro vitrificado, concreto ou madeira através de grupos hidroxila em suas cadeias laterais. No entanto, em razão das hidrólises ocorridas, o filme de látex formado durante o processo de hidratação da argamassa, é separado da mistura sendo necessária a incorporação de mais um tipo de polímero hidrofóbico (o etileno ou versato de vinil (VeoVA)), que é co-sintetizado com acetato de vinil, sendo geralmente utilizado a fim de proteger as ligações orgânicas formadas.

Kulesza et al. (2020) apresentam que entre os componentes que modificam as propriedades de argamassas estão também os éteres de celulose e ligantes poliméricos

orgânicos, este último sendo utilizados na forma de pós poliméricos redispersíveis flexíveis (RDP).

Os éteres de celulose afetam a viscosidade, trabalhabilidade e aumentam a retenção de água na argamassa (Pichniarczy e Niziurska, 2015). Como os éteres de celulose, os ligantes de polímero afetam tanto propriedades reológicas da argamassa fresca quanto propriedades do estado endurecido (Wang et al., 2016). Os RDPs melhoram a reologia da argamassa fresca, mas, acima de tudo, eles fornecem flexibilidade e resistência à tração de adesão de argamassa endurecida.

Wang et al. (2016) fizeram um resumo de trabalhos que visaram entender as interações químicas existentes entre polímeros e cimentos. A revisão proposta dá ênfase em pesquisas realizadas com polímeros do tipo EVA e acrílicos. A partir do levantamento bibliográfico os autores concluíram que as pesquisas existentes demonstraram, por meio dos vários métodos analíticos incluindo espectroscopia, análise térmica e microscopia, muitas evidências de interação química entre polímeros e compósitos de cimento.

No entanto, estes mesmos autores, afirmam ser necessário ainda mais estudos avançados na área a fim de relacionar as interações químicas existentes com o desempenho de materiais cimentícios modificados com polímero.

Petit et al. (2016), observaram em seu estudo que a adição de 2% em massa do polímero versato de vinil (VeOVA) na forma de RDP, sobre a mistura da argamassa seca, possibilitou um ganho de resistência de aderência à tração, após o tempo em aberto de 20 min, três vezes maior do que a resistência mínima solicitada pela norma (0,52 MPa). Desempenho satisfatório também foi obtido quando analisados os valores de resistência ao cisalhamento que, independentemente da idade observada (1,7 e 28 dias), também ficaram todos acima dos requisitos mínimos estabelecidos pela ANSI 118-15.

Os autores atribuem o bom desempenho das misturas produzidas, à existência da formação de um lado hidrofóbico da cadeia do polímero VeOVA, que após coalescência de partículas e a formação de filme irá desacelerar a evaporação da água de amassamento durante os 28 dias de cura, diminuindo e até impedindo a difusão de água através do filme de látex. Em razão disso, ocorre uma melhor hidratação do cimento em idade precoce, promovendo a ancoragem mecânica do CSH, resultante da hidratação do cimento, nos poros do substrato cerâmico.

Os autores mencionam ainda que a adesividade da argamassa colante está intrinsicamente relacionada com a energia de superfície e polaridade tanto do polímero quanto do substrato. Com relação a polaridade, os autores explicam que a hidroxila formada durante o processo de hidrólise no polímero cria a polaridade necessária para que haja a adesão entre as duas superfícies em contato, pois íons metálicos resultantes da dissolução do cimento podem ser encontrados na interface.

Kulesza et al. (2020), investigou como o uso de diferentes pós de polímero redispersível (RDP) afeta propriedades das argamassas de cimento para reparo. As propriedades estudadas foram: capacidade de contenção de fissuras, adesão determinada pela medição da resistência à tração e deformação transversal.

Os autores obtiveram resultados que mostraram que todos os RDP testados afetaram positivamente as propriedades da mistura de argamassada preparada. No que diz respeito aos resultados de aderência, à medida que se aumentava a proporção dos polímeros de pós redispersíveis (RDP), os valores de resistência também eram maiores. A argamassa padrão, sem o uso dos RDP, alcançou uma resistência de 0,28 MPa, enquanto as argamassas com 5% de RDP tiveram um ganho de até a 833% em comparação com a de referência.

Os incrementos na capacidade de adesão das argamassas com adição de polímeros do tipo pó redispersível é possível graças a sinergia entre grãos de cimento e partículas de polímero. Estudos realizados por Kotwica e Małolepszy (2012), identificaram interações químicas ocorridas entre compostos de cimento e dos polímeros. Segundo os autores observaram, a hidrólise de copolímeros de acetato de vinila-etileno, causaram mudanças na composição da fase líquida do sistema, incluindo uma diferença no pH da solução nos poros. Assim, de acordo com os autores, as interações químicas entre os compostos do cimento e os polímeros são significativas, e talvez até dominantes no processo de hidratação do cimento.

Atualmente, um dos mais importantes campos de aderência envolvendo ligações químicas é o uso de silanos com o tratamento superficial de diferentes tipos de substratos: sílica ativa, fibras, agregados, bases cimentícias e azulejos. Em todos os casos, foi observado um aumento da aderência, embora o mecanismo de interação não tenha sido amplamente investigado. Segundo Comyn (2006) o aumento da aderência pela utilização de silanos ocorre devido à formação de ligações covalentes na interface substrato-matriz.

3.1.2 Aderência Mecânica

Apesar de existir base científica demonstrando a natureza química da aderência, a contribuição do intertravamento mecânico não pode ser afastada. A ocorrência desse mecanismo depende da estrutura física da superfície do substrato e da capacidade de molhamento do produto aplicado sobre o substrato (neste caso, o produto aplicado precisa ser necessariamente líquido), que ainda no estado fresco deve ser capaz de penetrar nas irregularidades superficiais (poros e rugosidade) exercendo a ação de ancoragem após a solidificação (Costa, 2014).

Essa teoria é bastante difundida na área de argamassas como o principal mecanismo de aderência e, segundo ela, a aderência é resultado da ancoragem mecânica da pasta nos poros do substrato, ou seja, parte da matriz ou da água de amassamento contendo o ligante é succionada pelos poros do substrato onde ocorre a consolidação (Costa, 2014).

No caso de revestimentos cerâmicos, as propriedades importantes dos materiais (argamassa e ladrilhos cerâmicos) seriam aquelas que influenciam diretamente na velocidade e no volume do fluxo capilar, em conjunto com o tamanho das partículas finas e a propriedade reológica da argamassa. No caso de cerâmicas com baixa sucção capilar, o transporte de sólidos cessa em poucos minutos, resultando em menos possibilidade de penetração. No caso de cerâmicas com alta sucção capilar, o transporte ocorre em apenas alguns segundos e a argamassa perde muita água, resultando em possíveis problemas com a trabalhabilidade da argamassa (Botas et al. 2020).

Botas (2020) defende que a água é principal responsável pela interligação entre a argamassa de cal aérea e o ladrilho cerâmico. A água seria o veículo que transporta os componentes físicos, que uma vez endurecidos, fornecem a ligação entre os dois materiais em contato. A argamassa deve ter água suficiente para facilitar o transporte das partículas finas para os poros da interface argamassa-cerâmica. Uma dosagem de água na argamassa abaixo da quantidade adequada não proporcionará troca adequada de componentes e o vínculo é fraco ou mesmo inexistente. Se a dosagem for muito alta, causa quantidade excessiva de água na interface prejudicando a ligação.

Um modelo proposto por Dupin, Detriché e Maso (1988) tenta explicar a interação entre a argamassa e o substrato, modelo este que ficou conhecido como Teoria dos Poros Ativos. Segundo o modelo proposto, o fluxo de água entre a argamassa e o substrato pode

ser entendido como a interação de dois sistemas de poros com o sentido do fluxo saindo dos poros de maior diâmetro para os de menor diâmetro.

Para esses autores, o sistema de poros do substrato cerâmico apresenta-se com raios aproximadamente constantes ao longo do tempo. Por sua vez, a argamassa no estado fresco apresenta-se com um sistema de poros de raios variáveis com o tempo, que decrescem com a hidratação dos aglomerantes da argamassa. Quando a argamassa é lançada no substrato poroso de capilares inicialmente vazios, observa-se que os raios médios da argamassa são superiores aos dos capilares do substrato, assim, propiciando o fluxo da água no sentido da argamassa para o substrato. Na sucção ocorre um aperto mecânico das partículas sólidas da argamassa, tendo em vista a depressão dos capilares concomitantemente com uma aceleração da cristalização decorrentes da hidratação dos produtos dissolvidos do aglomerante. O resultado desse mecanismo é uma diminuição do raio médio dos capilares da argamassa, até se tornar igual à dos capilares do substrato, quando então o fluxo de água para ou é até mesmo invertido (Dupin, Detriché e Maso, 1988). Enquanto isso, no interior dos poros do substrato ocorrem fenômenos de precipitação dos produtos de hidratação dos aglomerantes, e transcorrido algum tempo, com a cura, esses precipitados intracapilares exercem ação de ancoragem da argamassa à base resultando na aderência física (Carasek, 2001).

Se faz necessário salientar, porém, que o modelo de intertravamento mecânico não leva em consideração a interação química que ocorre na interface adesivo/substrato. Nesse modelo, o travamento mecânico ocorre quando o substrato apresenta irregularidades que permitam a ancoragem do adesivo, conforme ilustrado na Figura 1.

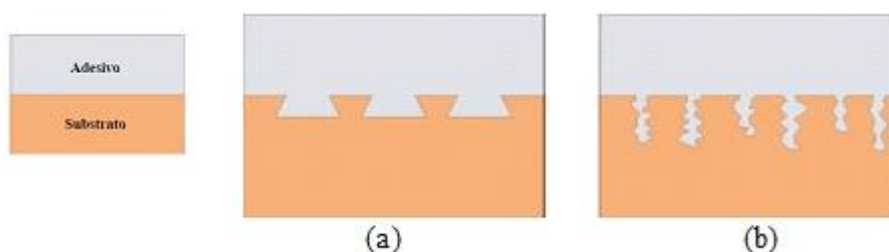


Figura 1 - Representação esquemática do mecanismo de aderência mecânica entre adesivo/substrato: (a) imperfeições do substrato; (b) porosidade aberta do substrato (Fonte: Costa, 2014).

Na prática, como não existem superfícies totalmente planas, todas possuem algum tipo de rugosidade a depender da escala na qual se está sendo observada. Uma superfície

pode ser composta por várias escalas de rugosidade, a depender dos processos a que foi submetida. No entanto, o ganho de aderência só será efetivo se o adesivo recobrir toda a superfície do substrato, garantindo o contato molecular (Costa, 2014).

Paes et al. (2014) realizaram um estudo para analisar a influência do tamanho dos agregados sobre o transporte de água da argamassa para o substrato após o contato dos dois materiais. Os autores concluíram que argamassas com maiores tamanhos de partícula de agregados, facilitam o transporte de água da argamassa para o substrato.

De acordo com Costa (2014), o que é mais provável, e parece já se encontrar comprovado, é que o efeito de sucção provoca a migração de íons para o interior do substrato e não da pasta. Se a concentração de íons for elevada e houver espaço disponível, haverá a precipitação dos hidratos, e depois de algum tempo, esses precipitados intracapilares poderão exercer a ação de ancoragem matriz-substrato.

Papaioannou et al. (2015) estudaram a aderência entre a argamassa de assentamento com tijolos cerâmicos para alvenaria. Para isso, diversos traços de argamassas foram dosados, tendo sido realizados ensaios mecânicos, de avaliação de consistência através de *flow table* e análises microscópicas. As análises microscópicas na interface do tijolo/argamassa, revelaram que os blocos com melhores resultados de aderência foram aqueles em que foi observado a presença de fases complexas de Ca-Al-Si.

Segundo os autores, a aderência da interface argamassa/tijolo ocorre com a formação de uma matriz de Si-Al com baixo teor de Ca no aglutinante que recobre a interface, e ao mesmo tempo, a formação de fases finas de Ca-Al-Si que podem penetrar nos poros do tijolo. Na matriz, a razão Si / Al que favorece a adesão está na faixa de 1:0,5, com um baixo teor de Ca (Si/Ca : 1/0,15). As fases finas de Ca-Al-Si que penetram no tijolo têm uma razão Ca/Si /Al no intervalo 1/0,45–0,5/0,09–0,15. Quanto mais bem formadas são as fases Ca-Al-Si em uma matriz bem estruturada, mais forte será a aderência entre os materiais.

Botas et al. (2020), estudaram argamassas de cal aérea com substituições de metacaulim para utilização compatível em revestimentos cerâmicos de edificações históricas. Os autores estudaram especialmente a aderência da argamassa na interface com o ladrilho cerâmico, fazendo-se uso de ensaios mecânicos e análises microscópicas.

A investigação microscópica da eficiência da ligação entre os dois materiais foi realizada a partir da análise de penetração de íons de cálcio nos poros do biscoito do ladrilho cerâmico. Os autores observaram a zona de transição interfacial ao longo de 150 µm de

comprimento, e concluíram que a concentração de cálcio diminuía com o aumento da profundidade observada. A concentração de cálcio era maior a profundidades entre 30-40 μm . Em profundidades acima de 40 μm a proporção Ca/Si chegou a aumentar, como resultado da presença de silicatos de cálcio, e depois disso, diminuía drasticamente e permanecia praticamente inalterado.

Botas et al. (2020) concluem afirmando que existe uma estreita relação entre a proporção Ca/Si e os valores de resistência à aderência encontrados na pesquisa. De maneira que as amostras com maiores valores de resistência foram as que também tiveram encontradas maiores proporções de Ca/Si nos poros do ladrilho cerâmico.

Guo et al. (2021), produziram argamassas destinadas a reparo de estruturas de concreto fissuradas. Para isso, preparam a argamassa com adição de polímeros do tipo resina epóxi e avaliaram a incorporação de nanopartículas de TiO_2 na resina em percentuais de 0, 1, 3 e 5%. Os autores fizeram uma série de análises através de ensaios para avaliação das propriedades mecânicas e microscópicas da resina, da argamassa de reparo e da interface da ligação da argamassa com o substrato.

No que concerne a resistência à aderência, foi observado que as argamassas modificadas com resina epóxi e ainda, com incremento de nanopartículas de TiO_2 , apresentaram melhores resistências. Foi observado aumento de até 7,3% e 14,6% das argamassas modificadas com resina e adição de 5% TiO_2 , em comparação com a argamassa somente com resina (e 0% TiO_2) e a argamassa de controle, respectivamente.

Os autores atribuíram esse ganho de resistência aos diferentes papéis que os polímeros de resina epóxi desempenharam na matriz cimentícia. Segundo eles, os poros da matriz cimentícia, bem como as fissuras formadas durante o carregamento ou naturalmente durante o processo de secagem, foram preenchidas pelas partículas de resina epóxi. Outro fator que pode ter influenciado nesses resultados foi a densificação da microestrutura e a atuação do filme polimérico como ponte de transferência de tensão. E por fim, os autores consideraram ainda, que o endurecimento da resina epóxi geralmente termina mais cedo do que a hidratação das partículas da matriz cimentícia, e portanto, a perda de água durante a hidratação é parcialmente impedida pelos filmes de resina epóxi endurecida. A Figura 2 apresenta imagens da análise microscópica da interface substrato/argamassa padrão e modificada, evidenciando a redução de fissuras na região.

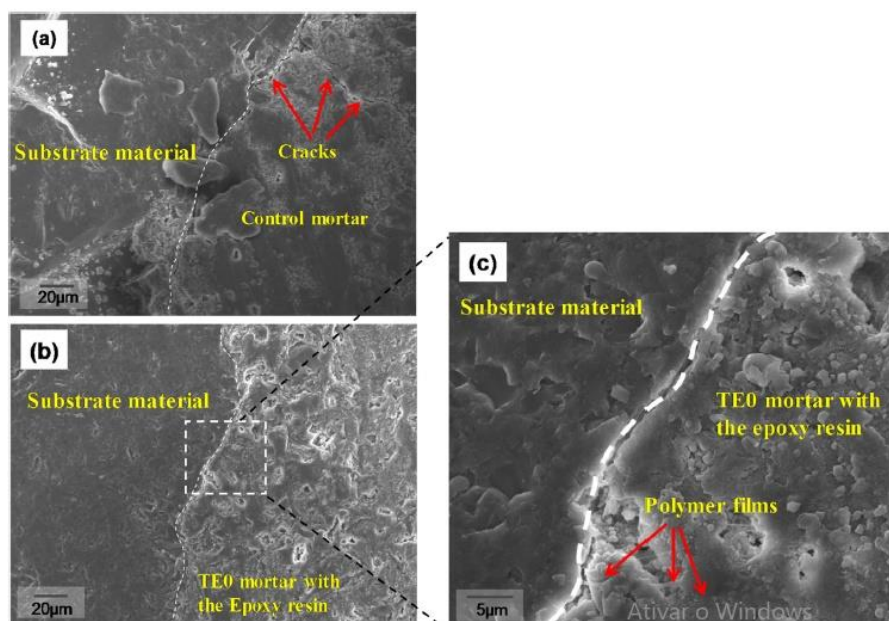


Figura 2 - Microestrutura da zona de transição entre o substrato e (a) argamassa de controle sem adição de resina; (b) argamassa com adição de 4,5% resina epóxi e 0% de TiO₂; (c) uma imagem ampliada da região marcada com linhas tracejadas da Figura 2(b) (Fonte: Guo et al, 2021).

De acordo com os estudos realizados, se faz necessário levantar o questionamento feito por Costa (2014, p. 36) a respeito de que “embora haja indícios de penetração de matriz cimentícia nos poros do substrato, ainda não há uma comprovação da ocorrência desta precipitação no interior dos poros”, ou seja, o que se observa, é que há a penetração de espécimes químicas do cimento para o interior dos poros dos substratos e não, necessariamente, da matriz cimentícia.

Por fim, é válido ainda considerar, que a contribuição dos produtos hidratados que penetram no substrato para a resistência de aderência, deverá depender ainda do volume de material nos poros e da resistência mecânica desses produtos.

3.1.2.1 Contato substrato-matriz cimentícia

A aderência mecânica também pode ser estudada levando em consideração um outro fator denominado de extensão de aderência. Segundo Carasek (1997), a extensão de aderência pode ser definida como sendo a razão entre a área de contato efetivo e a área total possível de ser unida.

O contato entre superfícies determina a intensidade das ligações na interface: na medida em que a distância entre elas aumenta, a intensidade das ligações cai rapidamente e

isso implica na seguinte relação: quanto maior o número de defeitos interfacial, menor a aderência entre os materiais em contato (Costa, 2014).

Segundo Mansur (2007), entre os diversos fatores que afetam o desenvolvimento da aderência mecânica de sistemas cimentícios, favorecem, em especial, o contato entre os materiais: a trabalhabilidade e consistência, de modo a favorecer o espalhamento da argamassa no lançamento; as operações realizadas no momento da execução, uma vez que toda a operação de compactação e prensagem tende a ampliar a extensão de contato e, portanto, a ancoragem do revestimento; a rugosidade da superfície de contato; as características de porosidade e taxa de sucção inicial da base; condições de limpeza da superfície; características dos materiais constituintes da argamassa, especialmente a finura do cimento e granulometria do agregado; e preparo da base (com ou sem chapisco);

Carasek e Scartezini (2003) avaliaram os fatores que exercem influência na resistência de aderência dos revestimentos de argamassa, observando, entre outras coisas, as características de rugosidade superficial do bloco utilizado na alvenaria (cerâmico ou de concreto). Nesta pesquisa, os autores chegaram à conclusão de que o bloco cerâmico apresenta uma superfície mais densa, compacta e lisa, ao passo que o bloco de concreto apresentava uma textura diferenciada que favoreceu o intertravamento da argamassa (macroancoragem), permitindo uma melhor penetração, segundo eles, da pasta aglomerante e da própria argamassa no interior do bloco, gerando valores de resistência de aderência por arrancamento superiores aos obtidos nos blocos cerâmicos.

Santos (2019) investigou a influência da utilização de solução de cal em substituição à água de amassamento de chapisco e emboço sobre a aderência de revestimentos argamassados em substratos de alvenaria com blocos cerâmicos e de concreto. Em todas as situações investigadas, foi observado maiores valores de resistência à aderência aos revestimentos aderidos ao substrato de bloco de concreto. O autor atribuiu o melhor desempenho à maior rugosidade e taxa de sucção inicial dos blocos de concreto, características que tornam a base mais sensível às alterações na superfície de contato com a argamassa.

Gasperin (2011) avaliou a influência da camada de preparo da base, o chapisco, quanto a sua forma de aplicação (manual ou mecanizada) e composição (areia bem graduada e contínua e outra descontínua e mal graduada), sobre a resistência de aderência de revestimentos de argamassa aplicados sobre substrato de concreto de baixa porosidade.

Os resultados obtidos por Gasperin (2011) identificaram que a aplicação mecanizada utilizada (do tipo canequinha) não gerou resultados satisfatórios, uma vez que para as características da argamassa de chapisco utilizada (alta relação água/cimento), a aplicação resultou em uma camada desuniforme, o que prejudicou a aderência. Quanto a composição do chapisco, os melhores resultados obtidos para a resistência de aderência foram obtidos com chapiscos confeccionados com areia de granulometria contínua e bem graduada, corroborando com o conceito já bem difundido de que areias com granulometrias contínuas são melhores para contribuir para o melhor desempenho mecânico das argamassas e concretos.

Gasperin (2011) também utilizou aditivo retentor de água (0,25%) e sílica ativa (5%), que proporcionaram ganhos significativos de resistência à aderência ao cisalhamento. O uso de retentores ajuda a manter a consistência da argamassa, e conseqüentemente, fornecer melhor trabalhabilidade a mesma, ou seja, contribuindo para ampliar a extensão de contato.

Stolz (2011) estudou a influência da interação entre os parâmetros reológicos de argamassas e a área potencial de contato com substratos na aderência de argamassas de revestimento. Os substratos de concreto utilizados foram confeccionados de forma a obter três diferentes tipos de rugosidades em suas superfícies, já a consistência da argamassa foi alterada a partir da utilização de diferentes teores de aditivo incorporador de ar.

O estudo de Stolz (2011) revelou que o uso de aditivos incorporadores de ar promove o aumento do tamanho de bolsões de ar próximos à interface, contribuindo para melhoria da fluidez da argamassa, mas reduzindo as resistências de aderência à tração e de aderência ao cisalhamento. Com relação a capacidade de retenção de água das argamassas, o estudo mostrou que quanto maior o poder de retenção, melhores resistências de aderência eram alcançadas, pois a água perdida mais lentamente possibilita melhor disponibilidade da mesma para a hidratação dos aglomerantes e formação de agulhas de aderência da argamassa com o substrato.

Sobre a relação da área de contato e os valores de aderência, a autora concluiu que os maiores valores de resistência de aderência obtidos são correspondentes aos corpos de prova que obtiveram maior área de contato com o substrato. O resultado obtido por Stolz (2011), mostra que resistência de aderência da argamassa com o substrato pode ser significativamente melhorada com a ampliação da área de contato na zona interfacial dos materiais.

A extensão de contato dos materiais foi um dos fatores analisados no trabalho desenvolvido por Melo et al. (2020), para mostrar como a presença de falhas de contato na interface da argamassa colante com placas cerâmicas comprometem o mecanismo de aderência. O conjunto (argamassa – placa cerâmica) foi submetido a esforços simultâneos de tração e cisalhamento. A pesquisa revelou que a resistência de aderência nesta interface decresce à medida que a falha na colagem aumentava, apresentando perda de aderência de até 44,2% e 51,4% para as AC II e AC III, respectivamente.

É preciso salientar ainda que o contato entre substrato – matriz cimentícia pode ser fortemente afetado pelas condições de exposição as quais os materiais estão expostos (temperatura, umidade e vento). Tais agentes podem gerar tensões nos materiais de revestimentos que superam a sua capacidade de suporte (resistência) ou de absorver as deformações, ocasionando fissuras e descolamentos (Silva, 2018).

Wetzel et al. (2012) fez um protótipo de uma garagem com paredes e piso de concreto pré-fabricado para avaliar os danos em revestimentos cerâmicos provocados por agentes externos. Medidas de expansão e retração dos ladrilhos cerâmicos e de fissuras nas ligações argamassa-cerâmica foram realizadas.

Os autores concluíram que as primeiras fissuras se formaram devido ao processo natural de retração da argamassa, seguido de fissuras de origem térmica localizadas principalmente nos rejuntas dos ladrilhos. Em um segundo estágio, ocorre a propagação destas fissuras como consequência da percolação de água da chuva através das fissuras do rejunte e o inchamento da argamassa. O terceiro estágio foi o aumento da abertura das fissuras que se deu em razão da ciclagem entre períodos secos e período úmido (exposição ao sol e chuva).

A pesquisa também mostrou que após um ano de exposição, o som cavo nas bordas dos ladrilhos cerâmicos apareceu, dando indicativo de perda de aderência com o substrato cimentício. Os pesquisadores concluíram em face disso, que tensões de cisalhamento ocorrem de maneira mais pronunciada nas bordas do ladrilho cerâmico, pois, segundo eles, as tensões diferenciais na interface se acumulam no centro e seguem em direção às suas bordas.

Rêgo (2012) estudou o comportamento mecânico de adesão na interface adesivo/placa cerâmica, sujeitando os materiais às variações térmicas cíclicas simulando situações de chuva e calor. As amostras foram submetidas a ensaios sob temperaturas de

exposição de 22°C e de 55°C. Para pesquisa, foram desenvolvidos adesivos geopoliméricos e comparado seu desempenho com os de argamassas colantes ACIII-E.

Os resultados obtidos mostraram que um aumento da temperatura tem um efeito negativo no desempenho mecânico (ensaio de resistência a aderência) das argamassas colantes. Este efeito é semelhante tanto para as peças cerâmicas brancas quanto para as pretas; contudo, quando submetidos ao regime cíclico, o porcelanato preto apresenta um efeito negativo mais acentuado quando comparado ao porcelanato branco.

Já para as placas cerâmicas coladas com o adesivo a base de geopolímeros o efeito foi positivo e bem superior as alcançadas pela ACIII-E, ou seja, o aumento da exposição da temperatura sobre revestimentos colados com adesivos geopoliméricos proporcionou melhoria de resistência. O estudo de Rêgo (2012) indicou que o uso de geopolímeros em adesivos é bastante promissor para melhorar o desempenho mecânico deles.

A partir da análise dos trabalhos apresentados, pode-se concluir que pesquisas mais recentes na área de revestimentos destinam esforços em encontrar alternativas que contribuam para melhoria da aderência interfacial dos materiais, tais como: alteração na composição dos adesivos com incorporação de polímeros redispersíveis, geopolímeros, adições minerais e aditivos que modifiquem sua reologia; melhoria das condições superficiais do substrato, promovendo alterações em sua rugosidade superficial ou tratamentos da camada de preparo (chapisco).

No entanto, ainda é escasso o desenvolvimento de estudos que visem aprimorar o modelo atual de avaliação da resistência de aderência ou ainda que visem buscar parâmetros que melhor expliquem o comportamento dos materiais que compõem o sistema de revestimento.

Nesse sentido, os próximos tópicos abordados têm por objetivo ampliar a visão acerca dos atuais métodos para avaliação da aderência, dos mecanismos que levam a falhas de materiais cimentícios e das metodologias de avaliação de dano.

3.2 Ensaio de Avaliação da Aderência

O descolamento de revestimentos continua sendo um dos mais graves tipos de manifestação patológica devido aos riscos de acidentes, em decorrência da queda de placas ou parte de camadas, bem como o custo para o seu reparo. Esse descolamento ocorre em razão da perda de aderência, ou seja, o material perde sua capacidade de se manter unido por contato interfacial. Isso se dá em função das tensões (normais e tangenciais) ocorridas no

revestimento cerâmico excederem a capacidade de aderência das ligações dessas camadas (Valentini e Kazmierczak, 2016).

Para avaliação desta propriedade tem-se disponível diversos testes que podem ser classificados como destrutivos e não destrutivos. Porém, o teste destrutivo de resistência à aderência sob tração, também conhecido como *pull-off*, continua sendo o mais amplamente utilizado para avaliar a eficiência de ligação entre as camadas que constituem o revestimento.

Para realização do ensaio de resistência à aderência sob tração, existem normas de padronização tanto nacionais (NBR 13528/2019, NBR 14081-4/2012) quanto internacionais (EN 1015-12, EN 12004-2:2017, ASTM D 7234-2019, ASTM D 4541). Este ensaio mede a quantidade de força aplicada perpendicularmente ao plano de revestimento necessária para induzir a falha. A falha pode ocorrer em uma interface (ruptura adesiva) ou coesivamente dentro de um material.

Segundo a norma norte americana ASTM D4541, a medida da resistência de aderência depende tanto de parâmetros do material quanto do equipamento utilizado para a medição.

Nesse sentido, em Costa et al. (2007), é mencionado que o ensaio de aderência à tração apresenta resultados bastante variáveis devido a fatores inerentes ao próprio procedimento, tais como, o ângulo e aplicação da carga, a velocidade de aplicação e o tipo de equipamento. Em seu estudo, Costa et al. (2007) verificaram a influência das seguintes variáveis: geometria e dimensão dos corpos-de-prova, camada de cola entre a pastilha e a superfície do revestimento, excentricidade e forma de aplicação da carga de arrancamento. Os autores chegaram à conclusão de que a geometria e dimensão do corpo-de-prova, a espessura da camada de cola e a forma e excentricidade de aplicação da carga interferem na distribuição de tensões na interface argamassa-substrato e, conseqüentemente, afetam os valores de resistência de aderência à tração.

Ainda nesse contexto, é oportuno acrescentar que há estudos em que a falta de compatibilidade entre os resultados de ensaios de aderência obtidos em laboratório, com os que são obtidos em obra, é relatada. Pesquisas realizadas por Ramos et al. (2012), Zanelatto et al. (2013), Martínez et al. (2013) e Martínez et al. (2016), em que foram realizados testes de resistência à aderência em laboratório e em campo, demonstraram que o ambiente de laboratório é fator relevante na maior média de aderência, fato atribuído ao maior controle de aplicação dos revestimentos e de realização dos ensaios.

Lopes, Flores-Colen e Silva (2015) também estudaram alguns fatores que podem influenciar a variabilidade dos resultados dos testes de aderência à tração, pois na literatura é observado grande variabilidade em seus resultados, sendo alcançados valores de coeficiente de variação na ordem de 10% a 35%.

A variabilidade dos resultados dos testes de aderência está associada a múltiplos fatores em serviço, que às vezes são difíceis de detectar. Tentar entender esses fatores tornará mais fácil a identificação de zonas de teste com características semelhantes, o que ajudaria na avaliação dos resultados, especialmente quando uma técnica destrutiva é empregada.

O estudo realizado por Lopes et al. (2015) avaliaram a influência da espessura, geometria e dimensão dos discos metálicos, altura de realização do teste na parede, uso de diferentes dinamômetros e ambiente de realização (laboratório e campo). Em todos os testes foram observados o modo de falha e atendimento aos valores de resistência mínimos estabelecidos pelos fabricantes e pelas normas europeias.

Os autores concluíram que maiores valores de resistência são alcançados quando a espessura do disco de aço aumentou, acreditando-se que espessuras entre 1 ou 2 cm são as mais adequadas. O uso de disco metálico quadrado com 10 cm de lado leva a diminuição dos valores médios de aderência, admitindo-se, desta maneira, que uma dimensão de 5cm de lado deva ser usada. A avaliação da resistência de aderência em alturas elevadas levou a menores valores de aderência, sendo atribuído tal resultado a posição ergonômica e a maior exposição à chuva e ao vento, que contribuem fortemente para o processo de desgaste do revestimento. Os demais fatores avaliados não tiveram resultados conclusivos.

Na Tabela 1 são apresentadas as principais características de diferentes métodos de ensaio de resistência de aderência à tração das três normas mais citadas da revisão sistemática sobre o tema, realizada por Vaz e Carasek (2019).

Ao comparar os critérios apresentados na Tabela 1 e os critérios apresentados por Lopes et al. (2015), observa-se que houve mudanças nas normas europeias e brasileiras nestes últimos anos. As principais mudanças estão relacionadas à geometria dos discos metálicos, antes quadrados e atualmente circulares, e a especificação na norma brasileira da espessura mínima (1 cm) do disco metálico e do tipo de cola, antes inexistente.

Tabela 1 – Principais características de diferentes métodos de ensaio de resistência de aderência à tração (Fonte: Vaz e Carasek, 2019).

	ABNT NBR 13528 [1]	ABNT NBR 15258 [115]	EN 1015-12 [2]
Nº de CPs	≥12	≥10	≥5
Aplicação	Obra e laboratório	Laboratório	Laboratório
Substrato padrão	-	Conforme NBR 14082 (recomenda-se pigmentado)	550x150x50 mm
Condições do substrato	Vertical/horizontal e limpo	Nivelado e limpo	Nivelado
Forma e seção do CP	Circular, diâmetro=50 mm	Circular, diâmetro=50 mm	Circular, diâmetro=50±0,1 mm
Espessura da pastilha	Mínimo de 10 mm	Mínimo de 5 mm	Mínimo de 10 mm
Tipo de corte	Argamassa endurecida	Argamassa endurecida	Argamassa fresca ou endurecida
Profundidade do corte	Mínimo até substrato	1 mm dentro do substrato	2 mm dentro do substrato
Condições de cura da argamassa	-	≥1 dia, T=23±2 °C, UR=60%±5%	≥21 dias, T=21±2 °C, UR=65%±5%
Distância entre CPs	Distância entre CPs, dos cantos e quinas de no mínimo 50 mm	Distância entre CPs no mínimo de 20 mm e dos cantos e quinas de no mínimo 40 mm	-
Tipo de cola	Recomenda epóxi, poliéster ou similar	Base de resina epóxi	Base de resina (epóxi ou metilmetacrilato)
Equipamento de tração	Dinamômetro de tração, baixo peso, erro máximo de 2%	Articulado para assegurar o esforço de tração simples, erro máximo de 2%	Não especificado
Condição de aplicação do carregamento	Constante até a ruptura	Aplicação contínua de carga 250±50 N/s	Sem choque e uniforme, 0,003 a 0,1 N/(mm².s)
Apresentação dos resultados	Valores individuais de tensão, em MPa	Valores individuais de tensão, em MPa	Valores individuais de tensão, em N/mm²

É preciso salientar ainda, que apesar das alterações realizadas, outros critérios ainda precisam ser estudados em maior detalhamento, como por exemplo a influência da altura do teste em paredes de fachadas (para ensaios em campo), da pressão a ser exercida sobre o ladrilho no momento da aplicação, do tipo de dinamômetro, da espessura do adesivo aplicado para colagem do ladrilho ao substrato e da taxa de sucção do ladrilho.

No que diz respeito aos valores de resistência à aderência, existem alguns documentos técnico-normativos que versam sobre requisitos mínimos de aderência aos quais os revestimentos devem atender para serem considerados conformes. A Tabela 2 sintetiza os critérios de quatro destes documentos.

Tabela 2 – Critérios e valores mínimos normativos de resistência de aderência (Fonte: Adaptado de Vaz e Carasek, 2019).

Documento	Critérios e valores mínimos de aderência (MPa)		
NBR 13749	Parede Interna	Pintura ou base reboco	0,20
		Cerâmica ou laminado	0,30
	Parede Externa	Pintura ou base reboco	0,30
		Cerâmica	0,30
	Teto	Pintura ou base reboco	0,20
NFP - 15-201-1	substrato com média resistência de aderência		0,60
	substrato com baixa resistência de aderência		0,40
Normativas cubanas	0,20		

Especificamente sobre os testes de avaliação de aderência de argamassas colantes, a norma brasileira, NBR 14081:2012, estabelece um mínimo de 0,5 MPa para as argamassas do tipo ACI e ACII; e 1,0 MPa para as ACIII, semelhantemente ao que é especificado em normas europeias.

De acordo com Goldeberg (1998) o teste de aderência sob tração deveria ser usado como uma avaliação qualitativa, ao invés de quantitativa, do vínculo entre dois materiais, pois segundo o autor, a área efetiva do contato adesivo é incerta e a força necessária para separar as superfícies não diz respeito à força da ligação adesiva dos pontos onde ocorre o contato.

Em Łukasik, Michałowski e Michalak (2020) encontra-se uma breve menção a críticas com relação a adoção de avaliação da resistência de aderência somente em função da resistência à tração ao invés do cisalhamento. Segundo os autores, a avaliação por meio da resistência ao cisalhamento retrataria melhor as forças as quais as argamassas colantes estão sujeitas, classificando melhor seu desempenho em serviço.

Nos revestimentos, as tensões de cisalhamento ocorrem especialmente em razão das movimentações térmicas, que deformam os estratos que o compõe em razão dos seus diferentes coeficientes de dilatação. As variações térmicas ocorridas geram tensões de tração e compressão no revestimento cerâmico. O surgimento da tração entre as camadas de materiais diferentes dá origem também a tensões de cisalhamento entre o tardo das peças e a argamassa colante, resultando em empenamento da placa cerâmica ou estufamento pela perda gradual de resistência. A maior diferença de módulo de elasticidade se dá entre as

argamassas colantes e as placas cerâmicas, portanto esta interface pode ser considerada a mais crítica em um sistema de revestimento cerâmico (Silva, 2018).

Quando se observa estudos em materiais de reparo para estruturas de concreto, a avaliação da eficiência da ligação na interface argamassa de reparo/substrato de concreto se dá por meio da utilização de ensaios destrutivos, cujas amostras do material são submetidas a tensões combinadas de tração e cisalhamento, cisalhamento puro ou cisalhamento e compressão. Exemplo disso são as pesquisas desenvolvidas por Lim e Li (1997), Wagner et al (2013), Sajdlová e Kabele (2016), Zanotti et al. (2017) e Shah e Huseien (2020).

De acordo com Silva (2018), os parâmetros necessários para o modelo de interface referente à adesão de revestimentos cerâmicos podem ser obtidos através dos ensaios clássicos da mecânica da fratura. Tais ensaios, assim como nos estudos de materiais para reparo, poderiam simular a ação combinada dos esforços que de fato atuam na fachada de uma edificação.

Dessa maneira, é imprescindível entender de que maneira os danos nos materiais cimentícios se formam e se propagam a fim de responder aos seguintes questionamentos: Por que, mesmo atendendo a critérios normativos, ainda não se consegue evitar os descolamentos dos revestimentos? É possível que existam formas de avaliação e parâmetros ainda não considerados e que melhor expliquem o desempenho e eficiência de ligação das argamassas colantes com seus substratos?

3.3 Danos em Materiais Cimentícios

O dano pode ser definido como uma variável interna que caracteriza a distribuição dos micro-defeitos em um material. Em materiais cimentícios, esses micro-defeitos surgem na forma de microfissuras já na fase de fabricação. As microfissuras podem existir na forma de fissuras de aderência na interface entre agregados graúdos e matriz, ou estarem distribuídos na matriz de argamassa. O crescimento gradual dessas microfissuras é responsável por causar danos progressivos ao material, podendo levá-los a falha. (Dutta e Kishen, 2020).

Quando se está preocupado com a integridade de uma estrutura, componente ou material, o estudo da mecânica da fratura, com o enfoque na formação e propagação de fissuras se torna essencialmente importante. Isso porque os pequenos defeitos, descontinuidades externas ou internas dos materiais, já pré-existentes e/ou surgidos

posteriormente durante seu uso, atuam como regiões potencialmente concentradoras de tensões que podem levá-los a falha (Ferreira, 2019).

Ainda de acordo com Ferreira (2019), o processo de dano ocorre pela geração sistemática de ruptura de ligações e nucleações sucessivas de microfissuras. Os vazios e defeitos internos do material se reúnem, dando origem a uma ou mais microfissuras que, com o crescimento dos níveis de carregamento dará origem a coalescência das microfissuras, gerando mesofissuras. O crescimento individual dessas mesofissuras ou a reunião delas, gera a macrofissura (10^{-5} a 10^{-3} m).

Outro importante fator responsável pela acumulação de danos é a solicitação alternada de cargas externas, que resulta no que é denominado de fadiga. A flutuação dessas tensões, mesmo que abaixo da tensão de escoamento do material, dá origem a processos locais de plastificação em razão da concentração de tensões que ocorrem nos defeitos microscópicos, microfissuras e vazios presentes na estrutura do material.

No sistema de revestimento cerâmico, os seus componentes estão sujeitos a tensões de diversas naturezas atuando simultaneamente, sendo destacadas aquelas de origens térmicas, que são reportadas como principal responsável pelo descolamento de peças cerâmicas, seja nas principais idades ou após longo período (Fiotito, 1994).

Bauer et al. (2012) citam ainda algumas características do mecanismo de descolamento de revestimento que se assemelham e muito com o comportamento de fadiga, tais como:

- O processo não surgir de imediato quando o edifício é concluído, evidenciando, portanto, que o fenômeno não é provavelmente devido a um carregamento de natureza estática;
- As fachadas de cores escuras sempre apresentarem maior incidência de descolamentos, o que associa o fenômeno aos esforços de natureza térmica;
- E o fato de o descolamento ocorrer em bolsões, sendo que as peças cerâmicas são descoladas de forma progressiva e as falhas de contato aumentam paulatinamente.

De acordo com Uchoa (2007), a evolução do processo de fadiga por propagação da fissura pode ser dividida em quatro etapas: nucleação, crescimento micro e macroscópico e ruptura final.

Quando se fala em propagação de fissuras, Ferreira (2019) ressalta que se deve observar que ela pode ocorrer também segundo diferentes regimes. No regime de crescimento estável (subcrítico) a propagação da fissura está condicionada ao crescimento da solicitação externa; o metaestável, pode acontecer em níveis de carregamento que antecedem a carga crítica; e o instável, se verifica uma vez que é atingida a carga crítica e a fissura se propaga sem que haja mais necessidade de qualquer aumento do carregamento externo.

Muitos trabalhos com modelos numéricos permitem prever o comportamento de materiais sujeitos a fadiga, simulando a possibilidade de nuclear defeitos no interior de um meio contínuo, como é caso do livro de Mohammadi (2008); e simular a propagação de fissuras em estruturas de concreto armado, como o trabalho de Unger et al. (2007 *apud* Soares e Iturrioz, 2015). Porém, quando se deseja entender a degradação das propriedades mecânicas dos materiais submetidos a cargas oscilantes, a bibliografia clássica se dedica ao entendimento do comportamento de materiais metálicos, com comportamento de ruptura dúctil.

Entretanto, os regimes de ruptura são essencialmente três: as rupturas frágeis, as quase frágeis e as rupturas dúcteis. A ruptura frágil dos materiais se caracteriza pelo desenvolvimento de deformações plásticas em quantidades desprezíveis e a dissipação energética envolvida com essa plastificação também é muito pequena ou desprezível (Ferreira, 2019).

Spooner, Pomeroy e Dougillt (1976), ao estudarem o desenvolvimento de danos e a dissipação de energia em pastas de cimento, constataram a redução do módulo de elasticidade inicial antes que a tensão de pico fosse alcançada. Essa ocorrência foi observada em todas as amostras testadas, indicando que algum nível de degradação estrutural estava ocorrendo à medida que a deformação aplicada aumentava.

Os autores entenderam que a detecção de algum dano em pastas de cimento, antes do pico de tensão, indicava que este material não seria verdadeiramente frágil. Em materiais frágeis, o início da propagação de trincas seria seguido imediatamente por fratura completa.

Em Ferreira (2019), os materiais cimentícios são classificados como materiais de ruptura quase frágil. Este tipo de ruptura é caracterizado pela capacidade do material em dissipar energia antes da carga máxima e após a sua ocorrência. Neste caso, o processo de dissipação energética tem início nos últimos estágios de carregamento que antecedem a

carga máxima em razão do crescimento estável de fissuras. Após o pico de carregamento, o material tem sua capacidade resistente reduzida e ocorre o aumento dos deslocamentos em regiões discretas do sólido, havendo deformação plástica e o consequente processo de fissuração.

A ruptura dúctil ocorre pela reunião de vazios ou de microfissuras que tem seu avanço e todo o processo de ruptura, precedido da geração de quantidades substanciais de deformações plásticas e de dissipação energética.

É importante destacar que em qualquer um dos casos, a ruptura é sempre favorecida pela existência de micro defeitos que atuam como concentradores de tensão e, portanto, promotores de danificação progressiva.

Em materiais cimentícios, como por exemplo o concreto, a existência de defeitos internos favorecem, em escala microscópica, a concentração de tensões elevadas já nos estágios iniciais de carregamento. É verificado, então, a perda progressiva de coesão na interface matriz-agregado causando rupturas de interface. Assim as características de resistência da interface matriz-agregado tornam-se determinantes na contenção da progressão do dano (Ferreira, 2019).

Spooner e Dougill (1975), realizaram uma avaliação quantitativa de danos no concreto com base na energia do sistema, durante carregamento compressivo, chegando à conclusão de que já nos estágios iniciais de carregamento, em deformações muito baixas, o dano se desenvolve progressivamente até atingir uma taxa máxima logo após o pico de tensão e, em seguida, tende a um valor assintótico.

Para Dutta e Kishen (2020), a interface agregado-matriz de argamassa é a zona mais fraca e caracterizada por microfissuras, mesmo antes da aplicação de quaisquer cargas externas. Em ensaios com cargas cíclicas, até um certo número de ciclos, as microfissuras permanecem estacionárias, com a evolução do ensaio e aumento do número de ciclos, as microfissuras começam a se propagar, primeiro ao longo da interface, causando o descolamento do agregado da argamassa e, depois, evoluindo para o interior da matriz.

Uma analogia pode ser feita às argamassas usadas em revestimentos, em que fissuras oriundas da retração do material, de falhas de preenchimento do tardo e/ou dos ciclos térmicos (sol e chuva), também se desenvolvem na interface argamassa-placa cerâmica causando posterior descolamento do revestimento.

Em um levantamento realizado por Mansur, Nascimento e Mansur (2012), sobre manifestações patológicas em revestimentos com placas cerâmicas, foi observado que em 84% dos edifícios analisados houve o descolamento com ruptura adesiva na interface placa cerâmica/argamassa colante. A explicação para a frequência de ocorrências do deslocamento nesta interface é de que essa região do sistema de revestimento é a mais solicitada por esforços de cisalhamento quando considerados efeitos térmicos e de expansão higroscópica das placas cerâmicas.

De acordo com Pacheco e Vieira (2017), os panos de fachada com maior incidência do sol e da chuva podem sofrer variações bruscas de temperatura que se caracterizam pelo choque térmico gerando tensões que atuam na argamassa colante de fachadas de edificações por meio da ação da fadiga termomecânica.

Logo, se faz necessário relacionar o problema de descolamento em fachadas com estudo da mecânica da fratura, entendendo o processo a partir da ótica de propagação de fissura, verificando a estabilidade de uma fissura pré-existente em um meio, assim como com a instabilidade dessa fissura até o colapso.

3.3.1 Métodos de Avaliação de Danos

Neste tópico serão tratadas as metodologias empregadas em ensaios de avaliação do dano através de propagação de fissura tanto em testes destrutivos quanto em não destrutivos.

3.3.1.1 Testes Destrutivos

Nos testes clássicos de propagação de fissuras, uma fissura inicial entre duas placas coladas se propaga quando uma carga de flexão é aplicada. Esses ensaios são classificados de acordo com os modos de propagação de deslocamento das faces da fissura (Barros e Champaney, 2009). Os modos e as respectivas esquematizações dos ensaios estão ilustrados na Figura 3.

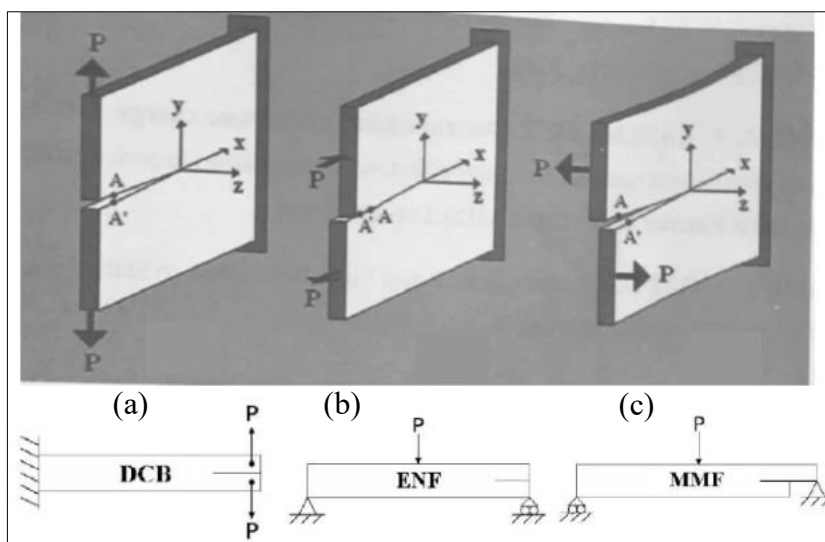


Figura 3 – Modos de solicitação ao fraturamento e respectivas esquematizações de testes de propagação: (a) modo I, teste DCB; (b) modo II, teste ENF; (c) modo III, teste MMF (Fonte: Ferreira, 2019 e Barros e Champaney, 2009).

Em Callister & Rethwisch (2016) e Ferreira (2019), encontram-se as definições dos tipos modos, classificados segundo a teoria da mecânica da fratura, sendo eles:

- Modo I, puro, de tração, em que os avanços da fissura ocorrem sempre na mesma direção;
- Modo II, puro, de cisalhamento plano, em que a propagação de fissura ocorre no plano x-y, com orientação dada por um ângulo da ordem de $70,6^\circ$, relativamente ao eixo x;
- Modo III, ou modo de rasgamento.

Os ensaios para os modos I, II e III, são, respectivamente: o Double Cantilever Beam (DCB), o End Notched Flexure (ENF) e o Mixed Mode Flexure (MMF), este último, usa uma combinação dos modos de propagação puros (Barros e Champaney, 2009).

Barros, Champaney e Valoroso (2012) realizaram testes experimentais e de simulação numérica para avaliar um modelo de interface coeso formulado dentro da estrutura de mecânica de danos. Amostras com placas de alumínio coladas com epóxi, com diferentes tamanhos de fissuras inicial foram submetidas aos testes ENF e MMF.

Ainda que na simulação proposta, os efeitos de propagação dinâmica, que não foram representados no modelo, não permitissem a representação correta da resposta da estrutura, os autores concluíram que os testes de simulação mostraram uma concordância satisfatória

com os testes experimentais realizados, uma vez que o ponto de propagação da fissura pode ser previsto com bastante precisão.

Seguindo a proposta de ensaios dos autores Barros et al. (2012), Melo et al. (2020) realizaram um trabalho em que a resistência de aderência da argamassa colante foi avaliada a partir do teste de propagação de fissura em modo misto de tensões (MMF).

A realização do teste consistiu na aplicação da carga na metade do vão de um corpo de prova formado por duas placas cerâmicas paralelas unidas através de uma argamassa colante. Uma região de falha de contato foi feita a fim de simular os pontos do tardo não preenchidos pela argamassa durante sua aplicação em campo. A Figura 4 apresenta a esquematização do ensaio realizado por Melo et al. (2020).

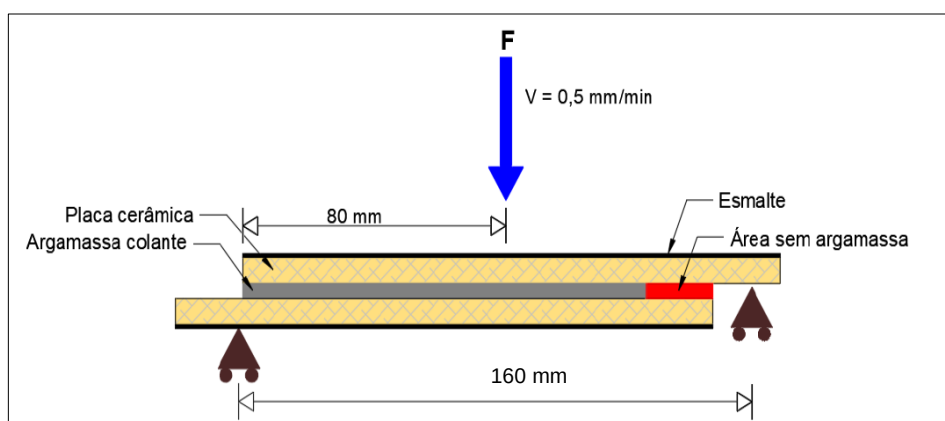


Figura 4 – Esquematização do ensaio realizado na pesquisa de Melo et al. (2020) (Fonte: Silva, 2018).

A geometria do corpo de prova desenvolvido na pesquisa foi baseada na proposta de Barros, Champaney e Valoroso (2012), que favoreceria o aparecimento de tensões de tração diretas e cisalhantes, e indução de propagação de fissura na interface entre a placa cerâmica e a argamassa colante.

Na pesquisa, Melo et al. (2020) concluíram que os valores de resistência à aderência sob tração, preconizado pela NBR 14081-4, foram maiores do que os obtidos pelo teste MMF, indicando uma superestimação do método tradicional de avaliação de capacidade de aderência do material.

Frequentemente avalia-se a compatibilização das argamassas e revestimentos cerâmicos somente ponderando as propriedades estáticas, particularmente o módulo de elasticidade. No entanto, entendendo-se que o comportamento das fachadas das edificações,

às quais os materiais adesivos são aplicados, não proporciona um estado de solicitações estáticas, a quantificação correta do dano deveria ser feita através da sujeição do material a cargas cíclicas, a fim de se compreender o comportamento de fadiga do material.

Considerando isso, Alencar (2020) realizou um estudo para avaliar o comportamento de fadiga de argamassas colantes, submetidas a esforços cíclicos em uma frequência de 10 Hz, em que as amostras são submetidas a ensaio de tração na flexão. Entretanto, os ensaios realizados por Alencar (2020) não consideraram a análise via propagação de fissuras.

Os resultados obtidos mostraram que as argamassas colantes estudadas não devem ser submetidas a cargas cíclicas próximas de sua resistência estática, pois seu comportamento à fadiga se mostrou muito imprevisível, com elevados coeficientes de variação. O número de ciclos médios alcançados pelas argamassas testadas ficou entre 10^4 e 10^5 .

A análise do comportamento em fadiga de argamassas na resistência à fratura quando uma trinca está presente, não é comum. Foi identificada a dificuldade de se encontrar referências na literatura sobre a aplicação de testes experimentais na área de revestimentos. Esse fato direcionou a revisão para encontrar referências cujos procedimentos experimentais tivessem em sua metodologia a avaliação desta propriedade, porém aplicada a outros tipos de materiais.

Em Garpelli et al. (2022) foi realizado um estudo do comportamento de um compósito de fibras de carbono envolvidas por resina epóxi, usado para confecção de peças do setor de aeronáutica. As amostras do material foram submetidas ao teste de propagação do tipo ENF (modo II), sob condições de carga estática e cíclica (frequência de 5Hz). A pesquisa objetivava realizar uma caracterização detalhada sobre o comportamento do compósito à fadiga e avaliar a qualidade da junta adesiva usada na confecção das amostras, através de sua tenacidade à fratura.

Para simular a existência de uma fissura foi utilizado um filme de teflon, posicionado no plano médio de uma das extremidades da peça. O objetivo da simulação era caracterizar a presença de um defeito na peça que atuasse como um concentrador de tensões, produzindo um plano preferencial de fraturamento. A Figura 5 ilustra a geometria da peça confeccionada.

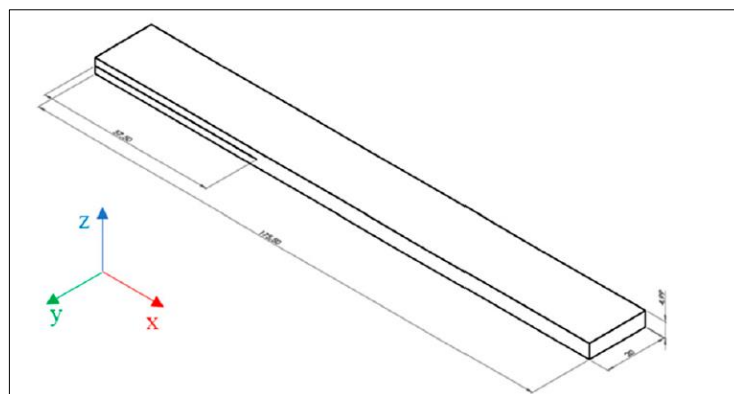


Figura 5 – Geometria das amostras confeccionadas (Fonte: Garpelli et al., 2022).

Os autores conseguiram extrair suas conclusões sobre a qualidade dos métodos de união de peças, a saber, junta *co-cured* (CC), *co-bonded* (CB) ou *secondary-bonded* (SB), sendo as duas última realizadas por meio de adesivo. Eles compararam os valores de tenacidade obtidos dos testes de fadiga, que indicaram ser um pouco menores nas juntas unidas com adesivos. O menor valor de tenacidade indica menor capacidade de adesão em comparação com aqueles de maior valor.

Fan et al (2024) investigou o efeito de vazios e da geometria de juntas adesivas a base époxi usadas na união de compósitos de epóxi com fibra de vidro. Para isso, foi escolhido o ensaio de propagação de fissura do tipo DCB. As avaliações foram realizadas tomando como base a taxa de liberação de energia.

Ogawa et al (2023), Ogawa et al (2022) e Saleh (2023) também avaliaram o desempenho a fratura de adesivos acrílico, poliuretano e epóxi, respectivamente, por meio de ensaios de propagação. Os parâmetros para investigação foram a energia crítica de fratura e a tensão máxima alcançada pelos adesivos.

Sousa et al. (2022), avaliaram o comportamento em fadiga de um adesivo estrutural à base de epóxi, usado na união de substratos de aço de alta resistência. Para avaliar a falha do material, os autores adotaram os testes de mecânica da fratura para os modos puros I e II numa frequência de carregamento de 10 Hz. O objetivo da pesquisa foi desenvolver um modelo de fadiga capaz de prever a vida em fadiga do adesivo sob diferentes modos de fratura, determinando o número de ciclos necessários até a falha do material.

De acordo com Dutta e Kishen (2020), para modelar o comportamento de fadiga de um material, parâmetros como taxa de deformação, energia dissipada e deformação plástica

acumulada, devem ser considerados e já vem sendo proposto por pesquisadores na área de simulação. No campo experimental, entretanto, o mesmo não é verificado. Há um limitado número de pesquisas para avaliação do comportamento em fadiga ou análise energética do dano em materiais cimentícios em geral.

Ainda de acordo com Dutta e Kishen (2020), o processo de fadiga é caracterizado por mudanças graduais e permanentes na estrutura interna de um material que resulta em danos, levando a sua falha. Essas mudanças são irreversíveis e de natureza dissipativa, envolvendo, portanto, geração e liberação de energia.

Todo material apresenta alguma quantidade de energia armazenada e/ou mobilizada, e em materiais com propriedades elásticas, denominamos de energia potencial elástica ou, simplesmente, energia elástica. Quando da aplicação de um carregamento sobre o material, a força que está realizando trabalho e causando a sua deformação, mobiliza energia para dentro dele.

Para manter o equilíbrio no interior do material, o trabalho realizado pelas forças externas deve se manter igual ao valor de energia potencial elástica ou energia de deformação acumulada no sólido. No caso de um material deformado e em equilíbrio que apresenta uma fissura inicial a_0 , o crescimento dessa fissura somente ocorrerá se a energia necessária para a sua propagação puder ser liberada pelo sistema (Ferreira, 2019).

Segundo Rao (2008), em um material submetido a vibração (aqui aplicado as vibrações ocasionadas por cargas cíclicas), ocorre uma transferência alternada de sua energia potencial para energia cinética e de energia cinética para energia potencial. Em um sistema amortecido, certa quantidade de energia é dissipada em cada ciclo de vibração.

A energia dissipada é perdida em razão de múltiplas causas, por exemplo, pelo atrito entre o aplicador de carga e o material (amortecimento de coulomb), pelo atrito interno entre as moléculas que compõe o material em deformação (amortecimento histerético) e/ou pelo próprio deslocamento da massa de ar onde o material está inserido (amortecimento viscoso).

Spooner (1975) acreditava que a energia dissipada poderia ser tomada como uma medida de dano do material e que essa dissipação ocorria através de dois processos. O primeiro processo ocorreria apenas durante o primeiro ciclo de carregamento e é chamada de energia dissipada do dano; o segundo, ocorreria ao longo dos demais ciclos, tendo um efeito de amortecimento semelhante ao que é observado em materiais sujeitos a vibração ou carregamento repetido, denominado de energia dissipada devido ao amortecimento.

Para o cálculo do trabalho total (W_1), realizado durante o carregamento imposto ao material, Spooner (1975) o define como sendo o valor obtido através da área entre a curva de carregamento e o eixo x da curva tensão-deformação, ilustrado na Figura 6.

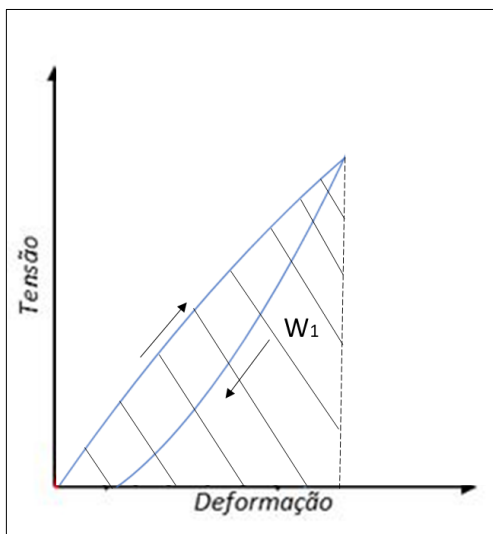


Figura 6 – Energia total envolvida durante o primeiro ciclo de carga e descarga de um material ideal (Fonte: Autora, adaptado de Spooner, 1975).

Já a energia total dissipada (E_d) durante o primeiro ciclo de carga e descarga é ilustrado pela Figura 7, sendo igual a área delimitada entre as curvas de carregamento e descarregamento do material.

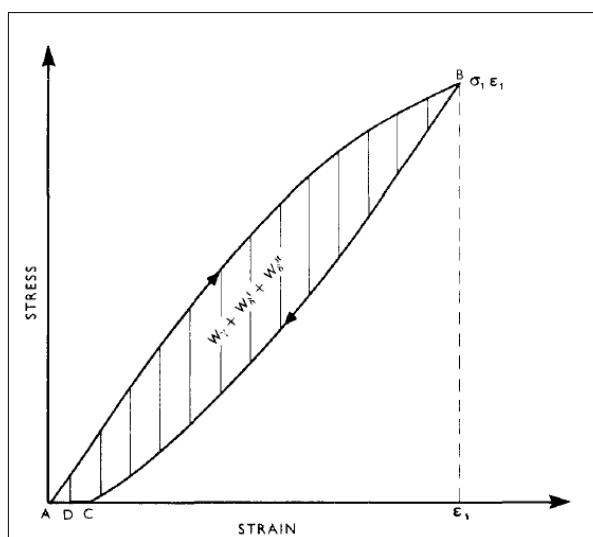


Figura 7 – Energia dissipada durante o primeiro ciclo de carga e descarga de um material ideal (Fonte: Spooner, 1975).

De acordo com Valoroso e Champaney (2004), uma condição básica a ser considerada, é dada pelo critério de energia da mecânica da fratura, a saber, que a energia dissipada (E_d) durante o processo de propagação de fissura é igual à energia crítica de fratura (G_c) do material.

Segundo Ferreira (2019), quando a taxa de liberação de energia, E_d , atinge um valor crítico, G_c , a fissura se propaga de maneira instável no material, ou seja, podendo levar o material a falha.

Partindo desse princípio, Barros e Champaney (2009) apresentaram uma metodologia para a obtenção da energia crítica de fratura (G_c) e construção da curva de propagação de fissuras. De acordo com esses autores, a energia (E) necessária para fazer uma trinca se propagar pode ser calculada de acordo com a equação (1), obtida a partir dos dados delimitados pela área cinza da curva força-deslocamento da Figura 8.

$$E = \frac{FLE(i)}{2} (FS(i-1) - FI(i)) \quad (1)$$

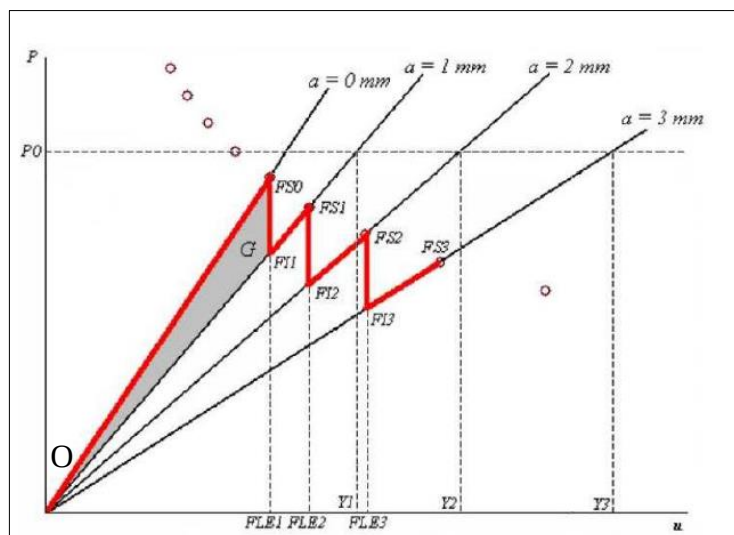


Figura 8 – Área representativa da energia necessária para fazer uma trinca se propagar em relação a um comprimento inicial da trinca, a (Fonte: Barros e Champaney, 2009).

A equação (1) descreve o cálculo da diferença das áreas formadas pelos triângulos O-FS0-FLE1 e O-FI1-FLE1. O valor de E , na equação (1), denominado como sendo a energia necessária para fazer uma trinca se propagar, em relação a um comprimento inicial

da trinca, a , pode ser comparado com o que foi ilustrado por Spooner (1975), na Figura 7, para obtenção da energia dissipada, uma metodologia de obtenção do valor de energia dispendida por meio do cálculo de diferença de áreas.

Diante do exposto, pode-se perceber a importância de se conhecer a energia crítica de fratura, pois é um parâmetro importante na avaliação de desempenho mecânico do material, definindo o limite crítico de energia necessária a ser dissipada pelo material, a partir do qual se propaga a fissura e se cria uma superfície de fratura no material.

Além disso, quando se trabalha com princípios energéticos do material, a análise de desempenho do material deixa de possuir um caráter local, isto é, deixa de ser realizada por meio de fatores de intensidade de tensão na ponta de uma trinca (K), para os diferentes modos de sollicitação à fratura, e passa a ter um caráter global, pois decorre da análise de variação de flexibilidade do sólido como um todo (antes e após a propagação da fissura).

Observa-se, entretanto, que a sua aplicabilidade se limita à análise de materiais com resposta linear-elástica ao fraturamento (Ferreira, 2019).

A pesquisa a ser desenvolvida visa avaliar a integridade da ligação interfacial argamassa colante/substrato, por meio de ensaio de propagação de fissuras. Para isso, o material de análise será submetido a tensões simultâneas (tração e cisalhamento), simulando os esforços oriundos de variações térmicas as quais os materiais de fachada estão expostos. Para simular a ciclicidade da atuação dos esforços provenientes das variações térmicas, uma técnica não destrutiva de frequência de ressonância será empregada e seus resultados comparados com os obtidos a partir do teste clássico de propagação do tipo MMF (modo misto).

Ensaio de ultrassom e frequência de ressonância já vêm sendo utilizados em pesquisas mais recentes para avaliar danos em materiais cimentícios, tais como determinação de propagação de fissuras até a falha final de lajes de concreto (Yuyama et al., 2001), falha por fadiga de vigas de concreto (Nor, Saliah e Hashim, 2020), desempenho mecânico de revestimentos em paredes, realizados em campo (Galvão et al., 2018), avaliação de aderência de materiais cimentícios a estruturas metálicas tubulares (Silva, 2010), entre outros.

A seguir, será abordado uma revisão de trabalhos científicos que aplicaram em suas metodologias testes não destrutivos (NDT), para investigação de danos ou problemas de aderência em materiais cimentícios.

3.3.1.2 Testes Não Destrutivos

Em Goldberg (1998) são citadas as seguintes técnicas não destrutivas para análise de qualidade de aderência em revestimentos: o teste visual e óptico, a modelagem numérica (Análise de Elementos Finitos FEA), o teste de impacto acústico, a varredura termográfica (*thermographic scanning*), teste ultrassônico (velocidade de pulso), a radiografia e o teste de umidade.

Já em Medeiros (2018) algumas técnicas não destrutivas mais gerais são citadas, sendo elas: esclerômetro de schmidt; métodos à base de ultrassom; métodos que utilizam a frequência de ressonância; métodos magnético-elétricos; técnicas de termografia infravermelha; métodos de emissão acústica e resistividade com medição local elétrica.

No que concerne ao teste de frequência de ressonância, Barreto (2019) menciona que o fenômeno da ressonância em um material ocorre quando a frequência de excitação vibrante externa ao mesmo coincide com sua frequência de vibração natural.

Com a ocorrência da ressonância, serão observados a formação de picos de amplitude de maneira harmônica das ondas que constituem o sinal, sendo o primeiro ponto máximo a frequência ressonante natural do espécime estudado (Almeida, 2012).

Segundo Chen et al. (2011), já está bem estabelecido que as frequências de ressonância de uma amostra de material podem ser usadas para avaliar as suas propriedades elástico-lineares. Ao assumir uma tensão-deformação baseada na lei de Hooke, as constantes elásticas de uma amostra podem estar diretamente relacionadas às frequências de ressonância medidas, contanto que a geometria, condições de contorno e a densidade do material sejam conhecidas. O módulo de elasticidade dinâmico, por exemplo, apresenta uma estreita relação de proporcionalidade com a frequência natural do concreto.

Chen et al. (2011), acrescenta que a espectroscopia de ultrassom ressonante (RUS) pode ser usada para acompanhar o progresso de danos materiais ao longo do tempo, mas neste caso, a suposição de uma relação linear tensão-deformação não é mais uma aproximação válida quando um material se torna danificado, e o comportamento constitutivo de um material danificado geralmente exibe um nível elevado de não linearidade.

Liu et al. (2010) fizeram uso da técnica de espectroscopia de ultrassom ressonante não linear para uma barra de cimento unidimensional com condições de contorno assimétricas (um limite livre e um limite fixo), para investigar a sua eficiência em identificar a posição de defeitos. Os autores concluíram que a posição dos defeitos na barra testada pode

ser estimada a partir das amplitudes medidas dos harmônicos ímpares dos modos de vibração. Corroborando com a teoria de que a presença de defeitos no material causa mudança na frequência de ressonância e que esta mudança, em sua pesquisa, foi dependente da amplitude dos terceiros e quintos harmônicos, especialmente.

Barreto (2019) utilizou de técnicas não destrutivas, quais sejam, velocidade de pulso ultrassônico e frequência de ressonância mecânica longitudinal, para investigar a viabilidade de detecção de reação álcali-agregado (RAA) em prismas de concreto.

Este autor concluiu, após análise das expansões por 500 dias, que a técnica de velocidade de onda ultrassônica não foi sensível o suficiente para indicar se os prismas estavam ou não apresentando RAA, apesar das expansões estarem apontando para isto.

Já com relação a técnica de frequência de ressonância, as frequências naturais dos prismas se mantiveram aproximadamente constantes até as expansões assumirem valor da ordem de 0,035%, quando, a partir daí, suas frequências passam a reduzir. Barreto (2019) finaliza suas considerações destacando que a técnica de ressonância detecta, de forma antecipada, a reação álcalis-agregado (RAA) e que os valores das frequências começam a decrescer, mesmo sem sinais exteriores ou expansões exageradas, podendo-se admitir que o fenômeno já estava se manifestando.

Silva (2010) avaliou a aderência de material cimentício em estruturas tubulares metálicas utilizando-se de ensaios destrutivos estático (ensaio de arrancamento sob tração) e não destrutivo sob esforço dinâmico (ressonância). A avaliação da aderência do ensaio foi realizada pela contagem do número de ciclos no estado elástico e pós dano da pasta cimentícia.

Os testes realizados por Silva (2010) evidenciam que a contagem do número de ciclos é um bom indicativo da eficiência da aderência de contato entre os materiais, tendo sido observado que quanto maior a força de aderência obtida no ensaio estático, maior o número de ciclos registrados no ensaio dinâmico via ressonância. A idade da pasta cimentícia e o tratamento superficial na região do contato foram os fatores que influenciaram nos valores de cargas obtidas. Todos esses fatores também influenciaram igualmente nos números de ciclos contados.

Outro ponto de destaque é que a perda de aderência entre os materiais pode ser relacionada com o decremento da amplitude da onda. A autora explica que a deformação detectada na face exterior do revestimento cimentício, no regime estático, corresponde com

as respostas obtidas no regime dinâmico (número de ciclos elásticos, número de ciclos pós dano e amplitude do deslocamento do revestimento cimentício).

Medeiros (2018) utilizou-se de espectroscopia de ultrassom ressonante para avaliar a qualidade de blocos estruturais de concreto a partir da viabilidade da criação de espectros padrão dos blocos. A autora utilizou-se, para tanto, de blocos visualmente conformes e blocos com defeitos, obtendo êxito na elaboração dos espectros padrão, com picos de ressonância muito próximos.

Medeiros (2018) observou, que nos blocos com defeitos aparentes, os espectros obtidos sofreram alterações nos valores dos picos de frequência de ressonância, obtendo valores menores que os blocos conformes, devido a diminuição da rigidez deles. As amplitudes destes blocos foram também consideravelmente menores, devido ao maior amortecimento proporcionado pelo atrito realizado pelas paredes dos blocos entre as fissuras.

Xiong et al (2023) investigou a trajetória de propagação de fissuras em amostras metálicas usadas em pás de motores aeronáuticos. Para isso foram usadas ferramentas de simulação numérica e avaliação das mudanças de frequências de ressonância em função do comprimento de propagação da fissura. Os autores verificaram que a frequência de ressonância diminuía à medida que o comprimento de propagação da fissura aumentava. Outros estudos nessa área também foram realizados por Chen et al (2021), Qu et al (2019) e Witek (2015), que conduziram pesquisas para análise de propagação de trincas em motores aeronáuticos sob condições de ressonância.

A partir do exposto, é possível observar que o uso de técnicas não destrutivas com base em frequência de ressonância para avaliação de danos, já vem sendo realizada. Porém, em nenhuma das pesquisas levantadas foi possível encontrar estudos experimentais que fizessem uso da técnica em argamassas, nem muito menos que investigassem a integridade ou a qualidade da aderência da argamassa aplicada em revestimentos de fachada. Neste sentido, vê-se que há uma escassez de estudos nessa área que visem o entendimento das etapas de propagação do dano nas camadas de revestimentos. Por conseguinte, há dificuldades de se encontrar trabalhos em que técnicas destrutivas e não destrutivas, que simulem de maneira mais realista os esforços aos quais camadas do revestimento estão sujeitas, sejam utilizadas.

Diante desse contexto, essa pesquisa se propõe a investigar a integridade da ligação argamassa/substrato cerâmico, utilizando-se de parâmetros de carga e de energia que ajudem na investigação da propagação do dano. Para isso, foram produzidas amostras que foram submetidas a ação de esforços simultâneos de tração e cisalhamento, simulando os esforços aos quais o conjunto argamassa/cerâmica está, de fato, exposto. Ensaio destrutivo (MMF) e não destrutivo (frequência de ressonância) foram empregados para essa investigação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as estratégias experimentais adotadas com intuito de alcançar os objetivos geral e específicos definidos anteriormente.

4.1 Procedimento Experimental

Para desenvolvimento da presente pesquisa foram confeccionadas amostras prismáticas, de 40x160mm, formadas por duas placas cerâmicas unidas por meio de uma argamassa colante industrializada. As amostras produzidas foram utilizadas nos ensaios de modo misto (*Mixed Mode Flexure* - MMF) e de frequência de ressonância mecânica a fim de avaliar, por meio de ambos os ensaios, a aderência das juntas de argamassas testadas quando submetidas a esforços estáticos e dinâmicos.

Para isso, as seguintes variáveis foram consideradas:

- Tipo de adesivo: foram utilizados dois tipos de argamassa colante que se diferenciam pela sua capacidade de adesividade;
- Tipo de substrato: placas cerâmicas que atendessem o limite máximo de 6% de taxa de absorção estabelecida pela NBR 13755:2017;
- Tempo de cura: pretendeu-se avaliar a evolução das propriedades mecânicas e de parâmetros de energia em função da idade de moldagem do conjunto argamassa colante/substrato ao longo de 7, 14 e 28 dias;
- Espessura da argamassa colante: foram adotadas espessuras fixadas em $5 \pm 0,5\text{mm}$;
- Tamanho da fissura prévia: 0 (referência), 15, 30 e 45mm, a fim de avaliar a influência do tamanho da fissura sobre a capacidade de aderência das argamassas colantes.

A Tabela 3 traz uma esquematização das variáveis que foram analisadas na pesquisa, totalizando 24 famílias de estudo para os ensaios de MMF e ressonância.

Os ensaios de MMF e frequência de ressonância terão seus resultados observados a partir da análise de 3 e 4 corpos de prova respectivamente, totalizando 72 amostras para o ensaio MMF e 96 para o ensaio de ressonância;

Tabela 3 – Variáveis consideradas no programa experimental (Fonte: Autora, 2024).

Tamanho da Fissura (mm)	Tipo de AC	Idade (dias)	Identificação das famílias
0	AC - Tipo A	7	AC TA-0
		14	AC TA-0
		28	AC TA-0
	AC - Tipo B	7	AC TB-0
		14	AC TB-0
		28	AC TB-0
15	AC - Tipo A	7	AC TA-15
		14	AC TA-15
		28	AC TA-15
	AC - Tipo B	7	AC TB-15
		14	AC TB-15
		28	AC TB-15
30	AC - Tipo A	7	AC TA-30
		14	AC TA-30
		28	AC TA-30
	AC - Tipo B	7	AC TB-30
		14	AC TB-30
		28	AC TB-30
45	AC - Tipo A	7	AC TA-45
		14	AC TA-45
		28	AC TA-45
	AC - Tipo B	7	AC TB-45
		14	AC TB-45
		28	AC TB-45

Dois tipos de argamassa colante enquadradas em grupos distintos de desempenho e indicação de uso foram adotados como forma de verificar se diferenças significativas nos espectros de ressonância poderiam ser identificadas.

A variação das idades se justifica na necessidade de poder analisar a evolução das propriedades mecânicas e de energia das amostras, investigando se há e quais são, por exemplo, as alterações do espectro de frequência em função da evolução das reações de hidratação do composto cimentício.

O uso de fissura prévia foi adotado com intuito de simular a presença de defeitos na interface dos materiais, causados, por exemplo, pelo preenchimento deficiente do tardo da cerâmica pela argamassa, bem como a presença de fissuras que se desenvolvem

(imediatamente após ou depois de alguns dias da aplicação da execução do revestimento) em razão do choque térmico ocorridos nos panos de fachada.

A Figura 9 ilustra a esquematização das amostras produzidas e o posicionamento da fissura prévia.

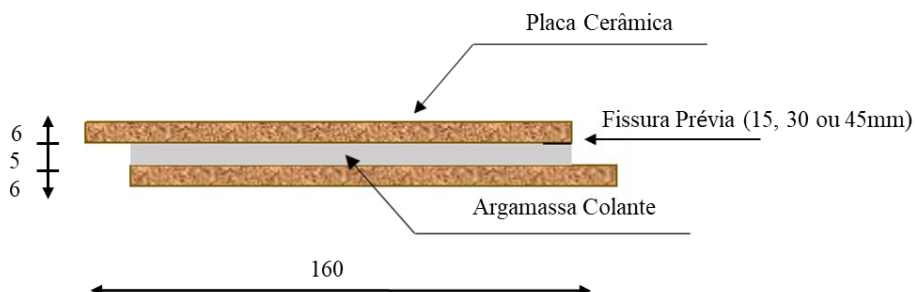


Figura 9 – Representação gráfica das amostras usadas nos ensaios com dimensões em mm (Fonte: Autora, 2024).

A fissura prévia foi realizada por meio da inserção de um filme de acetato implantado na interface da argamassa colante/cerâmica, a fim de que este atuasse como um concentrador de tensões e produzisse um plano preferencial de fraturamento que representasse o tipo preferencial de ruptura em revestimentos de fachada (ruptura adesiva). A espessura do filme usado foi de 30µm e a opção por este tipo de filme se deu em razão de sua composição polimérica (de policloreto de vinila) evitar problemas com dobras na extremidade cortada, facilitando a implantação na amostra, além de ser facilmente adquirido no mercado.

Para minimizar variações de espessuras ao longo dos 40 mm de largura do corpo de prova, optou-se por cortar o filme na mesma largura das amostras. Os tamanhos das fissuras prévias foram escolhidos a fim de permitir que elas correspondessem a cerca de 10 a 30% do vão livre do corpo de prova entre os apoios, se assemelhando ao adotado por Garpelli et al. (2022) bem como pelas dimensões recomendadas pela ASTM D7905.

4.2 Caracterização dos Materiais

Para avaliação da resistência de aderência das argamassas testadas, se faz importante conhecer as características dos materiais usados na produção das amostras. Com este intuito, foram realizados ensaios tanto nas placas cerâmicas quanto nas argamassas.

4.2.1 Placa Cerâmica

Dentre as características da cerâmica que afetam o desenvolvimento da aderência mecânica dos materiais cimentícios em contato com um substrato, estão as que se relacionam

com a sua porosidade. Para investigar essas características foram realizados ensaios para determinação da porosidade, absorção capilar e densidade aparente do tardo da placa, de acordo com a NBR ISO 10545-3:2020 – Placas Cerâmicas: Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente.

Nesta pesquisa, foi utilizado um único tipo de revestimento cerâmico. As características fornecidas pelo fabricante estão resumidas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características das cerâmicas.

Dimensão	7x26 cm
Espessura	6,8 mm
Grupo de absorção	BIIa (3 a 6%)
Indicação de uso	Paredes internas, fachadas, pisos residenciais e não residenciais internos de tráfego médio.
Coefficiente de Atrito	<0,4

4.2.1.1 Determinação da Absorção, Porosidade e Densidade Aparente

Para mensurar os valores de absorção, porosidade e densidade aparente, foram separadas e cortadas 5 placas cerâmicas conforme modelo normativo, ilustrado na Figura 10.

A norma recomenda que placas com área inferior ou igual a 400cm² sejam cortadas ao meio, com o corte realizado perpendicularmente ao lado mais longo. Após isso, foi realizada a escolha aleatória de uma das metades da placa para proceder com o ensaio.

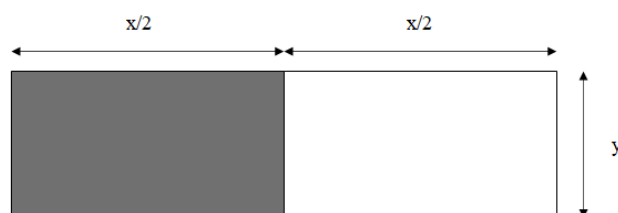


Figura 10 – Esquema de corte das placas cerâmicas menores ou iguais a 400cm² para o ensaio (Fonte: Adaptado NBR ISO 10545-3:2020).

As placas selecionadas foram levadas para secagem em estufa, a 110°C, por no mínimo 24h ou até que obtivesse constância de peso. Após a secagem, as placas foram

resfriadas em um dessecador, como ilustrado na Figura 11(a), posicionada com um dos lados cortados voltados para o fundo, e depois determinada sua massa seca (m_1).

Em seguida, as placas foram mantidas sob um sistema de evacuação, sob uma pressão de 10kPa, durante 30min (Figura 11(b)). Na sequência, mantendo-se o vácuo, adicionou-se água lentamente até que as peças ficassem totalmente impregnadas por água. O vácuo foi removido e as placas foram mantidas submersas durante 15min (Figura 11(c)), para em seguida determinar sua massa suspensa (m_3) (Figura 11(d)). A Figura 11 ilustra a sequência dos passos descritos para este ensaio.

As placas foram, então, secadas por um pano úmido a fim de que todas as gotas visíveis fossem removidas de sua superfície, e obtida sua massa saturada (m_2) (Figura 11(e)).

Para os cálculos da absorção de água (Abs), porosidade aparente (P) e densidade aparente (D), foram utilizadas as seguintes equações:

$$Abs = 100 \times \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \quad (1)$$

$$P = 100 \times \frac{(m_2 - m_1)}{m_2 - m_3} \quad (2)$$

$$D = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \quad (3)$$

O ensaio descrito foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

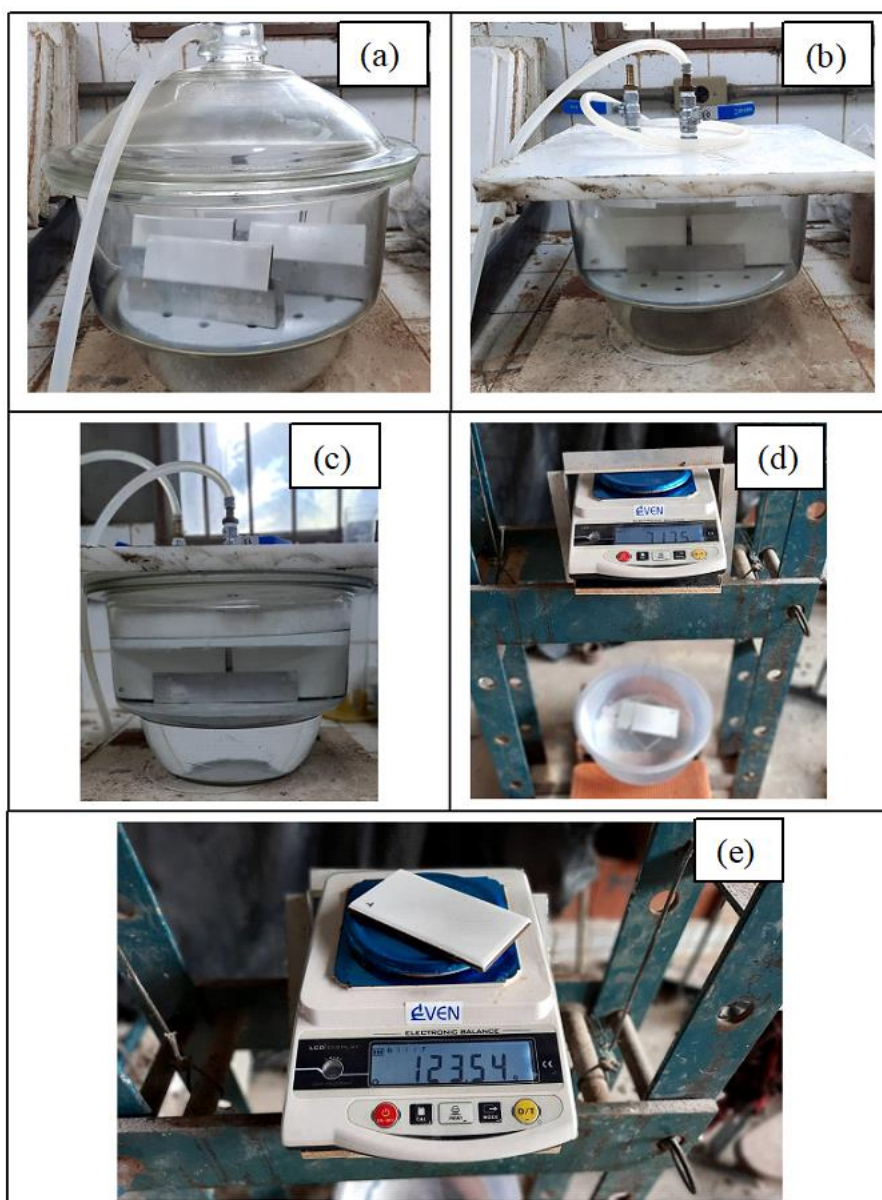


Figura 11 – Sequência do ensaio de absorção, porosidade e densidade aparente: (a) resfriamento das placas no dessecador; (b) sistema de evacuação; (c) submersão em água; (d) medição da massa submersa; (e) medição da massa saturada (Fonte: Autora, 2022).

4.2.1.2 Análise Química da Massa Cerâmica

A análise dos compostos químicos presentes na mistura da massa cerâmica foi fornecida pelo fabricante.

4.2.2 Argamassa Colante

Para caracterização das argamassas colantes foram realizados os ensaios mecânicos seguindo a orientação da NBR 14081:2012 - Argamassa Colante Industrializada para assentamento de placas cerâmicas. De acordo com esta norma, é possível determinar a

resistência de aderência das argamassas à tração (em cura normal, imersa e em estufa) e o tempo em aberto, com vistas a classificá-las nos tipos especificados pela norma, como mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades Fundamentais para classificação das argamassas colantes (Fonte: NBR 14081-1:2012).

Requisito	Métodos de Ensaio	Unidade	Critério		
			ACI	ACII	ACIII
Tempo em aberto	NBR 14081-3	min	≥ 15	≥ 20	≥ 20
Resistência de aderência à tração aos 28 dias, em função dos tipos de cura	Cura normal		$\geq 0,5$	$\geq 0,5$	$\geq 1,0$
	Cura submersa	NBR 14081-4	$\geq 0,5$	$\geq 0,5$	$\geq 1,0$
	Cura em estufa			$\geq 0,5$	$\geq 1,0$

Os ensaios descritos pelas NBR 14081-3:2012 e NBR 14081-4:2012, para determinação do tempo em aberto e resistência de aderência à tração, respectivamente, foram realizadas pelo Laboratório de Ensaio Tecnológicos em Materiais da Construção Civil (LETMACC) do SENAI – PE.

As características técnicas e de indicação de uso fornecidas pelo fabricante das argamassas utilizadas na pesquisa (o mesmo fabricante para os dois tipos), encontram-se resumidas na Tabela 6, a seguir.

Tabela 6 – Características das argamassas utilizadas na pesquisa.

	AC TA	AC TB
Indicações de Uso	Cimentcola cozinhas e banheiros	Cimentcola Flexível ACIII (AC TB)
	- Revestimentos cerâmicos de até 80x80cm, em pisos e paredes de ambientes internos;	- Revestimentos de até 120x120cm para sobreposição e 140x140cm base comum;
	- Ambientes com presença de água, como banheiros, cozinhas, lavanderias, lavabos, etc;	- Assentar porcelanatos, mármore, granitos e cerâmicas em pisos e paredes internas e externas;
	- O produto não dispensa uso de impermeabilização do ambiente;	- Revestimentos de até 60x60 cm com absorção de água de 0,5% a 6% em fachadas (20 andares);
		- Pastilhas de porcelana;
Características Técnicas	Desempenho de aderência em cura normal $\geq 0,5$ MPa	Desempenho de aderência em cura normal $\geq 1,0$ MPa
	Desempenho de aderência em cura submersa $\geq 0,5$ MPa	Desempenho de aderência em cura submersa $\geq 1,0$ MPa
	Tempo em aberto ≥ 15 minutos	Desempenho de aderência em cura em estufa $\geq 1,0$ MPa
		Tempo em aberto ≥ 20 minutos

A nomenclatura adotada ao longo do texto para se referir aos tipos de argamassas serão: ACTA – Argamassa Colante tipo A, para a CimentCola Cozinhas e Banheiros; e ACTB - Argamassa Colante tipo B, para a CimentCola Flexível.

4.3 Ensaios de Propagação de Fissura

Foram realizados o ensaio destrutivo mecânico em modo misto (*Mixed Mode Flexure* - MMF) sob carregamento estático e o ensaio não destrutivo de Frequência de Ressonância Mecânica, sob carregamento dinâmico.

Para realização de ambos os testes foram confeccionadas as amostras sanduíches (conforme mencionadas em 4.1) que estão ilustradas na esquematização da Figura 9.

4.3.1 Preparação das Amostras

A confecção dessas amostras iniciou-se com os cortes das cerâmicas a fim de ajustá-las ao tamanho desejado (4x16cm), uma vez que a placa cerâmica possuía dimensões de 7x26cm. A fim de se garantir as mesmas condições de contato em todos os espécimes produzidos, foi feita a remoção de todo vestígio de cola do tardo das cerâmicas. Em seguida, elas foram lavadas com detergente e água e levadas para secagem em estufa por 24h, antes da produção das amostras.

As argamassas utilizadas foram preparadas manualmente devido à pequena quantidade que era preparada por vez. Optou-se por produzir pequenas quantidades a fim de garantir a aleatoriedade da reprodutibilidade das amostras e evitar que possíveis falhas do processo tecnológico de produção fossem propagados a todas as réplicas das amostras.

As amostras de argamassa foram preparadas em um recipiente plástico, seguindo recomendação do fabricante quanto a proporção, ordem dos materiais e aplicação. Todas as argamassas do tipo A (ACTA) foram preparadas usando a proporção $a/c = 0,195$; já as argamassas do tipo B (ACTB), utilizavam a proporção $a/c = 0,2$.

A água usada no preparo da argamassa foi do tipo destilada, a fim de garantir que o mesmo tipo de água fosse sempre utilizado, evitando interferências de espécies iônicas que pudessem variar de um fornecimento para outro ou, ainda, que alterassem a hidratação do material cimentício.

O material em pó era misturado com água até que todos os grumos fossem desfeitos e fosse observada a homogeneidade da mistura. Após a mistura, a argamassa era deixada em repouso por 15 min, a fim de que seus aditivos pudessem iniciar a reação. Durante o processo de maturação, o recipiente era coberto com um pano úmido. Passados os 15min de maturação, a argamassa era remisturada e, com o uso de uma espátula, pequenas porções da argamassa era espalhada sobre o tardo da cerâmica. Após o espalhamento da argamassa foi

utilizada uma desempenadeira com o lado denteado para formação dos cordões, cuidando-se em manter uma inclinação em relação a base, de aproximadamente 60°.

Na sequência, a segunda peça cerâmica era colocada sobre a argamassa sendo pressionada com os dedos e, depois, com o auxílio de um martelo de borracha, de modo a amassar os cordões formados. Para as amostras com a simulação de falha, previamente à colocação da segunda placa, posicionava-se o filme de acetato sobre a argamassa no local especificado.

Para que a espessura da argamassa no corpo de prova fosse controlada, foram confeccionados espaçadores de EVA. Os espaçadores também serviam para delimitar a área que não recebia argamassa, visando garantir a configuração proposta da Figura 9. Na Figura 12 pode ser observado um desenho esquemático de como os espaçadores foram posicionados nos corpos de prova.

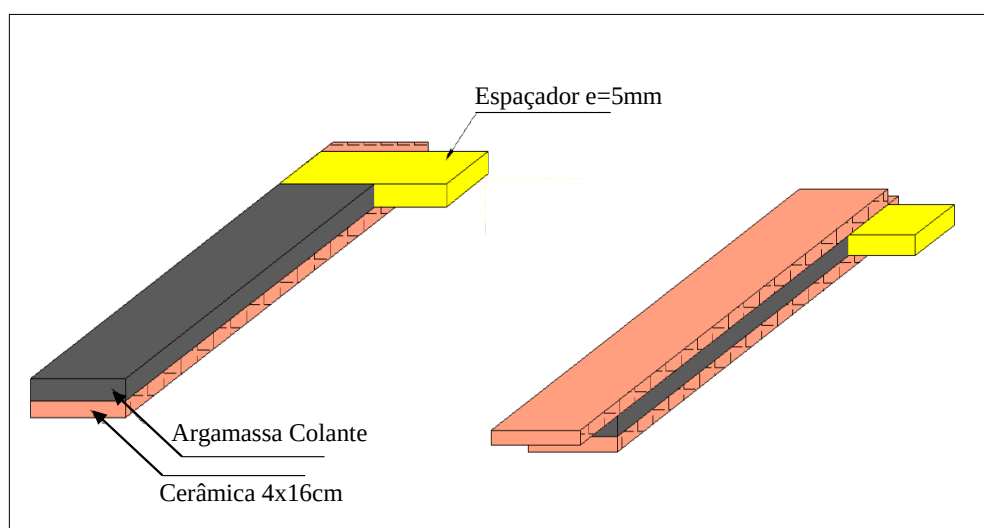


Figura 12 – Esquematização do uso de espaçadores (Fonte: adaptado de Silva, 2018).

4.3.2 Ensaio Mixed Mode Flexure (MMF) – Carga Estática

O ensaio MMF foi realizado no laboratório de Solidificação Rápida da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), seguindo as orientações encontradas na revisão da literatura em 3.3.1.1 e a esquematização na Figura 4. A Figura 13 traz uma ilustração do ensaio.

O equipamento utilizado foi a máquina de ensaios universais da Shimadzu Servopulser, com velocidade de aplicação de carga de 0,5mm/min e célula de carga com capacidade máxima de 10kN.



Figura 13 – Posicionamento da amostra sanduíche na máquina para o ensaio MMF (Fonte: Autora, 2022).

4.3.3 Ensaio de Frequência de Ressonância (Carga Dinâmica)

Para os ensaios de frequência de ressonância, se fez necessária a realização de testes pilotos para que o perfil dinâmico das amostras pudesse ser conhecido. Foi também nessa etapa que as variáveis tecnológicas foram analisadas a fim de definir a metodologia a ser empregada ao longo da pesquisa. Dessa forma, os testes de ressonância das amostras foram divididos em duas etapas que estão ilustradas no fluxograma da Figura 14.

O teste piloto de frequência de ressonância foi necessário pois, para o tipo de amostra e configuração estrutural adotada (ação simultânea de esforços trativos e cisalhantes), não foram encontradas pesquisas que pudessem servir de ponto de partida na identificação das respostas de ressonâncias características do material. Esse processo foi realizado através da obtenção de indicadores estatísticos que avaliaram o efeito das variáveis envolvidas a fim de validar se as frequências encontradas eram, de fato, características do arranjo escolhido. Somente após essas análises iniciais se pode definir a metodologia a ser adotada para prosseguimento da pesquisa.

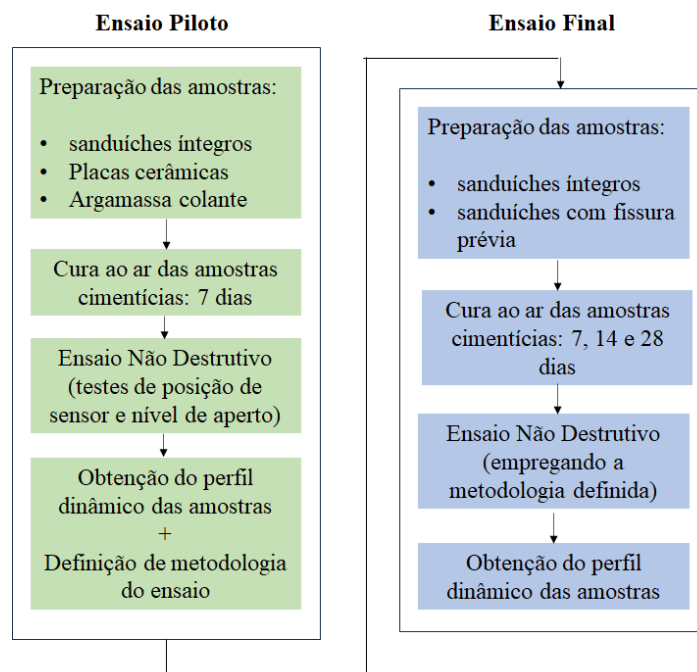


Figura 14 – Etapas de construção do ensaio de ressonância (Fonte: Autora, 2024).

4.3.3.1 Definições Iniciais

O ensaio de frequência de ressonância consistiu na aplicação de repetidas cargas de pequena magnitude sobre a amostra, durante um intervalo de tempo específico, provocando movimentos oscilatórios no material.

De acordo com Correia (2007), após a aplicação desse tipo de carga (repetidas), ocorrerá no corpo diferentes formas de movimentos oscilatórios em relação a uma posição de equilíbrio durante um intervalo de tempo. Tais movimentos oscilatórios são chamados de frequência e estão associados a um modo de vibração.

Dessa forma, pode-se dizer que todo material que seja submetido a um tipo de vibração, apresentará uma ou mais frequências características nas quais ele tende a vibrar, denominada de frequência natural. Quando a frequência da excitação externa se assemelha a frequência natural do material ocorre o que é denominado de frequência de ressonância e o material vibra com mais intensidade.

A amplitude dos picos de frequência de ressonância pode ser diminuída em razão da capacidade de amortecimento do material. De acordo com Cossolino e Pereira (2010), o amortecimento é o mecanismo pelo qual a energia mecânica de um sistema é dissipada, sendo particularmente sensível à presença de trincas e micro trincas.

Assim sendo, a análise do comportamento do material por meio da obtenção do espectro de suas frequências de ressonância é uma das formas de caracterizá-lo, fornecendo informações importantes para avaliação do desempenho mecânico do material, tais como:

- Frequências naturais: relacionadas diretamente com a rigidez do material analisado;
- Amplitude dos picos: relacionada com a capacidade dissipativa do material;
- Geometria dos picos: largura do pico e área sob a curva, para obtenção de parâmetros de energia do material que ajudem a estabelecer limites críticos a partir do qual o material perde sua capacidade de manter as partes que o compõe aderidas.

4.3.3.2 Configuração Experimental do Ensaio

A análise do material via técnica não destrutiva visava submeter a amostra às mesmas condições de esforços internos as quais estaria sujeita no ensaio destrutivo do tipo MMF (Figura 4). Ou seja, a configuração do ensaio tanto destrutivo quanto não destrutivo tinha por objetivo submeter a amostra a esforços simultâneos de tração e cisalhamento a fim de que simulassem os esforços aos quais o conjunto argamassa/cerâmica estaria submetido em uma fachada.

O sinal de excitação mecânica é produzido por um gerador de onda, modelo 33220A, fabricante Agilent. O sinal gerado é amplificado por meio de um amplificador de potência modelo PA-138 (LABWORKS Inc) que o encaminha ao *shaker* (excitador eletromecânico) que, por sua vez, realiza a aplicação da carga oscilatória na amostra. A Figura 15 ilustra o aparato descrito para realização do ensaio.

Devido à maneira como o excitador fica posicionado, foi necessário que a amostra fosse colocada verticalmente e, dessa forma, as configurações de apoio precisaram ser reajustadas a fim de que fosse atendido o critério de esforços internos solicitantes. A Figura 16 ilustra a configuração adotada.

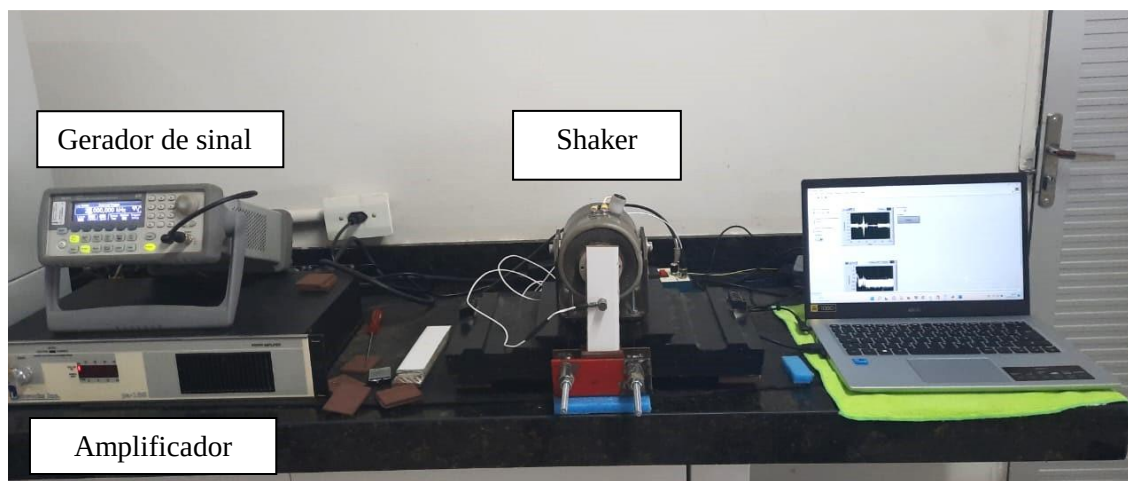


Figura 15 – Equipamentos necessários à produção e aplicação da carga na amostra (Fonte: Autora, 2022).

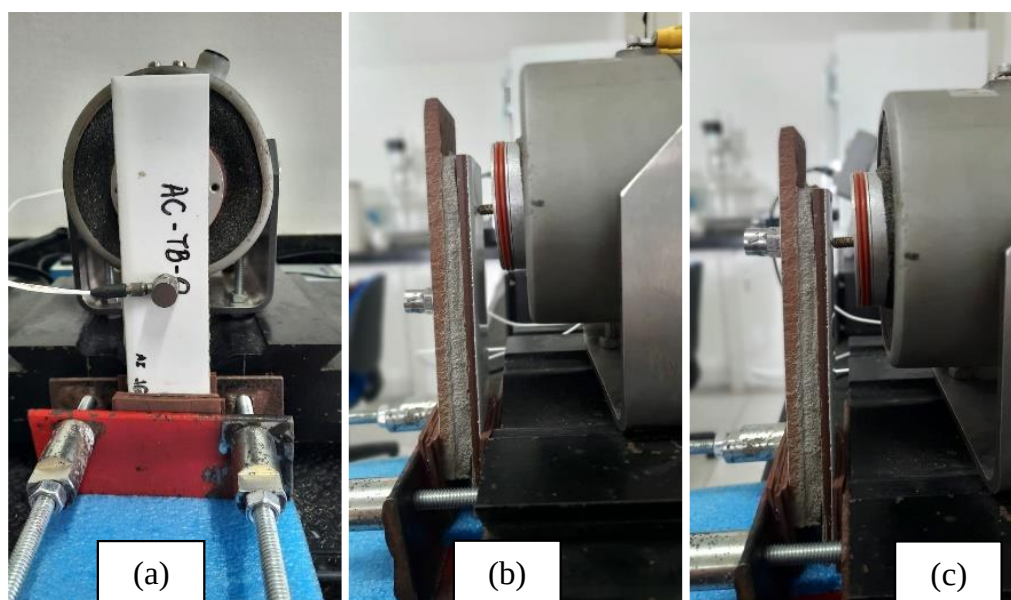


Figura 16 – Configuração de ensaio da amostra tipo sanduíche: (a) detalhe frontal do posicionamento da amostra com acelerômetro centralizado; (b) detalhe lateral do posicionamento; (c) detalhe lateral da amostra com sensor na parte superior (Fonte: Autora, 2022).

Como ilustrado pela Figura 16, foi produzida uma base de apoio metálica em forma de “L”, encaixada por meio de duas barras roscadas, onde a amostra era colocada. O ajuste da posição da amostra em relação ao excitador era feito por meio do aperto manual de duas porcas. Esse aperto foi realizado sempre pelo mesmo operador e sua possível interferência foi avaliada em três níveis, denominados de apertos 1, 2 e 3.

O aperto 1 era realizado nas porcas até que o máximo de rotações suportadas pelo operador fossem realizadas. Os apertos 2 e 3 eram variações do aperto 1, relacionados respectivamente a uma pequena folga e um aperto maior, sendo este último realizado com auxílio de uma chave de boca. A adoção de três tipos de apertos se fez necessário a fim de investigar a possível influência desses apertos sobre os espectros gerados.

A configuração adotada no posicionamento das amostras foi de um arranjo engastado numa extremidade e livre na outra. A excitação era aplicada na extremidade livre e o acelerômetro era fixado junto a amostra em duas posições: centralizado no vão livre (Figura 16a e 16b) ou na parte superior da amostra (Figura 16c). A adoção de duas posições para o sensor foi realizada para investigar se essa mudança afetava as respostas de espectro obtidas durante o ensaio.

Para amenizar as dissipações de energia por atrito do apoio, foram adotados mecanismos amortecedores de placas de EVA, que eram colocadas nas interfaces do apoio metálico com as amostras (Figura 16).

Encaixada a amostra, o excitador ficava posicionado em uma das faces da amostra (na extremidade livre) e o acelerômetro era colocado na face oposta, em duas posições (central ou superior).

O acelerômetro é conectado a um condicionador de sinal que tem como função amplificar o sinal de vibração captado por ele. O sinal de vibração amplificado é encaminhado ao sistema de aquisição de dados que fica conectado a um computador. Os sinais encaminhados ao computador eram visualizados por meio do software NILabVIEW (2021), armazenados e analisados posteriormente através do MATLAB R2022a.

As amostras eram excitadas em uma faixa de frequência entre 100 Hz e 20 kHz. Em cada amostra eram realizadas um conjunto de 10 leituras durante 10s, cada. Cada leitura é resultante de uma frequência de amostragem de 100.000 medidas por segundo, totalizando 1.000.000 de pontos por leitura. Os dados obtidos nas 10 leituras eram lidos por um algoritmo que realiza a Transformada Rápida de Fourier, do qual era obtido o espectro das amostras no domínio da frequência.

4.3.3.3 Tipos de Amostras

Os ensaios foram realizados em três tipos de amostras: placas cerâmicas, argamassas colantes e na amostra sanduíche (cerâmica/argamassa/cerâmica). A Figura 17 apresenta os tipos de amostras mencionadas.

Apesar da pesquisa ter por finalidade investigar a integridade da aderência da interface argamassa/cerâmica, fez-se necessário conhecer isoladamente os espectros dos materiais que compunham o conjunto cerâmica-argamassa, a fim de identificar com clareza quais frequências de ressonância estão associadas a cada um deles e as possíveis alterações do espectro quando se analisa os materiais aderidos.

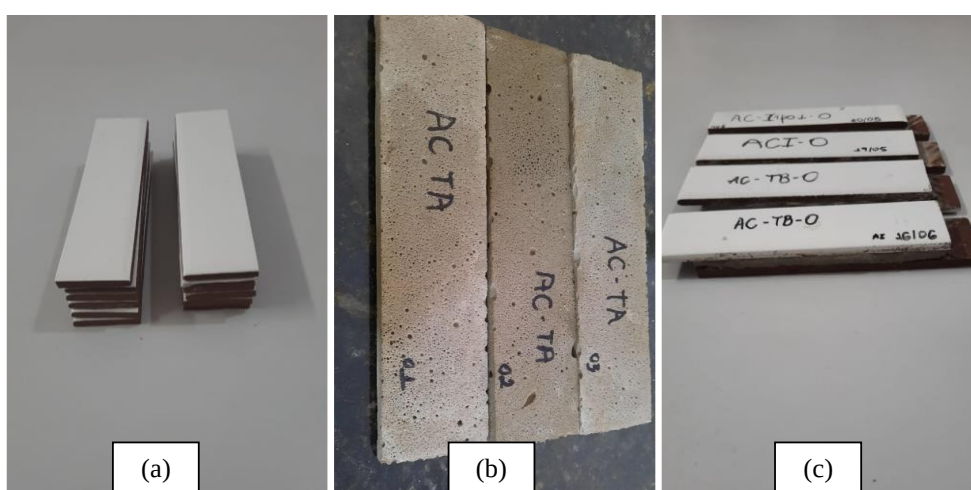


Figura 17 – Tipos de amostras ensaiadas: (a) cerâmica; (b) argamassa colante; (c) amostra sanduíche (Fonte: Autora, 2022).

Para o ensaio piloto não foi realizada inserção do filme de acetato na interface, o filme foi usado somente no ensaio final, nos diferentes tamanhos definidos para o estudo. Essa metodologia foi necessária porque era necessário, primeiramente, conhecer o comportamento da amostra íntegra, a fim de definir seu espectro característico.

Para o teste piloto foram utilizadas um total de 4 amostras sanduíches (duas para cada um dos tipos de argamassa colante), 3 amostras de placas cerâmicas e 6 amostras de argamassa (3 para cada tipo). As amostras cimentícias foram submetidas ao ensaio de frequência de ressonância após 7 dias da sua moldagem, ou seja, foi usada a menor idade dentre as selecionadas para investigação do comportamento do material ao longo da pesquisa.

A Tabela 7 apresenta um fluxograma resumo do estudo que se deu para definição do perfil dinâmico das amostras, bem como a apresentação das variáveis tecnológicas envolvidas no ensaio (tipo de aperto e posição do sensor acelerômetro), cujos efeitos foram investigados.

Tabela 7 – Fluxograma do ensaio piloto de frequência de ressonância para caracterização do perfil das amostras (Fonte: Autora, 2022).

Tipo de Amostra	Réplica	Fissura Prévia	Aperto	Posição Sensor
Sanduíche AC TA	1	0	1	Centralizada
			2	
			3	
	2		1	
			2	
			3	
	1	0	1	Superior
			2	
			3	
2	1			
	2			
	3			
Sanduíche AC TB	1	0	1	Centralizada
			2	
			3	
	2		1	
			2	
			3	
	1	0	1	Superior
			2	
			3	
2	1			
	2			
	3			
Cerâmica	1	0	1	Centralizado
			2	
			3	
	2	1		
		2		
		3		
Cerâmica	1	0	1	Superior
			2	
			3	
	2	1		
		2		
		3		
AC TA	1	0	1	Centralizado
			2	
			3	
	2	1		
		2		
		3		
AC TB	1	0	1	Superior
			2	
			3	
	2	1		
		2		
		3		

Para o teste final, uma vez que a metodologia do ensaio (nível de aperto e posição do acelerômetro) ficou definida, foram produzidas 4 amostras para cada uma das 24 famílias apresentadas na Tabela 3 a fim de se alcançar o objetivo proposto com a pesquisa.

4.3.3.4 Metodologia de Análise dos Dados

Após a realização das medições de ressonância das amostras, os dados armazenados eram analisados no MATLAB R2022a, onde de lá eram obtidos os espectros no domínio do tempo e da frequência. Em seguida, eram extraídas as coordenadas de frequência e amplitude de onda. Essas coordenadas foram organizadas em planilhas do Excel, identificadas por tipo de amostra, aperto e posição do acelerômetro, estes últimos, a depender da fase de ensaio (piloto ou final).

Foi também realizada a análise de pico de cada espectro de frequência por meio software OriginLab2018 para obtenção dos demais parâmetros de interesse, tais como, largura do pico e área sob a curva. O amortecimento foi calculado pelo método de largura de banda, usando as duas informações extraídas da análise de pico: a frequência no ponto máximo da curva e a FWHM (largura do pico a meia altura).

A partir das informações obtidas dos picos de ressonância de todos os espectros, análises estatísticas descritivas (média, desvio padrão, coeficiente de variação) e testes de hipótese estatísticos foram realizadas a fim de investigar o efeito das variáveis tecnológicas do ensaio (posição do sensor e nível de aperto) na fase piloto; e o efeito das variáveis de estudo (fissura, tempo de cura e tipo de AC), na fase final, sobre os parâmetros de onda (frequência, amplitude, largura, amortecimento e área sob a curva) obtidos a partir do espectro.

A avaliação do efeito das variáveis foi feita a partir dos testes de hipótese Mann Whitney e Kruskal-Wallis, pois a análise estatística dos dados envolvia variáveis qualitativas e que não apresentavam distribuição normal.

É importante salientar que testes de hipótese estatísticos foram utilizados, pois eles são capazes de comprovar se as variáveis tecnológicas envolvidas no ensaio causaram diferenças significativas nos valores de frequência, amplitude e demais parâmetros investigados, quando elas eram alteradas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES - PARTE 1

5.1 Caracterização dos Materiais

5.1.1 Ensaio de Absorção, Porosidade e Densidade Aparente das Placas Cerâmicas

A Tabela 8 apresenta os resultados do ensaio de absorção, porosidade e densidade aparente realizados em 5 amostras cerâmicas, conforme especificado pela norma NBR ISO 10545-3:2020.

Tabela 8 – Valores de absorção (Abs), porosidade (P) e densidade aparente (D) do revestimento cerâmico usado na pesquisa (Fonte: Autora, 2022).

Peça (7x13cm)	Peso Seco (g)	P. Submerso (g)	P. Saturado (g)	Abs (%)	P(%)	D(g/cm³)
1	122,63	70,66	123,53	0,73	1,70	2,32
2	130,14	74,95	130,8	0,51	1,18	2,33
3	132,49	76,33	133,01	0,39	0,92	2,34
4	120,43	69,48	121,31	0,73	1,70	2,32
5	123,97	71,75	125,76	1,44	3,31	2,30
Média				0,76	1,76	2,32

Os resultados apresentados mostram que o material cerâmico analisado apresenta uma taxa de absorção de 0,76%, se enquadrando, de acordo com a NBR ISO13006:2020, no grupo BIa, cuja faixa de absorção está situada entre 0,5 e 3% classificando-a como um produto do tipo grês.

De acordo com a NBR 13755:2017, as placas ou pastilhas cerâmicas usadas em revestimentos de fachadas não devem exceder 6% de taxa de absorção, enquadrando a cerâmica usada na pesquisa como um produto apropriado para uso em revestimentos externos de fachadas.

É importante salientar, que como a classificação alcançada divergiu da classificação do fabricante, um novo ensaio foi feito, com as mesmas placas usadas no ensaio anterior, confirmando os valores apresentados na Tabela 8.

5.1.2 Análise Química da Cerâmica

A Tabela 9 apresenta a composição química presente nas matérias primas utilizadas na produção da cerâmica usada na pesquisa.

Tabela 9– Compostos químicos presentes na matéria prima da massa cerâmica (Fonte: Cerâmica Elizabeth, 2022).

Matéria Prima	Compostos Químicos									
	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	Perda ao Fogo (%)
Sienito 1	70,6	17,08	1,75	1,19	0,38	0,22	3,94	3,5	0,17	1,18
Sienito 2	60,59	15,67	4,7	2,37	2,37	0,24	5,9	6,6	0,87	0,69
Mataraca	66,5	20,63	1,08	0,68	0,19	0,22	0,08	0,33	1,57	8,73
Argila	60,9	17,75	6,45	0,76	1,17	0,23	0,58	2,08	0,81	9,27
Filito 1	62,73	17,09	5,51	1,15	1,43	0,21	2,21	3,66	0,84	5,2
Filito 2	64,12	17,78	4,21	0,76	0,93	0,21	1,29	3,52	0,55	6,64
Filito 3	56,62	13,71	9,93	3,6	3,2	0,11	2,5	2,32	2,34	3,8
Retraco Moído de Porcelanato	65,55	17,82	0,96	1,99	1,19	0,24	1,42	2,85	0,25	7,73
Dolomita	15,33	3,8	0,63	28,24	10,63	0,24	0,31	0,51	0,1	40,2

As matérias primas da massa cerâmica são argila e outros materiais não argilosos como o sienito (rico em feldspato) e filito (rico em quartzo e caulinita), estes últimos usados como fundente na massa cerâmica. A massa é constituída basicamente por óxidos, sendo 90% deles os óxidos de silício, alumínio, ferro e cálcio.

5.1.3 Ensaio Mecânico da Argamassa Colante

Os resultados mecânicos das argamassas colantes (tempo em aberto e resistência a aderência à tração) e o ensaio de deslizamento estão apresentados nas Tabelas 10 e 11. Os resultados foram obtidos a partir da análise de 10 amostras.

Tabela 10 – Ensaio de Caracterização da Argamassa Colante Tipo A (ACTA) (Fonte: Autora, 2023).

Requisitos		Método de Ensaio	Unidade	Critério de aceitação ACI	Resultado
Tempo em aberto		NBR 14081-3	min	≥ 15	≥ 15
Resistência de aderência à tração aos 28 dias, em função dos tipos de cura	Cura normal	NBR 14081-4	MPa	≥ 0,5	0,5
	Cura submersa			≥ 0,5	0,63
Deslizamento		NBR 14081-5	mm	≤ 2	0,8

Tabela 11 – Ensaio de Caracterização da Argamassa Colante Tipo B (ACTB) (Fonte: Autora, 2023).

Requisitos	Método de Ensaio	Unidade	Critério de aceitação		Resultado
			ACII	ACIII	
Tempo em aberto	NBR 14081-3	min	≥ 20	≥ 20	≥ 20
Resistência de aderência à tração aos 28 dias, em função dos tipos de cura	Cura normal	MPa	≥ 0,5	≥ 1,0	1,0
	Cura submersa		≥ 0,5	≥ 1,0	0,6
	Cura em estufa		≥ 0,5	≥ 1,0	0,7
Deslizamento	NBR 14081-5	mm	≤ 2	≤ 2	0,8

De acordo com os requisitos estabelecidos pela NBR 14081-1/2012: Argamassa Colante Industrializada para Assentamento de Placas Cerâmicas – Requisitos, a argamassa ora nomeada ACTA, atende aos requisitos estabelecidos para uma ACI, sendo caracterizada

como um adesivo com menores quantidades de cimento e aditivos e indicadas, portanto, para aplicações de revestimentos internos. Essa classificação está em conformidade com as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante da argamassa. Entretanto, os resultados da Tabela 11, da argamassa nomeada ACTB, vai de encontro as especificações do fabricante, que enquadra seu produto como uma ACIII. O produto analisado, porém, não atendeu aos valores mínimos estabelecidos por dois dentre os cinco critérios exigidos pela norma. Sua classificação mais adequada, portanto, seria de uma ACII.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES - PARTE 2

5.2 Análise da Aderência sob Carregamento Estático (Ensaio de Modo Misto)

A fim de melhor compreender os resultados apresentados a seguir, se fez necessário esquematizar a curva de ensaio obtida (Figura 18) e dividi-la em estágios.

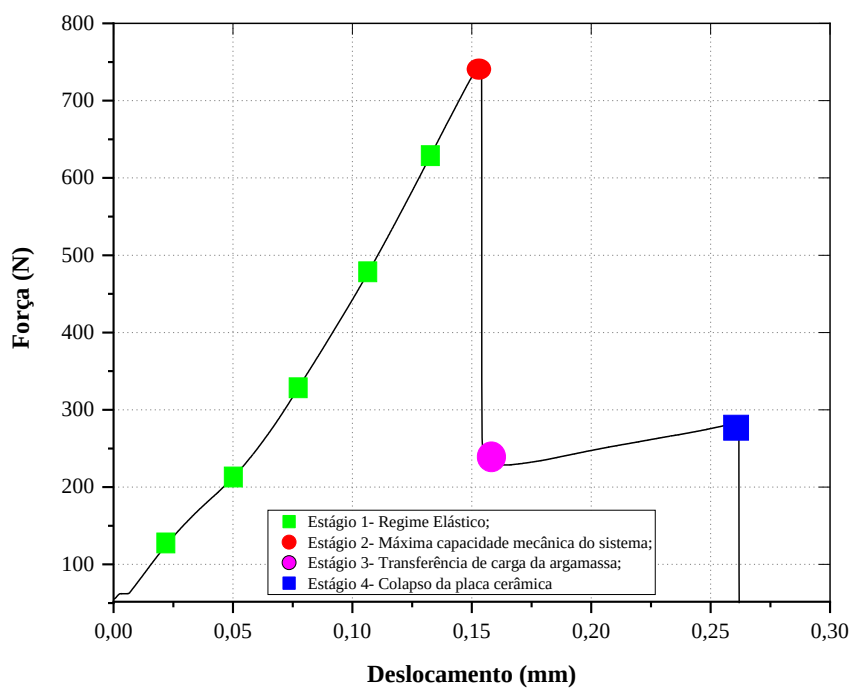


Figura 18 – Esquematização da curva MMF das amostras sanduíche (Fonte: Autora, 2023).

O estágio 1, nomeado de regime elástico, é o estágio caracterizado pelo aumento da força aplicada necessária para provocar o deslocamento da amostra. Nesse trecho, a curva se aproxima de uma reta, caracterizando um comportamento linear até alcançar o ponto crítico. Durante esse estágio é observado um aumento da rigidez do material, a qual é especialmente dominada pela rigidez da argamassa.

No estágio 2, o sistema colado chega ao seu limite máximo de resistência aos esforços simultâneos, havendo, a partir daí, a perda de resistência que é mostrada pelo trecho em declive entre os estágios 2 e 3. Nesse trecho, ocorre a propagação da fissura, provocando a ruptura da ligação entre os dois materiais em contato, o que faz a força cair bruscamente.

O estágio 3 é o ponto onde acontece a transferência de capacidade de carga da argamassa para a placa cerâmica, ocorrendo, a partir daí, a estabilização da rigidez da amostra por meio do suporte mecânico da cerâmica.

O estágio 4 marca o fim do ensaio em razão do colapso da cerâmica.

A Figura 19 mostra um comparativo das curvas MMF feita com as amostras sanduíches e o mesmo ensaio feito com 2 placas cerâmicas com junta seca.

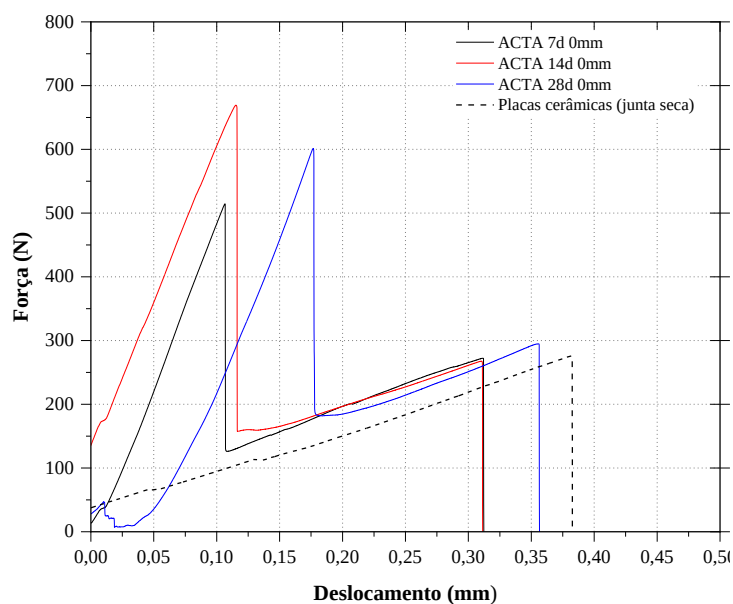


Figura 19 – Comparativo das curvas MMF entre amostras sanduíches e placas cerâmicas (Fonte: Autora, 2023).

Uma análise comparativa entre as curvas dos dois tipos de amostras aponta que a curva MMF das placas cerâmicas (sem argamassa) coincide com a parte inferior da curva das amostras sanduíche, ou seja, o trecho entre o estágio 3 e o final do estágio 4. A partir da análise destas curvas pode-se considerar que:

1. O início da curva das amostras sanduíches (Estágio 1) é dominada pelo comportamento do adesivo, ou seja, a resistência oferecida pelo material (nesse trecho) vem predominantemente da rigidez da argamassa colante;
2. O trecho entre os pontos 2 e 3, marca a ruptura da ligação entre a argamassa e a placa cerâmica em razão da propagação do dano;
3. A partir do ponto 3, a capacidade mecânica da amostra é marcadamente dominada pela cerâmica, ocorrendo nesse ponto a transferência de capacidade de carga da argamassa para a placa;
4. No ponto 4, o colapso ocorrido relaciona-se com a ruptura da placa.

Os resultados apresentados a seguir das curvas MMF, das diferentes famílias de estudo, foi dividido em função das variáveis consideradas: idade, tamanho da fissura e tipo de argamassa colante (AC). No entanto, com vistas a promover a melhor visualização das

curvas, foi utilizada apenas uma curva representativa de cada grupo de estudo. Ainda assim, é importante ressaltar, que para discussão dos resultados todas as amostras foram consideradas. Foram realizados testes estatísticos para avaliar os efeitos das variáveis (tamanho de trinca, tempo de cura e tipo de argamassa) nos resultados do ensaio. As Figuras 22 e 23 trazem as médias e o desvio padrão das cargas máximas de todas as amostras ensaiadas.

5.2.1 Influência do Tamanho da Pré-Fissura

As Figuras 20 e 21 apresentam os resultados do teste de propagação de fissura em função do tamanho da fissura, para os dois tipos de argamassa em estudo.

Ao analisar o comportamento das amostras sanduíche apresentado nas Figuras 20 e 21, percebe-se que os maiores valores de carga máxima são das amostras sem a presença de fissura prévia. Ao introduzir a fissura nas amostras, a força máxima resistida pelo material (Estágio 2) cai abruptamente, já a partir da fissura de 15mm.

Nas Figuras 20 e 21, verifica-se que o trecho compreendido entre os estágios 2 e 3 apresentou um menor comprimento à medida que se aumentou o tamanho da fissura previamente inserida nas amostras. Essa redução do comprimento do trecho considerado, reflete a rápida transferência de carga da argamassa para a placa cerâmica em função da rápida propagação da fissura ocorrida no material adesivo.

Em contrapartida, a região compreendida entre os pontos dos estágios 3 e 4 se torna maior à medida que é aumentada a extensão da fissura prévia. Nessa região, o suporte de carga é predominantemente realizado pela placa cerâmica em razão da propagação do dano na argamassa, evidenciando que quanto maior a extensão do dano, mais rapidamente ocorre a perda de aderência do conjunto, prejudicando sua resistência mecânica.

As Figuras 20 e 21 também evidenciam que a ruptura ocorrente no estágio 4, ocorre sempre em um mesmo nível de deslocamento suportado pela amostra, independentemente do nível de fissuração da argamassa colante, uma vez que a argamassa já não mais contribui com o suporte mecânico da amostra, marcando o fim do ensaio em razão do colapso da placa cerâmica.

Para verificação do efeito do tamanho da fissura sobre a força máxima alcançada nas amostras, resolveu-se realizar o teste de diferenças estatísticas entre os grupos (teste de Kruskal-Wallis), seguido do teste de comparação múltipla Conover-Iman. As Figuras 22 e 23 apresentam o resultado dos testes e a redução da capacidade de carga em relação as amostras íntegras, em função do tamanho da fissura em diferentes idades.

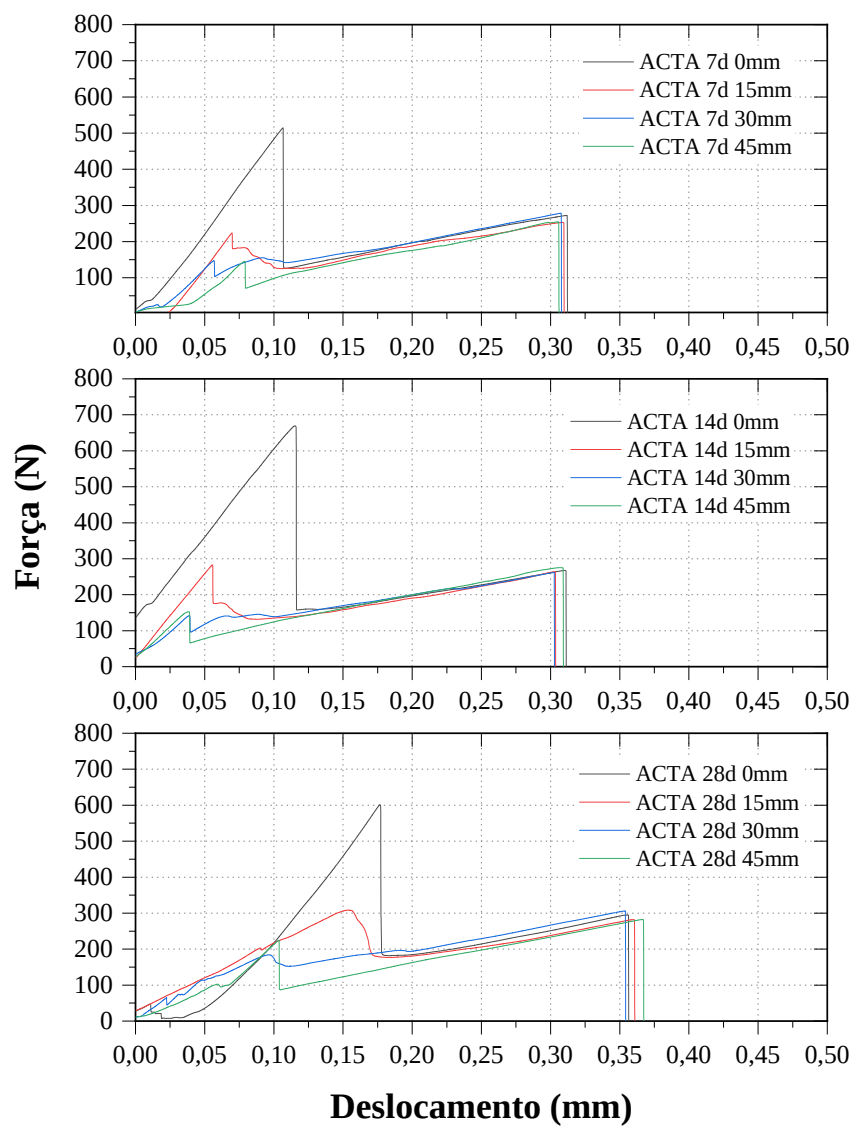


Figura 20 – Curvas MMF da argamassa ACTA em função dos tamanhos de fissura em diferentes idades (Fonte: Autora, 2023).

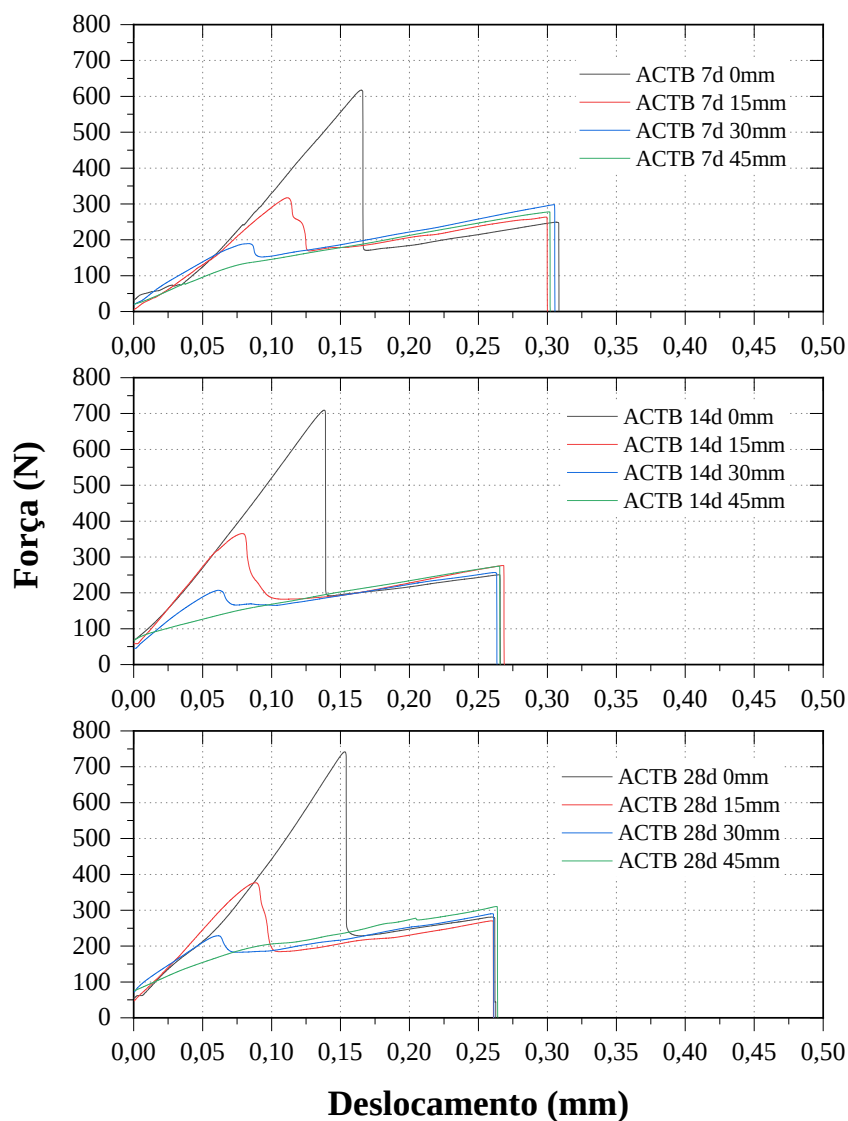


Figura 21 – Curvas MMF da argamassa ACTB em função dos tamanhos de fissura em diferentes idades (Fonte: Autora, 2023).

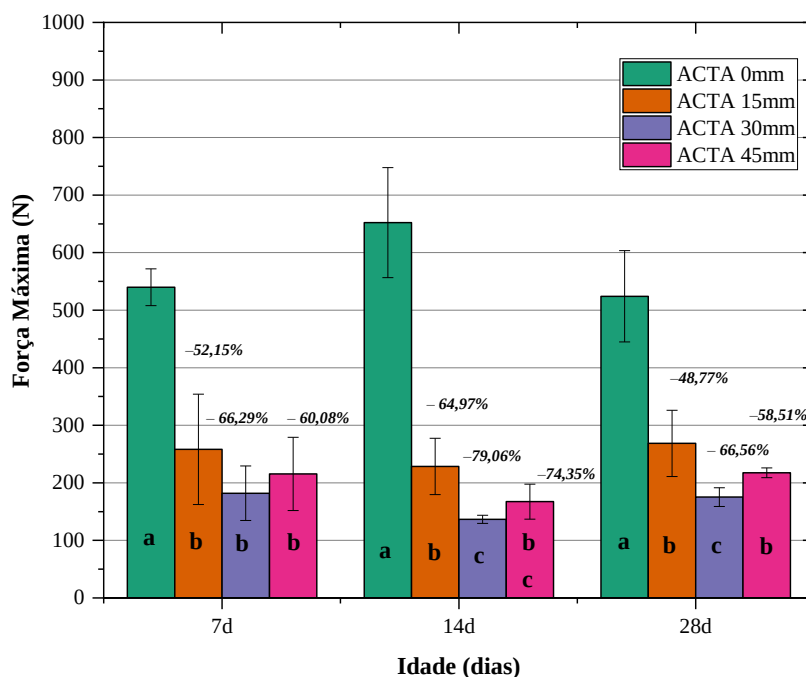


Figura 22 – Efeito da fissura sobre a força máxima das amostras com ACTA em diferentes tempos de cura. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora, 2023).

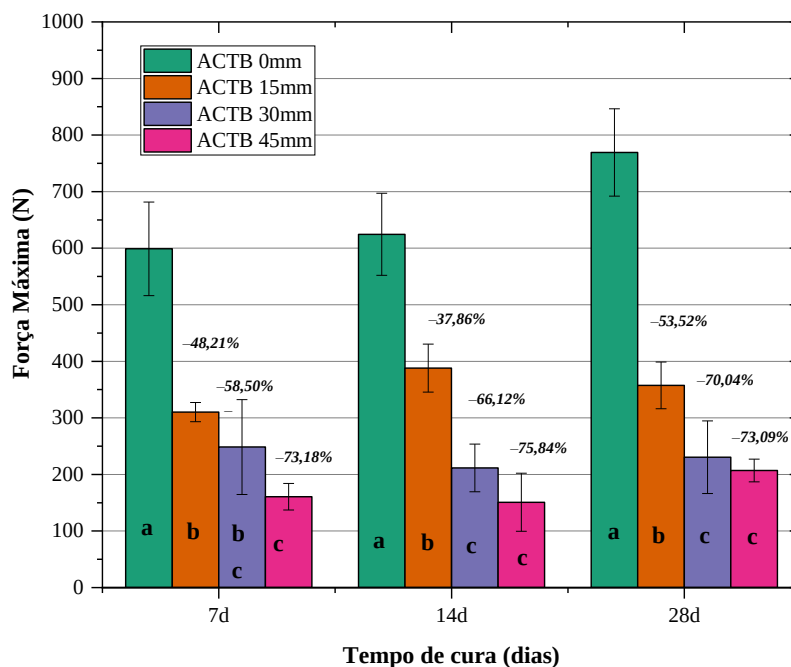


Figura 23 – Efeito da fissura sobre a força máxima das amostras com ACTB em diferentes tempos de cura. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora, 2023).

O primeiro teste estatístico mostrou existir significância da variável tamanho de fissura sobre o parâmetro força máxima resistida ($p\text{-valor} < 0,0000$), indicando que a probabilidade de que esses valores sejam diferentes entre os diferentes tamanhos de fissura adotados é de 100%. Sendo assim, o segundo teste foi aplicado para se descobrir em qual ou em quais tamanhos de fissura isso ocorria. Os resultados estão expressos através das letras no interior das barras. A mesma letra no interior das barras denota grupos homogêneos.

A partir dos resultados das Figuras 22 e 23 é verificado que ao menor tamanho de fissura (15mm), a redução da capacidade de carga da amostra fica perceptível, causando redução significativa em seu valor.

A existência de uma fissura de 15mm, correspondente a uma perda de contato de 12,5%, gerou uma redução da força máxima suportada pelo conjunto argamassa-cerâmica de aproximadamente 50% em relação a amostra referência (sem fissura), para ambos os tipos de argamassa com idade de 28 dias.

Os valores apresentados aqui se assemelham com os obtidos por Silva (2018), cujas argamassas estudadas obtiveram perdas de 44,2% e 51,4%, respectivamente, para ACII e ACIII, com falha de contato de 20mm.

Quando se aumentou o tamanho da fissura para 30mm, dobrando a perda de contato, a capacidade de carga cai, aos 28 dias, aproximadamente 70% em relação a amostra referência. Esse percentual de perda se mantém o mesmo nas amostras de ACTB mesmo com o aumento da perda de contato (fissura de 45mm).

Essa redução expressiva da capacidade de carga das amostras demonstra o elevado efeito concentrador de tensões que a existência de falhas na região de interface exerce já nos estágios iniciais de carregamento. Isso também revela a importância de se garantir que as condições do substrato sejam as melhores possíveis, pois o ganho de aderência só será efetivo se a argamassa colante recobrir toda a superfície. Tudo isso reforça a premissa de que o contato entre as superfícies é determinante na intensidade das ligações existentes na interface, uma vez que a folha de acetato, que simulou a existência da fissura, foi posicionada justamente na interface argamassa-cerâmica, interferindo diretamente na aderência entre eles.

5.2.2 Influência do Tempo de Cura

As Figuras 24 e 25 apresentam os resultados do teste de propagação de fissura no modo misto (MMF) em função da idade de moldagem, para os dois tipos de argamassa em estudo.

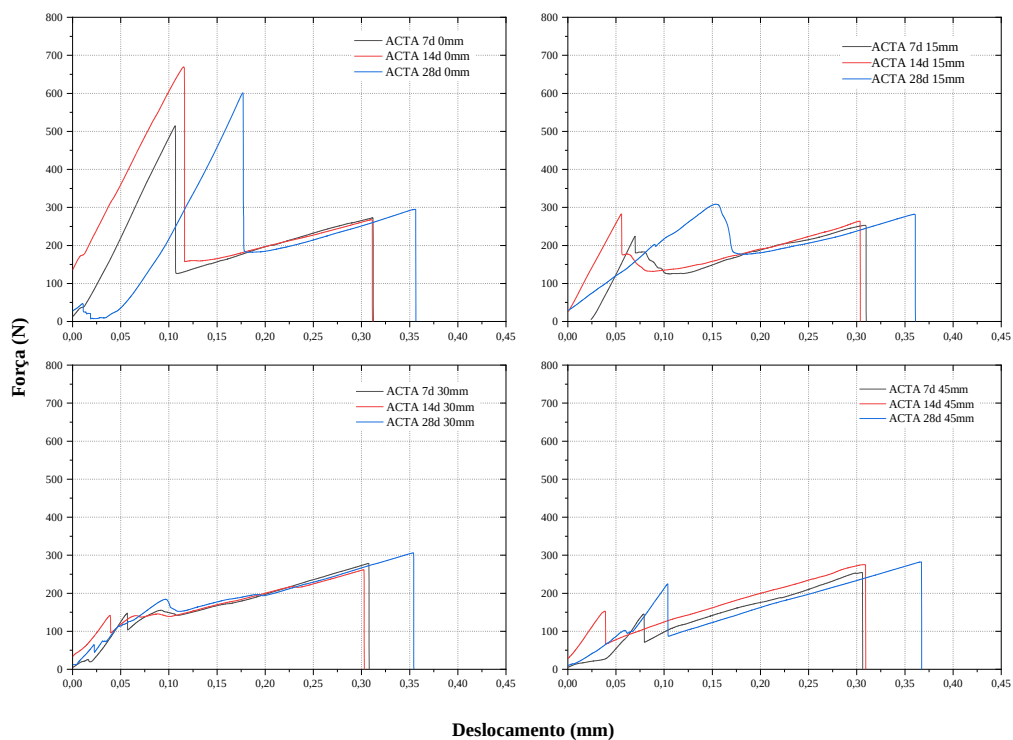


Figura 24 – Curvas MMF da argamassa ACTA em função da idade para os diferentes tamanhos de fissura (Fonte: Autora, 2023).

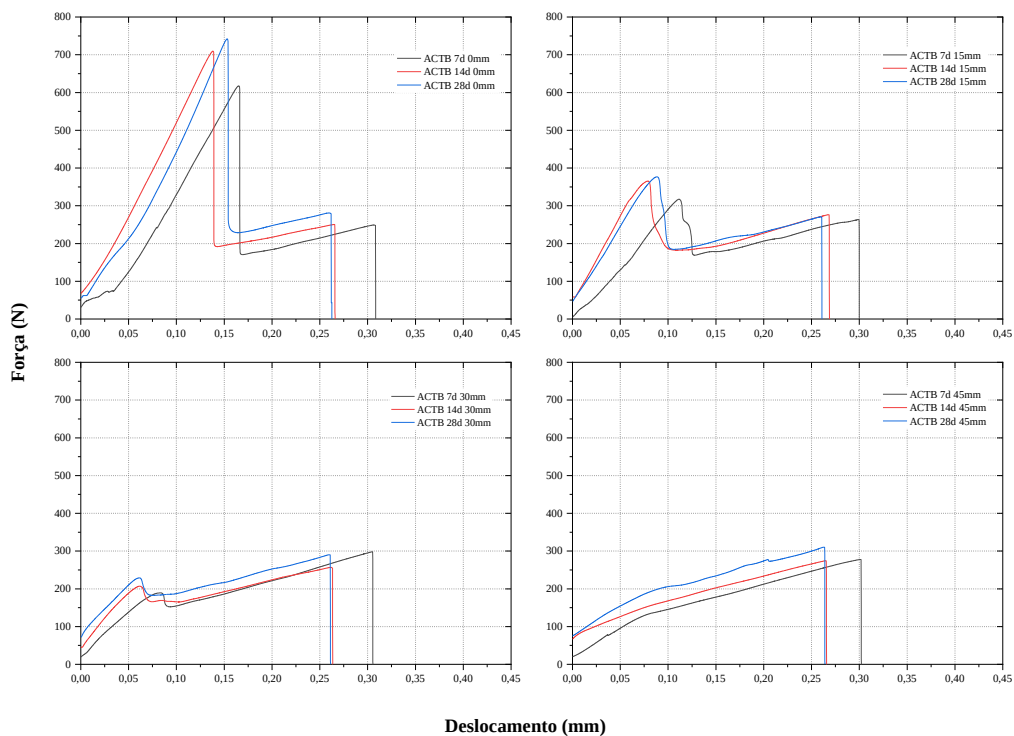


Figura 25 – Curvas MMF da argamassa ACTB em função da idade para os diferentes tamanhos de fissura (Fonte: Autora, 2023).

O comportamento das amostras sanduíche apresentado nas Figuras 24 e 25 parece indicar que a força máxima alcançada no estágio 2 é levemente aumentada em função da idade. A maior diferença ocorre nas amostras com ACTB, sem fissura prévia, quando se avança da idade de 7 para 28 dias.

Para verificação do efeito idade sobre a força máxima alcançada nas amostras, resolveu-se realizar os mesmos testes estatísticos (Kruskal-Wallis e Conover-Iman). As Figuras 26 e 27 apresentam o resultado dos testes. A mesma letra no interior das barras denota grupos homogêneos.

O resultado da análise estatística mostrou que as diferenças observadas nas curvas representativas, em razão do tempo de cura, não tiveram significância ($p\text{-valor} = 0,65$). Ou seja, as pequenas diferenças entre as forças, percebida nas Figuras 24 e 25 encontram-se dentro do desvio padrão representativo da média das amostras.

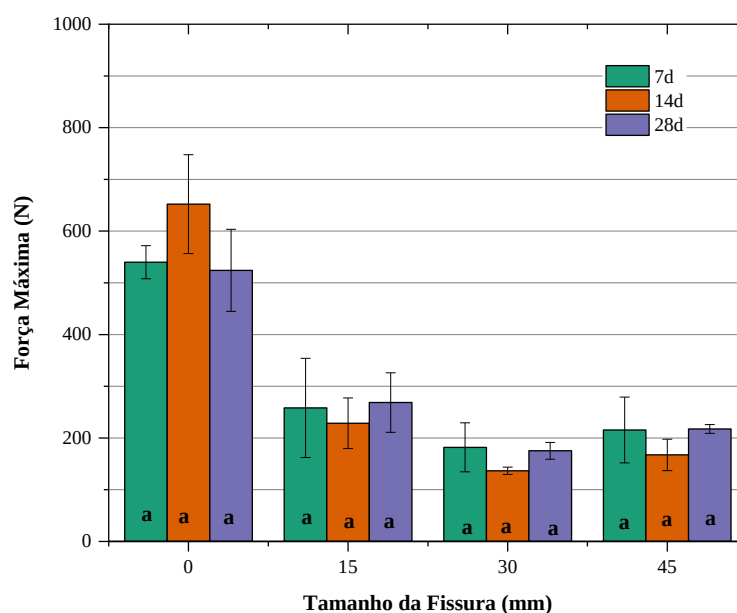


Figura 26 – Efeito da idade sobre a força máxima das amostras com ACTA nos diferentes tamanhos de fissura. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora, 2023).

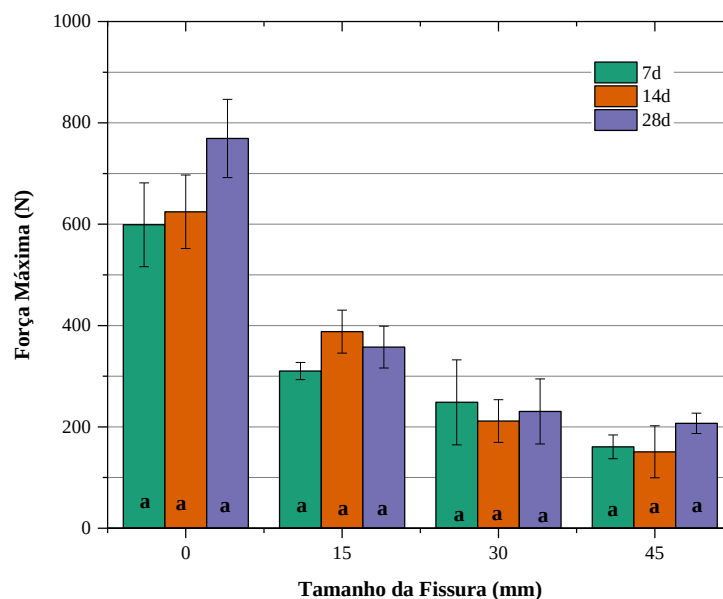


Figura 27 – Efeito da idade sobre a força máxima das amostras com ACTB nos diferentes tamanhos de fissura. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman (p -valor < 0,05), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos (Fonte: Autora, 2023).

Um ponto que merece atenção é o formato da curva das amostras de ACTB 45mm, que se assemelha ao triângulo da curva das placas cerâmicas de junta seca. Esse formato dificultava a identificação do valor da força máxima do estágio 1. Para resolver essa dificuldade, implementou-se o uso de derivadas dos pontos da curva, como ferramenta para auxiliar na identificação desse valor. O item 5.2.4 descreve como a ferramenta foi aplicada e os resultados encontrados.

Uma justificativa para essa mudança do formato da curva pode ser encontrada no tamanho da fissura, que corresponde a quase 40% do vão (considerando a região entre os apoios que está sujeito aos esforços), o que enfraquece a ligação argamassa-cerâmica, deixando a região de domínio da cerâmica (Estágio 3-4) maior, à medida que se aumentou o tamanho da fissura.

Estudos realizados por Carraro et al. (2013), que avaliaram a dependência da mistura dos modos de propagação sobre a propagação do dano, revelaram que nos ensaios de modo misto, as curvas de propagação dos corpos de prova apresentaram uma resposta que, a depender da contribuição de cada modo (I e II), o comportamento da curva mudava gradativamente do DCB (modo puro I) para ENF (modo puro II). Para uma contribuição de mistura de modos igual a 0,52, ou seja, praticamente modo I e II contribuindo igualmente

sob a amostra, o formato da curva dos autores se assemelhou muito com o formato obtido nas amostras ACTA 0mm e ACTB 0mm. Já para uma mistura de modos de 0,75 (mais contribuição do modo II), a curva dos autores apresentou o formato semelhante ao da ACTB 45mm.

Ou seja, a partir do estudo de Carraro et al (2013) é possível concluir que nos testes realizados com as amostras deste estudo, o tamanho da fissura influenciou na contribuição da mistura de modos, justificando a alteração gradativa ocorrida na resposta dos ensaios, sendo esta mais evidente nas amostras de ACTB 45mm.

5.2.3 Influência do Tipo de Argamassa Colante

A Figura 28 apresenta os resultados do ensaio MMF em função do tipo de argamassa colante. A análise das curvas representativas parece indicar que a argamassa ACTB apresenta desempenho mecânico levemente superior à ACTA, para todas as idades avaliadas.

No entanto, quando se leva em consideração os valores de carga de todas as amostras, a aplicação do teste estatístico de Mann-Whitney, usado quando se quer comparar dois grupos de amostras independentes (ACTA e ACTB), indicou um $p\text{-valor} > 0,05$, o que significa que a hipótese de igualdade entre as médias dos valores deve ser aceita, ou seja, é muito mais provável que o desempenho mecânico das duas argamassas seja igual.

Outra análise necessária é o comparativo dos valores de carga máxima das amostras sem fissura, entre os ensaios de aderência à tração direta e o modo misto. A Tabela 12 traz os valores para comparação.

Tabela 12 – Ensaio de tração direta *versus* MMF (Fonte: Autora, 2023).

	Força Máxima (N)	
	NBR 14081 - Cura normal	MMF
ACTA 0	1231,8	524,17
ACTB 0	2386,4	769,25

Os valores apresentados na Tabela 12 mostram que a força máxima, obtida no ensaio tradicionalmente utilizado para medir a resistência de aderência, é significativamente maior que os valores de força máxima obtidos através do ensaio de modo misto. Essa discrepância, que chegou a ser de 2 e 3 vezes maior, para as amostras de ACTA e ACTB, respectivamente, pode ser explicada pela sujeição das amostras sanduíches a ação simultânea dos esforços de tração e cisalhamento, o que não ocorre no ensaio normatizado pela NBR 14081.

Sabendo-se que nos revestimentos ocorrem tanto tensões de tração quanto de cisalhamento, é possível afirmar, para este estudo, que o ensaio de aderência sob tração pura superestimou o desempenho mecânico das argamassas colantes. Resultado similar foi observado na pesquisa de Silva (2018).

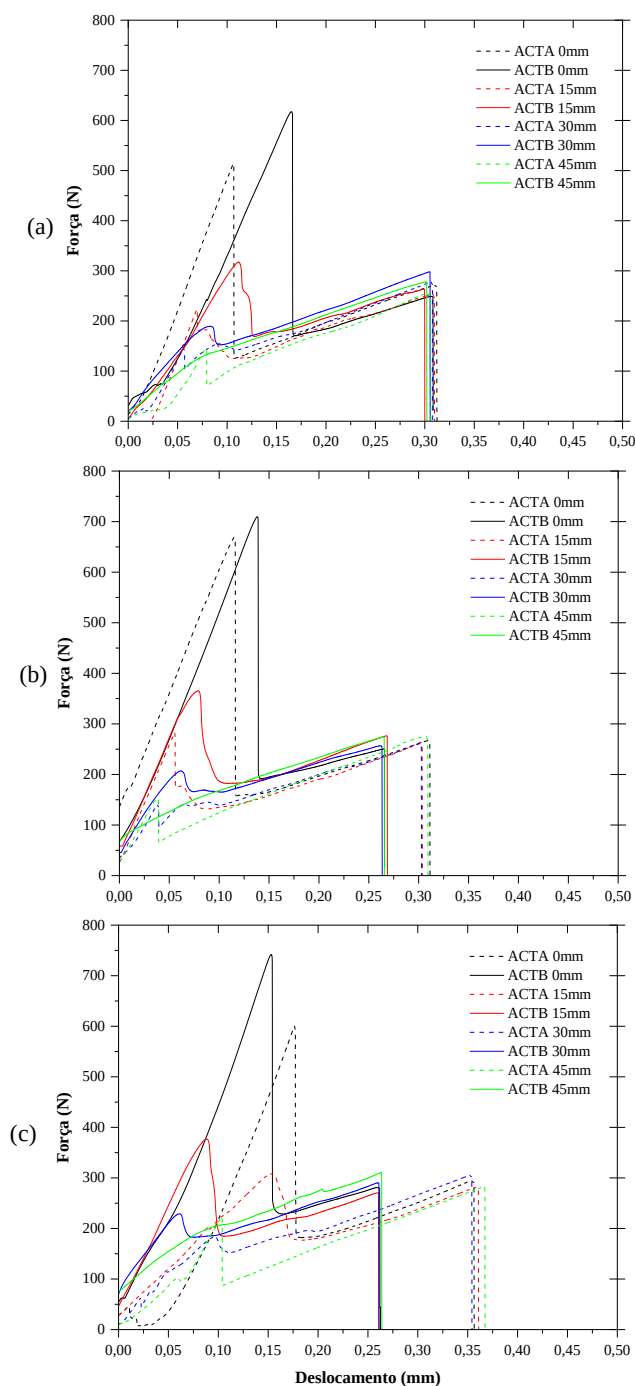


Figura 28 – Curvas de propagação de fissura em função do tipo de argamassa colante, para os diferentes tamanhos de fissura prévia: (a) 7dias, (b) 14 dias, (c) 28dias (Fonte: Autora, 2023).

5.2.4 Determinação da Força Máxima das Curvas ACTB 45mm

Durante a análise e tratamento dos resultados obtidos com o ensaio MMF, verificou-se que a curva ACTB 45mm possuía um formato diferente das demais, que dificultava a obtenção do valor da força máxima do conjunto argamassa/cerâmica. O valor da força máxima era definido como sendo o primeiro ponto da curva em que uma mudança de direção (ascendente/descendente) era visível.

Então, para as curvas ACTB 45mm, resolveu-se obter a primeira derivada para cada ponto da curva, plotar o gráfico com os valores dessas derivadas em função dos deslocamentos e assim identificar para qual valor de deslocamento, o primeiro ponto de mudança de direção ocorria. Com o valor do deslocamento, encontrava-se na curva MMF, o valor da força correspondente. O cálculo das derivadas foi obtido com o uso do software Origin e as Figuras 29 e 30 apresentam as curvas de derivadas obtidas para uma amostra de ACTB 0mm (referência) e ACTB 45mm, aos 28 dias.

Uma análise da Figura 30, tomada como referência, revela que o ponto de $F_{\text{máx}}$ do conjunto argamassa/cerâmica (Estágio 2) coincide, em $x \approx 0,15\text{mm}$, com o trecho de mudança do sinal dos valores da derivada primeira (Fig. 29(b)). A mudança de sinal na curva de derivadas (de valores positivos para negativos) diz respeito a uma alteração na curva MMF, de um intervalo crescente para um decrescente, ou seja, um ponto de máximo relativo na curva da Figura 29(a). Essa região, entre os estágios 2 e 3 na curva MMF, é marcada por uma queda abrupta da resistência da amostra ensaiada e ressaltada, na Figura 29(b), por uma ruptura da curva de derivadas. Logo após essa ruptura, segue-se um trecho de valores de derivadas aproximadamente constante (trecho horizontal), o qual coincide com a região entre os estágios 3 e 4 da Figura 29(a). Esse comportamento foi observado em todas as curvas de derivadas plotadas para essa análise.

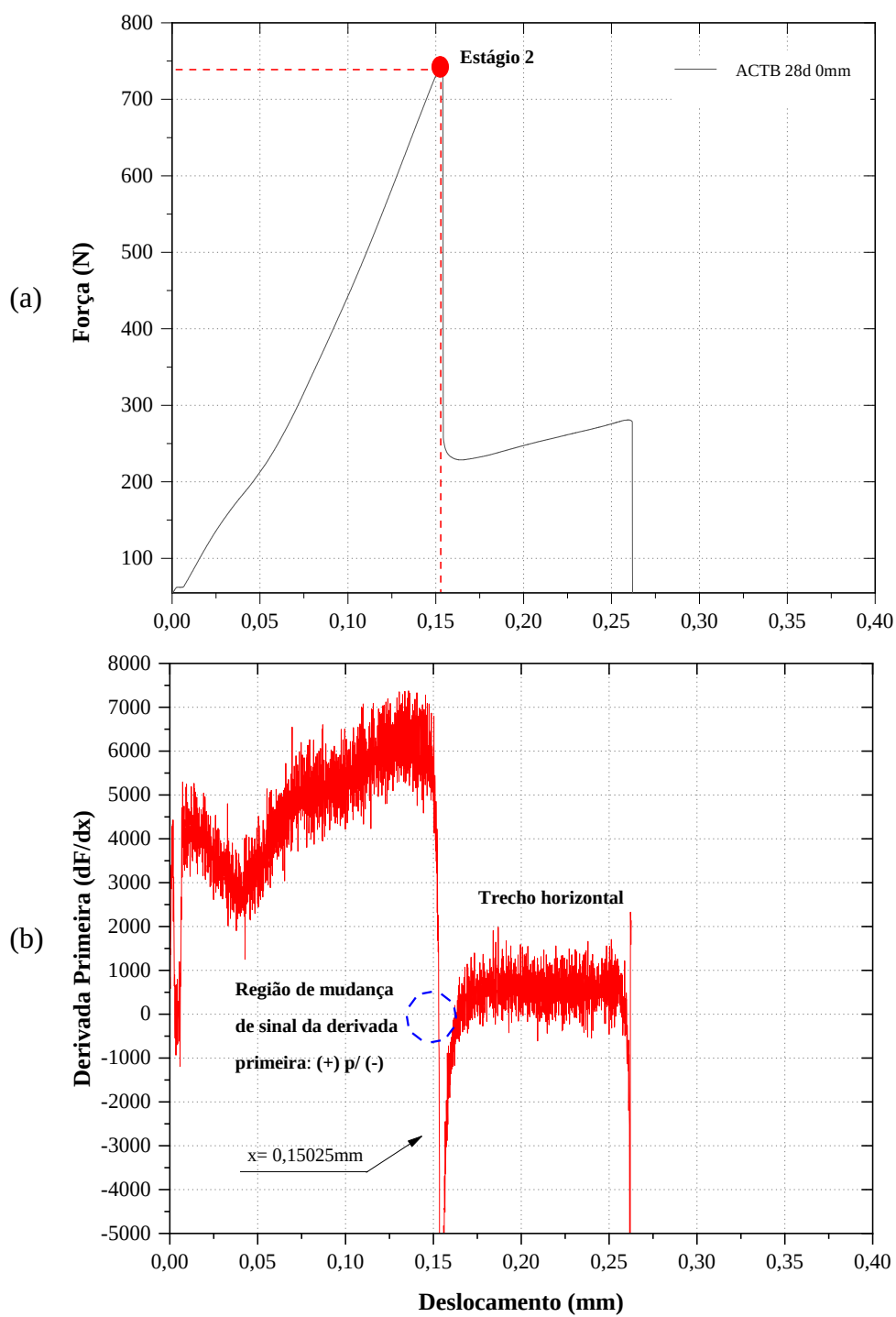


Figura 29 – Curvas ACTB 28d 0mm: (a) Força x deslocamento; (b) Derivada primeira versus deslocamento (Fonte: Autora, 2023).

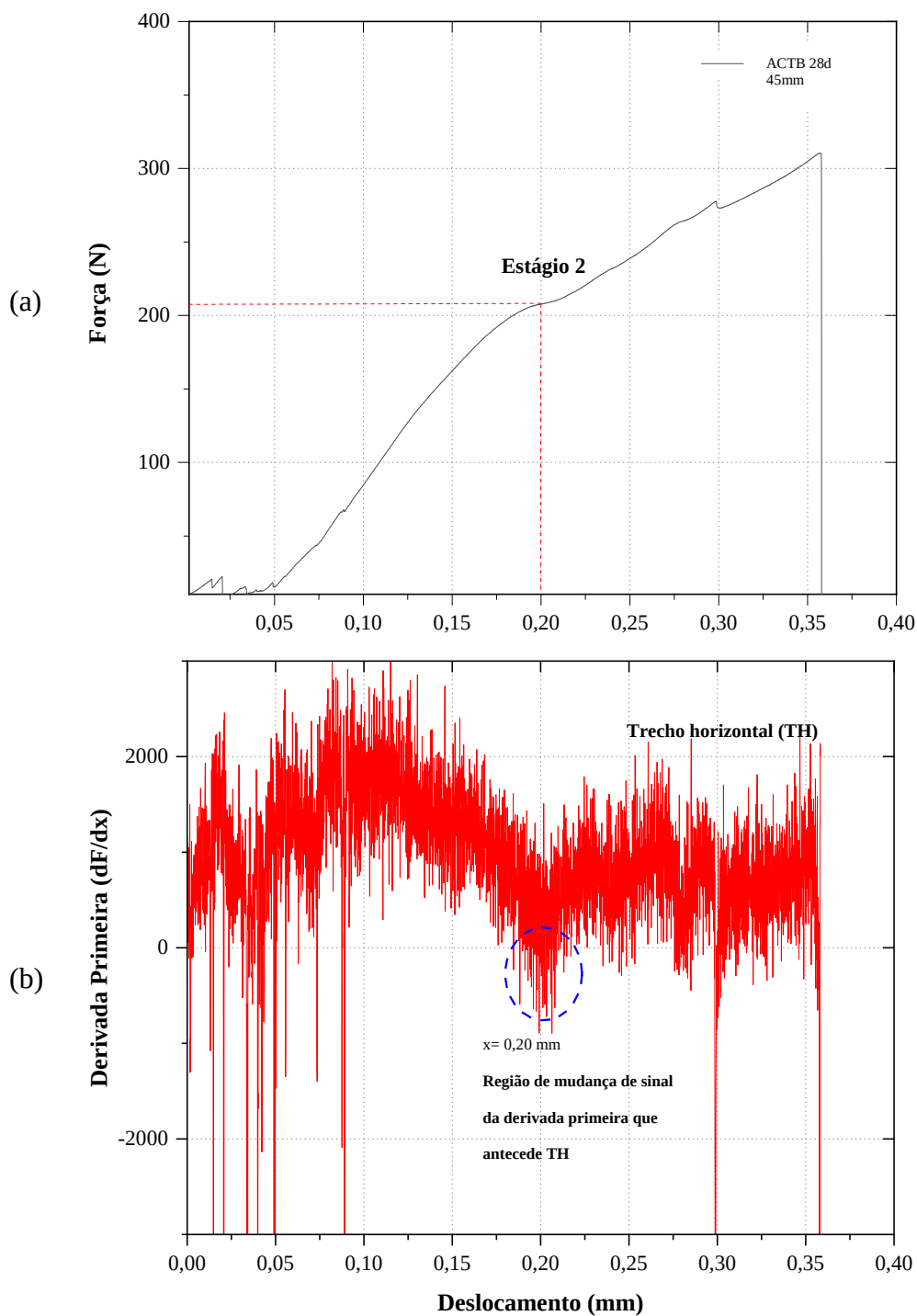


Figura 30 – Curvas ACTB 28d 45mm: (a) Força x deslocamento; (b) Derivada primeira x deslocamento (Fonte: Autora, 2023).

A partir das observações realizadas, resolveu-se considerar que o ponto de $F_{\text{máx}}$ das curvas de ACTB 45mm deveria ser aquele em que: (1) na curva de derivadas houvesse a alteração do sinal; (2) acompanhado dessa mudança, houvesse o trecho de curva horizontal.

A metodologia adotada encontra-se ilustrada na Figura 30 e foi adotada para determinar o valor de $F_{m\acute{a}x}$ das amostras de ACTB 45mm.

Uma observação minuciosa das Figuras 29 e 30 permite a discussão de alguns pontos:

1. O trecho de valores positivos de derivadas nas Figuras 29(b) e 30(b) corresponde a um intervalo crescente da curva MMF, refletindo a resposta da amostra à imposição da carga que lhe é sujeita, ou seja, período em que a rigidez da amostra está aumentando. Esse trecho correspondente ao Estágio 1 da curva MMF, em que a argamassa absorve os esforços solicitantes e atinge seu limite no Estágio 2 ($F_{m\acute{a}x}$);
2. A região onde há mudança de sinal nas Figuras 29(b) e 30(b), passando para valores negativos da derivada, corresponde a uma alteração na curva MMF para um intervalo em que os valores de força decaíam, indicando o momento em que a argamassa perde sua rigidez em razão da propagação da fissura. Corresponde ao intervalo entre os estágios 2 e 3 da curva MMF.
3. Após a ruptura da argamassa, a curva de derivadas apresenta um trecho de valores muito próximos, positivos, se estabilizando. É o trecho horizontal (TH) da curva, destacado nas Figuras 29(b) e 30(b). Essa estabilização dos valores é alcançada por meio da rigidez da cerâmica que, neste momento, assume o suporte mecânico da amostra. Os valores das derivadas permanecem assim (TH) até que seja alcançado o limite de resistência da placa e ela se rompe. Tem-se, então, o último trecho decrescente na curva MMF e os seus respectivos valores negativos da primeira derivada. Corresponde ao período entre os estágios 3 e 4 da curva MMF.

5.2.5 Análise da Integridade da Aderência por Parâmetros de Energia

Embora as abordagens baseadas em carga e tensão sejam objetos de uma grande quantidade de investigação, esta pesquisa deseja investigar se a análise da aderência da ligação argamassa colante-cerâmica também pode ser feita mediante critério de energia, a fim de mostrar quantitativamente a energia que, quando colocada nas amostras, cria superfícies de fratura.

Os valores de energia elástica potencial e energia dissipada foram extraídos a partir das curvas de propagação. A energia elástica foi obtida a partir da área sob a curva força-deslocamento do ensaio MMF no trecho delineado pelos estágios 1 a 3. Esse trecho foi

escolhido por: i- incluir o estágio 1, em que a curva se aproxima de uma reta, caracterizando seu comportamento linear; ii- ser o trecho reconhecido como aquele em que o sistema argamassa-placa ainda permanece aderido sendo, portanto, representativo da energia elástica introduzida dentro do sistema durante a aplicação do carregamento. A área sob a curva foi obtida usando a ferramenta de integração do software OriginLab.

A Figura 31 apresenta os valores de energia elástica para os dois tipos de argamassa, em função dos diferentes tamanhos de fissura. A análise estatística por meio do teste de diferenças mostra que o desempenho energético da ACTB só é melhor que o da ACTA nas primeiras idades (7d e 14d), para as amostras referência e com nível de fissuração 15mm ($p\text{-valor} = 0,495$). Conforme há redução do contato entre os materiais, a diferença de desempenho entre os dois tipos de argamassa não pode mais ser notada, uma vez que a peça cerâmica assume o suporte mecânico da amostra.

Em relação ao tempo de cura, verifica-se que esta não foi uma variável determinante para causar diferenças no desempenho energético dos tipos de argamassa ($p\text{-valor} > 0,05$). O desempenho das duas argamassas se mantém semelhante à medida que as reações de hidratação evoluem, assim como observado no desempenho mecânico do ensaio MMF.

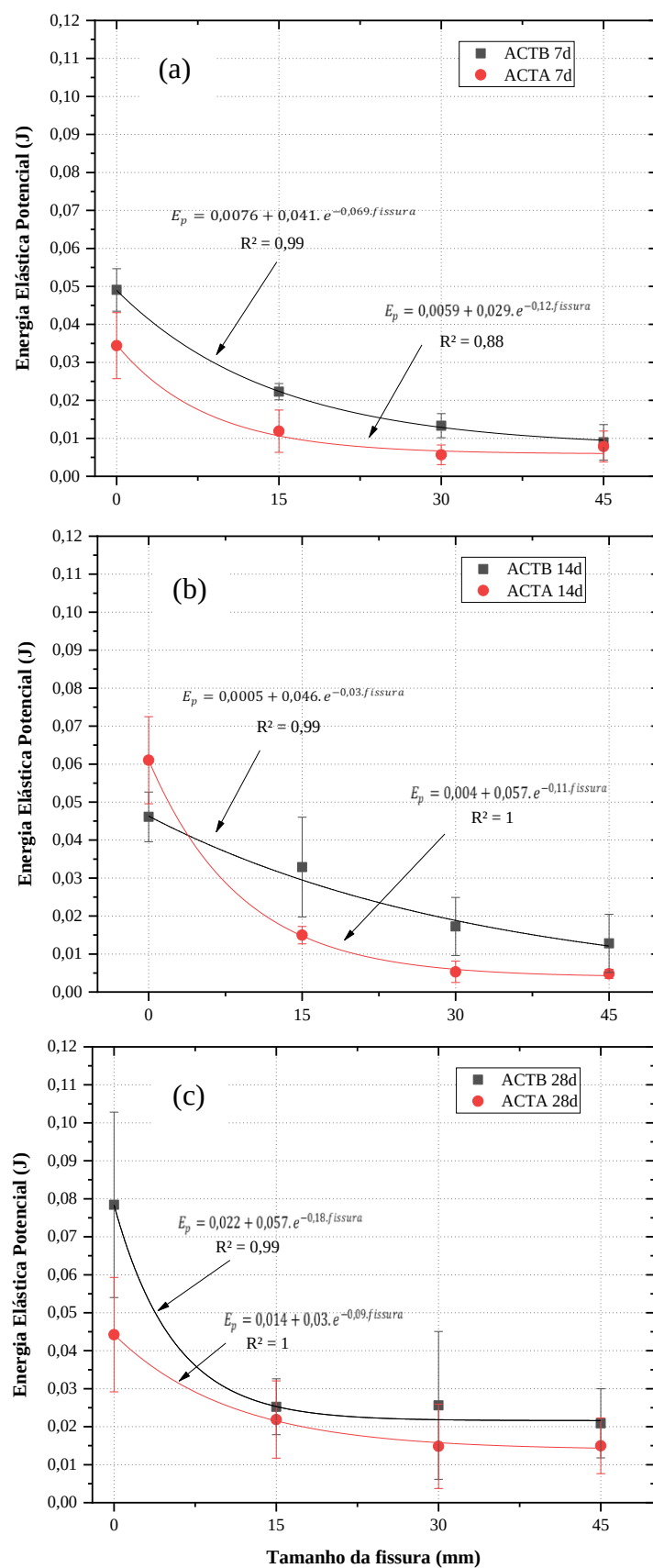


Figura 31 – Energia elástica das amostras em função do tamanho da fissura: (a) 7 dias; (b) 14 dias; (c) 28 dias (Fonte: Autora, 2023).

Ao analisar o comportamento energético do material em função do tamanho da fissura, pode-se observar pela Figura 31 que há um decréscimo da energia potencial elástica à medida que a área de contato entre os materiais é diminuída. A redução dessa energia ocorre de maneira significativa já nas amostras com 15mm de fissura ($p\text{-valor} = 0,038$), assim como observado nas discussões anteriores com o parâmetro de força. Para os demais tamanhos de fissuras, também foram comprovados estatisticamente existir diferenças entre os valores de energia elástica destas amostras em relação a amostra referência ($p\text{-valor} < 0,0000$)

A redução de energia elástica ocorre porque o aumento do tamanho da fissura se dá com dissipação de energia pelo sistema. Assim, ao final da propagação, a energia potencial elástica armazenada no sistema ficou permanentemente diminuída. A redução exponencial da energia em razão da propagação de uma fissura ou da presença de falha de colagem mostra existir uma estreita relação da energia da interface com a força adesiva material, uma vez que os valores de carga do conjunto cerâmica/argamassa colante também sofreram significativa redução. Menores valores de energia elástica das amostras indicam menor resistência de aderência na ligação da interface dos materiais.

Os resultados observados demonstram que, em meio a existência de semelhança de desempenho mecânico das argamassas colantes, a energia da interface pode ser relacionada com as condições do substrato em propiciar melhor ancoragem mecânica dos materiais em contato.

Um parâmetro importante na previsão de resistência à fratura dos materiais é a taxa de liberação de energia crítica, por essa razão, os valores de energia dissipada ao longo do processo de propagação da fissura foram calculadas e são apresentadas na Tabela 13. A energia dissipada foi calculada com base na metodologia de Barros e Champaney (2009), apresentada no referencial teórico.

Tabela 13 – Energia dissipada (Ed) das amostras (Fonte: Autora, 2023).

Tempo de Cura (dias)	Energia Dissipada na Propagação (J) - ACTA					
	0/15	DP	15/30	DP	30/45	DP
7	0,023	0,010	0,006	0,007	-0,001	0,003
14	0,046	0,009	0,009	0,006	0,003	0,001
28	0,022	0,010	0,014	0,011	0,005	0,003
Tempo de Cura (dias)	Energia Dissipada na Propagação (J) - ACTB					
	0/15	DP	15/30	DP	30/45	DP
7	0,027	0,004	0,010	0,006	0,005	0,004
14	0,013	0,007	0,016	0,015	0,009	0,005
28	0,053	0,031	0,004	0,018	0,017	0,012

Os dados da Tabela 13 revelam que para as amostras saírem de um estado sem fissuração para o estado de fissuração inicial (0/15mm), foi necessário maior dissipação de energia quando comparado com os demais estados. Também mostram que depois que a fissura inicia sua propagação, o seu avanço não requer o mesmo desprendimento de energia, justificando os valores mais baixos de dissipação quando se vai avançando de 15mm até 45 mm. Isso pode ser explicado em razão de que o crescimento da fissura promove a acumulação de danos, o que favorece o coalescimento de microfissuras existentes, colaborando para sua propagação. Além disso, uma vez que a taxa de liberação de energia atinge um valor crítico, G_c , a fissura se propaga de maneira instável, ou seja, cresce sem a necessidade de acréscimo de carga aplicada.

De acordo com Abadi et al. (2020), os valores de taxa de energia dissipada são indicadores da durabilidade de uma ligação, mostrando quantitativamente quanta energia deve ser colocada nas amostras para criar superfícies de fratura.

De acordo com Champaney & Valoroso (2004) e Barros & Champaney (2009), a energia crítica de fratura (G_c) é igual a energia dissipada (E_d) durante o processo de propagação da fissura. Estes autores apresentam ainda, que a energia crítica de fratura pode assumir o maior valor dentre as energias dissipadas pelo material ao longo do processo de propagação de dano. Sendo assim, na Tabela 14 são apresentados os valores de G_c para cada um dos tipos de AC e tempos de cura.

Tabela 14 – Energia Crítica de Fratura (Fonte: Autora, 2023).

Tempo de cura (dias)	Energia Crítica (J)			
	ACTA	DP	ACTB	DP
7	0,023	0,010	0,027	0,004
14	0,046	0,009	0,013	0,007
28	0,022	0,010	0,053	0,031

Os valores de G_c confirmam o fato de que nem o tipo de AC, nem o tempo de cura foram fatores influenciadores sobre os parâmetros de energia do material, pois todos os G_c identificados situam-se dentro da média $0,053 \pm 0,031$ J. Esse resultado se apresenta em boa concordância com o que foi observado por meio dos valores de carga máxima e energia elástica, que também não foram afetados por estas mesmas variáveis.

A título de comparação com o resultado desta pesquisa, a Tabela 15 traz uma síntese de valores de energia crítica de fratura (G_c) obtidos para diferentes adesivos e substratos.

Tabela 15 – Energia Crítica de Fratura de diferentes materiais (Fonte: Autora, 2023).

Ensaio	Autor	Substrato	Adesivo	Espessura Adesivo (mm)	G_c (N/mm)
SLB	Santos e Campilho, 2017	Compósito de polímero e fibra de carbono	Poliuretano	1	5,5
			Epóxi	1	0,1
MMB	Silva, 2019	Aço	Epóxi	0,9	0,228
SLB	Ribeiro et al, 2019	Alumínio	Epóxi	0,2	0,11
MMF	Barros e Champaney, 2013	Alumínio (com tratamento de superfície)	Epóxi	0,5	0,08
		Alumínio (sem tratamento de superfície)		0,5	0,04

O valor de $0,053 \pm 0,031$ J se aproxima de valores de outras pesquisas experimentais para outros sistemas e, então, pode ser utilizado como sendo a energia crítica de fratura da interface cerâmica-argamassa colante, reconhecendo ser necessário que a carga aplicada sobre essas amostras dispense uma energia igual ou superior a esse valor para que seja possível que uma fissura de 15mm se propague e crie uma superfície de fratura.

No estudo desta pesquisa ficou evidenciado existir uma estreita relação da energia de superfície com a aderência. Dessa maneira, quanto pior foi o contato interfacial, menor a quantidade de energia armazenada na amostra, em função da dissipação ocorrida para

propagação da fissura. Em razão disso, para se conseguir melhorar o desempenho energético do material e ter aumentado o valor de sua energia crítica de fratura (G_c), se faz necessário melhorar as condições de contato interfacial. Isso foi observado nos estudos Barros e Champaney (2013), em que o tratamento de superfície realizado em um grupo de amostras proporcionou aumento da energia crítica de fratura destas em relação as que não receberam tratamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES - PARTE 3

Os resultados apresentados nesta terceira parte constituem de dados obtidos através do ensaio de ressonância. Sua apresentação e discussão serão divididos em duas etapas: resultados do ensaio piloto e resultados do ensaio final.

5.3 Definição do Espectro Padrão e Implementação da Metodologia de Ensaio (Ensaio Piloto)

Para que fosse possível identificar as frequências naturais da amostra sanduíche como sendo característica do conjunto em análise, e assim, definir o seu perfil dinâmico, foi necessário conhecer o comportamento dos espectros individuais de cada material que compunha o conjunto.

Nesse sentido, a apresentação desses resultados seguirá a seguinte ordem: espectros da placa cerâmica, da argamassa e do conjunto; análises estatísticas para investigação do efeito das variáveis nível de aperto e posição do acelerômetro sobre os espectros obtidos.

É importante salientar que as todas as amostras sanduíches usadas nessa etapa são as de referência, ou seja, sem a presença de fissura.

5.3.1 Espectros de Frequência

Para facilitar a análise dos resultados, plotou-se em um único gráfico os espectros de todas as réplicas e níveis de aperto nelas empregados. As Figuras 32 a 37 apresentam os resultados dos espectros obtidos, respectivamente, das amostras cerâmicas, de argamassa colante e do conjunto, separando-as em razão do posicionamento do acelerômetro ou do tipo de argamassa colante.

As Figuras 32 e 33 apresentam, respectivamente, os espectros das cerâmicas para o acelerômetro posicionado na parte central e superior da amostra. Para medições dessas leituras de frequências foram usadas 3 réplicas de placas cerâmicas.

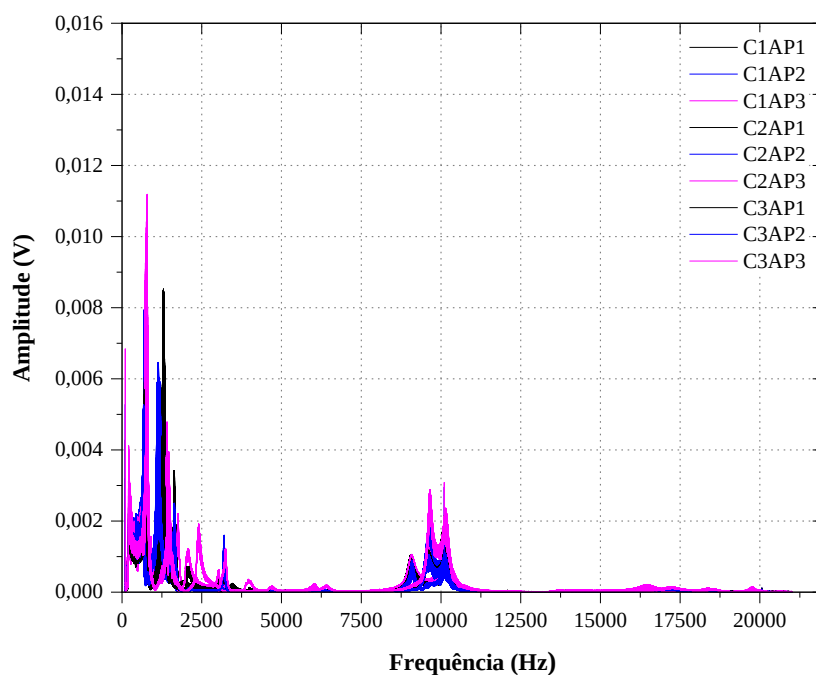


Figura 32 – Espectros de Frequências de amostras cerâmicas (C) para cada um dos três níveis de aperto (AP) e acelerômetro posicionado na parte central do vão livre da placa (Fonte: Autora, 2022).

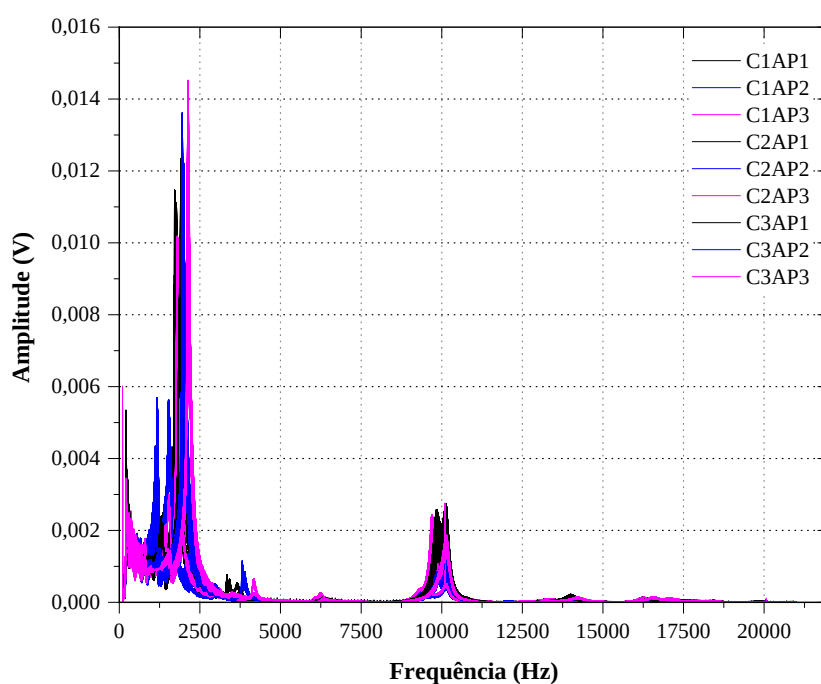


Figura 33 – Espectros de frequências de amostras cerâmicas (C) para cada um dos três níveis de aperto (AP) e acelerômetro posicionado na parte superior da placa (Fonte: Autora, 2022).

As Figuras 34 e 35, apresentam os resultados dos espectros das argamassas colantes tipo A (ACTA) e B (ACTB). Os espectros foram obtidos a partir da leitura de 3 réplicas para cada tipo de argamassa.

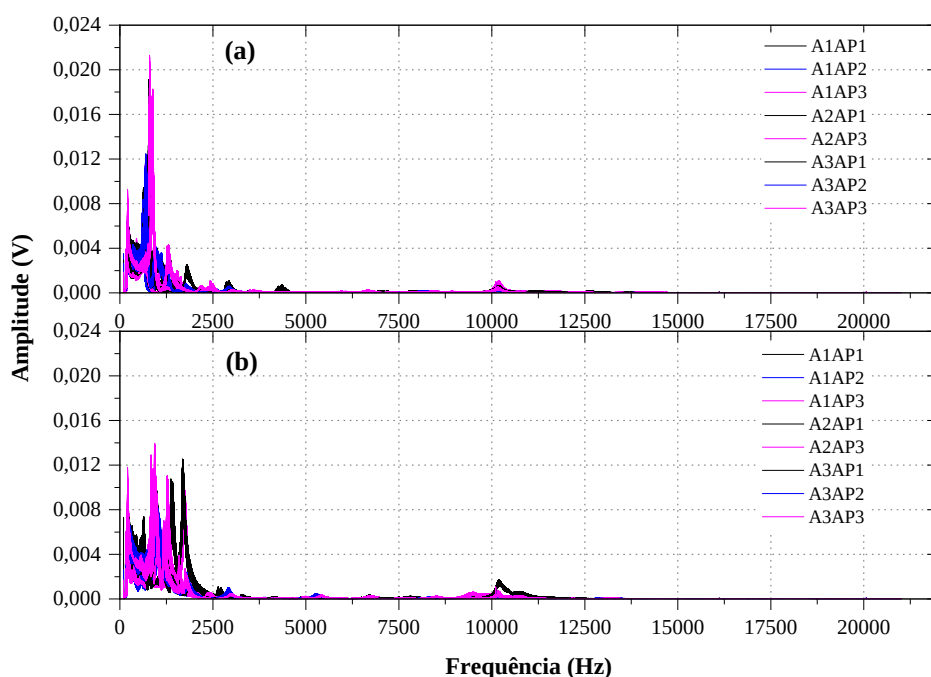


Figura 34 – Espectros de frequências de amostras de argamassa (A) do tipo ACTA: (a) acelerômetro centralizado; (b) acelerômetro na parte superior da amostra (Fonte: Autora, 2022).

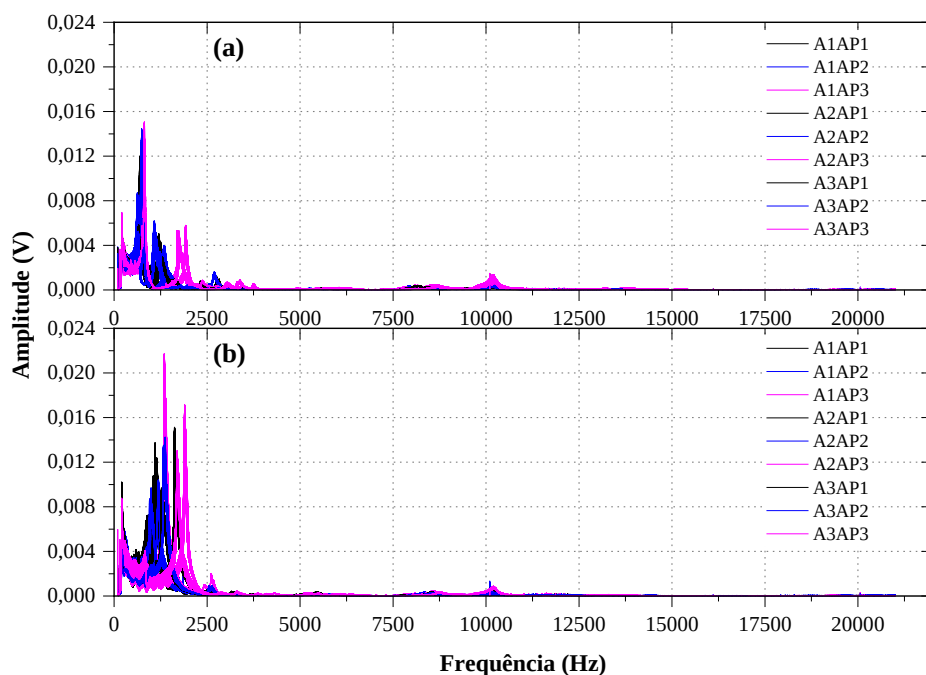


Figura 35 – Espectros de frequências de amostras de argamassa (A) do tipo AC TB: (a) acelerômetro centralizado; (b) acelerômetro na parte superior da amostra (Fonte: Autora, 2022).

As Figuras 36 e 37 apresentam, respectivamente, os espectros das amostras sanduíche moldadas com as argamassas colantes tipo A (ACTA) e B (ACTB). Para medições dessas leituras de frequências foram usadas 2 réplicas para cada um dos tipos de amostra sanduíche.

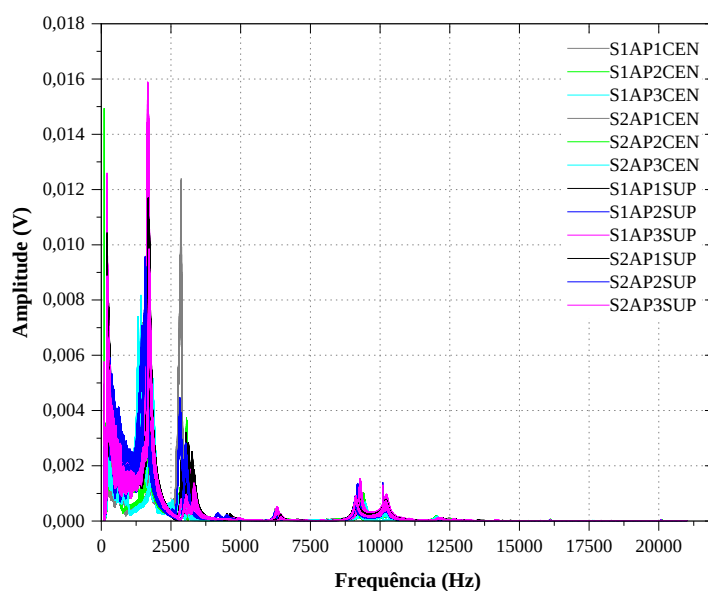


Figura 36 – Espectros de frequências de amostras sanduíche (S) com argamassa ACTA para cada um dos três níveis de aperto (AP) e posições central (CEN) e superior (SUP) do acelerômetro (Fonte: Autora, 2022).

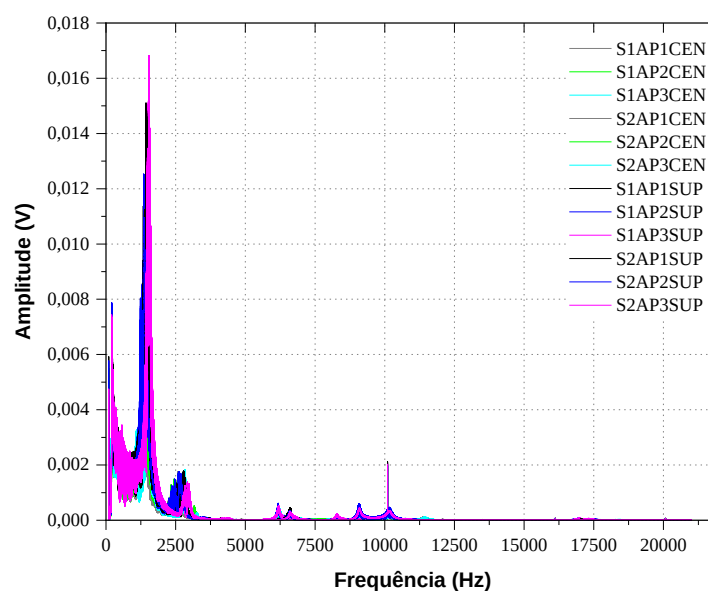


Figura 37 – Espectros de frequências de amostras sanduíche (S) com argamassa ACTB para cada um dos três níveis de aperto (AP) e posições central (CEN) e superior (SUP) do acelerômetro (Fonte: Autora, 2022).

Com relação aos espectros das amostras, estes se apresentaram, em geral, de forma uniforme, com picos de frequências próximos uns dos outros, aparentemente independentes do nível de aperto empregado.

Analizando as Figuras 32 e 33, relativas as amostras cerâmicas, foi possível notar a presença de maior quantidade de picos de ressonância quando o acelerômetro foi usado centralizado nas amostras, podendo ser atribuído a menor uniformidade das respostas captadas ou a um maior número de modos de vibração percebido em função da posição do acelerômetro. Os picos das amostras cerâmicas ficaram situados em uma faixa que vai de 600Hz a 4000Hz e depois entre 9000Hz e 10000Hz, mostrando a ampla faixa de frequências naturais apresentadas pela amostra do revestimento.

Entretanto, numa análise da Figura 33, onde se verifica mais uniformidade das respostas das placas cerâmicas, é possível observar que há uma concentração maior de picos localizados numa região de frequência de 2000Hz e, depois, em 10000Hz. Estes últimos picos são os que também apresentam as menores variações ($CV \leq 0,5\%$), cujos dados são apresentados a seguir, na Tabela 16. Esse fato demonstra que todas as amostras cerâmicas ensaiadas, para ambas as posições do acelerômetro, apresentaram picos de ressonâncias com frequências muito próximas da faixa de 10000Hz.

Diante do exposto, pode-se inferir que as frequências naturais associadas ao material cerâmico devem ser aquelas observadas nos picos definidos após 2000Hz, com grande incidência deles na região de 10000Hz.

Os espectros das amostras de argamassa (Figuras 34 e 35) apresentaram picos quase que totalmente concentrados na faixa de até 2500Hz, para os dois tipos de argamassa, com picos de maiores amplitudes localizados na faixa de 800 a 1900Hz. A maior concentração de picos das amostras de argamassa em frequências inferiores a 2500Hz permite considerar que as suas frequências naturais são tipicamente caracterizadas por frequências de valores menores quando comparadas com as amostras cerâmicas.

Picos em 10000Hz com amplitudes muito pequenas, também são visualizados nas amostras de argamassa, indicando que modos de vibração parecidos ocorrem em amostras com geometria semelhantes. Também não é possível notar mudanças significativas nos espectros em função dos níveis de aperto empregados.

Já os espectros das amostras sanduíches (Figuras 36 e 37), possivelmente não tiveram suas frequências influenciadas nem pelas mudanças de nível de aperto, nem pelo

posicionamento de sensor, pois se apresentaram de forma padronizada, concentrados de maneira muito uniforme em faixas específicas.

Nesses espectros é possível observar a influência dos dois materiais componentes (cerâmica e argamassa) sobre o espectro do conjunto, indicando a influência da argamassa sobre a faixa de baixa frequência da amostra, com picos de ressonância entre 1400 a 2900Hz; e da placa cerâmica, sobre o pico em torno de 10000Hz, que se situa na região de alta frequência da amostra.

É importante ressaltar, que o pico em 10000Hz aparece com maiores amplitudes nos espectros das placas cerâmicas, ultrapassando a linha de 0,002V, mas sofre uma redução nas amostras sanduíches e de argamassa, assumindo valores bem inferiores a 0,002V. Esse comportamento corrobora com a ideia de que essa região de frequências é dominada pela resposta do componente cerâmico, que ao ficar unido a argamassa apresenta menos liberdade para vibrar e, por isso, responde com menores amplitudes de vibração.

Entre essas duas regiões de influência dos materiais componentes há alguns picos, podendo estes serem associados a resposta de ressonância do conjunto. As Tabelas 16 a 20, do item sobre análise estatística, apresentam as médias dos picos observados para cada um dos tipos de amostras, corroborando com a discussão.

Isto posto, pode-se considerar que no espectro da amostra sanduíche, os menores valores de frequência estão associados com o componente de argamassa, enquanto às maiores, estão associadas ao componente do revestimento cerâmico, uma vez que a este último é atribuída maior rigidez.

5.3.2 Investigação dos Efeitos – Análise Estatística

Para investigar os efeitos do nível do aperto manual e da posição do acelerômetro na obtenção das frequências naturais das amostras, foi realizado um levantamento de todos os picos observados em cada um dos espectros obtidos. Os pares frequência e amplitude foram tabelados para obtenção de sua média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV).

A Tabela 16 apresenta os dados estatísticos descritivos de cada um dos 8 picos observados nos 18 espectros de frequências das amostras cerâmicas. Para melhor análise dos dados, os resultados foram separados em função do posicionamento do sensor.

Tabela 16 - Dados estatísticos dos valores de frequência e amplitude de amostras cerâmicas (Fonte: Autora, 2022).

Picos	Posição Centralizada						Posição Superior					
	Frequências (Hz)			Amplitude (V)			Frequências (Hz)			Amplitude (V)		
	Média	DP	CV	Média	DP	CV	Média	DP	CV	Média	DP	CV
1	663,81	87,75	13,22	0,00362	0,00195	53,75	547,91	650,60	118,74	0,00070	0,00086	122,93
2	1281,73	122,65	9,57	0,00335	0,00122	36,24	1917,417	196,78	10,26	0,00703	0,00205	29,17
3	1946,66	512,64	26,33	0,00101	0,00055	54,14	3631,423	430,64	11,86	0,00030	0,00017	57,89
4	3225,35	143,98	4,46	0,00041	0,00039	95,98	6307,762	73,93	1,17	0,00008	0,00004	47,98
5	6177,78	3092,11	50,05	0,00007	0,00004	58,61	9579,238	212,76	2,22	0,00088	0,00070	80,14
6	9453,46	259,73	2,75	0,00101	0,00049	48,24	10105,83	28,98	0,29	0,00104	0,00055	53,10
7	10111,66	43,55	0,43	0,00098	0,00045	45,65	13830,69	386,08	2,79	0,00009	0,00002	27,34
8	17019,61	347,30	2,04	0,00006	0,00003	55,29	16707,92	417,25	2,50	0,00008	0,00002	24,82

As Tabelas 17 a 20 apresentam os dados estatísticos descritivos dos espectros de frequência das amostras de argamassa e do tipo sanduíche, separados por tipo de argamassa colante. Os dados das amostras de argamassa (Tabelas 17 e 18) foram obtidos a partir da análise de 16 e 18 espectros de frequência para os tipos de argamassa A e B, respectivamente. Já os dados das amostras do tipo sanduíche foram obtidos a partir da análise de 12 espectros para cada um dos tipos de argamassa usados.

Tabela 17- Dados estatísticos dos valores de frequência e amplitude de amostras da argamassa ACTA (Fonte: Autora, 2022).

Picos	Posição Centralizada						Posição Superior					
	Frequências (Hz)			Amplitude (V)			Frequências (Hz)			Amplitude (V)		
	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)
1	674,96	133,90	19,84	0,00683	0,00381	55,82	874,64	108,82	12,44	0,00583	0,00254	43,64
2	1640,00	321,62	19,61	0,00085	0,00069	80,86	1826,11	109,93	6,02	0,00302	0,00280	92,89
3	2418,12	58,82	2,43	0,00029	0,00018	63,38	-	-	-	-	-	-
4	2874,01	183,24	6,38	0,00034	0,00020	59,21	2928,73	295,91	10,10	0,00027	0,00021	78,96
5	-	-	-	-	-	-	5211,35	194,10	3,72	0,00016	0,00010	59,81
6	7455,28	697,88	9,36	0,00009	0,00004	39,30	7719,41	802,05	10,39	0,00013	0,00005	34,93
7	10169,30	20,91	0,21	0,00036	0,00021	58,34	9985,88	212,61	2,13	0,00033	0,00034	100,72

Tabela 18 - Dados estatísticos dos valores de frequência e amplitude de amostras da argamassa ACTB (Fonte: Autora, 2022).

Picos	Posição Centralizada						Posição Superior					
	Frequências (Hz)			Amplitude (V)			Frequências (Hz)			Amplitude (V)		
	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)
1	701,91	117,40	16,73	0,00715	0,00245	34,30	-	-	-	-	-	-
2	1452,78	326,61	22,48	0,00340	0,00071	21,04	1511,63	256,28	16,95	0,00909	0,00252	27,73
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	2844,05	304,70	10,71	0,00050	0,00037	75,12	2505,37	143,72	5,74	0,00082	0,00039	47,40
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	8284,39	300,81	3,63	0,00022	0,00004	20,56	8627,04	158,55	1,84	0,00020	0,00006	29,65
7	10119,39	118,19	1,17	0,00041	0,00022	53,79	10119,11	42,40	0,42	0,00025	0,00017	68,46

Tabela 19 - Dados estatísticos dos valores de frequência e amplitude de amostras sanduíche com ACTA (Fonte: Autora, 2022).

Picos	Posição Centralizada						Posição Superior					
	Frequências (Hz)			Amplitude (V)			Frequências (Hz)			Amplitude (V)		
	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)
1	1652,81	174,66	10,57	0,00283	0,00080	28,24	1643,78	82,87	5,04	0,00667	0,00192	28,81
2	2633,44	509,07	19,33	0,00250	0,00300	119,90	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	3626,56	398,93	11,00	0,00010	0,00007	69,56	3057,77	118,42	3,87	0,00159	0,00087	54,88
5	6372,34	68,56	1,08	0,00013	0,00010	56,50	6368,98	87,30	1,37	0,00017	0,00008	50,91
6	9319,69	84,75	0,91	0,00042	0,00019	45,19	9213,96	68,46	0,74	0,00074	0,00019	25,65
7	10245,30	109,67	1,07	0,00013	0,00010	79,44	10143,32	4,34	0,04	0,00044	0,00006	13,96
8	12237,59	252,80	2,06	0,00008	0,00002	30,14	12356,95	242,91	1,97	0,00005	0,00002	47,70

Tabela 20 - Dados estatísticos dos valores de frequência e amplitude de amostras sanduíche com ACTB.

Picos	Posição Centralizada						Posição Superior					
	Frequências (Hz)			Amplitude (V)			Frequências (Hz)			Amplitude (V)		
	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)
1	1427,43	63,70	4,46	0,00571	0,00099	17,37	1459,13	56,67	3,88	0,00765	0,00145	18,96
2	2586,43	157,92	6,11	0,00065	0,00015	23,59	2675,92	89,95	3,36	0,00038	0,00064	167,47
3	2738,74	132,58	4,84	0,00084	0,00021	24,33	2832,73	129,25	4,56	0,00089	0,00020	22,09
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	6402,13	198,65	3,10	0,00020	0,00005	23,28	6401,86	212,01	3,31	0,00027	0,00006	20,71
6	8710,07	421,09	4,83	0,00007	0,00001	18,57	8705,97	400,38	4,60	0,00020	0,00010	47,23
7	10163,97	18,33	0,18	0,00010	0,00003	28,51	10139,83	14,85	0,15	0,00021	0,00002	9,05
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

A partir dos dados das Tabela 16 a 20, foram selecionados os picos que apresentaram, simultaneamente, menor coeficiente de variação dos parâmetros frequência e amplitude para as duas posições do acelerômetro e/ou nos dois tipos de argamassa. Esse critério foi adotado a fim de que se tornasse possível a investigação do efeito das variáveis independentes (aperto e posição do acelerômetro) sobre os espectros obtidos.

Para o parâmetro frequência, foram selecionados os picos que obtiveram $CV \leq 10\%$, ou seja, picos em que houve baixa dispersão de seus valores em torno da média. Para a amplitude, os coeficientes de variação assumiram valores mais elevados, indicando menor homogeneidade quando comparado com os valores de frequência. Como o objetivo é a seleção de picos para investigação de efeitos a partir de testes estatísticos, selecionou-se os picos com os menores coeficientes de variação para esta variável, sendo enquadrados aqueles entre $20 \leq CV \leq 55\%$.

Para as amostras do tipo sanduíche, foram levadas ainda em consideração o CV de outros parâmetros, tais como, largura de pico (FWHM), amortecimento e área sob a curva do pico. Isso se deu em razão das amostras do tipo sanduíches serem as amostras a partir das quais o objetivo fim da pesquisa será estudado, sendo necessário incluir parâmetros que fornecessem dados energéticos do material.

As Tabelas 21 e 22 apresentam os resultados de largura de pico (FWHM), amortecimento e área sob a curva do pico. Com exceção do amortecimento, que foi calculado pelo método de largura de banda, os demais parâmetros foram obtidos por meio do software OringinLab 2018, através da ferramenta análise de pico.

Com base nos critérios estabelecidos, os picos selecionados para análise estatística das amostras cerâmicas foram os picos 2, 6, 7 e 8; para as amostras sanduíche, os picos selecionados foram 1, 5, 6 e 7. Para as amostras de argamassa foi necessário adotar um segundo critério de seleção, pois o critério existente permitiria somente a seleção de dois picos (6 e 7), o que forneceria um reduzido número amostral para a análise. Então, resolveu-se selecionar também todos os picos que apareciam simultaneamente nos dois tipos de argamassa e nas duas posições de sensores. Assim, foram acrescentados na realização dos testes estatísticos destas amostras, os picos 2 e 4, totalizando 4 picos selecionados.

Tabela 21 - Dados estatísticos dos valores de FWHM, amortecimento e área de amostras sanduíche com ACTA (Fonte: Autora, 2022).

Picos	Posição Centralizada								
	FWHM (Hz)			Amortecimento			Área sob a curva (V.Hz)		
	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)
1	185,24	35,08	18,93	0,0576	0,0164	28,52	0,5653	0,2224	39,34
2	326,68	327,78	100,34	0,0663	0,0722	108,81	0,4779	0,4835	101,17
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	43,01	46,59	108,34	0,0062	0,0071	114,23	0,0130	0,0248	190,39
5	187,69	60,27	32,11	0,0148	0,0048	32,78	0,0266	0,0180	67,59
6	253,12	74,51	29,44	0,0136	0,0039	28,71	0,1185	0,0719	60,64
7	450,27	148,71	33,03	0,0221	0,0075	34,04	0,0776	0,0725	93,50
8	295,05	70,35	23,84	0,0120	0,0028	22,88	0,0251	0,0068	27,08
Picos	Posição Superior								
	FWHM (Hz)			Amortecimento			Área sob a curva (V.Hz)		
	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)
1	211,84	46,31	21,86	0,0652	0,0177	27,20	1,4278	0,1851	12,96
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	183,13	81,77	44,65	0,0301	0,0135	44,93	0,3462	0,2550	73,65
5	162,45	61,42	37,81	0,0128	0,0049	38,41	0,0313	0,0239	76,21
6	302,49	76,02	25,13	0,0164	0,0042	25,49	0,2271	0,0303	13,35
7	637,28	42,65	6,69	0,0314	0,0021	6,72	0,2988	0,0587	19,66
8	265,63	124,66	46,93	0,0108	0,0051	47,58	0,0173	0,0101	58,51

Tabela 22 - Dados estatísticos dos valores de FWHM, amortecimento e área de amostras sanduíche com ACTB (Fonte: Autora, 2022).

Picos	Posição Centralizada								
	FWHM (Hz)			Amortecimento			Área sob a curva (V.Hz)		
	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)
1	192,37	26,10	13,57	0,0678	0,0112	16,51	1,1474	0,1399	12,19
2	183,99	154,67	84,07	0,0360	0,0306	85,09	0,1209	0,1014	83,89
3	196,82	113,93	57,89	0,0362	0,0215	59,24	0,1735	0,0999	57,59
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	201,83	33,54	16,62	0,0152	0,0023	15,33	0,0431	0,0127	29,45
6	216,59	37,02	17,09	0,0125	0,0023	18,76	0,0168	0,0040	23,95
7	253,96	33,55	13,21	0,0125	0,0016	13,08	0,0254	0,0046	18,13
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Picos	Posição Superior								
	FWHM (Hz)			Amortecimento			Área sob a curva (V.Hz)		
	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)
1	202,02	23,96	11,86	0,0695	0,0101	14,53	1,6251	0,2504	15,41
2	173,93	168,66	96,97	0,0324	0,0324	99,94	0,1341	0,1354	100,96
3	153,40	58,65	38,23	0,0254	0,0138	54,50	0,1564	0,0993	63,52
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	200,71	28,12	14,01	0,0151	0,0029	19,19	0,0563	0,0112	19,92
6	271,46	71,06	26,18	0,0153	0,0046	30,08	0,0600	0,0319	53,18
7	402,16	135,48	33,69	0,0198	0,0067	33,82	0,0934	0,0381	40,77
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

A Tabela 23 apresenta os resultados da análise estatística para avaliação das diferenças significativas entre os valores de frequência e amplitude em função do nível de aperto, posicionamento do acelerômetro e tipo de AC (quando fosse o caso).

Tabela 23 – Avaliação dos efeitos posição do acelerômetro, nível de aperto e tipo de AC através de testes de hipótese para os diferentes tipos de amostras (Fonte: Autora, 2022).

Cerâmicas			Argamassas			Sanduíches		
Parâmetros	<i>p-valor</i>		Parâmetros	<i>p-valor</i>		Parâmetros	<i>p-valor</i>	
	Acelerômetro (Mann-Whitney)	Aperto (Kruskal-Wallis)		Acelerômetro (Mann-Whitney)	Aperto (Kruskal-Wallis)		Acelerômetro (Mann-Whitney)	Aperto (Kruskal-Wallis)
Freq2	0,00063*	0,222	Freq2	0,346	0,038*	Freq1	0,58	0,001*
Freq6	0,00041*	0,932	Freq4	0,454	0,341	Freq5	0,885	0,977
Freq7	0,00041*	0,805	Freq6	0,117	0,001*	Freq6	0,403	0,000*
Freq8	0,27015	0,824	Freq7	0,009*	0,535	Freq7	0,069	0,840
Amplitude2	0,0045*	0,980	Amplitude2	0,006*	0,000*	Amplitude1	0,004*	0,023*
Amplitude6	0,79108	0,641	Amplitude4	0,637	0,022*	Amplitude5	0,112	0,005*
Amplitude7	0,00041*	0,854	Amplitude6	0,817	0,000*	Amplitude6	0,023*	0,000*
Amplitude8	0,29184	0,402	Amplitude7	0,144	0,872	Amplitude7	0,004*	0,038*

* $p\text{-valor} < 0,05$

A partir do resultado da Tabela 23, é possível afirmar que os níveis de apertos adotados não causaram, em qualquer um dos tipos de amostras, diferenças significativas nos valores de frequência e amplitude ($p\text{-valor} > 0,05$). Ou seja, apertar um pouco mais ou um pouco menos as porcas que auxiliaram no posicionamento da amostra, não provocou diferenças significativas nos espectros obtidos.

Com relação a mudança no posicionamento do acelerômetro, a Tabela 23 mostra que algumas variáveis tiveram seus valores alterados. As amostras cerâmicas foram as mais afetadas, tendo mudanças significativas em cinco das oito variáveis. Já as amostras de argamassa e do tipo sanduíche tiveram menos da metade de suas variáveis sendo alteradas pela mudança. As frequências das amostras sanduíche não foram afetadas pela mudança da posição do acelerômetro, já as de argamassa, tiveram somente um dentre os quatro picos analisados, influenciados pela mudança.

O tipo de AC exerceu influência sobre a frequência do pico 2 das amostras de argamassa, e sobre a frequência do pico 1 das amostras sanduíche. Os picos dessas amostras correspondem a mesma faixa de frequência, que varia entre 1400 e 1600Hz, a depender do tipo de argamassa colante empregada. A comprovação estatística de que esse pico assume um valor diferente quando se altera o tipo da AC, corrobora com a questão levantada anteriormente de que a região de baixa frequência do espectro das amostras sanduíche reflete o comportamento do componente de argamassa.

Quando se observam as amplitudes (Tabela 23), as diferenças entre os espectros dos dois tipos de argamassa ficam mais evidentes, se apresentando em três dos quatro picos analisados para as amostras de argamassa, e em todos os quatro picos das amostras sanduíches.

Essa análise sugere ser possível, através de espectros de ressonância em amostras íntegras (0mm), que tipos distintos de argamassa possam ser identificados. A alteração no espectro poderia ser observada, nesse caso, a partir da análise dos valores de frequência e amplitude das amostras.

5.4 Conclusões Parciais a Partir do Ensaio Piloto

A partir dos resultados obtidos e análises realizadas as seguintes conclusões e definições foram feitas, de forma a dar prosseguimento aos ensaios finais de ressonância:

- os níveis de apertos adotados não causaram, em qualquer um dos tipos de amostras, diferenças significativas nos valores de frequência e amplitude. Ou seja, apertar um pouco mais ou um pouco menos as porcas, não provoca diferenças significativas nos espectros obtidos. Sendo assim, optou-se por adotar o aperto 1 que consiste no aperto manual das porcas até o limite do esforço do operador e que fornece visualmente melhor definição dos picos;

- A mudança no posicionamento do acelerômetro foi significativa nos espectros de amostras cerâmicas e provocou alterações nas amplitudes de alguns picos dos demais tipos de amostras. Por essa razão, optou-se por continuar adotando as duas posições do sensor nos ensaios finais, e verificar se com a inserção da fissura prévia, essa alteração se tornaria ainda mais perceptível;
- Os tipos de argamassas colantes utilizadas causaram modificações em seus espectros, alterando valores de frequência e amplitudes e fornecendo espectros diferentes a depender do tipo de AC, tanto nos espectros das amostras de argamassa quanto nos das amostras sanduíches;
- O perfil dinâmico do componente cerâmico mostrou que seus picos característicos se situam na região de frequências acima de 2000Hz, com coeficientes de variações muito baixos na região próxima de 10000Hz, sendo esta última, a provável região em que a cerâmica consegue manter sua influência nas respostas das amostras sanduíche;
- O perfil dinâmico das argamassas apresentou picos concentrados em frequências de até 2500Hz, se distinguindo assim, do revestimento cerâmico investigado. Os picos de maiores amplitudes de onda das argamassas foram observados em uma frequência de até 1900Hz;
- O perfil dinâmico das amostras sanduíche é composto de frequências que têm a influência de ambos os materiais que o compõe. Apresentando os picos característicos situados nas proximidades da faixa de 2500Hz, bem como nas proximidades de 10000Hz. A região entre essa faixa de frequência também apresentou picos, alguns mais evidentes no espectro cerâmico, outros no espectro da argamassa. Dessa forma, é possível dizer que o perfil dinâmico da amostra sanduíche traduz a característica do conjunto.

5.5 Análise da Aderência sob Carregamento Dinâmico - Frequências de Ressonância (Ensaio Final)

Definida a metodologia a ser empregada no ensaio de ressonância, prosseguiu-se com a segunda parte do ensaio. As Figuras 38 a 43 retratam a resposta das amostras sanduíches ao teste de ressonância, sem e com a presença da fissura prévia, em diferentes idades. Para cada grupo de análise da Tabela 3, foram produzidas 4 amostras, resultando num total de 96 amostras ensaiadas.

Seguindo a mesma metodologia do ensaio piloto, os espectros foram separados por tipo de argamassa, organizando as medidas de ambas as posições do acelerômetro em um mesmo gráfico. Os espectros também foram agrupados segundo as diferentes idade e tamanho da fissura prévia, duas variáveis de análise que foram investigadas somente nessa segunda fase de testes.

A nomenclatura usada na legenda dos gráficos segue o seguinte modelo: tipo de argamassa (ACTA ou ACTB), tamanho da fissura prévia (0, 15, 30 e 45mm), idade (7,14 e 28 dias) e posição do acelerômetro (Centralizado – C ou Superior – S).

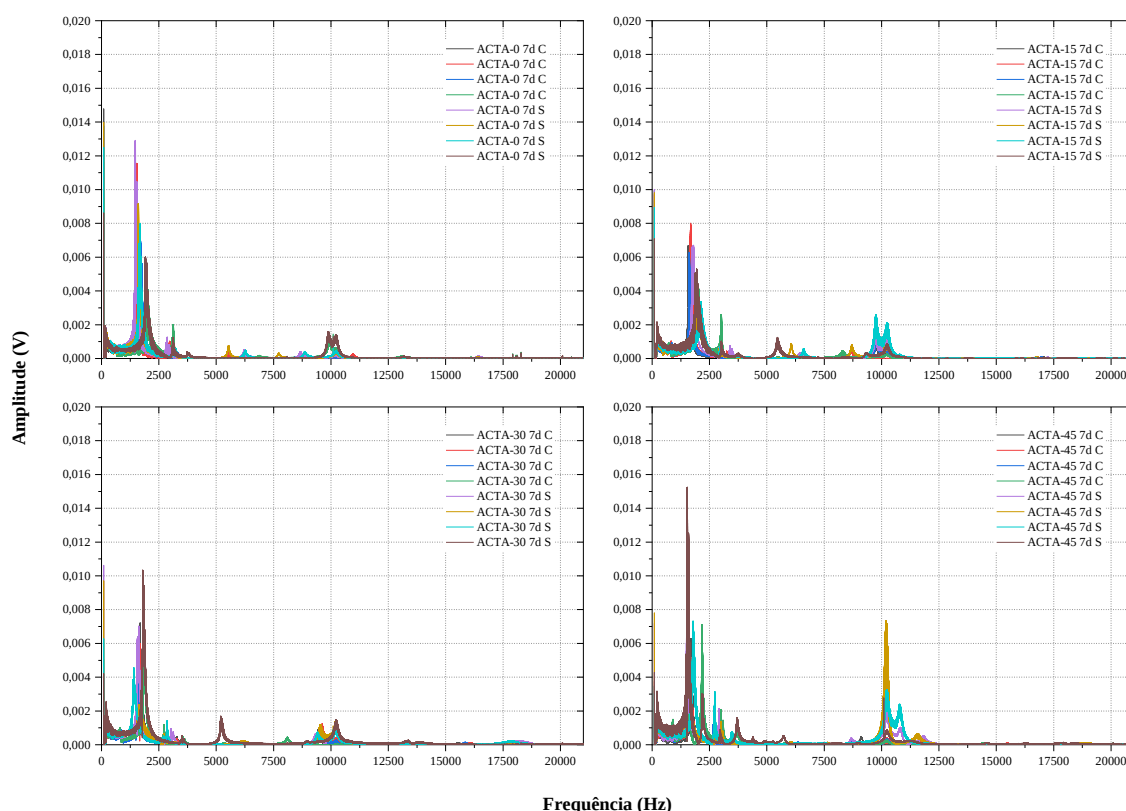


Figura 38 – Espectros de ressonância de amostras sanduíche de argamassa ACTA, com idade de 7 dias, para os diferentes tamanhos de fissura prévia (Fonte: Autora, 2023).

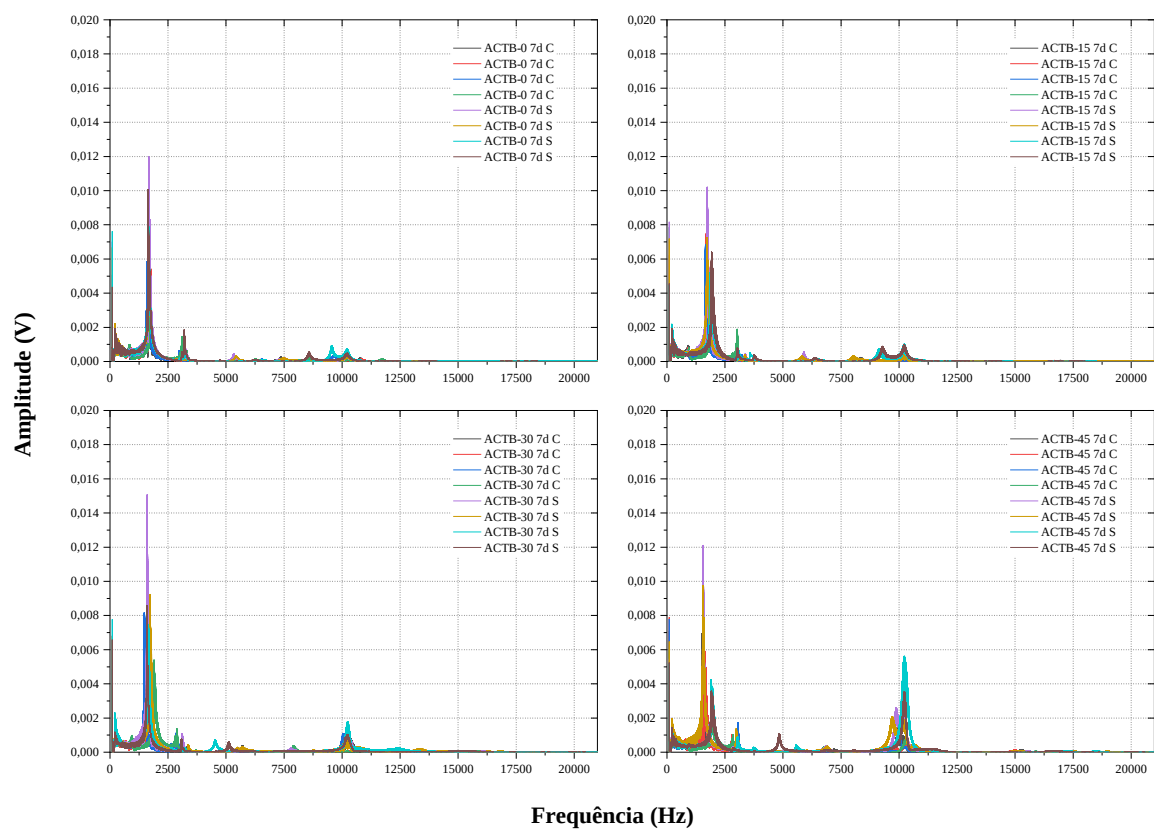


Figura 39 – Espectros de ressonância de amostras sanduíche de argamassa ACTB, com idade de 7 dias, para os diferentes tamanhos de fissura prévia (Fonte: Autora, 2023).

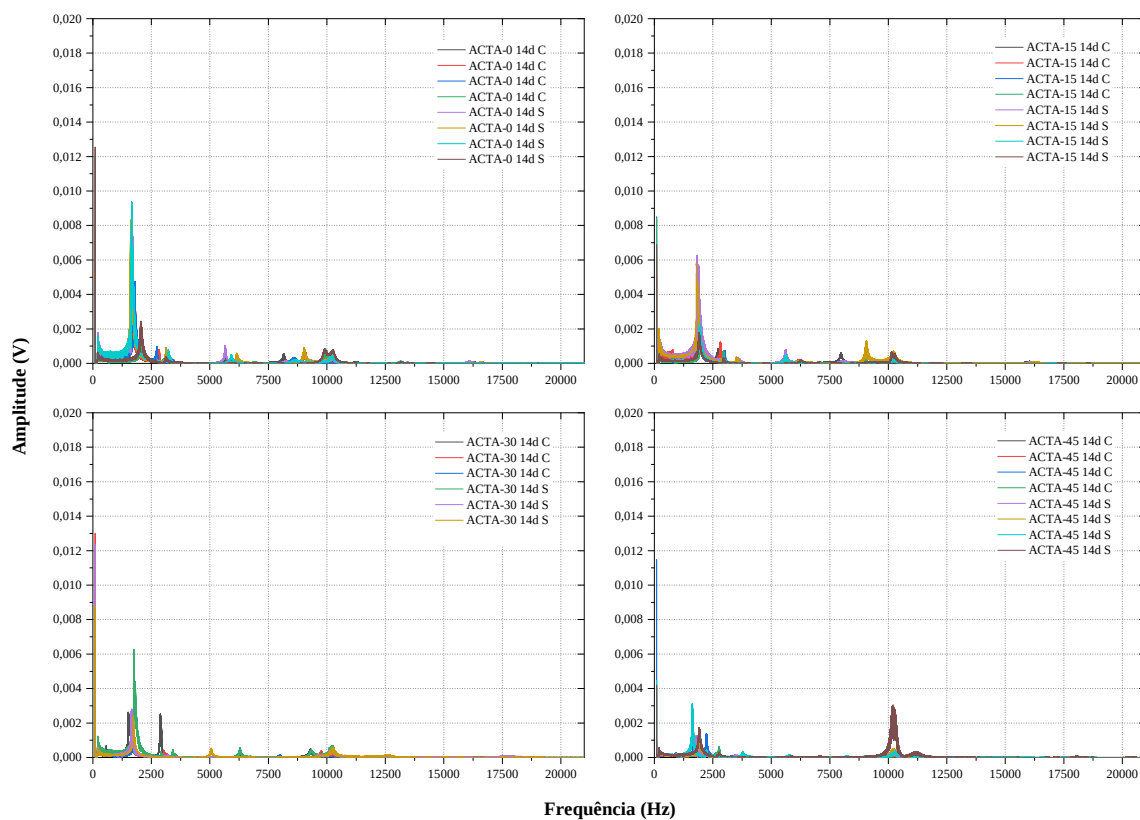


Figura 40 – Espectros de ressonância de amostras sanduíche de argamassa ACTA, com idade de 14 dias, para os diferentes tamanhos de fissura prévia (Fonte: Autora, 2023).

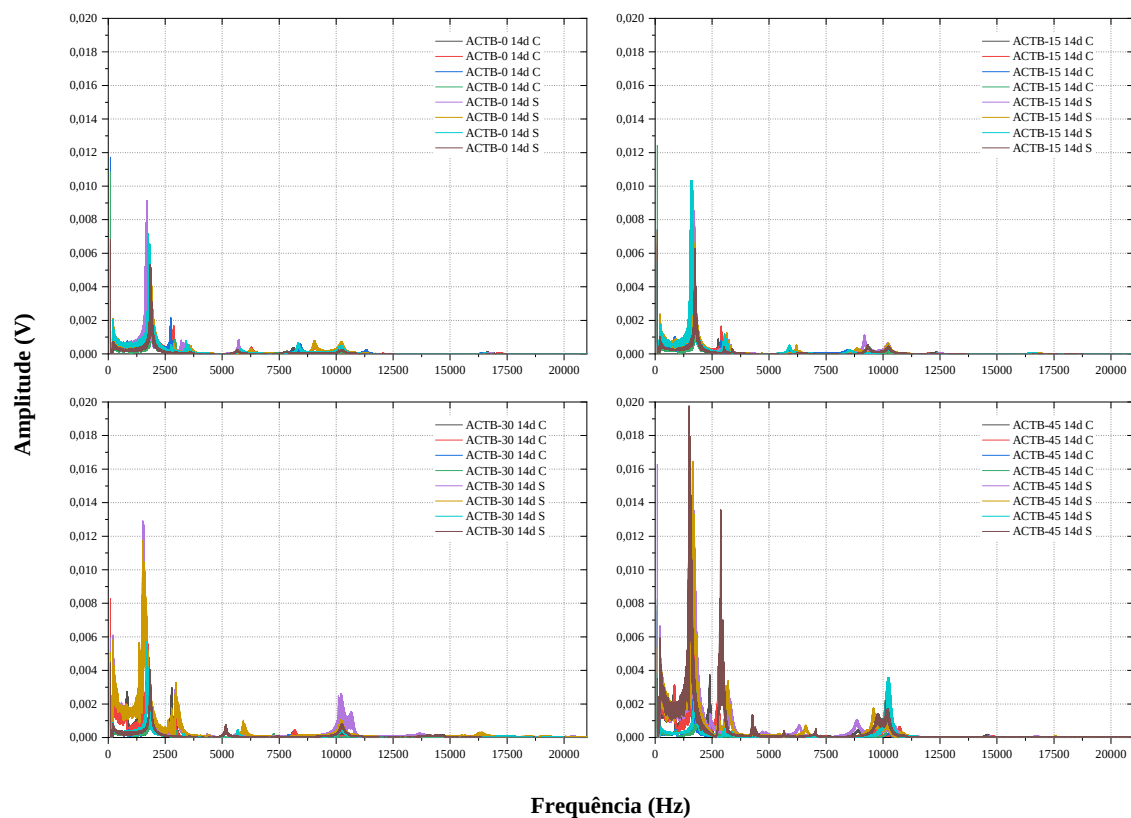


Figura 41 – Espectros de ressonância de amostras sanduíche de argamassa ACTB, com idade de 14 dias, para os diferentes tamanhos de fissura prévia (Fonte: Autora, 2023).

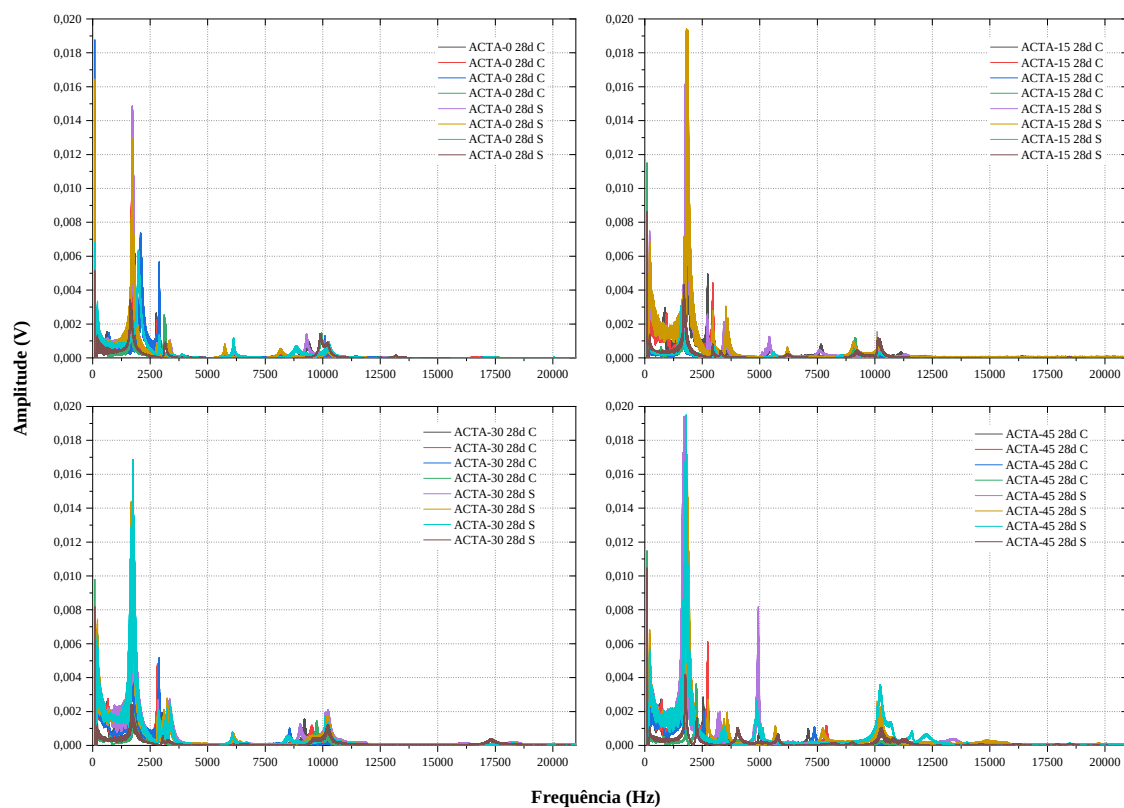


Figura 42 – Espectros de ressonância de amostras sanduíche de argamassa ACTA, com idade de 28 dias, para os diferentes tamanhos de fissura prévia (Fonte: Autora, 2023).

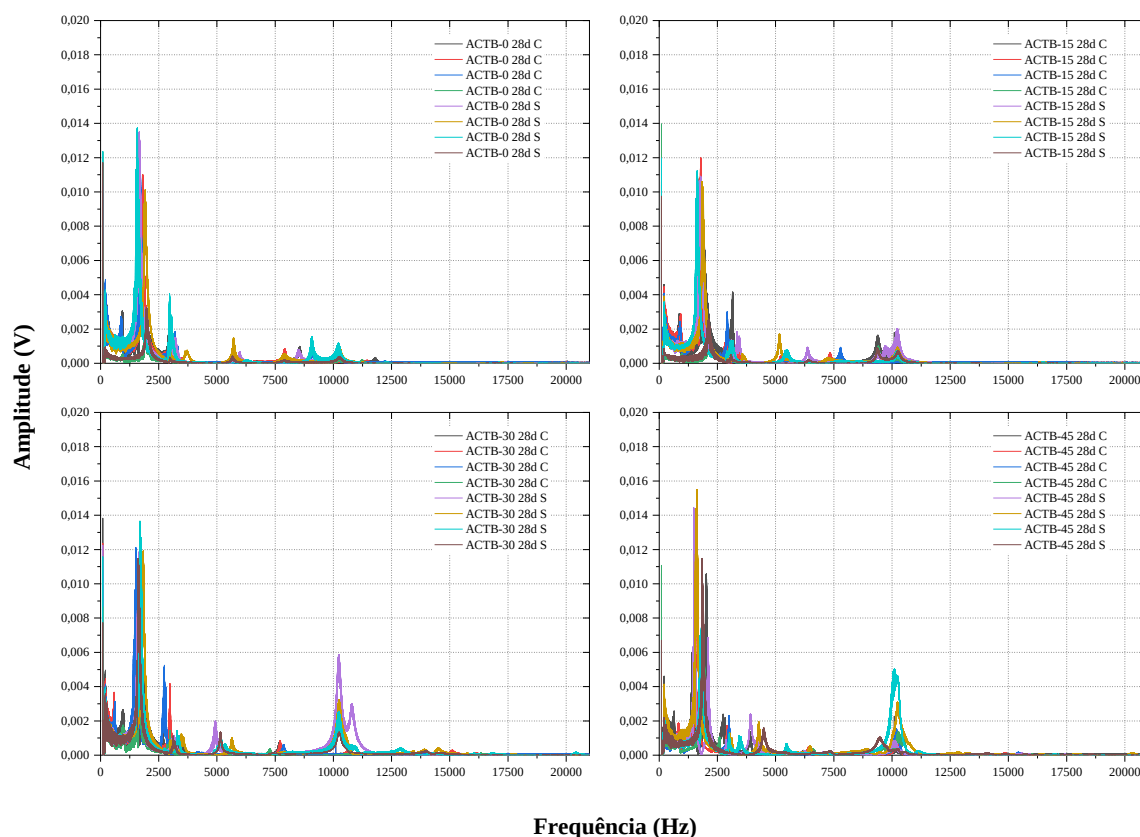


Figura 43 – Espectros de ressonância de amostras sanduíche de argamassa ACTB, com idade de 28 dias, para os diferentes tamanhos de fissura prévia (Fonte: Autora, 2023).

Comparando-se os espectros do teste piloto com os espectros referência destes testes finais, na idade de 7 dias, observa-se que houve a manutenção do padrão de ressonância da amostra, quer seja, dois picos bem definidos até 3000Hz (região de baixa frequência da amostra), outros dois picos na faixa entre 8000Hz e 10000Hz (região de alta frequência da amostra) e alguns picos de menor amplitude no intervalo entre essas faixas. Também pode ser observado que as amplitudes da região de alta frequência são menores para o sanduíche de ACTB, assim como observado na fase piloto dos testes, dando evidência da maior aderência da cerâmica com a argamassa tipo B e, por isso, sua menor amplitude de vibração.

A seguir será realizada a discussão dos espectros obtidos na segunda fase de ensaios (Figuras 38 a 43) e, a fim de tornar mais didática a compreensão dos resultados, optou-se por dividir a discussão em função das variáveis de análise.

5.5.1 Influência do Tamanho da Fissura Prévia

Uma análise visual dos espectros à medida que o tamanho da fissura de interface aumenta, permite muito facilmente identificar que o padrão mais homogêneo dos espectros referência (0mm) vai sendo perdido e ocorre uma descaracterização do padrão de

ressonância do material. O espectro vai ficando com muitos picos desencontrados, há um aumento da quantidade de picos na região de baixa frequência e um aumento significativo da amplitude do pico na região de 10000Hz. A descaracterização do padrão de frequências ressonantes fica mais evidente nos espectros das amostras com fissura de 45mm, apesar de também poder ser observado alguns desses aspectos nos espectros das amostras com fissura de 30mm.

Para melhor ilustrar o aspecto descrito, tem-se as Figuras 44 e 45 que apresentam a comparação dos espectros referência com os espectros de 45mm de fissura, para os tipos de argamassas ACTA e ACTB, respectivamente, em idades distintas.

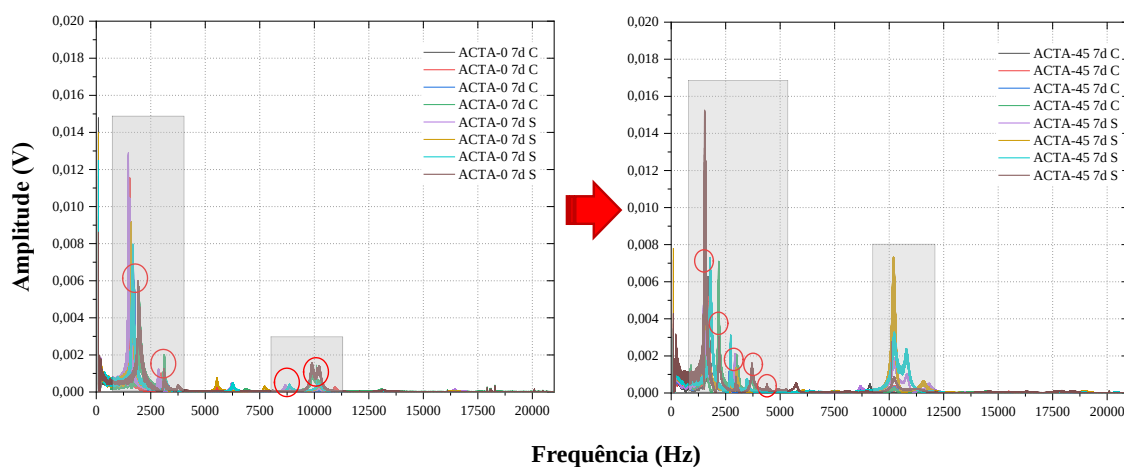


Figura 44 – Alteração do padrão ressonante do material em razão da presença de fissura de interface de 45mm em amostra com ACTA (Fonte: Autora, 2023).

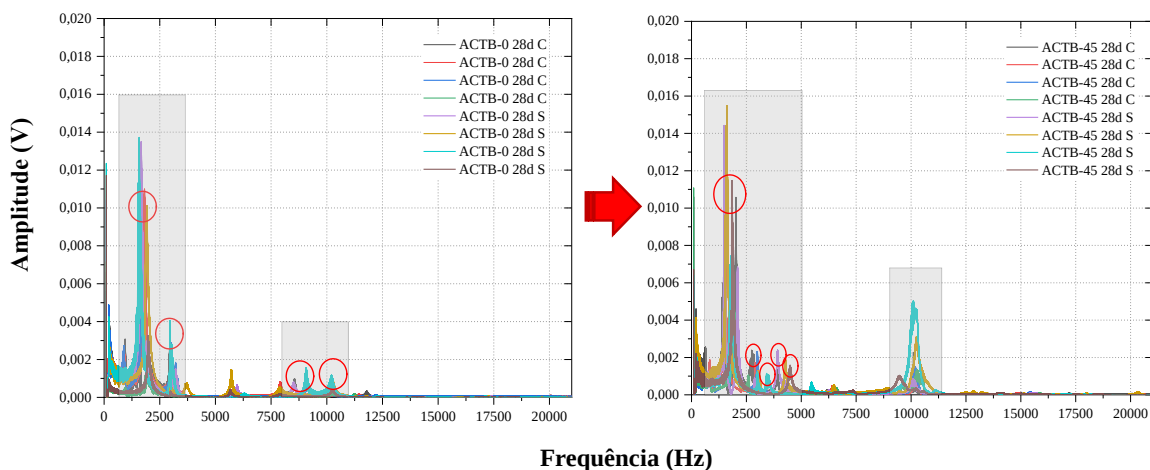


Figura 45 – Alteração do padrão ressonante do material em razão da presença de fissura de interface de 45mm em amostra com ACTB (Fonte: Autora, 2023).

O aumento da quantidade de picos na região de baixa frequência dos espectros pode estar associado a redução da rigidez da amostra, pois, de acordo com a norma americana ASTM E2001 (2013) – Standard guide for Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS) for Defect Detection in Both Metallic and Non-Metallic Parts,

Se um defeito, como uma trinca, for introduzido em uma região sob tensão, ele reduzirá a rigidez efetiva, ou seja, a resistência da peça à deformação, e deslocará para baixo a frequência dos modos ressonantes que introduzem tensão na trinca. Esta é uma base para detectar defeitos com técnicas baseadas em RUS.

Sendo assim, um dos indicativos da presença do dano dessas amostras por meio da análise dos seus espectros de ressonância seria o aparecimento de mais picos na região de baixa frequência, em razão da redução de rigidez da argamassa com falha.

Uma análise das Figuras 44 e 45 também revela que o pico presente nas amostras referência na região entre 8000Hz e 9000Hz, sofre amortecimento nas amostras com 45mm de fissura. Esse amortecimento é de tal magnitude que o pico parece ter sumido dos espectros dessas amostras. Esse amortecimento pode ser observado nas amostras de ambos os tipos de argamassa, com fissuras a partir de 30mm. As Figuras 47 e 48 apresentam uma ampliação da região onde ocorre esse amortecimento.

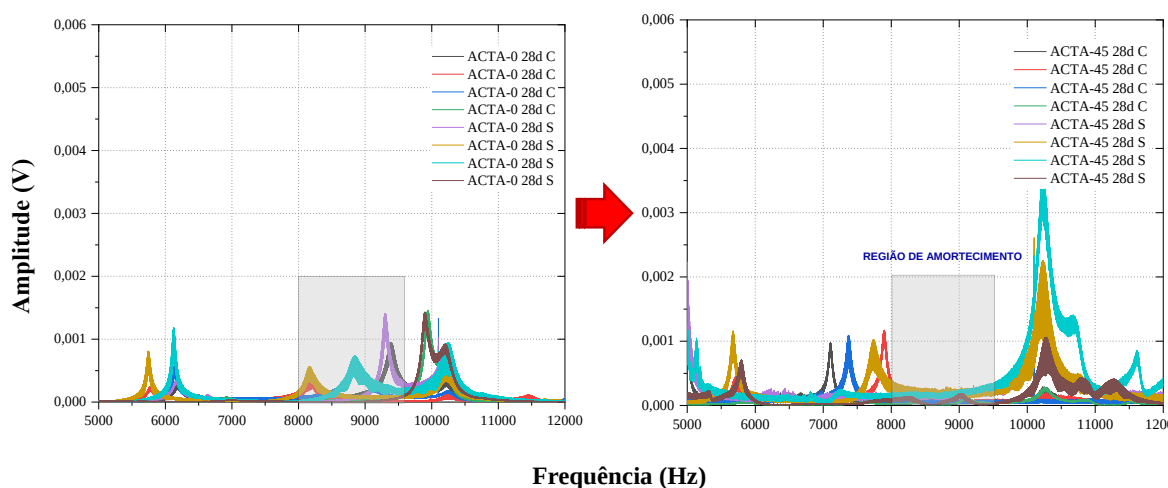


Figura 46 – Comparação das regiões de frequência ressonante entre 8000 e 9000Hz dos espectros de ACTA-0 e ACTA- 45mm para observação do amortecimento (Fonte: Autora, 2023).

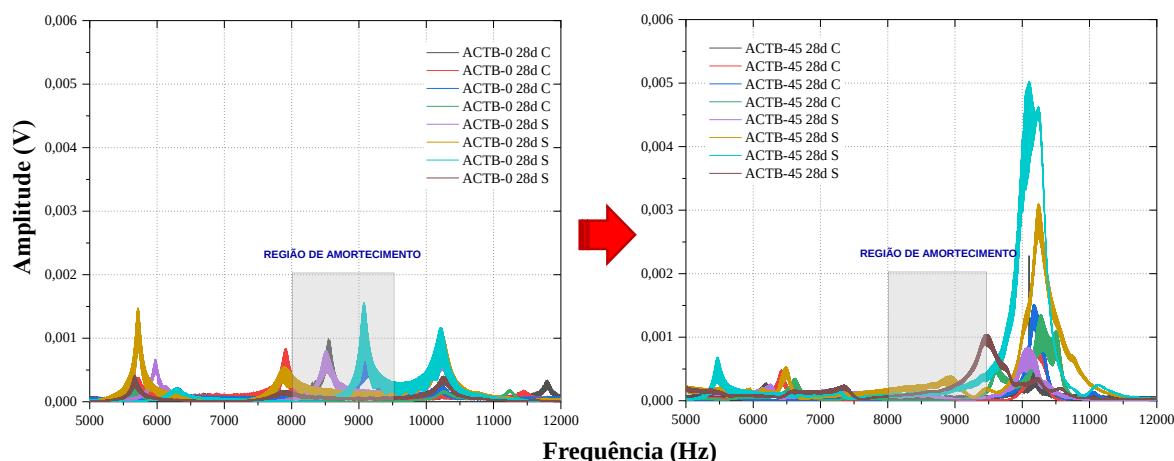


Figura 47 – Comparação das regiões de frequência ressonante entre 8000 e 9000Hz dos espectros de ACTB-0 e ACTB- 45mm para observação do amortecimento (Fonte: Autora, 2023).

O amortecimento é uma propriedade particularmente sensível a presença de trincas, sendo maior, quanto maior for a extensão do dano. Cossolino e Pereira (2010, p. 3) chegam a afirmar que “a nucleação e evolução de micro-trincas e trincas podem ser monitoradas com a caracterização do amortecimento, que aumenta devido ao atrito entre as paredes destas trincas”. Sendo assim, o fato deste pico situado entre 8000Hz e 9000Hz parecer ser o único pico cujo parâmetro de amortecimento foi sensível a presença da fissura prévia, sugere que ele possa ser entendido como um pico que reflete a resposta da interface de ligação argamassa/cerâmica da amostra, evidenciando a presença da falha de aderência em virtude da presença da fissura. Análises estatísticas foram realizadas para comprovação da hipótese levantada e será apresentada no item 5.5.5.1.

Um terceiro indicativo de falha de aderência que pode ser observado por meio dos espectros é a alteração da amplitude provocada no pico situado na frequência de 10000Hz. A diferença entre as amplitudes pode ser observada facilmente ao ser comparado o pico das amostras referência com o mesmo pico nas amostras de 30mm e 45mm de fissura prévia, apresentados nas Figuras 38 a 43 e nas ampliações das Figuras 46 e 47. As Figura 48 e 49 apresentam gráficos com valores médios das amplitudes do pico em 10000Hz e sua evolução com o crescimento da fissura.

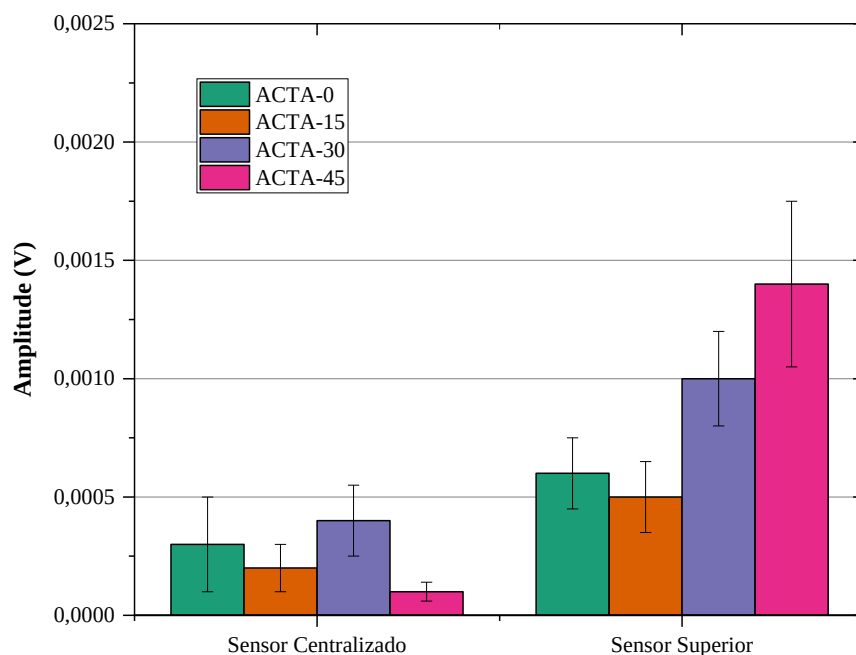


Figura 48 – Valores médio de amplitude do pico situado na frequência de 10.000Hz em função do tamanho da fissura e da posição do sensor acelerômetro de amostras ACTA aos 28 dias (Fonte: Autora, 2023).

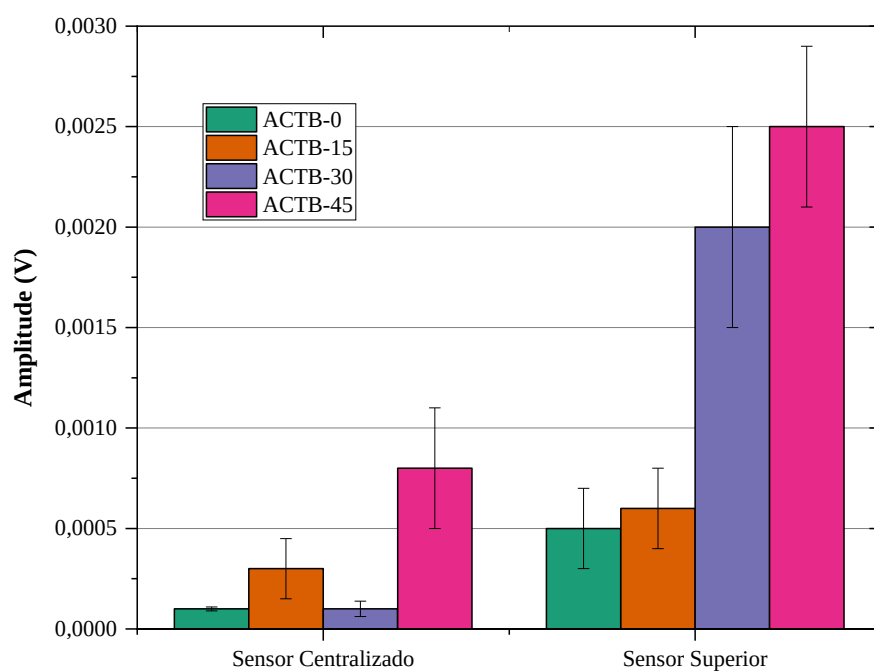


Figura 49 – Valores médio de amplitude do pico situado na frequência de 10.000Hz em função do tamanho da fissura e da posição do sensor acelerômetro de amostras ACTB aos 28 dias (Fonte: Autora, 2023).

Os gráficos apresentados nas Figuras 48 e 49 revelam que para um mesmo nível de dano, a amplitude do pico sofre influência da posição do acelerômetro. Isso é justificado pela

configuração estrutural do ensaio, que favorece maior flexão da amostra na região em balanço, sendo assim, as frequências ressonantes captadas pelo acelerômetro localizado nessa posição, tendem a ter picos de maiores amplitudes devido a sua menor restrição para vibrar.

Porém, ainda que se considere a influência da posição em que as respostas ressonantes são captadas, ao considerar uma mesma posição do acelerômetro, verifica-se que o aumento da amplitude ocorre, sendo cada vez mais alto à medida que o tamanho da fissura aumenta.

Além disso, observando mais uma vez os espectros das amostras com 45mm de fissura (Figuras 38 a 43), percebe-se que sempre há amostras cujas amplitudes em 10000Hz superam o valor de 0,002V, para o posicionamento superior do acelerômetro, ou seja, próximo a região de localização da falha de aderência. Isso ocorre para todas as idades e tipos de argamassa.

O fato apresentado se faz importante porque esse mesmo nível de amplitude foi alcançado pelas amostras compostas somente de placa cerâmica, ensaiadas na fase piloto (Figuras 32 e 33). O seu pico em 10000Hz também assume valores acima de 0,002V. Ou seja, o nível de vibração da amostra sanduíche com uma fissura de 45mm (correspondente a um pouco mais de um terço da área de uma das interfaces) se iguala ao nível de vibração de uma placa cerâmica “solta”.

Dito isto, pode-se admitir que a amplitude do pico em 10000Hz sofre alteração em função não somente da posição do acelerômetro, mas também em razão da existência de dano na amostra, refletindo o grau de descolamento da placa cerâmica. O pico em 10000Hz estaria, portanto, refletindo a resposta ressonante da peça cerâmica que, à medida que perde o contato efetivo com a argamassa pela presença da fissura de interface, tem mais liberdade para vibrar e, portanto, maiores amplitudes de pico são observadas, assemelhando-se a de uma placa “solta”.

Esses resultados também podem sugerir que o ensaio de ressonância, além de detectar a presença de dano no material, também auxilie na identificação de sua localização, pois para a presente pesquisa, as maiores amplitudes foram observadas em amostras com fissuras de 45mm quando o sensor estava posicionado na parte superior da amostra, coincidente com a região de localização da falha.

A discussão realizada até então possibilitou avaliar o efeito da fissura sobre os espectros de ressonância, chegando-se na construção de diretrizes que podem nortear a identificação de dano em amostras analisadas por meio de suas frequências de ressonâncias, quais sejam:

1. Descaracterização do padrão ressonante, com aumento na quantidade de picos na região de baixa frequência;
2. Amortecimento do pico que reflete a falha de aderência da interface que, para os ensaios realizados nessa pesquisa, situa-se entre 8000Hz e 9000Hz;
3. Aumento significativo da amplitude do pico em 10000Hz, evidenciando o descolamento da cerâmica;

É importante salientar que todas essas evidências foram observadas facilmente nas amostras com o maior comprimento de fissura adotado na pesquisa.

5.5.2 Influência do Tempo de Cura

Sendo este um parâmetro influente no desenvolvimento das propriedades dos materiais cimentícios, resolveu-se verificar se nos ensaios de ressonância o efeito do tempo de cura seria perceptível por meio da leitura dos espectros.

É importante lembrar que nos ensaios MMF, os resultados estatísticos mostraram que esse mesmo parâmetro não causou alteração nos valores da carga máxima alcançadas pelas amostras.

As Figuras 50 e 51 apresentam os espectros de ressonância em diferentes idades.

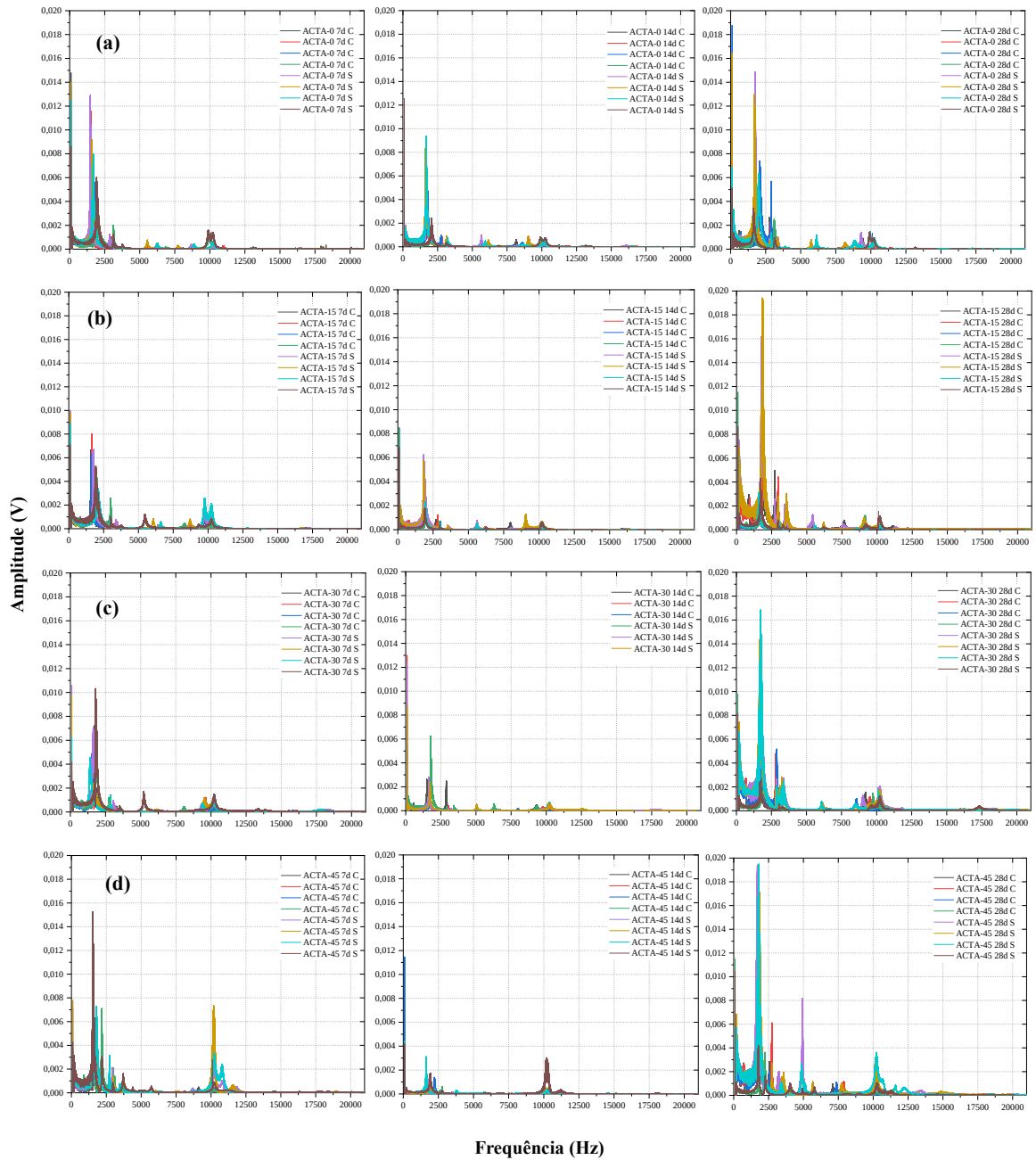


Figura 50 – Alteração dos espectros ao longo da idade das amostras com ACTA para cada tamanho de fissura: (a) 7d, 14d e 28d - 0mm; (b) 7d, 14d e 28d - 15mm; (c) 7d, 14d e 28d - 30mm e (d) 47d, 14d e 28d - 45mm (Fonte: Autora, 2023).

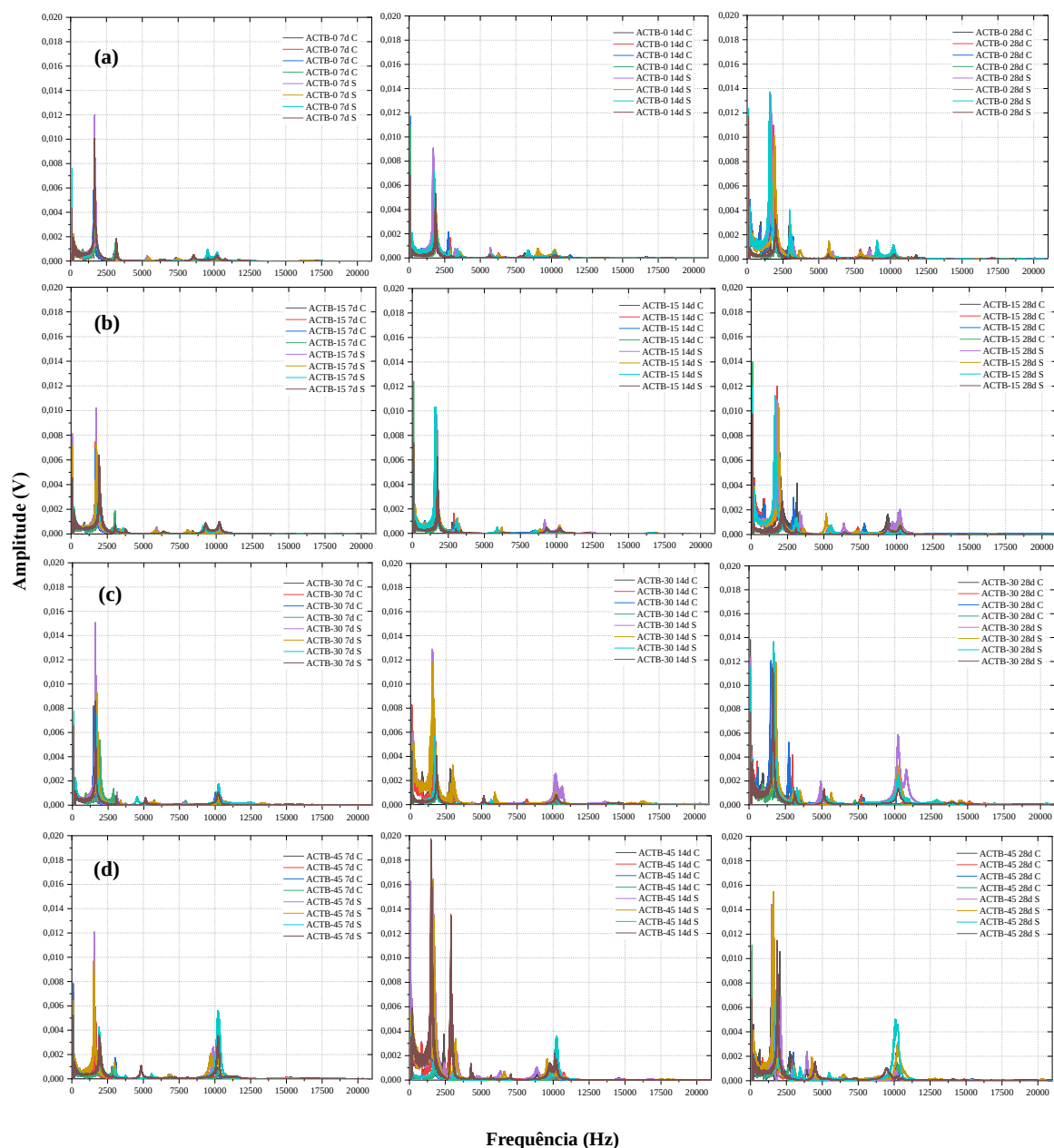


Figura 51 – Alteração dos espectros ao longo da idade das amostras com ACTB para cada tamanho de fissura: (a) 7d, 14d e 28d - 0mm; (b) 7d, 14d e 28d - 15mm; (c) 7d, 14d e 28d - 30mm e (d) 47d, 14d e 28d - 45mm (Fonte: Autora, 2023).

Em relação as frequências ressonantes, a análise visual dos espectros não permitiu verificar a existência de alterações. Porém, quando se observam as amplitudes dos picos da primeira e segunda frequência, percebe-se que elas parecem aumentar com a evolução das reações de hidratação.

O aumento nas amplitudes ocorre nos dois tipos de argamassa e para todos os grupos de amostras, sem e com fissura. É importante destacar também que os picos que tiveram suas

amplitudes aumentadas com a idade foram aqueles situados na região entre 1500Hz e 3000Hz, que é a região característica do componente cimentício presente na amostra sanduíche. A partir do exposto, verifica-se a maior sensibilidade do ensaio não destrutivo em captar as transformações ocorridas na resposta da amostra em função da idade, uma vez que o mesmo não pode ser percebido por meio do ensaio MMF.

A amplitude é uma propriedade que se relaciona com a capacidade dissipativa do material. O fato das amplitudes se tornarem maiores com a idade, mostra que o material não está dissipando, mas sim acumulando energia potencial. Para um mesmo nível de dano, um material com mais energia potencial é um material com mais capacidade aderente, pois ainda conserva energia para dissipar.

O aumento das amplitudes de vibração das 1ª e 2ª frequências naturais também traz implicações sobre os valores de energia das amostras. A análise dos parâmetros de energia e as análises estatísticas que possam confirmar a discussão levantada será realizada nos itens que tratarão especificamente dessas questões.

5.5.3 Influência do Tipo da Argamassa

Na etapa de teste piloto foi observado que os valores da primeira frequência eram diferentes de acordo com o tipo de AC usada. Nessa etapa final, a fim de conferir se o mesmo ocorria, construiu-se a Tabela 24 com os valores médios da primeira frequência dos espectros, para os dois tipos de argamassa empregados.

Tabela 24 – Valores comparativos da 1ª frequência natural entre as argamassas ACTA e ACTB nas três idades em estudo (Fonte: Autora, 2023).

1ª Frequência (Hz) - 7 dias															
Posição Centralizada								Posição Superior							
	0mm	DP	15mm	DP	30mm	DP	45mm	DP		0mm	DP	15mm	DP	30mm	DP
ACTA	1737,86	189,55	1752,46	194,71	1723,48	116,64	1653,14	68,70		1698,05	190,38	1967,52	133,28	1641,44	165,50
ACTB	1691,35	49,85	1751,99	106,28	1701,00	181,02	1795,02	227,25		1689,31	17,61	1833,95	106,25	1665,74	67,22

1ª Frequência (Hz) - 14 dias															
Posição Centralizada								Posição Superior							
	0mm	DP	15mm	DP	30mm	DP	45mm	DP		0mm	DP	15mm	DP	30mm	DP
ACTA	1803,25	202,73	1931,85	59,32	1661,27	86,79	1848,12	113,07		1778,48	193,25	1904,60	49,92	1736,43	62,46
ACTB	1839,93	85,02	1708,69	46,43	1760,29	119,63	1705,63	116,87		1812,14	79,04	1686,97	60,65	1674,13	128,67

1ª Frequência (Hz) - 28 dias															
Posição Centralizada								Posição Superior							
	0mm	DP	15mm	DP	30mm	DP	45mm	DP		0mm	DP	15mm	DP	30mm	DP
ACTA	1825,19	197,72	1786,78	119,98	1755,46	60,17	1801,22	67,70		1786,83	148,49	1751,33	114,84	1738,73	30,44
ACTB	1816,28	100,09	1889,41	205,94	1657,44	135,82	1684,98	228,66		1799,52	193,95	1856,51	201,33	1711,95	90,11

Os dados da Tabela 24 mostram que não há diferença entre as primeiras frequências das duas argamassas. Uma provável justificativa pode estar no fato de que a argamassa tipo B não alcançou o desempenho mecânico necessário para ser enquadrada como uma ACIII,

ficando com o desempenho mecânico de uma ACII, que se aproxima razoavelmente do apresentado pela argamassa tipo A (classificada como uma ACI). Este fato deve ter contribuído para que a rigidez das duas argamassas se apresentasse semelhante, e a diferença observada na fase piloto não pudesse ser perceptível nesta etapa. Os valores do ensaio de caracterização da argamassa foram apresentados nas Tabela 10 e 11, na primeira parte dos resultados.

Uma análise visual dos espectros de ressonância dos dois tipos de argamassa (Figuras 38 a 43), não permite identificar diferenças entre eles, exceção aos espectros de 14d, cujas amplitudes das amostras com ACTA ficaram significativamente menores. A menor amplitude desse espectro, porém, não é algo percebido somente quando se compara, para essa mesma idade, os espectros das duas argamassas. Ao comparar os espectros dos sanduíches com ACTA, ao longo das idades, também se percebe a diferença, ou seja, não deve ter sido o tipo de argamassa que influenciou.

Uma análise de diferenças significativas das frequências, amplitudes e de demais parâmetros dos principais picos do espectro foi realizada para posterior discussão e validação da discussão exposta.

5.5.4 Análise Estatística dos Parâmetros de Frequência e Amplitude dos Espectros

Para esta análise foram escolhidos 4 picos que, em primeiro lugar, se mantinham em todos os espectros obtidos; em segundo lugar, foram identificados como picos característicos de um determinado componente da amostra; e por fim, que foram sendo observados ao longo das discussões como picos que sofreram influência das variáveis fissura, idade ou tipo de AC. Os picos para análise foram: os dois picos da região de baixa frequência situados na região entre 1500Hz e 3000Hz, nomeados de picos 1 e 2; e os dois últimos picos da região de alta frequência entre 8000Hz e 10000Hz, nomeados de picos 3 e 4, respectivamente.

As Tabelas 25 e 26 apresentam os resultados dos testes estatísticos. Na Tabela 25 vê-se o resultado do teste de Kruskal Wallis para análise de diferenças significativas. Esse teste, já aplicado nas análises dos ensaios MMF, permite verificar se houve ou não interferência das variáveis fissura, idade e tipo de AC sobre os valores dos parâmetros de pico. Os valores com asterisco correspondem aos resultados em que a hipótese nula de igualdade entre as médias dos valores é rejeitada, mostrando assim que há diferença entre elas.

A Tabela 26 traz o resultado da análise do teste de correlação de Spearman, a fim de que se pudesse verificar se a interferência da variável sobre o parâmetro de pico tem alguma correlação e se esta é direta ou inversa.

Tabela 25 – Resultado do teste de hipótese Kruskal-Wallis sobre as frequências e amplitudes dos picos (Fonte: Autora, 2023).

Parâmetros de Pico	Variáveis de Estudo		
	(p-valor)		
	AC	Fissura	Idade
Freq1	0,1725	0,003*	0,0652
Freq2	0,0673	0,0004*	0,007*
Freq3	0,1151	0,0789	0,8769
Freq4	0,0134*	0,0009*	0,4420
Ampl 1	0,0059*	0,5713	0,0000*
Ampl 2	0,3207	0,2232	0,0000*
Ampl 3	0,0461*	0,0000*	0,1954
Ampl 4	0,5958	0,0066*	0,0002*

Tabela 26 – Resultado do teste de Spearman sobre as frequências e amplitudes dos picos (Fonte: Autora, 2023).

Parâmetros de Pico	Coeficientes de correlação		
	*correlações significativas (p-valor<0,05)		
	AC	Fissura	Idade
Freq1	-0,10	-0,15*	0,15*
Freq2	0,13	-0,26*	-0,21*
Freq3	-0,12	0,07	0,02
Freq4	0,18*	0,23*	0,03
Ampl 1	0,20*	0,02	0,19*
Ampl 2	0,07	0,08	0,44*
Ampl 3	-0,16*	-0,47*	0,11
Ampl 4	0,04	0,26*	0,02

Iniciando pela interferência da fissura, verifica-se que as frequências dos picos foram afetadas na região de frequências até 3000Hz (picos 1 e 2), e apresentaram uma correlação inversa (sinal negativo na Tabela 26) com o tamanho da fissura, indicando que os seus valores vão ficando menores à medida que se aumenta o tamanho do dano.

Para identificar qual ou quais tamanhos de fissura exercem a interferência, foi realizado o teste de comparação múltipla Conover-Iman. As Figuras 52 e 53 trazem os

valores das frequências dos picos 1 e 2, respectivamente, e o resultado do teste estatístico pode ser visualizado pela indicação das letras no interior das barras. A mesma letra denota grupos homogêneos.

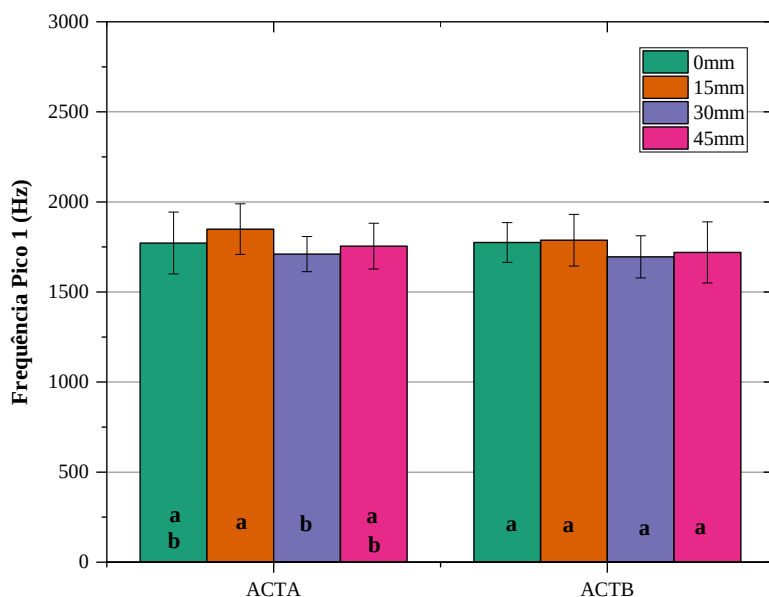


Figura 52 – Efeito do tamanho da fissura sobre a frequência de ressonância do pico 1 para os dois tipos de argamassa. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023)

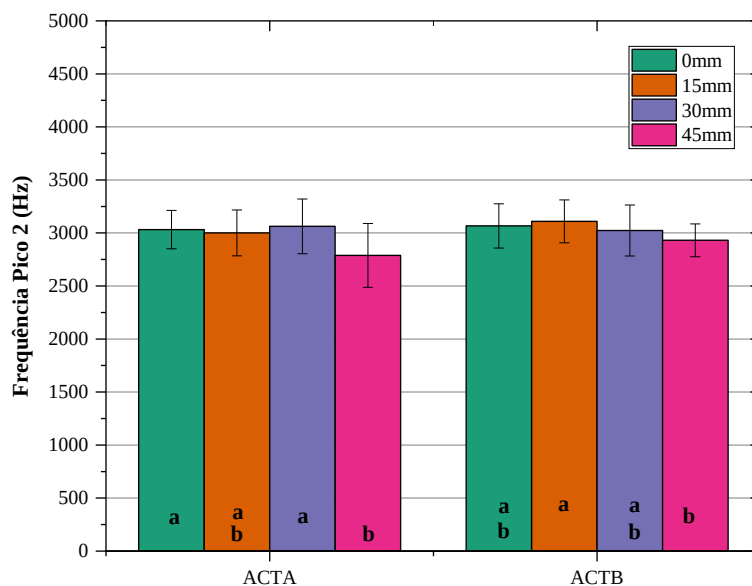


Figura 53 – Efeito do tamanho da fissura sobre a frequência de ressonância do pico 2 para os dois tipos de argamassa. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023)

O teste de comparações múltiplas revela que para o pico 1, a frequência de ressonância só é alterada nas amostras com ACTA e quando seus valores são comparados entre duas amostras já fissuradas, não sendo perceptível a diferença entre as frequências quando comparada com uma amostra íntegra, justificando o fato disso não ter ficado evidente por meio da análise visual dos espectros.

No caso da frequência de ressonância do pico 2 (situada na região de 3000Hz), a redução da frequência de ressonância é sentida nas amostras com ACTA e ACTB com fissura prévia de 45mm. Mas somente nas amostras com ACTA essa diferença é significativa ao se comparar com os valores de frequência de uma amostra íntegra. Em razão disso, se faz necessário mais testes para verificar se esse é um padrão a ser observado nas respostas de ressonância do material.

Outro parâmetro afetado pela presença da fissura é amplitude dos picos 3 e 4 (Tabela 25). A estatística mostra o que também fora observado e já discutido anteriormente a partir das análises dos espectros, que a amplitude do pico 3 é diminuída (sinal negativo na Tabela 26), comprovando ser o único pico a sofrer amortecimento; e que a amplitude do pico 4 é aumentada à medida que se aumenta o tamanho do dano.

Com relação a idade da argamassa colante, os valores de frequência não sofreram alteração, exceção ao pico 2 (Tabela 25) que apresentou uma correlação inversa (Tabela 26), revelando ter havido uma redução em seu valor com o passar da idade.

Em contrapartida, confirmando o que fora observado por meio dos espectros de ressonância, o parâmetro amplitude parece ter se mostrado mais sensível para captar a evolução das reações de hidratação, em que três dos quatro picos analisados foram alterados significativamente pelo desenvolvimento das reações do material cimentício, mas somente os picos 1 e 2 se correlacionaram com essa variável de maneira direta (Tabela 26), tendo suas amplitudes aumentadas com o passar da idade.

A amplitude do pico 1, situado na faixa de frequência entre 1600 e 1800Hz, também sofreu interferência do tipo de argamassa colante. Para averiguação, foi realizado o teste de comparações múltiplas para verificação de quais subgrupos eram atingidos por essa interferência.

A Figura 54 apresenta os valores de amplitude do pico 1, com captação pelo sensor superior, em amostras com idade de 14 dias.

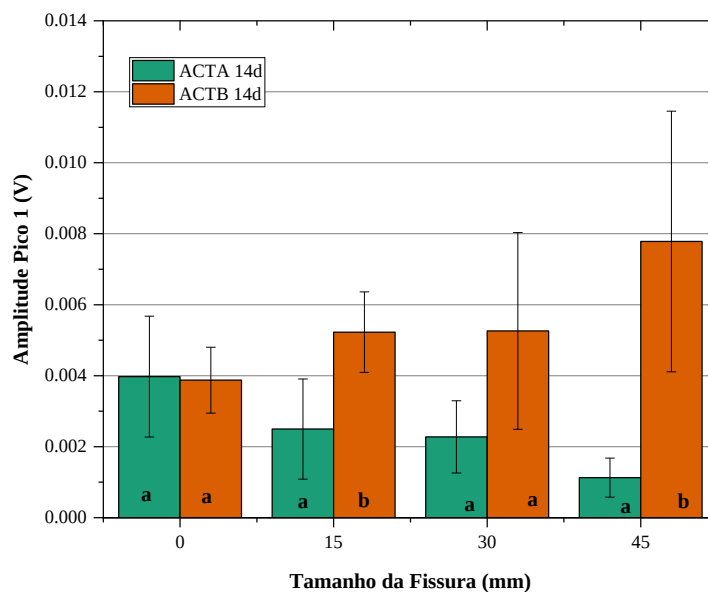


Figura 54 – Efeito do tipo de AC sobre a amplitude do pico 1 para os diferentes tamanhos de fissura, aos 14d. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman (p -valor < 0,05), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora, 2023)

Os valores apresentados na Figura 54 mostraram que essa diferença de amplitudes não existiu entre as amostras referências, sendo apenas observada nas amostras já fissuradas (15mm e 45mm). Apesar da constatação da interferência em amostras fissuradas, não se pode afirmar que este comportamento é um padrão a ser considerado, uma vez que ele não foi observado nas demais idades de 7 e 28 dias.

Finalizada as análises estatísticas propostas para esses parâmetros, se faz importante ressaltar que elas puderam validar a discussão anteriormente realizada através das análises visuais dos espectros de ressonância das amostras.

5.5.5 Análise da Aderência por Parâmetros de Energia

Assim como o realizado nos ensaios MMF, para os testes de ressonância também será realizada uma análise da adesão utilizando-se de parâmetros de pico que podem ser associados a uma análise quantitativa de energia.

Os parâmetros de pico utilizados para essa análise foram a largura de banda, amortecimento e área sob a curva do pico. Com exceção ao amortecimento, que foi calculado a partir do método da largura de banda, os demais parâmetros foram extraídos a partir de um

ajuste de curvas do software OriginLab2018, conforme já mencionado na metodologia. A Figura 55 traz a identificação desses parâmetros.

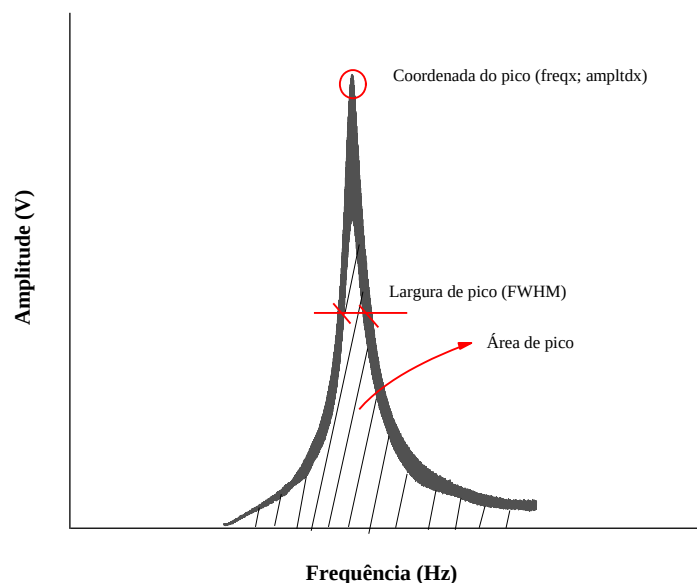


Figura 55 – Identificação dos parâmetros de picos de ressonância (Fonte: Autora, 2023).

A análise da adesão em razão dos parâmetros energéticos será dividida em função dos efeitos das variáveis fissura, tipo de AC e idade.

5.5.5.1 Efeito da Fissura

Com o intuito de fundamentar a discussão, foi realizada uma análise estatística dos parâmetros de pico dos 4 mesmos picos de ressonância escolhidos anteriormente na discussão das frequências e amplitudes. A Tabela 27 traz a análise de diferenças significativas em função das variáveis independentes do estudo. Os valores com asterisco correspondem aos resultados em que a hipótese nula de igualdade entre as médias dos valores é rejeitada, mostrando assim, que há diferença entre elas.

Com relação ao efeito da fissura sobre os parâmetros energéticos do pico, a Tabela 27 mostra que esta provocou interferências sobre o pico 3 (8000 Hz e 9000Hz) em todos os parâmetros envolvendo energia. Este pico foi identificado anteriormente (item 5.5.1) como o pico que sofreu um amortecimento tal que, nas amostras de 45mm, ele não é mais visualizado.

Para ampliar a discussão, também foi realizado o teste de correlação de Spearman, apresentado na Tabela 28.

Tabela 27 – Resultado do teste de hipótese Kruskal-Wallis para avaliação da interferência das variáveis AC, fissura e idade sobre os parâmetros de pico (Fonte: Autora, 2023).

Parâmetros de Pico	Variáveis de Estudo		
	(p-valor)		
	AC	Fissura	Idade
FWHM 1	0,2782	0,3851	0,0000*
FWHM 2	0,1900	0,0699	0,6563
FWHM 3	0,0013*	0,0000*	0,1692
FWHM 4	0,0468*	0,7917	0,6456
Amort 1	0,4552	0,2513	0,0001*
Amort 2	0,3083	0,1810	0,4864
Amort 3	0,0007*	0,0000*	0,2099
Amort 4	0,0261*	0,7830	0,7630
Energ 1	0,0606	0,4506	0,0000*
Energ 2	0,2164	0,1484	0,0000*
Energ 3	0,1892	0,0000*	0,0418*
Energ 4	0,7860	0,0248*	0,0011*

Tabela 28 – Resultado do teste de Spearman (Fonte: Autora, 2023).

Parâmetros de Pico	Coeficientes de correlação		
	*correlações significativas (p-valor<0,05)		
	AC	Fissura	Idade
FWHM 1	-0,08	0,00	0,33*
FWHM 2	0,10	0,17*	0,03
FWHM 3	0,25*	0,41*	0,10
FWHM 4	-0,15*	0,02	-0,05
Amort 1	-0,05	0,04	0,31*
Amort 2	0,07	0,22*	0,07
Amort 3	0,27*	0,40*	0,10
Amort 4	-0,17*	0,00	-0,04
Energ 1	0,14	0,00	0,27*
Energ 2	0,09	0,15*	0,41*
Energ 3	-0,10	-0,43*	0,15
Energ 4	-0,02	0,22*	0,00

O resultado da análise apresentada na Tabela 28 mostra que no pico 3, a relação da largura e do amortecimento com o tamanho da fissura é direta (sinal positivo), ou seja, maiores tamanhos de fissura provocaram uma interferência na amostra que refletiu no aumento da largura e do amortecimento deste pico.

A largura de banda (FWHM), assim como a amplitude, é um parâmetro indicativo do amortecimento sofrido pela amostra, sendo este último, o mecanismo pelo qual a energia

da amostra é dissipada. Para o pico 3, quanto maior foi o dano, maior se apresentou a largura de banda do pico e maior foi seu amortecimento. As Figuras 56 e 57 apresentam, respectivamente, os valores médios de FWHM e do amortecimento sofrido pelo pico 3, em função do tamanho da fissura para os diferentes tipos de idade.

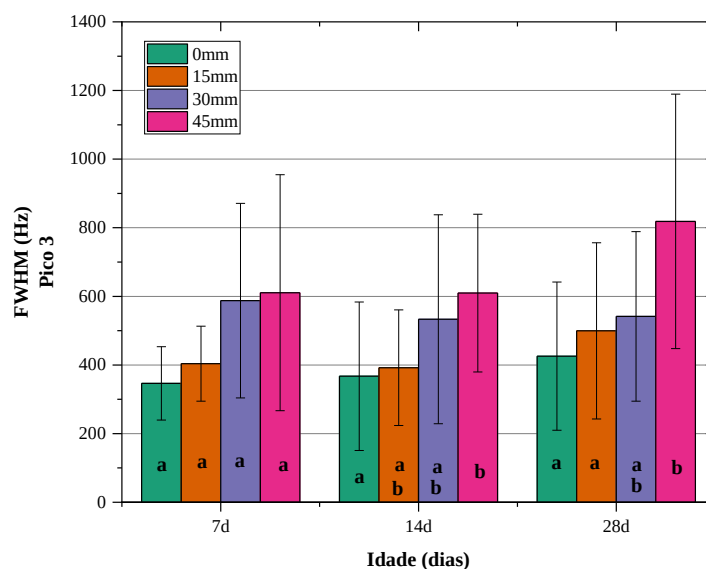


Figura 56 – Efeito do tamanho da fissura sobre a largura de banda do pico 3 em diferentes idades. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023)

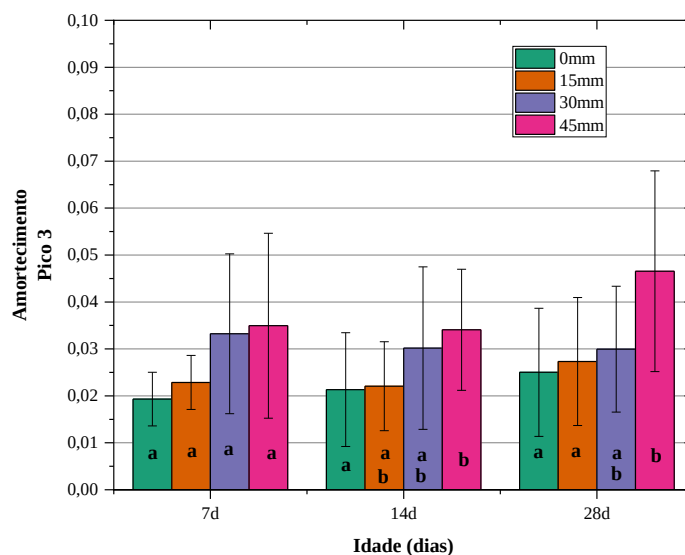


Figura 57 – Efeito do tamanho da fissura sobre o amortecimento do pico 3 em diferentes idades. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023)

As Figuras 56 e 57 mostram que para maiores tamanhos de fissura, a largura de banda e amortecimento do pico situado na frequência entre 8000Hz e 9000Hz, cresce, ilustrando o que já fora demonstrado por meio dos testes estatísticos. Além disso, é possível ainda estabelecer para qual tamanho de fissura a intervenção ocorre. Para os parâmetros de largura de banda e amortecimento, a interferência da fissura é detectável para idade superior a 7 dias e para o tamanho de 45mm de fissura. No caso de fissuras inferiores a 30mm, o dano não foi perceptível a esses parâmetros de pico.

Já a energia potencial elástica do sistema, representada pelo pico 3, possui uma relação inversa (sinal negativo) com o tamanho da fissura (Tabela 28). Isso pode ser explicado pela dissipação de energia que ocorre no pico. A dissipação de energia pode então ser também percebida pela redução da energia potencial elástica, antes armazenada na amostra.

O fato de o efeito da fissura sobre os parâmetros energéticos ocorrer especialmente no pico 3, parece, de fato, corroborar com a hipótese de que este pico reflete o comportamento da interface da ligação argamassa/cerâmica, região em que a inserção da fissura prévia foi realizada. A Figura 58 traz os valores médios da energia do pico 3 em função do tamanho da fissura para os diferentes tipos de idade.

A Figura 58 mostra que a redução da energia elástica das amostras ocorre de maneira significativa aos 28 dias de idade, também para o máximo tamanho de fissura utilizada na pesquisa.

A influência do tamanho da fissura também pode ser percebida pela energia elástica do pico 4, situado na região de 10000Hz. De acordo com a Tabela 28, existe uma relação direta da energia com o tamanho da fissura. Uma vez que este pico parece refletir somente o comportamento da placa, o descolamento provocado pela fissura de 45mm confere a placa mais liberdade para vibrar. A mudança da posição do corpo da cerâmica em torno de sua posição de equilíbrio gerou o armazenamento de energia potencial elástica em seu interior. O armazenamento dessa energia foi maior do que a dissipada pela sua deformação, permitindo assim o aumento observado. A Figura 59 mostra como a energia do pico 4 é aumentada em razão do aumento da área descolada.

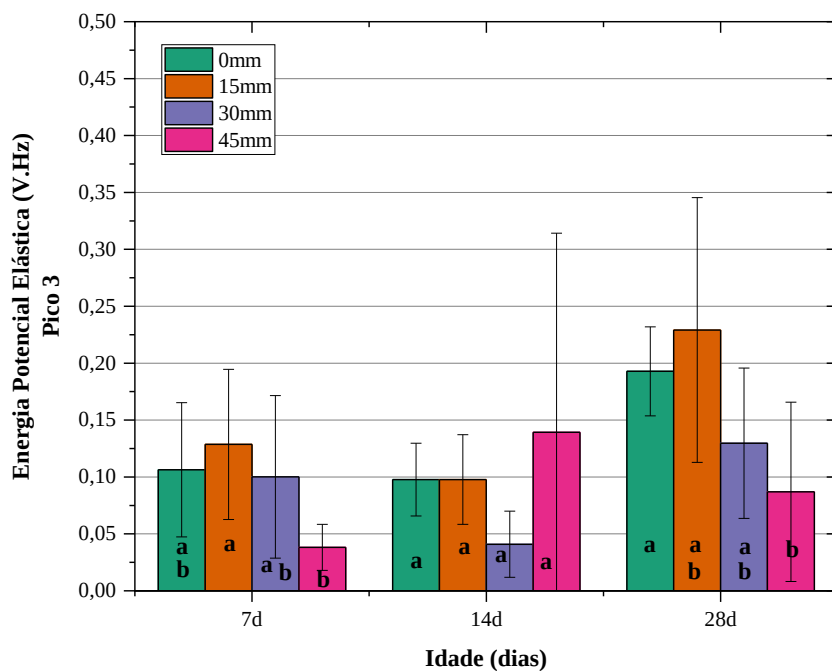


Figura 58 – Efeito do tamanho da fissura sobre a energia potencial elástica do pico 3 em diferentes idades. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora, 2023)

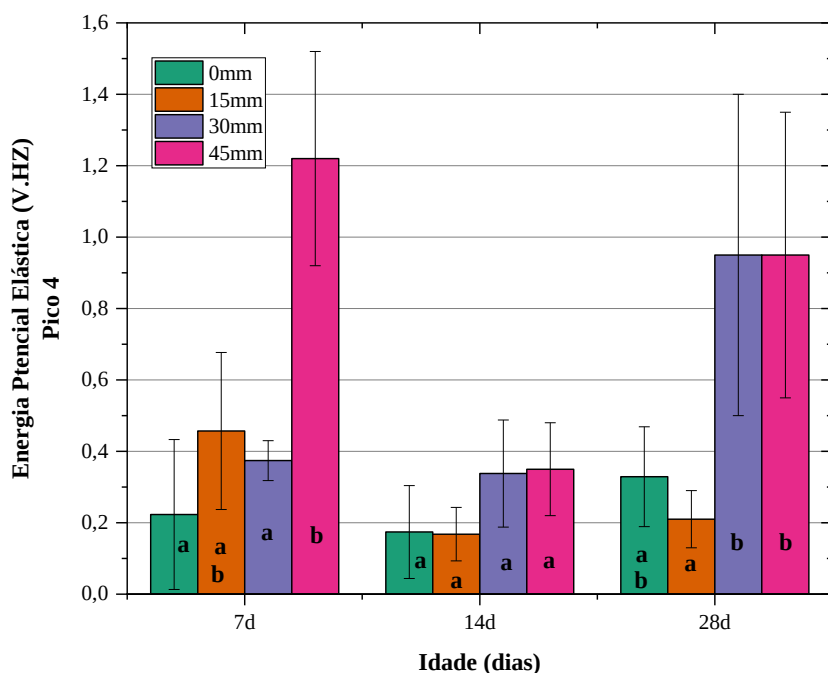


Figura 59 – Efeito do tamanho da fissura sobre a energia potencial elástica do pico 4, captadas pelo sensor superior, em diferentes idades. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora, 2023)

Como visto, a falha na aderência causada por fissuras na interface provoca reflexos na resposta energética do material. A partir do exposto, as seguintes considerações podem ser feitas:

1. A falha de aderência nas amostras pode ser identificada por meio de medidas quantitativas dos parâmetros de energia do pico;
2. O pico cujos parâmetros de energia foram sensíveis a percepção da presença de falha de aderência é o pico situado na região entre 8000Hz e 9000Hz;
3. Assim como nas observações visuais realizadas nos espectros, os parâmetros de energia que sofrem alteração de seus valores são das amostras cujo tamanho da fissura é de 45mm;
4. Amostras com perda de aderência correspondente a aproximadamente 1/3 do seu tamanho, tiveram no pico 3 aumento da sua largura de banda quando comparada com as amostras sem fissura, em idades a partir de 14 dias;
5. A energia dissipada do pico 3 pelas amostras com 45mm de fissura, também é maior quando comparada com as amostras sem fissura;
6. A energia elástica do pico da interface cai como consequência do amortecimento sofrido, mas só é observado aos 28 dias de idade;
7. O descolamento da placa cerâmica provoca aumento da energia elástica do pico em 10000Hz;

5.5.5.2 Efeito do Tempo de Cura

Consultando novamente os resultados apresentados nas Tabelas 27 e 28, vê-se que quanto aos parâmetros de energia, o tempo de cura da argamassa colante mantém sua influência sobre os picos da região de baixa frequência.

A análise visual dos espectros já mostrava que o avanço das reações de hidratação interferia nas amplitudes de vibração dos picos 1 e 2, fato já confirmado estatisticamente. Dessa forma, era possível presumir que os mesmos picos também teriam as suas energias potenciais elásticas afetadas pela variável idade.

A análise estatística apresentada na Tabela 27 revela que a energia dos quatro picos foi alterada significativamente em razão da idade das argamassas, mas, na Tabela 28, verifica-se que a correlação tempo de cura e energia só é significativa para os picos 1 e 2. Essa correlação é direta (sinal positivo – Tabela 28), o que significa que o avanço das reações de hidratação refletiu em um aumento da energia potencial armazenada na argamassa. As Figuras 60 e 61 trazem os valores da energia elástica dos picos 1 e 2 em função do tempo de

cura e o resultado do teste estatístico de comparação múltipla. As letras iguais no interior das barras denotam grupos homogêneos.

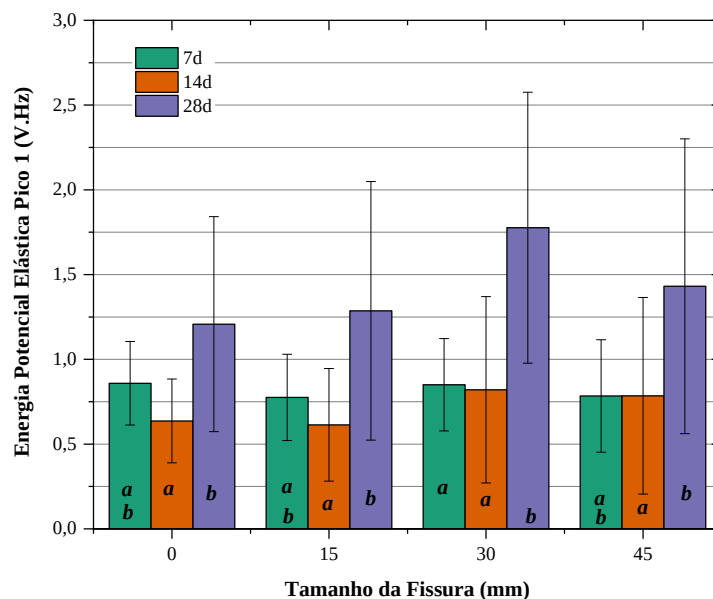


Figura 60 – Efeito do tempo de cura sobre a energia elástica do pico 1 nos diferentes tamanhos de fissura. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023)

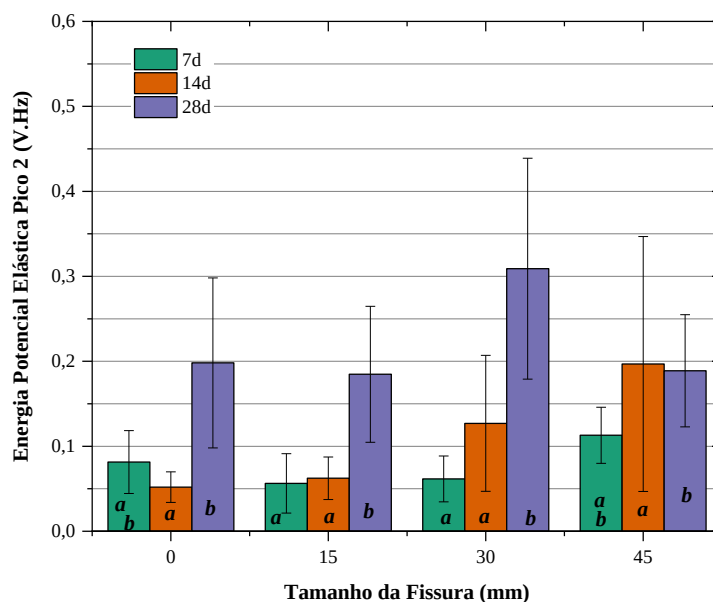


Figura 61 – Efeito da idade sobre a energia elástica do pico 2 nos diferentes tamanhos de fissura. As letras dentro de cada barra indicam diferenças estatísticas entre os grupos recuperados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Conover-Iman ($p\text{-valor} < 0,05$), a mesma letra denota subconjuntos homogêneos. (Fonte: Autora,2023)

As Figuras 60 e 61 revelam que a energia potencial elástica acumulada no sistema é significativamente alterada aos 28 dias de idade, quando apresentou um ganho significativo em comparação com a idade de 14 dias. Esse ganho sofreu influência das mudanças ocorridas na argamassa em razão do desenvolvimento das reações de hidratação.

Também se percebe que mesmo em amostras fissuradas, o ganho de energia ocorre para a idade de 28 dias. Esse comportamento não pode ser observado nos resultados do ensaio MMF, pois nele as médias dos valores situaram-se dentro do desvio padrão das amostras (Figuras 25 e 26). Sendo assim, podemos afirmar que neste estudo o teste de ressonância foi mais sensível para perceber as alterações sofridas pelo material em razão do seu tempo de cura.

5.5.5.3 Efeito do Tipo de Argamassa Colante

Os resultados das análises estatísticas apresentadas nas Tabelas 27 e 28 referentes ao tipo de AC, mostraram que os parâmetros de energia dos picos 1 e 2 também não foram alterados em razão do tipo de AC, assim como não foram os valores de frequência e amplitude. No entanto, se percebe que nos parâmetros energéticos de largura de banda e amortecimento, os picos 3 e 4 sofreram algum tipo de interferência por causa dos diferentes tipos de argamassa. O teste de Mann Whitney foi aplicado para avaliar a influência do tipo de argamassa em cada tamanho de fissura. A Tabela 29 traz o resultado do teste.

Tabela 29 – Resultados do teste estatístico Mann Whitney (Fonte: Autora, 2023).

Subgrupos	Intervenção do tipo de AC							
	FWHM 3		FWHM 4		Amortecimento 3		Amortecimento 4	
	U	p-valor	U	p-valor	U	p-valor	U	p-valor
0 mm	128	0,787	194	0,2649	121	0,601	193	0,255
15 mm	120	0,06	239	0,759	128	0,097	239	0,759
30 mm	74	0,000153*	221	0,350	64	0,000056*	215	0,286
45 mm	264	0,628	210	0,163	273	0,765	203	0,123

Os valores em asterisco indicam as amostras para as quais a hipótese de igualdade dos resultados deve ser rejeitada. O resultado do teste mostrou que o tipo de argamassa colante só alterou significativamente os valores de largura de banda e amortecimento do pico 3 nas amostras com fissura prévia de 30mm e, no pico 4, a interferência não foi encontrada quando o subgrupo considerado era o tamanho de fissura.

Essa análise mostra que o tipo de argamassa colante, assim como observado no ensaio MMF, não teve um efeito significativo sobre os parâmetros de energia das amostras dos picos considerados.

5.6 Comparação dos Resultados MMF e Ressonância

Todas as análises e discussões construídas ao longo dessa pesquisa permite estabelecer um comparativo entre os resultados obtidos a partir dos dois métodos de ensaios empregados na análise da aderência de juntas de argamassa. Este comparativo será sumarizado nos dois pontos que se seguem:

I. Análise da aderência

De todos os parâmetros investigados, nenhum foi mais influente sobre a aderência que as condições do contato na interface. Essa condição foi observada por meio da inserção de uma fissura prévia na interface do substrato com a argamassa colante. A presença da fissura levou a um comprometimento da aderência, confirmado nos resultados de ambos os métodos de ensaios empregados na pesquisa.

No ensaio de flexão de modo misto (MMF) isso foi facilmente identificado pela redução brusca de sua capacidade de carga, perceptível ao menor dos tamanhos de fissura adotado (15mm), mas cuja redução seguiu até um comprimento de fissura de 30mm, a partir do qual a redução se manteve dentro do mesmo patamar.

No ensaio de frequência de ressonância a redução da área de contato provocou a alteração do padrão ressonante das amostras, várias indicações visuais no espectro foram apontadas nas discussões revelando que a aderência da cerâmica à argamassa estava comprometida. Porém, essa descaracterização do padrão ressonante só pode ser notada para as amostras com 45mm de fissura prévia. Não tendo sido possível identificar na análise visual dos espectros alterações significativas para os menores tamanhos de fissura.

Em ambos os métodos o tipo de argamassa empregado não interferiu nas respostas das amostras, ou seja, nem os valores de carga máxima suportada, nem os espectros de ressonância, sofreram alterações. Uma justificativa para isso pode estar na similaridade de desempenho mecânico das argamassas, uma vez que os testes normativos enquadraram os dois tipos utilizados em ACI e ACII. Esse fato mostra mais uma concordância entre as duas metodologias empregadas.

Nos testes do ensaio MMF, o tempo de cura das amostras também não foi um parâmetro interveniente para detectar algum nível de melhoria da capacidade de aderência das argamassas. Porém, no ensaio de ressonância, as amostras apresentaram respostas ressonantes com alterações nas amplitudes dos picos da primeira e segunda frequência. As amplitudes desses picos são maiores aos 28 dias quando comparadas as amplitudes dos mesmos picos aos 7 e 14 dias. Esse fato mostra que o ensaio não destrutivo foi mais sensível em captar o efeito do tempo de cura sobre o desempenho mecânico das amostras que o destrutivo.

II. Análise da energia dissipada pelo sistema

A taxa de energia dissipada se mostrou um indicador em potencial para avaliação da aderência de materiais em contato. Essa taxa mostra quantitativamente a energia que se deve evitar colocar em um sistema colado a fim de preservar a integridade da ligação da interface e minimizar a propagação de fissuras e criação de superfícies de fratura.

O emprego dos dois ensaios possibilitou a identificação da energia necessária a propagação do dano das amostras em estudo. O comparativo dos valores de energia dissipada obtidos por ambos os tipos de ensaio é apresentado na Figura 62 para as amostras com ACTB. É importante lembrar, que assim como nas análises dos valores de carga (MMF) e dos espectros (ressonância), o tipo de argamassa colante não foi um parâmetro de interferência sobre os valores de energia do sistema em ambos os ensaios.

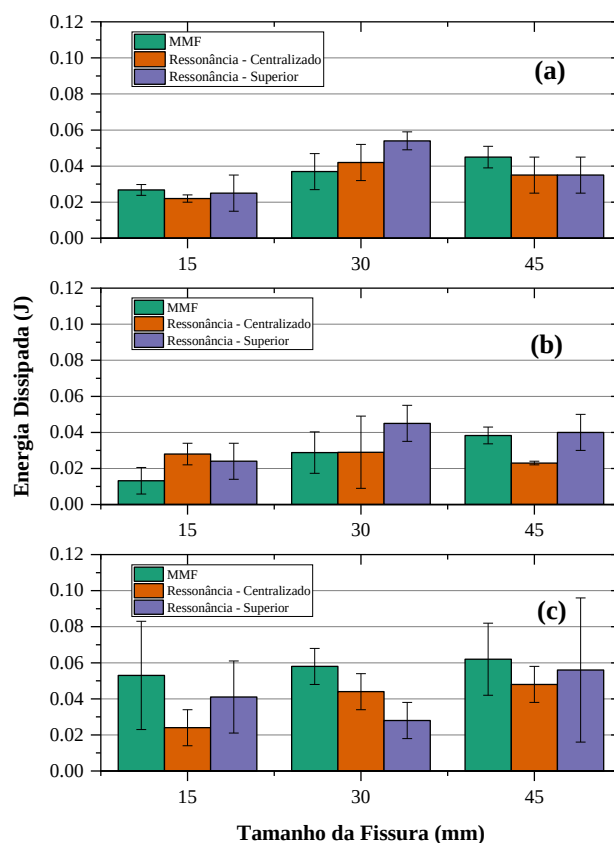


Figura 62 – Comparativo entre as energias dissipadas em relação as amostras referência, dos sanduíches com ACTB: (a) 7 dias; (b) 14 dias e (c) 28 dias (Fonte: Autora, 2023).

As tabelas 30 e 31 trazem o descritivo dos valores da energia liberada para ambos os tipos de argamassa.

O comparativo das energias dissipadas pelas amostras entre os ensaios apresentados na Figura 62 e nas Tabelas 30 e 31 mostra existir uma razoável compatibilidade entre os dois métodos. Vale ressaltar que o pico do espectro que foi usado para comparação foi o pico amortecido na região de frequência entre 8000Hz e 9000Hz. Este pico foi o único que sofreu amortecimento significativo quando se alterou o tamanho da fissura, sendo identificado como um pico representativo do comportamento da interface entre a argamassa colante e a cerâmica.

Tabela 30 – Comparação da taxa de energia liberada entre os métodos de ensaio para as amostras com argamassa ACTA (Fonte: Autora, 2024).

Tempo de Cura (dias)	Energia Dissipada (J) - ACTA					
	0/15					
	MMF	DP	Ressonância (Central)	DP	Ressonância (Superior)	DP
7	0,023	0,010	0,022	0,010	0,021	0,004
14	0,046	0,009	0,015	0,006	0,022	0,006
28	0,022	0,029	0,019	0,005	0,026	0,007
Tempo de Cura (dias)	0/30					
	MMF	DP	Ressonância (Central)	DP	Ressonância (Superior)	DP
7	0,029	0,007	0,016	0,004	0,024	0,008
14	0,054	0,007	0,018	0,003	0,020	0,005
28	0,036	0,018	0,015	0,006	0,028	0,005
Tempo de Cura (dias)	0/45					
	MMF	DP	Ressonância (Central)	DP	Ressonância (Superior)	DP
7	0,027	0,008	0,024	0,019	0,046	0,030
14	0,058	0,005	0,038	0,017	0,035	0,011
28	0,031	0,012	0,033	0,009	0,049	0,021

Tabela 31 - Comparação da taxa de energia liberada entre os métodos de ensaio para as amostras com argamassa ACTB (Fonte: Autora, 2024).

Tempo de Cura (dias)	Energia Dissipada (J) - ACTB					
	0/15					
	MMF	DP	Ressonância (Central)	DP	Ressonância (Superior)	DP
7	0,027	0,003	0,022	0,002	0,025	0,008
14	0,013	0,007	0,028	0,006	0,024	0,014
28	0,053	0,031	0,024	0,010	0,041	0,020
Tempo de Cura (dias)	0/30					
	MMF	DP	Ressonância (Central)	DP	Ressonância (Superior)	DP
7	0,037	0,011	0,042	0,011	0,054	0,005
14	0,029	0,011	0,029	0,022	0,045	0,013
28	0,058	0,013	0,045	0,011	0,028	0,012
Tempo de Cura (dias)	0/45					
	MMF	DP	Ressonância (Central)	DP	Ressonância (Superior)	DP
7	0,045	0,006	0,035	0,012	0,035	0,013
14	0,038	0,005	0,023	0,002	0,041	0,013
28	0,062	0,024	0,049	0,012	0,056	0,036

Assim como nos resultados dos testes MMF, os valores de G_c encontrados por meio do ensaio de ressonância serão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – Comparativo dos valores de energia crítica obtidos pelos dois tipos ensaio para ambos os tipos de argamassa (Fonte: Autora, 2024).

Tempo de Cura (dias)	Energia Crítica (J) - ACTA					
	MMF	DP	Ressonância (Central)	DP	Ressonância (Superior)	DP
7	0,023	0,010	0,024	0,019	0,046	0,030
14	0,046	0,009	0,038	0,017	0,035	0,011
28	0,022	0,010	0,033	0,009	0,049	0,021
Tempo de Cura (dias)	Energia Crítica (J) - ACTB					
	MMF	DP	Ressonância (Central)	DP	Ressonância (Superior)	DP
7	0,027	0,004	0,042	0,011	0,054	0,005
14	0,013	0,007	0,029	0,022	0,045	0,013
28	0,053	0,031	0,049	0,012	0,056	0,036

Observando os resultados apresentados na Tabela 32 e levando em consideração os valores assumidos em todas as idades e tipos de AC, a energia crítica para propagação de fratura, em amostras sanduíches, submetidas ao ensaio de frequência de ressonância, assume um valor médio de $0,056 \pm 0,036$ J. Este valor situa-se dentro da média encontrada para amostras submetidas ao teste destrutivo de modo misto ($0,053 \pm 0,031$). Com isso, essa investigação mostra existir uma boa correlação entre os dois métodos para o cálculo das energias liberadas pelo sistema em estudo.

6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa objetivou investigar a qualidade da aderência de juntas de argamassa colante a partir do uso de técnica não destrutiva de frequência de ressonância. A configuração estrutural do ensaio foi pensada de modo a melhor simular o que acontece nos revestimentos de fachada, produzindo a ação combinada dos esforços de tração e cisalhamento, a partir da aplicação de cargas cíclicas de pequena intensidade.

A investigação proposta, no entanto, não possui precedentes. Então, a fim de comparar os resultados obtidos pela técnica de ressonância, resolveu-se adotar também ensaios destrutivos: resistência à aderência sob tração, normatizado pela NBR 14081-4/2012; e flexão de modo misto (MMF), um clássico da mecânica da fratura, em que a ação simultânea das cargas poderia ser aplicada.

Com vistas a alcançar o objetivo proposto, resolveu adotar a inserção prévia de uma fissura na interface das amostras sanduíche e mediante a isso, estudar o efeito de algumas variáveis, tais como, tamanho da fissura, tempo de cura e tipo de argamassa colante.

A análise dos efeitos das variáveis foi realizada a partir de dois critérios: carga e energia. Diante do exposto, as conclusões do estudo serão apresentadas a seguir, separadas em função das etapas de trabalho e dos procedimentos de ensaio realizados.

I - Caracterização das Argamassas – NBR 14081

- Os dois tipos de argamassa colante usados nos testes, ACTA e ACTB, foram classificadas como ACI e ACII, respectivamente;
- A ACTB, entretanto, tinha a indicação do fabricante para ser ACIII. O não atendimento dos critérios para esta classificação fez com que o desempenho delas em função da capacidade de aderência não fosse tão diferente quanto se desejava.

II – Ensaio de Flexão de Modo Misto

- O ensaio de propagação de fissura em modo misto de tensão mostrou-se muito efetivo na identificação da perda de capacidade aderente das juntas de argamassa em meio a presença de dano;
- As curvas de propagação forneceram 4 estágios para o entendimento do mecanismo de falha das amostras sanduíches, sendo possível identificar a região de predominância de atuação da argamassa no suporte mecânico da amostra, o momento em que ocorre a ruptura da ligação entre a argamassa e a placa cerâmica em razão da

propagação da fissura, a transferência de capacidade de carga da argamassa para a placa cerâmica e o ponto de colapso da placa;

- A aderência da argamassa colante ao substrato foi significativamente comprometida pela presença da fissura prévia, podendo esse efeito ser visualizado a partir de fissura de 15mm, que provocou uma redução de 50% de sua resistência;
- A perda de aderência também ficou evidenciada pela rápida transferência de suporte de carga da argamassa para placa cerâmica, notada pela redução do trecho da curva entre os estágios 2 e 3 e o aumento da região entre os estágios 3 e 4 à medida que se aumentou o tamanho da fissura;
- Os tempos de cura e os diferentes tipos de argamassa utilizados não puderam ter seus efeitos observados no ensaio MMF. E ainda que uma diferença entre as curvas de propagação em função dessas variáveis pudesse ser percebida, a média das cargas máximas alcançadas pelas amostras se encontravam dentro do desvio padrão;
- A análise por meio de parâmetros de energia confirmou a importância do contato efetivo entre os materiais, refletido em uma redução da energia elástica do sistema em amostras previamente fissuradas, em razão do mecanismo de dissipação de energia que ocorreu nas amostras com falhas;
- A redução exponencial da energia em razão da propagação de uma fissura ou da presença de falha de colagem mostrou existir uma estreita relação da energia da interface com a força adesiva material, uma vez que os valores de carga do conjunto cerâmica/argamassa colante também sofreram significativa redução;
- A taxa de liberação de energia também foi calculada e seu maior desprendimento foi observado quando se saiu de um estado sem fissuração (referência) para o estado de fissuração inicial (15mm), a partir daí, menor liberação de energia era necessária para avançar de um estado de fissuração para outro maior;
- A pesquisa também mostrou que quanto pior era o contato interfacial, maior era a energia dissipada através da interface e menor a quantidade de energia potencialmente armazenada na amostra. Uma relação estreita entre energia de superfície e aderência mecânica pode ser observada.
- O valor de $0,053 \pm 0,031$ J foi adotado como sendo a energia crítica de fratura da interface cerâmica-argamassa colante desta pesquisa, reconhecendo ser necessário que a carga aplicada sobre essas amostras dispense uma energia igual ou superior a

esse valor para que seja possível que uma fissura de 15mm se propagasse e crie uma superfície de fratura.

III – Ensaio de Frequência de Ressonância

i. Fase Piloto

- Os testes realizados nessa fase se mostraram essenciais para que houvesse a construção de uma metodologia de ensaio, com especificação do nível de aperto e posições de sensores a serem empregados na fase final dos ensaios, bem como definição do perfil dinâmico de ressonância das amostras em estudo;
- O perfil dinâmico das amostras sanduíches foi dividido em três regiões de ressonância: a região de baixa frequência (1500Hz a 2500Hz), de influência do componente de argamassa; a região de alta frequência (9000Hz e 10000Hz), de influência do componente cerâmico; e a região intermediária, no intervalo dessas frequências, representando a resposta vibracional do conjunto.

ii. Fase Final

- O ensaio de frequência de ressonância se mostrou eficaz na detecção da presença do dano nas amostras deste estudo, porém essa percepção só era facilmente observada nos espectros de amostras com tamanhos de fissura de 45mm;
- Diretrizes para identificação de falhas nas amostras foram apontadas, sendo elas: a descaracterização do padrão ressonante da amostra pelo aumento na quantidade de picos na região de baixa frequência, o amortecimento do pico situado entre 8000Hz e 9000Hz e o aumento significativo da amplitude do pico em 10000Hz, evidenciando o descolamento da cerâmica;
- O pico entre 8000Hz e 9000Hz (pico 3) ficou caracterizado como o pico que reflete o comportamento da interface da ligação argamassa/cerâmica, pois foi o único que apresentou alterações significativas em todos os parâmetros analisados em razão das alterações das condições de contato na interface dos materiais.
- A presença da fissura de 45mm também provocou redução da energia elástica e aumento da energia dissipada do pico 3.
- Os valores de energia dissipada pelo pico 3 se mostraram compatíveis com os valores de energia obtidos no ensaio MMF, sendo a energia crítica de fratura das amostras o valor médio de $0,056\text{J} \pm 0,036\text{J}$.
- O efeito do tempo de cura pode ser observado por meio da análise dos espectros, sendo verificado um aumento nas amplitudes da primeira e segunda frequência

natural das amostras com 28 dias de idade, para os dois tipos de argamassa empregados;

- A evolução das reações de hidratação também levou a um aumento da energia elástica dos picos 1 e 2 das amostras, sendo significativo para idade de 28 dias. A maior quantidade de energia elástica armazenada no material aos 28 dias pode ser relacionada com a melhoria de sua capacidade aderente ao longo do tempo, pois mostra que ele conserva mais energia para dissipar.
- O tipo de argamassa não influenciou nas respostas de ressonância das amostras, não sendo percebido alterações nos resultados. Este fato pode ser justificado pela provável semelhança existente de suas rigidezes.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABADI, R.H.; TORUN, A. H.; FARD, A.M. Z.; CHOUPANI, N. Fracture characteristics of mixed-mode toughness of dissimilar adherends (cohesive and interfacial fracture). *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol 34 (6), 2020.

ALENCAR, D.R. L. Análise experimental da fadiga mecânica em argamassas colantes. 2020. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, 102 p. 2020.

ALMEIDA, S. M. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D4541 Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testes, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 7234. Standard test method for Pull-Off adhesion strength of coatings on concrete using portable Pull-Off adhesion testers. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 7905. Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISSO 10545-3:2020 – Placas Cerâmicas: Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13006: Placas cerâmicas - Definições, classificação, características e marcação. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13528-1: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13755: Revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com utilização de argamassa colante - Projeto, execução, inspeção e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14081/1: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14081/3: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 3: Determinação do tempo em aberto. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14081/4: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 4: Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO. Números do Setor, 2021. <http://www.anfacer.com.br/>. Acesso em 13 Ago. 2021.

BARRETO, A. Técnicas não destrutivas para detecção da reação álcali-agregado em prismas de concreto. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 105 p. 2019.

BARROS, S.; CHAMPANEY, L. Crack propagation tests: analytical and numerical approaches. Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, p. 183-192, 2009.

BARROS, S.; CHAMPANEY, L.; VALOROSO, N. Numerical simulations of crack propagation tests in adhesive bonded joints. Latin American Journal of Solids and Structures, 2012.

DE BARROS, S; CHAMPANEY, L. Crack propagation curves on flexure adhesion tests. International Journal of Structural Integrity, v. 4, n. 3, p. 396-406, 2013.

BAUER, E.; BEZERRA, L.M.; UCHÔA, J.; DAS CHAGAS, S.V.M. Estudo do comportamento à fadiga das argamassas e sua relação com as patologias e danos nas fachadas. 4º Congresso de Patologia e Reabilitação de Edifícios, Santiago de Compostela, Espanha, 2012.

BOTAS, S; VEIGA, R; VELOSA, A; SILVA, S.A. Compatible Air Lime Mortars for Historical Tiled Facades: Bond and Mechanical Strength versus Tile–Mortar Interface Microstructure. Journal of Materials and in Civil Engineering, vol 32 (6), 2020.

CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução. 9ª ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016.

CARASEK, H. Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. Tese de doutorado do programa de pós graduação em construção civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996, 285 p.

CARASEK, H.; DJANIKIAN, J. G. Aderência de argamassas a base de cimento Portland a unidades de alvenaria. Boletim Técnico BT/PCC/179 da escola politécnica da USP. São Paulo, 1997.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, IV, Brasília, 2001. Anais... Brasília, UnB, ANTAC, 2001.

CARASEK, H.; SCARTEZINI, L. M. Fatores que exercem influência na resistência de aderência à tração dos revestimentos de argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V, São Paulo, 2003.

CARRARO, P.A.; MENEGHETTI, G. M.; QUARESIMIN, M.; RICOTTA, M. Crack propagation analysis in composite bonded joints under mixed-mode (I+II) static and fatigue loading: experimental investigation and phenomenological modelling. *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol 27, n.11, 1179-1196, 2013.

CHEN, J; KIM, J-Y; KURTIS, K; JACOBS, L. Theoretical and experimental study of the nonlinear resonance vibration of cementitious materials with an application to damage characterization. *J. Acoustical Society of America*, Vol 130 (5), 2011.

CHEN, Y.G; ZHU, Q.Y; ZHAI, J.Y. Experimental investigation on fatigue of blade specimen subjected to resonance and effect of a damping hard coating treatment. *J. Cent. South Univ.* Vol 28 n.2, 445–453, 2021.

COMYN, J. Handbook of Adhesives and Sealants. Philippe Cognard, Volume 2, 1–50, Elsevier Science Ltd, 2006.

CORREIA, A. A. Vibrações de sistemas com 1 grau de liberdade. Curso de dinâmica. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2007.

COSSOLINO, L.C. PEREIRA, A. H. A. Amortecimento: classificação e métodos de determinação. Informativo Técnico-Científico ITC04 – Amortecimento ATCP. São Carlos, 2010. Disponível em: < <https://www.sonelastic.com/images/ITC04-ATCP.pdf> >

COSTA, E.B.C. Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias. Tese de doutorado do Programa de Pós Graduação de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2014. 206p.

DUPIN, I.; DÉTRICHÉ, C.H.; MASO, J.C. Accrochage direct d'un enduit sur un isolant par une liaison de type mécanique dans le cadre d'un procédé d'isolation par l'extérieur. *Matériaux et constructions*, 1988.

DUTTA, S; KISHEN, J. M. C. Mesoscale Analysis of Fatigue Damage through Aggregate–Mortar Bond Cracks in Cementitious Composites. *Journal of Engineering Mechanics*, v.142 (2), 2020.

ELIZABETH REVESTIMENTOS. Catálogo 2022. Disponível em: < <https://elizabethrevestimentos.com.br/pt/downloads/> >. Acesso em: 08 de agosto de 2022.

EN 1015-12. Methods of test for mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates. European Committee for Standardization - CEN, 2016.

EN 12004-2. Adhesives for ceramic tiles test methods. European Committee for Standardization - CEN, 2017.

FAN, J.; VASSILOPOULOS, A.P.; MICHAUD, V. Mode I fracture of thick adhesively bonded GFRP composite joints for wind turbine rotor blades. *Compos. Struct.*, vol. 327, 2024.

FERREIRA, L. E. T. Elementos de mecânica da fratura aplicada à engenharia estrutural: aspectos analíticos, computacionais e experimentais. Minas Gerais, Ed. da UFLA, 2019.

FIORITO, A.J.S.I. Manual de Argamassa de Revestimento – Estudo e Procedimento de Execução. Pini, São Paulo, Brasil, 1994.

GARPELLI, F.P.; RAMÍREZ, F.M.G.; SALES, R.M.; ARBELO, M.A.; SHIINO, M.Y.; RESENDE, H.B.; DONADON, M.V. Experimental characterization of Mode II fatigue delamination growth onset in composite Joints. *Journal of Composite Materials*, vol. 56 (1), 115–132, 2022.

GASPERIM, J. Aderência de revestimentos de argamassa em substrato de concreto: influência da forma de aplicação e composição do chapisco. Dissertação de mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRS, 2011, 194p.

GOLDBERG, R. P. Direct Adhered Ceramic Tile, Stone, Masonry Veneer, and Thin Brick Facades – Technical Manual. LATICRETE International, 1998. p. 288.

GUO, S; ZHANG, X; REN, J. et al. Preparation of TiO₂/epoxy resin composite and its effect on mechanical and bonding properties of OPC mortars. *Construction and Building Material*, vol 272. 2021.

GUTOWSKI, W. S. A. Thermodynamic Model of the Adhesive Bond. *The Journal of Adhesion* 22, 183–196 (1987).

KENDALL, K. Molecular adhesion and its applications: the sticky universe. Kluwer Academic/Plenum: New York; London, 2001.

KOTWICA, Ł; MAŁOLEPSZY, J. Polymer-cement and polymer-alite interactions in hardening of cement-polymer composites. *Cement Wapno Beton*, v.17 (special issue) p.12-16, 2012.

KULESZA, M; DĘBSKI, D; FANGRAT, J; MICHALAK, Effect of redispersible polymer powders on selected mechanical properties of thin-bed cementitious mortars. *J. Cement Wapno Beton*, vol 25, p. 168-177, 2020.

KOTWICA, L; MAŁOLEPSZY, J. Polymer-cement and polymer-alite interactions in hardening of cement-polymer composites. *Cement Wapno Beton*, vol 17, p. 12-16, 2012.

LIM, Y.M; LI, V.C. Durable repair of aged infrastructures using trapping mechanism of Engineered Cementitious Composites. *Journal Cement and Concrete Composites*, vol. 19 p. 373–385, 1997.

LIU, X; DAO, Z; ZHU, J; et al. Localization of material defects using nonlinear resonant ultrasound spectroscopy under asymmetric boundary conditions. *J. Physics Procedia*, vol 3, p. 55-61, 2010.

LOPES, C; FLORES-COLEN, I; SILVA, L. Variability of the Pull-Off Technique for Adhesion Strength Evaluation on Ceramic Tile Claddings. *The Journal of Adhesion*, vol 91, p 768-791, 2015.

ŁUKASIK, M; MICHAŁOWSKI, B; MICHALAK, J. Assessment of the Constancy of Performance of Cementitious Adhesives for Ceramic Tiles: Analysis of the Test Results Commissioned by Polish Market Surveillance Authorities. *Journal Applied Sciences*, vol 10 (18), 2020.

MANSUR, A.A.P. Mecanismos físico-químicos de aderência na interface argamassa modificada com polímeros/cerâmica de revestimento. Tese de doutorado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. 2007. 355p.

MANSUR, A. A. P; DO NASCIMENTO, O. L.; MANSUR, H. S., Mapeamento de Patologias em Sistemas de Revestimento Cerâmico de Fachadas, *Construindo*, v. 4, n. 01, p. 64. 2012.

MARTÍNEZ, I; ETXEBERRIA, M; PAVÓN, E; DÍAZ, N. Analysis of the properties of masonry mortars made with recycled fine aggregates for use as a new building material in Cuba. *Revista de la Construcción*, vol 15, p. 9-21, 2016.

MEDEIROS, Y. Caracterização não destrutiva de blocos estruturais de concreto. Dissertação de mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 171 p. 2018.

MELO, A.C; COSTA E SILVA, A.J; TORRES, S.M; DELGADO, J.P.M.Q; AZEVEDO, A.C. Influence of the contact area in the adherence of mortar – Ceramic tiles interface. *Construction and Building Materials*, v. 243, 2020.

MOHAMMADI, S. *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. Blackwell Publishing, Iran, 2008.

NOR, N. M; SALIAH, S. N. M; HASHIM, K. A. Fatigue damage assessment of reinforced concrete beam using average frequency and rise angle value of acoustic emission signal. *International Journal of Structural Integrity*, vol 11 (4), 2020.

OGAWA, Y.; NAITO, K.; HARADA, K.; OGUMA, H. Proposal of Evaluation Method for Crack Propagation Behaviors of Second Generation Acrylic Adhesives under Mode I Static Loading. *Polymers*, vol. 15, 2023.

OGAWA, Y.; NAITO, K.; HARADA, K.; OGUMA, H. Evaluation of crack growth behaviors under Mode I static loading for two part polyurethane adhesives. *Int. J. Adhes. Adhes.* vol. 117, 2022.

OLIVEIRA, J. de. Estudo das propriedades de argamassas colantes submetidas à saturação e secagem. Dissertação de mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. 180 p. 2004.

PACHECO, C. P.; VIEIRA, G. L. Análise quantitativa e qualitativa da degradação das fachadas com revestimento cerâmico. *Revista Cerâmica*, v. 63, p. 432-445, 2017.

PAES, I. N; BAUER, E; CARASEK, H; PAVÓN, E. Influence of water transportation inside a mortar/block system on bonding resistance behavior.” *Revista Ingeniería de Construcción*, vol 29 (2), p. 175–186, 2014.

PAPAIIOANNOU, S; ARGYROPOULOU, R; TACHOS, C; MARKANTONIS, N. The adhesion properties of mortars in relation with microstructure. *The Journal of Adhesion*, vol 91 (7), p. 505–517, 2015.

PETIT, J-Y; COMELLI, B; PERRIN, RENAUD; WIRQUIN, ERICK. Effect of formulation parameters on adhesive properties of ANSI 118-15 and 118-11 compliant tile adhesive mortars. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. Vol 66, p.73-80, 2016.

PICHNIARCZYK, P; NIZIURSKA, M. Properties of ceramic tile adhesives modified by different viscosity hydroxypropyl methylcellulose. *Construction and Building Material*, vol 77, p. 227-232, 2015.

QU, Z; ZHANG, L; YAN, L; NI, Z.H; WU, J.Y. Experimental crack propagation and fracture failure analysis of the titanium alloy blade subjected to high cycle fatigue. *AIP Conf. Proc*, vol 2154, n.1, 2019.

RAMOS, N.M.M; SIMÕES, M.L; DELGADO, J.M.P.Q; FREITAS, V.P. de. Reliability of the pull-off test in situ evaluation of adhesion strength. *Construction and Building Materials*, vol 31; p. 86-93, 2012.

RAO, S. *Vibrações mecânicas*. 4ª edição. São Paulo. Pearson Frentice Hall. 2008.

REGO, S.R. Mecanismos de adesão em sistemas cerâmicos aderidos sujeitos a variações térmicas cíclicas. Tese de doutorado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba. 109 p. 2012.

SAJDLOVÁ, T; KABELE, P. Analysis of stability of Mode II crack growth. *Journal Applied Mechanics and Materials*, vol 825, p. 161–164, 2016.

SALEH, M.N.; BUDZIK, M.K.; SAEEDIFAR, M.; ZAROUCHAS, D.; FREITAS, S.T. On the influence of the adhesive and the adherend ductility on mode I fracture characterization of thick adhesively-bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 115, 2022.

SANTOS, A.M. Influência da utilização de solução de cal em substituição à água de amassamento de chapisco e emboço para revestimento. Dissertação de Mestrado do

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco. 2019.

SHAH, K.W; HUSEIEN, G. F. Bond strength performance of ceramic, fly ash and GBFS ternary wastes combined alkali-activated mortars exposed to aggressive environments. *Construction and Building Materials*, vol 251, 2020.

SILVA, A.C.M. Contribuição ao estudo da influência da área de contato na aderência da interface argamassa colante-cerâmica. Dissertação de mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, 2018, 122 p.

SILVA, E.P. Avaliação da aderência em estruturas tubulares metálicas revestidas com material cimentício sob esforços estáticos e dinâmicos. Tese de Doutorado da Universidade Federal da Paraíba, 2010, 122p.

SOARES, F.S.; ITURRIOZ, I. Simulação da propagação subcrítica de fissuras em materiais quase frágeis aplicando uma versão do método de elementos discretos formados por barras. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. 2015.

SOUSA, F.C.; AKHAVAN-SAFAR, A.; RAKESH, G.; SILVA, L.F.M. Fatigue life estimation of adhesive joints at different mode mixities, *The Journal of Adhesion*, vol. 98, 2022.

SPOONER, D. C.; DOUGILLT, J. W. A quantitative assessment of damage sustained in concrete during compressive loading. *Magazine of Concrete Research*, vol. 27 (92), 1975.

SPOONER, D. C.; POMEROY, C. D.; DOUGILLT, J. W. Damage and energy dissipation in cement pastes in compression. *Magazine of Concrete Research*, vol. 28 (94), 1976.

STOLZ, C.M. Influência da interação entre os parâmetros reológicos de argamassas e a área potencial de contato de substratos na aderência de argamassas de revestimento. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 213p. 2011.

UCHÔA, J.C.B. Procedimento numérico e experimental para a avaliação da resistência à fadiga de sistemas de revestimento. Dissertação de mestrado. Brasília, 178p. 2007.

UNGER, J.F.; ECKARDT, S.; KÖNKE, C. Modelling of cohesive crack growth in concrete structures with the extended finite element method. *Elsevier, Comput Methods Appl Mech Engrg.*, vol 196, 4087–4100, 2007.

VALENTINI, P; KAZMIERCZAK, C. S. Avaliação da aderência de placas cerâmicas aplicadas como revestimento de fachada. *Revista ALCONPAT*, vol 6, p. 116-128, 2016.

VALOROSO, N.; CHAMPANEY, L. F. A damage model for simulating decohesion in adhesively bonded assemblies. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*. 2004.

VAZ, F. H. B; CARASEK, H. Resistência de aderência de revestimentos de argamassa: contribuição por meio de mapeamento e revisão sistemática de literatura para futuras pesquisas no tema. *Revista Cerâmica*, vol 65, p. 303-318, 2019.

XIONG, Q; GUAN, H; MA, H; WU, Z; ZENG, J; WANG, W; WANG, H. Crack propagation and induced vibration characteristics of cracked cantilever plates under resonance state: Experiment and simulation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol 201, 2023.

WAGNER, C; BRETSCHNEIDER, N; SLOWIK, V. Characterization of the interface between strain hardening cementitious repair layers and concrete subgrade. Conference: Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-8, Toledo (Spain), 2013.

WANG, R; LI, J; ZHANG, T; CZARNECKI, L. Chemical interaction between polymer and cement in polymer-cement concrete. *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.* 64(4), p.785-792, 2016.

WETZEL, A; ZURBRIGGEN, R; HERWEGH, M; GREMINGER, A; KAUFMANN, J. Long-term study on failure mechanisms of exterior applied tilings. *Construction and Building Materials*, vol 37, p. 335-348, 2012.

WITEK, L. Simulation of crack growth in the compressor blade subjected to resonant vibration using hybrid method, *Engineering Failure Analysis*, vol 49, 57–66, 2015.

YUYAMA, S; LI, Z.W; YOSHIZAWA, M.; TOMOKIYO, T; UOMOTO, T. Evaluation of fatigue damage in reinforced concrete slab by acoustic emission. *Journal NDT and E International*, Vol. 34, p. 381-387, 2001.

ZANELATTO, K.C; BARROS, M.M.S.B; MONTE, R; SABBATINI, F.H. Avaliação da influência da técnica de execução no comportamento de revestimento de argamassa aplicado com projeção mecânica contínua. *Revista Ambiente Construído*, vol 13 (2), p.87-109, 2013.

ZANOTTI, C; BORGES, P.H.R; BHUTTA, A; BANTHIA, N. Bond strength between concrete substrate and metakaolin geopolymer repair mortar: effect of curing regime and PVA fiber reinforcement. *Cement and Concrete Composites*, Vol 80, p. 307-316, 2017.