

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**APRIMORAMENTO DO ENSAIO EMM-ARM PARA
DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE
MATERIAIS CIMENTÍCIOS**

ANDERSON NORBERTO SANTOS CERQUEIRA

**ORIENTADOR: RODRIGO DE MELO LAMEIRAS COORIENTADOR:
RENAN ROCHA RIBEIRO**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS

BRASÍLIA/DF: NOV/2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**APRIMORAMENTO DO ENSAIO EMM-ARM PARA
DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE MATERIAIS
CIMENTÍCIOS**

ANDERSON NORBERTO SANTOS CERQUEIRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Rodrigo de Melo Lameiras, Doutor (ENC - UNB)
(ORIENTADOR)

Marcos Honorato de Oliveira, Doutor (ENC - UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)

Valdirene Maria Silva Capuzzo, Doutora (ENC - UNB)
(EXAMINADORA EXTERNA)

DATA: BRASÍLIA/DF, 04 de NOVEMBRO de 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Cerqueira, Anderson Norberto Santos

Aprimoramento Do Ensaio EMM-ARM Para Determinação Do Módulo De Elasticidade De Materiais Cimentícios

[Distrito Federal] 2021.

xii, 78 p., 297mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2021)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | | |
|-----------------|----------------------|----------------------------|
| 1. Desempenho. | 2. EMM-ARM. | 3. Módulo de elasticidade. |
| 4. Nanossílica. | 5. Primeiras idades. | |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) | |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Cerqueira, A.N.S (2021). Aprimoramento Do Ensaio EMM-ARM Para Determinação Do Módulo De Elasticidade De Materiais Cimentícios. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 78p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Anderson Norberto Santos Cerqueira

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Aprimoramento Do Ensaio EMM-ARM Para Determinação Do Módulo De Elasticidade De Materiais Cimentícios.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2021

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Anderson Norberto Santos Cerqueira

anderson.norberto@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, queria expressar minha gratidão aos orixás, que se mantêm presente em minha vida e me concedeu forças para continuar trilhando meu caminho e mostrar que este será um passo dado sem titubear. Em especial à Xangô, patrono da justiça e do fogo do saber; Oxum, dona da beleza, das riquezas e feitiços; e Yemanjá, mãe das águas, guerreira e protetora. Adupé orixá!

Sem o carinho e amor da minha família eu não seria quem sou e não teria determinação para ir atrás dos meus objetivos. Obrigado à minha mãe Telma Oliveira, meu pai Genivaldo Cerqueira, meu irmão Armando Sobrinho e avó Lau Oliveira que me apoiam desde todo o sempre. Devo ainda citar meu esposo Gabriel Bahia e minha Yálorixá Maísa Bahia e todos os seus filhos. Obrigado por tudo!

Não poderia deixar de contar com a ajuda dos meus amigos durante minha jornada, desde a infância. Todos vocês se mostram presentes em minha vida e serei eternamente grato pelo zelo e carinho.

Agradeço também ao PET Civil UnB e sua tutora Fabiana de Arruda, que pôde me guiar e aconselhar nesses semestres na universidade candango, além de mostrar diversos caminhos dentro da Engenharia Civil; E aos meus orientadores, Rodrigo Lameiras e Renan Ribeiro, pelo cuidado e atenção com o nosso projeto, que foi desenvolvido em meio ao caos mundial provocado pelo Coronavírus. Devo agradecer a empresa BASF e a Nouryon pela doação do aditivo super plastificante e da nanossílica.

A todos e a cada um de vocês, meu mais profundo carinho!

“Isso de querer
ser exatamente aquilo
que a gente é
ainda vai
nos levar além”

- Paulo Leminski

RESUMO

O ensaio denominado EMM-ARM (*Elasticity Modulus Measurement through Ambient Response Method*) é um método inovador para estimar o módulo de elasticidade de pastas cimentícias desde as primeiras idades de forma não destrutiva que se baseia nos conceitos básicos de dinâmica das estruturas e utiliza acelerômetros para fazer medição da frequência natural de vibração para estimar o módulo de elasticidade estático dos materiais. Estudos prévios indicaram que o ensaio EMM-ARM apresenta anomalias quando utilizado para investigar materiais cimentícios com adição de nanossílica. O uso de nanossílica em compósitos cimentícios demonstra um acréscimo vigoroso das propriedades mecânicas, interferindo na resistência à compressão e porosidade, contribuindo para seu desempenho e durabilidade. Este trabalho teve por objetivo avaliar a viabilidade do uso do ensaio de EMM-ARM com argamassa para caracterização da cinética de hidratação de cimentos Portland e verificar se o seu uso é capaz de eliminar as anomalias identificadas em pesquisas anteriores no resultado do ensaio EMM-ARM com pastas. Foram realizados ensaios de EMM-ARM com pastas e argamassas, num total de 10 amostras. Foram realizados ensaios de determinação do módulo de elasticidade utilizando o equipamento Sonelastic em aproximadamente um, três e sete dias. Os resultados provenientes de ambos ensaios foram comparados e verificou-se visualmente os corpos de prova ao final dos ensaios para verificar indícios quando a aderência entre os componentes e vazios decorrentes da moldagem. Ao comparar o módulo de elasticidade estático proveniente do EMM-ARM com os obtidos do Sonelastic, os resultados das pastas apresentaram valores, em média, 15,20% inferiores. Já os ensaios EMM-ARM realizados com a argamassa apresentaram valor, em média, 1,26% superiores aos obtidos com o Sonelastic. Este resultado pode ser um indicativo da limitação do ensaio de EMM-ARM quando realizado em pastas, fortalecendo a hipótese de que a elevada retração autógena leva a perda de aderência entre o molde e o material testado, descumprindo assim um dos princípios básicos para a determinação do módulo de elasticidade do material através do ensaio de EMM-ARM, que é a consideração de aderência perfeita e funcionamento 100% composto da viga compósita constituída pelo tubo do molde e o cilindro de material testado.

Palavras-chave: Desempenho. EMM-ARM. Módulo de elasticidade. Nanossílica. Primeiras idades.

ABSTRACT

Improvement of the EMM-ARM test to determine the E-modulus of cementitious materials with nanosilica additions since the early ages

The test called EMM-ARM (Elasticity Modulus Measurement through Ambient Response Method) is an innovative method to estimate the modulus of elasticity of cementitious pastes from an early age in a non-destructive way that is based on the basic concepts of structural dynamics and uses accelerometers to measure the natural frequency of vibration to estimate the static modulus of elasticity of materials. Previous studies indicated that the EMM-ARM assay presents anomalies when used to investigate cementitious materials with the addition of nanosilica. The use of nanosilica in cementitious composites demonstrates a vigorous increase in mechanical properties, interfering with compressive strength and porosity, contributing to its performance and durability. This work aimed to evaluate the feasibility of using the EMM-ARM test with mortar to characterize the hydration kinetics of Portland cements and verify if its use is able to eliminate the anomalies identified in previous research in the results of the EMM-ARM test with paste. EMM-ARM tests were carried out with pastes and mortars, in 10 samples. Tests to determine the modulus of elasticity were carried out using the Sonelastic in one, three and seven days. The results from both tests were compared and the specimens were visually verified at the end of the tests to verify evidence when the adhesion between the components and voids resulting from the molding. When comparing the static modulus of elasticity from the EMM-ARM with those obtained from the Sonelastic, the results of the pastes showed values, on average, 15.20% lower. Otherwise, the EMM-ARM tests carried out with the mortar presented a value, on average, 1.26% higher than those obtained with Sonelastic. This result may be an indication of the limitation of the EMM-ARM test when performed on pastes, strengthening the hypothesis that high autogenous shrinkage leads to loss of adhesion between the mold and the material tested, thus breaching one of the basic principles for determination of the modulus of elasticity of the material through the EMM-ARM test, which is the consideration of perfect adhesion and functioning 100% composed of the composite beam consisting of the mold tube and the cylinder of tested material.

Keywords: Performance. EMM-ARM. Modulus of elasticity. Nanosilica. Early ages.

SUMÁRIO

Capítulo	Página
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO	3
1.1.1. OBJETIVO GERAL	3
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.2. LIMITAÇÕES DO TRABALHO	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1. NANOSSÍLICA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS	5
2.1.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	6
2.1.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE	9
2.1.3. RETRAÇÃO AUTÓGENA	12
2.2. EMM-ARM	15
3. METODOLOGIA	17
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
3.2. MATERIAIS	18
3.2.1. AGLOMERANTE	18
3.2.2. ADITIVOS	18
3.2.3. AGREGADO MIÚDO	19
3.2.4. ÁGUA DE AMASSAMENTO	19
3.2.5. TRAÇO DAS AMOSTRAS	20
3.3. MÉTODOS	20
3.3.1. SISTEMA DE ENSAIO SONELASTIC	20
3.3.2. SISTEMA DE ENSAIO EMM-ARM	21
3.3.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	22
3.3.4. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE ENSAIO EMM-ARM	27
3.3.5. PREPARAÇÃO PARA O ENSAIO EMM-ARM	31
3.3.6. EXECUÇÃO DO ENSAIO SONELASTIC	32
3.3.7. EXECUÇÃO DO ENSAIO EMM-ARM	33
3.3.8. VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE DOS CORPOS DE PROVA	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1. PASTAS	38
4.1.1. SONELASTIC	38
4.1.2. EMM-ARM	40
4.1.3. VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE DOS CORPOS DE PROVA	47
4.2. ARGAMASSAS	48

4.2.1. SONELASTIC	48
4.2.2. EMM-ARM	50
4.2.3. COMPARAÇÃO DOS DADOS DE PASTA E ARGAMASSA	57
4.2.4. VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE DOS CORPOS DE PROVA	58
4.2.5. COMPARAÇÃO COM TRABALHOS ANTERIORES	59
5. CONCLUSÕES	61
6. REFERÊNCIAS	62
APÊNDICE A	66

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 1 - Traço das amostras.....	20
Tabela 2 - Identificação da posição das amostras – EMM-ARM.	27
Tabela 3 - Medidas dos corpos de prova – Sonelastic – Pasta.	38
Tabela 4 - Média do Módulo de Elasticidade - Sonelastic – Pasta.	40
Tabela 5 - Parâmetros da equação de ajuste – Pasta.	45
Tabela 6 - Valores EMM-ARM x Sonelastic – Pasta.	46
Tabela 7 - Medidas dos corpos de prova – Sonelastic – Argamassa.....	49
Tabela 8 - Média do Módulo de Elasticidade - Sonelastic – Argamassa.....	50
Tabela 9 - Parâmetros da equação de ajuste – Argamassa.....	56
Tabela 10 - Valores EMM-ARM x Sonelastic – Argamassa.	57

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1 – Aglomerações da nanossílica.....	6
Figura 2 - Resistência à compressão ao longo do tempo.	7
Figura 3 - Índice de desempenho das pastas em cada idade.	7
Figura 4 - Resistência à compressão.	8
Figura 5 - Resistência à compressão das pastas de cimento.	9
Figura 6 - Curvas médias do módulo de elasticidade para cada mistura.	11
Figura 7 - Retração autógena argamassa x concreto.....	13
Figura 8 - Curva de tensão ao longo do tempo resultado do ensaio de anel de restrição.	14
Figura 9 - Configuração EMM-ARM.	16
Figura 10 – Fluxograma das etapas.....	17
Figura 11 - Curva granulométrica da areia.	19
Figura 12 - Esquema de montagem do Sistema Sonelastic.....	21
Figura 13 - Configuração do ensaio EMM-ARM para pastas de cimento.....	22
Figura 14 - Misturador Menegotti.....	22
Figura 15 - Processo de mistura da pasta.	23
Figura 16 - Pesagem da amostra para determinação da densidade da pasta.	24
Figura 17 - Processo de vibração das amostras para ensaio de Sonelastic.	25
Figura 18 - Processo de vedação do corpo de prova para ensaio de EMM-ARM.....	25
Figura 19 - Esquema completo do ensaio EMM-ARM.	26
Figura 20 - Frequência da amostra 02 no domínio do tempo.	28
Figura 21 – (a) Aceleração no domínio do tempo; (b) Intensidade estimada em cada frequência (teste).....	29
Figura 22 - Seção transversal do tubo serrado.	30
Figura 23 - Conjunto de vedação - Ensaio EMM-ARM.	31
Figura 24 - Amostras para o ensaio Sonelastic.	32
Figura 25 - Sonelastic – (a) Pistão e (b) microfone.	33
Figura 26 – (a) Aceleração no domínio do tempo; (b) Intensidade estimada em cada frequência.	35
Figura 27 - Frequência de vibração no domínio do tempo.	36
Figura 28 - Mesa de serragem.....	37
Figura 29 - Tubo de ensaio serrado.....	37

Figura 30 - Corpos de prova - Pasta – Sonelastic.	38
Figura 31 - Módulo de Elasticidade Dinâmico - Pasta – Sonelastic.	39
Figura 32 - Fissuras no corpo de prova.	39
Figura 33 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor - Amostra 03.	41
Figura 34 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor - Amostra 04.	42
Figura 35 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor - Amostra 05.	42
Figura 36 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor - Amostra 06.	43
Figura 37 - Frequência em três picos filtrado - Amostra 06.	44
Figura 38 - Módulo de elasticidade estático – Pasta.	44
Figura 39 - Módulo de Elasticidade - EMM-ARM x Sonelastic – Pasta.	45
Figura 40 - Módulo de elasticidade normalizado pelo <i>ESonelastic, 7dias(-)</i> – Pasta.	46
Figura 41 - Seções serradas do tubo – Pasta.	47
Figura 42 – Pasta deslizando do tubo.	47
Figura 43 - Seções serradas do tubo - Pasta (II).	48
Figura 44 - Corpos de prova - Argamassa – Sonelastic.	48
Figura 45 - Demonstração de vazios - Argamassa – Sonelastic.	49
Figura 46 - Módulo de Elasticidade Dinâmico - Argamassa – Sonelastic.	50
Figura 47 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor; (c) Frequência em três picos filtrado – Amostra 07.	51
Figura 48 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor; (c) Frequência em três picos filtrado – Amostra 08.	52
Figura 49 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor; (c) Frequência em três picos filtrado – Amostra 09.	53
Figura 50 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor; (c) Frequência em três picos filtrado – Amostra 10.	54
Figura 51 – Módulo de elasticidade estático – Argamassa.	55
Figura 52 - Módulo de Elasticidade - EMM-ARM x Sonelastic – Argamassa.	56
Figura 53 - Módulo de elasticidade normalizado pelo <i>ESonelastic, 7dias(-)</i> – Argamassa.	57
Figura 54 - Módulo de elasticidade normalizado pelo <i>ESonelastic, 7dias(-)</i>	58
Figura 55 - Corpo de prova serrado – Argamassa.	59
Figura 56 - Curvas médias do módulo de elasticidade	60

1. INTRODUÇÃO

Para o melhor emprego dos materiais na construção civil, estudos são feitos a fim de se conhecer melhor as propriedades para a aplicação individual e seu comportamento quando combinados. O mesmo ocorre com o concreto e as pastas cimentícias, onde se há registros de anos de pesquisa sobre seu processo de hidratação e consequente liberação de calor, o seu ganho de resistência à compressão com o endurecimento da peça, entre outros (METHA *et al.*, 2014; NEVILLE e BROOKS, 2013). Com o avanço da tecnologia e a demanda por redução do desperdício e maior precisão na aplicação do conhecimento, torna-se necessário para os pesquisadores entender mais profundamente o cimento e o ganho de suas propriedades.

O ensaio EMM-ARM (*Elasticity Modulus Measurement through Ambient Response Method*), desenvolvido por Azenha *et al.* (2010) e aprimorado por Granja (2016), traz importantes contribuições, pois possibilita a obtenção de dados de forma não destrutiva do módulo de elasticidade da pasta em tempo real, tornando possível estudar o comportamento da pasta em idades menores que um dia, mesmo com a pasta fresca, sem a necessidade de desmolde dos corpos de prova.

Ribeiro (2019), em sua dissertação de mestrado realizada no PECC/ENC/UnB, desenvolveu uma versão de baixo custo do EMM-ARM, tornando seu manuseio mais acessível e funcional. Em seu trabalho, foi proposta uma solução cujo sistema de aquisição de dados é baseado principalmente na utilização da plataforma Arduino, concebida para ser uma ferramenta rápida de prototipagem. O sistema de ensaio desenvolvido por Ribeiro (2019), no entanto, ainda não foi utilizado por outros usuários além do próprio autor, e sua utilização por outros operadores pode contribuir para o contínuo desenvolvimento do sistema e da melhoria de sua usabilidade. Ainda no PECC/ENC/UnB, o trabalho de Souza (2021) aplicou o ensaio EMM-ARM para estudar diferentes pastas de cimento com adição de nanossílica. Esta pesquisa trouxe subsídios relevantes a respeito da técnica de ensaio e do uso da nanossílica e sua contribuição na pasta, inclusive nas primeiras idades.

A nanossílica assume um papel importante ao ser inserida na pasta cimentícia, atuando na melhoria das propriedades mecânicas. Este material acelera a hidratação do cimento e induz a formação de compostos de silicato de cálcio hidratado que preenchem interstícios da pasta (empacotamento da estrutura), tornando a estrutura mais densa. Assim, ao se adicionar a nanopartícula espera-se o aumento acentuado da resistência e do módulo de elasticidade nas primeiras idades, quando ocorre o processo químico supracitado (KONG *et al.*, 2013; SOUSA; RÊGO, 2020).

Apesar da técnica EMM-ARM ter sido aplicada com sucesso para determinar as propriedades de diferentes tipos de materiais cimentícios (AZENHA *et al.*, 2012; RIBEIRO, 2019; SOUZA, 2021) e não cimentícios (GRANJA *et al.*, 2015), Souza (2021) observou anomalias nos resultados dos ensaios feitos em pastas que continham nanossílica, nos quais a evolução do módulo de elasticidade determinado pelo EMM-ARM apresentou uma aparente e precoce assíntota. Os resultados de resistência à compressão feitos em idades 1, 3, e 7 dias não acompanharam os resultados de evolução de módulo determinados no EMM-ARM, o que reforça a ideia da ocorrência de alguma anomalia na aplicação do EMM-ARM associado ao uso de nanossílica nas pastas.

Detalhes importantes observados no trabalho de Souza (2021) que devem ser citados:

- 1) O valor de módulo de elasticidade assintótico nas pastas com nanossílica com fator $a/c = 0,3$ e $0,4$ foram menores que os valores obtidos nas pastas de referência, sem nanossílica. Na pasta com $a/c = 0,5$ este comportamento não foi observado.
- 2) Observou-se que este comportamento anômalo foi mais claro/forte quando a água/cimento da pasta era menor (fator que eleva a retração autógena);
- 3) Este comportamento anômalo ocorre nas idades de cerca de 1 a 2 dias, exatamente quando a retração autógena costuma atingir os valores máximos.

A partir dos ensaios de Souza (2021), podem ser levantadas três hipóteses para explicar as anomalias observadas nos resultados: (1) uma possível perda de trabalhabilidade, decorrente do mau manuseio e do tempo para realização das moldagens dos corpos de prova, pode ter dificultado a moldagem e levado a uma maior porosidade dos corpos de prova feitos com tal material; (2) a adição de nanossílica provocou uma retração autógena muito forte nas fases muito iniciais, o que levou a uma microfissuração na pasta; (3) a retração autógena e a deficiência da ancoragem entre o molde e o corpo de prova causou um deslizamento, resultando em um grau de ação composta entre o material ensaiado e o tubo do molde menor que 100% (esta é uma das hipóteses básicas que fundamenta o tratamento dos resultados do ensaio de EMM-ARM para determinação da evolução das propriedades do material testado).

Gong *et al.* (2020) e Lefever *et al.* (2020) reportam que a adição de nanossílica em materiais cimentícios leva a maiores níveis de retração, sustentando as hipóteses (2) e (3). Outros trabalhos apontam que a adição de nanossílica induz uma perda de trabalhabilidade devido ao aumento da área superficial do material pela adição da sílica, o que sustenta a hipótese (1) ((BERRA *et al.*, 2012; LAVERGNE *et al.*, 2019; NAZAR *et al.*, 2020; YANG *et al.*, 2021)).

Sendo assim, é necessário avaliar a viabilidade do uso do ensaio de EMM-ARM com argamassa e verificar se o seu uso é capaz de mitigar/eliminar as anomalias. Tal avaliação exige

inspeção cuidadosa dos corpos de prova de materiais com adição de nanossílica após execução do ensaio EMM-ARM, de forma a se identificar a ocorrência de indícios de maior porosidade devido à redução de trabalhabilidade destes materiais, ou ainda se ocorre deficiência na ancoragem entre tubo e corpo de prova. Em se havendo tais fenômenos uma possível solução é a utilização de argamassas para realização do ensaio EMM-ARM, em substituição a pastas de cimento utilizadas nos trabalhos com nanossílica até então, numa tentativa de se reduzir os efeitos adversos da nanossílica em relação à retração autógena e perda de trabalhabilidade por meio da inclusão de agregados ao material, reduzindo a proporção, em volume, da pasta de cimento, que é o componente submetido à retração (HOLT, 2001).

1.1. OBJETIVO

1.1.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral investigar as causas e propor soluções para as anomalias nos resultados da evolução dos módulos de elasticidade de materiais cimentícios com adições de nanossílica determinados pela técnica EMM-ARM.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Podem ser citados como objetivos específicos deste trabalho:

- Avaliar a viabilidade do uso do ensaio de EMM-ARM com argamassa para caracterização da sua cinética de hidratação com cimento Portland e nanossílica;
- Verificar se o uso de argamassa é capaz de mitigar/eliminar as anomalias identificadas em pesquisas anteriores no resultado do ensaio EMM-ARM com pastas de cimento;
- Caracterizar a cinética de hidratação de pastas de cimento Portland com nanossílica;
- Avaliar a exequibilidade do ensaio por um novo usuário fazendo uso do sistema *low cost* para realização do ensaio de EMM-ARM desenvolvido por Ribeiro (2019)

1.2. LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Devido às limitações impostas pela pandemia da COVID-19, este trabalho não pôde utilizar a infraestrutura do Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB – LEM/ENC/UnB. Assim, as condições de moldagem dos corpos de prova não foram as ideais. Pelo mesmo motivo, não foi possível realizar ensaios importantes para a investigação realizada, por exemplo: ensaios de caracterização dos materiais utilizados e ensaios de retração autógena com as pastas e argamassas.

Em decorrência da limitação do tempo e laboratório o número de repetições do ensaio e o número de corpos de prova ensaiados também foram limitados e isto impediu uma análise estatística adequada, como a análise de variância (ANOVA).

Apesar das limitações citadas, o autor acredita que a investigação realizada foi válida por servir como uma pesquisa exploratória, podendo justificar e nortear futuros estudos a serem realizados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. NANOSSÍLICA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Ao se fazer uma mistura de aglomerante, agregados miúdos ou graúdos e água é possível formar materiais cimentícios. O Cimento Portland atua como o material quimicamente ativo que promove a união.

Para cada combinação utilizada o material endurecido apresenta propriedades diferentes, ainda que sejam utilizados os mesmos componentes com variadas proporções. Supletivamente, a mistura ainda pode conter aditivos que provocam alguma mudança na propriedade física, de forma temporária ou permanente, com pequenas doses; ou adições que podem somar ou substituir parcialmente o cimento e tem o propósito de melhorar o desempenho do material endurecido, além da sua durabilidade.

A Nanossílica é uma nanopartícula amplamente utilizada na construção civil para promover melhoria nas propriedades mecânicas da pasta cimentícia. Segundo Mendes e Repette (2019) tais melhorias ocorrem por conta do efeito de empacotamento e da reação pozolânica da nanossílica.

O empacotamento ocorre através do preenchimento dos vazios intersticiais do cimento, tal qual ocorre com o filler na remoção do ar incorporado. Quimicamente, a nanossílica em reação com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberado na hidratação do material forma compostos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), partículas resistente que ocupam os vazios capilares (NOGUEIRA *et al.*, 2018).

As nanopartículas possuem alta reatividade por conta do pequeno tamanho e, conseqüentemente, superfície específica elevada, portanto, há uma redução considerável no tempo de reação química. Essa velocidade pode ser prejudicial para a peça quando a nanossílica formar aglomerações (grumos) que ao invés de preencher vazios, provoque outros e comprometa o bom funcionamento da estrutura (KONG *et al.*, 2013).

Na Figura 1 é possível visualizar o comportamento da nanossílica em três diferentes estágios. O primeiro deles (Figura 1a) ocorre quando as nanopartículas ocupam os interstícios e contribuem de forma efetiva ao empacotamento e a redução da porosidade, em seguida, no estágio (Figura 1b) já é possível ver o comportamento de um aglomerado sendo formado no interstício e provocando o surgimento de novos vazios ao forçar o distanciamento entre as partículas a sua volta.

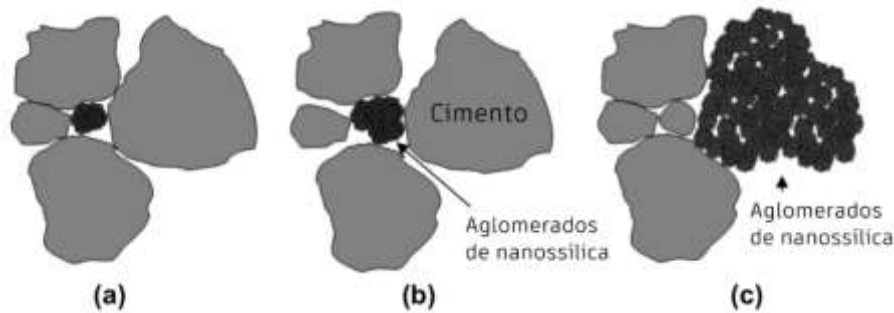


Figura 1 – Aglomerações da nanossilica.
 Fonte: Adaptado de Kong *et al.* (2013)

Portanto, é possível afirmar que o uso da nanossilica além de diminuir a porosidade total da pasta, também diminui o diâmetro do poro interno da peça. (SAID *et al.*, 2012). Esta redução pode chegar a dimensões menores que 10nm nas regiões de atuação da nanossilica (SHIH *et al.*, 2006).

O uso inadequado da nanossilica pode provocar a perda de fluidez e decréscimo da resistência característica à compressão, uma vez que haverá a necessidade de porções maiores de água nas reações de hidratação da pasta devido a superfície específica, formando aglomerados (Figura 1c). De forma a evitar o problema abordado e provocar dispersão das partículas sem uso exacerbado de água, recomenda-se combinar o uso de aditivo superplastificante a base de poli carboxilato (NOGUEIRA *et al.*, 2018).

2.1.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

É amplamente sabido na literatura que ao adicionar a nanossilica na composição da pasta, espera-se um acréscimo acentuado da resistência nas primeiras idades por conta do efeito de empacotamento, que consiste na diminuição dos vazios intersticiais pelo aumento da variedade de tamanhos dos grãos, além de provocar redução da zona frágil do conjunto agregado-pasta pelo efeito pozolânico (NETO; GEYER, 2019).

Através da Figura 2 é possível ver a influência provocada pela nanossilica no concreto. Percebe-se dois grupos, o A com adição de 0%, 3% e 6% de nanossilica e o B que apresenta as mesmas taxas, mas possui o acréscimo da cinza volante (largamente utilizado como suplemento ao cimento por seu baixo custo e disponibilidade). Para este trabalho é interessante a análise do grupo A, onde percebe-se um marcante crescimento da resistência à compressão ao longo do tempo, com uma curva especial no primeiro trecho, à medida que há acréscimo na taxa de nanossilica na composição da pasta (SAID *et al.*, 2012).

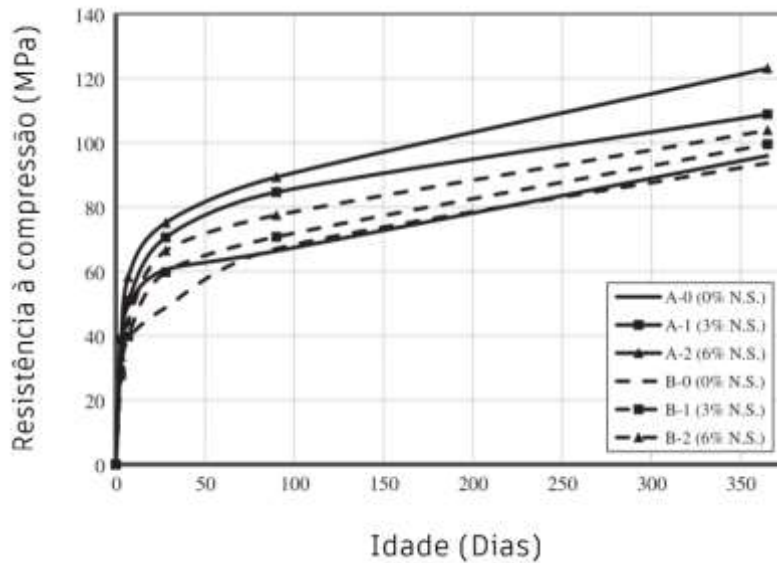


Figura 2 - Resistência à compressão ao longo do tempo.
 Fonte: Adaptado de Said et al. (2012)

Segundo Sousa e Rêgo (2020), a nanossílica acelera a hidratação da pasta e consequentemente, a formação dos compostos de silicato de cálcio hidratado que preenchem os interstícios e aumentam a resistência, reduzindo a porosidade e tornando a microestrutura mais densa.

Os autores produziram 6 tipos diferentes de pasta com aditivo super plastificante e as submeteram ao teste de compressão em 1, 3 e 7 dias, como na Figura 3. Duas delas possuíam apenas nanossílica (1% e 2,5%), outra possuía apenas metacaulim (15%, Material que influencia a pasta de forma semelhante), outras duas misturando os dois materiais (com as mesmas taxas de nanossílica e completando 15% com metacaulim) e uma última com apenas cimento Portland para ser usada como referência.

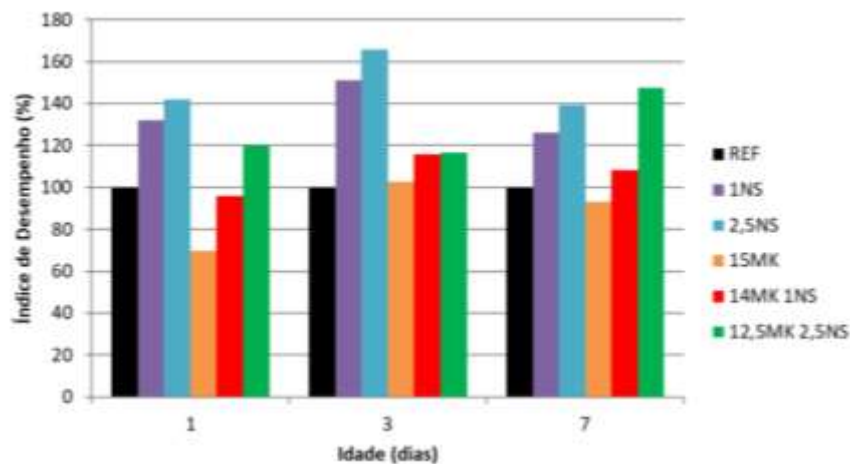


Figura 3 - Índice de desempenho das pastas em cada idade.
 Fonte: Sousa e Rêgo (2020)

Conforme explicitado na Figura 3, o resultado foi exatamente como esperado. A nanossílica agiu de forma aguda nos primeiros dias e as duas amostras contendo apenas a nanopartícula apresentaram os maiores valores no primeiro e terceiro dia, obedecendo a premissa: “quanto mais nanossílica, maior será o aumento da resistência à compressão”. No sétimo dia as amostras foram ultrapassadas pela amostra que antes estava imediatamente abaixo de ambas com nanossílica e metacaulim 2,5% e 12,5% respectivamente, sugerindo a boa combinação dos materiais para idades mais avançadas. É importante citar que a amostra de referência se manteve nos menores resultados, ao lado da amostra com adição de 15% de metacaulim.

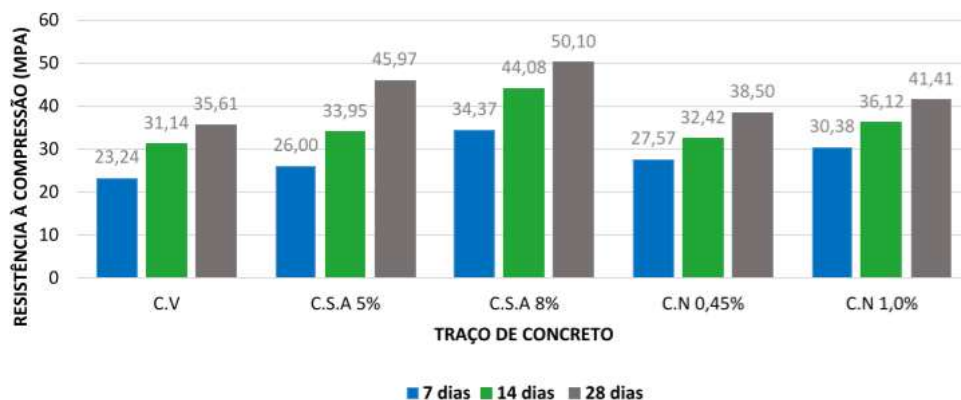


Figura 4 - Resistência à compressão.
Fonte: Schwartz e Cassol (2018)

Schwartz e Cassol (2018) produziu um ensaio experimental, cujo resultado foi expresso na Figura 4, com 5 traços diferentes analisando a resistência à compressão do material em 7, 14 e 28 dias. Dois com taxas 0,45% e 1% de nanossílica estabilizada (C.N), outros dois com 5% e 8% de sílica ativa (C.S.A) e outro de concreto convencional como referência que veio a apresentar o menor entre os resultados nas três idades estudadas. As amostras com nanossílica apresentaram valores acima do convencional, mas não superaram os das amostras com sílica ativa.

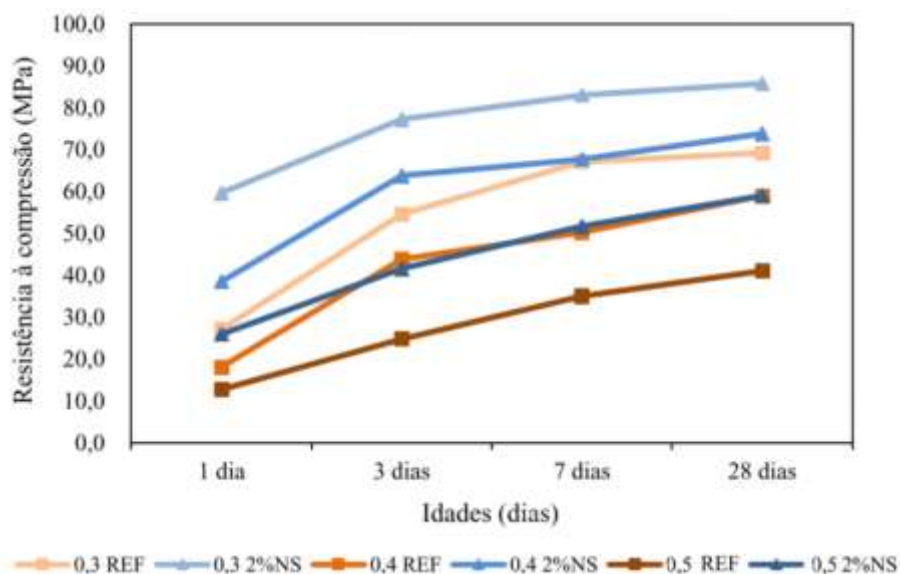


Figura 5 - Resistência à compressão das pastas de cimento.

Fonte: Adaptado de Souza (2021)

Souza (2021) produziu testes que buscam validar a contribuição da nanossílica na pasta de cimento nas primeiras idades, associando ao fator água/cimento (a/c), que está diretamente ligado ao índice de porosidade resultante na pasta endurecida. Como resultado, expresso na Figura 5, entende-se que a nanopartícula provocou um aumento de 152,36% na resistência à compressão em relação a pasta de referência com 0,3 a/c com 1 dia. Este acréscimo na resistência diminui à medida em que se aumenta a quantidade de água utilizada no traço, alcançando a taxa de 113,41% da resistência à compressão em relação a pasta sem a adição com 0,5 a/c em 1 dia.

2.1.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade (E) é uma propriedade mecânica do material e está diretamente relacionada com a tensão sofrida e decorrente deformação do elemento de estudo, ou seja, o módulo de elasticidade é um importante fator para o entendimento do comportamento de um elemento ao se submeter à carregamentos.

Para a Lei de Hooke, a teoria da elasticidade linear, considera-se que uma determinada força crescente por unidade de área (tensão) atuante sobre um material qualquer provoca uma deformação proporcional. Se ao remover a aplicação da força houver um decréscimo da deformação até seu ponto nulo, considera-se o comportamento como elástico e, quando não, trata-se de um comportamento plástico.

Muitos materiais apresentam elasticidade até determinada tensão/deformação e se comportam de forma plástica a partir deste ponto, sendo assim este material possui comportamento elasto-plástico.

É possível obter o módulo de elasticidade tangente inicial (MPa) aos 28 dias utilizando o método de ensaio estabelecido na NBR 8522 (2017), ou através de uma estimativa explanada na NBR 6118 (2014):

$$E_{ci} = \alpha_E * 5600 * \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

Considera-se que f_{ck} é a resistência característica à compressão do cimento utilizado e α_E uma variante de acordo como agregado utilizado: 1,2 para basalto e diabásio; 1,0 para granito e gnaiss; 0,9 para calcário; e 0,7 para arenito. Este módulo pode ser usado quando se tratar da análise global do comportamento da estrutura ou quando houver perdas de protensão.

Quando se tratar de um elemento estrutural ou sua seção transversal, pode-se usar o módulo de elasticidade secante, que não varia quando em tração ou compressão. A NBR 6118 (2014) estabelece para encontrar o módulo de deformação secante a expressão abaixo, desde que o primeiro fator seja menor ou igual a 1,0.

$$E_{cs} = (0,8 + 0,2 * \frac{f_{ck}}{80}) * E_{ci} \quad (2)$$

Com o uso da nanossílica, espera-se uma evolução acentuada do módulo de elasticidade nas primeiras idades, tal qual ocorre com a resistência à compressão. A variação da relação água/cimento também influencia de forma semelhante, quanto maior a relação, mais água é adicionada à mistura e por fim, menor será o módulo de elasticidade por conta da porosidade consequente na pasta endurecida. Desta forma, é comum associar o uso de nanossílica ao de um aditivo superplastificante que não utilize água em excesso, apesar da superfície específica elevada do material.

Segundo Mondal *et al.* (2010), pastas de cimento com adição de nanossílica provocam um acréscimo do módulo de elasticidade ao mesmo passo que há um aumento considerável das partículas C-S-H (silicato de cálcio hidratado), alcançando 18GPa com 6% de acréscimo de nanossílica.

No entanto, a correlação entre as propriedades supracitadas não é corroborada no trabalho realizado por Souza (2021). Foram realizados ensaios considerando três diferentes taxas a/c (0,3 a 0,5), considerando 2% de nanossílica e seu valor de referência, sem adição de Nanossílica, como a Figura 6 expressa através de curvas médias do módulo de elasticidade. É

válido ressaltar que quanto menor a a/c , menor é o valor assintótico do módulo de elasticidade, quando comparado com o valor obtido na pasta de referência.

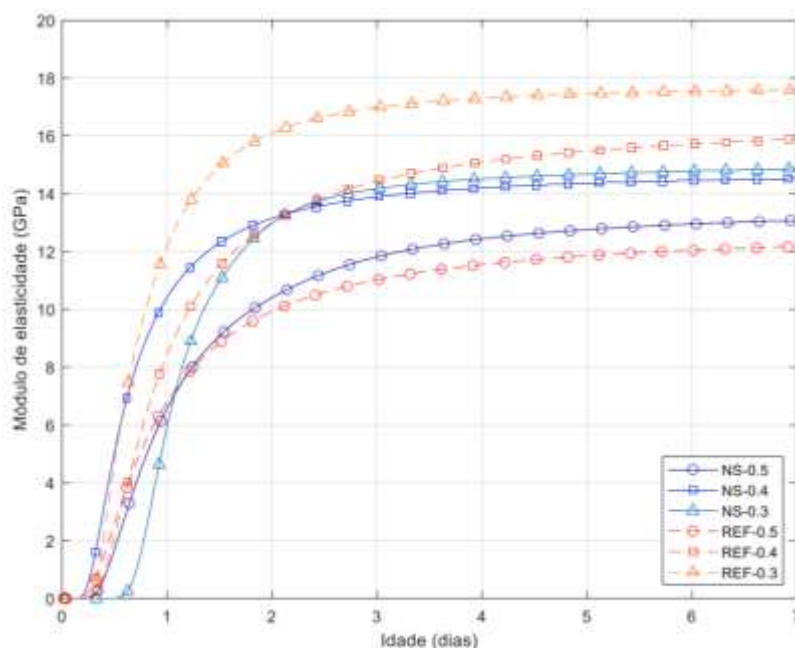


Figura 6 - Curvas médias do módulo de elasticidade para cada mistura.

Fonte: Souza (2021)

O maior módulo e o único acima da referência estabelecida para idades avançadas foi encontrada no ensaio cuja taxa a/c era de 0,5. Enquanto a única amostra a apresentar valores acima da referência nas primeiras idades foi a taxa de 0,4 a/c , apesar de haver um ponto em que a referência se torna maior que a peça com nanossílica.

Souza (2021) apresentou que a incoerência nos dados pode ser devido a maior necessidade de super plastificante nas pastas de taxa 0,3 a/c , pois o aditivo interfere no comportamento do módulo de elasticidade e dificulta a compreensão dos dados. Levantou a hipótese de que o erro pode estar associado a alguma falha do ensaio ou a hidratação muito rápida, influenciado pela nanossílica, ou a conseqüente formação de aglomerados e consumo elevado de água por conta da superfície específica. Há necessidade da repetição dos ensaios e de buscar o fator que provocou o erro.

É importante ressaltar que o trabalho de Souza (2021) é um dos pioneiros na avaliação nas primeiras idades do módulo de elasticidade, por conta da tecnologia e ensaio EMM-ARM, desenvolvido por Azenha *et al.* (2010) e teve posterior versão de baixo custo adaptada por Ribeiro (2019). Entende-se como “primeiras idades” os valores próximos a 1 dia, quando a pasta não tem resistência suficiente para receber o tratamento necessário ao ser submetido à ensaios convencionais que requerem uma amostra sólida capaz de suportar carregamentos.

Poucos trabalhos conseguem obter dados com a pasta tão jovem e o método supracitado não provoca qualquer dano na estrutura da amostra.

É preciso evidenciar outros trabalhos que obtiveram resultados em um tempo semelhante. Wang *et al.* (2019) apresenta um método de prever o módulo de elasticidade em nas primeiríssimas idades através da aplicação de uma micro força e análise do cone indentado de 45 graus. Shao *et al.* (2015) demonstra um método elétrico de avaliar o módulo de elasticidade nas primeiras idades do concreto.

2.1.3. RETRAÇÃO AUTÓGENA

Quando a retração ocorre durante a hidratação da pasta, sem haver perda da água para o meio externo em temperatura constante, dá-se o nome de retração autógena. Esse processo ocorre através da formação de meniscos capilares na migração da água com o objetivo de participar do processo químico de hidratação, provocando altas tensões e o efeito de retração (NUNES; FIGUEREDO, 2007).

A intensidade da retração autógena depende principalmente do material que compõe a pasta, as proporções utilizadas e a taxa água/cimento, pois estes irão definir a densidade da microestrutura e sua porosidade da peça (HOLT, 2001).

Quanto menor for o poro, maior será a tensão do menisco, ao mesmo tempo que uma menor relação a/c irá apresentar maior retração autógena. (NUNES; FIGUEREDO, 2007)

Este fenômeno é mais comum em concretos de alto desempenho cuja reserva de água de hidratação é muito pequena e exige que a água se locomova internamente ou em corpos de prova onde a pasta se encontra isolada do meio externo por selagem e ocorre uma contração volumétrica dos sólidos e consequente retração (SILVA; DANTAS, 2005).

A Figura 7 demonstra a retração autógena ao longo do tempo para a argamassa e concreto. Fazendo uso de aditivo super plastificante e taxa 0,3 a/c. O efeito da retração autógena está intimamente relacionado às variações volumétricas dos componentes da pasta, desta forma, o concreto apresenta taxas menores de auto secagem em relação a argamassa devido a presença de agregados em maiores proporções, ou seja, existe uma rigidez relativa maior por conta do material de volume constante (HOLT, 2001).

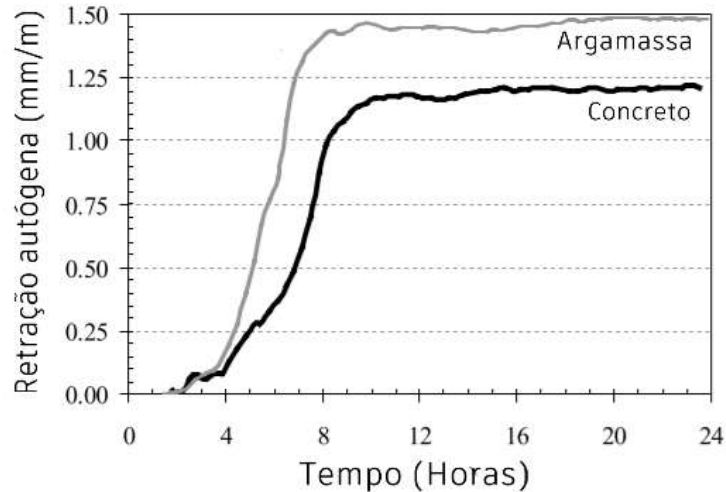


Figura 7 - Retração autóloga argamassa x concreto.

Fonte: Adaptado de Holt (2001)

Espera-se, então que a pasta de cimento sem adição de agregados possua uma retração autóloga ainda mais violenta. O uso de elevadas taxas de nanossílica e de partículas menores na composição das pastas sugere um aumento considerável na retração autóloga devido a auto secagem, velocidade de hidratação e alto calor de hidratação, como explicitado por Balapour *et al.* (2018), podendo reduzir este efeito através do uso de super plastificante para tornar a quantidade utilizada de água como apropriada.

A literatura aponta o uso de polímeros superabsorventes em combinação com a nanossílica como uma forma de reduzir a retração autóloga enquanto mantém as propriedades mecânicas do material de referência. Lefever *et al.* (2020) descreve em sua pesquisa que os polímeros fazem armazenamento de água e provê quando necessário, durante a reação de hidratação, ao passo que a nanossílica impede a perda das propriedades mecânicas causada pelo polímero.

Na Figura 8, percebe-se o resultado do ensaio de “anel de retração” realizado por Lefever *et al.* (2020) onde demonstra a pasta de referência (Figura 8a), a amostra contendo apenas os polímeros superabsorventes, duas amostras com nanossílica em (Figura 8c) e uma da mistura combinada dos dois materiais (Figura 8d).

A linha sólida representa o início da retração autóloga enquanto a linha traço-ponto representa seu final. É possível ver que o tempo de duração do fenômeno reduziu por mais de 100 minutos nas amostras com a presença dos polímeros, da mesma forma em que há uma redução da deformação. Pode-se constatar também que houve variação muito menor da temperatura (Linha verde tracejada), visto que na presença da nanossílica a retração autóloga se dá mais cedo que nas outras amostras. Vale ressaltar que quase não há variação na tensão

provocada no anel de medição quando a amostra contém os polímeros, sugerindo que a retração autógena teve pouca intensidade.

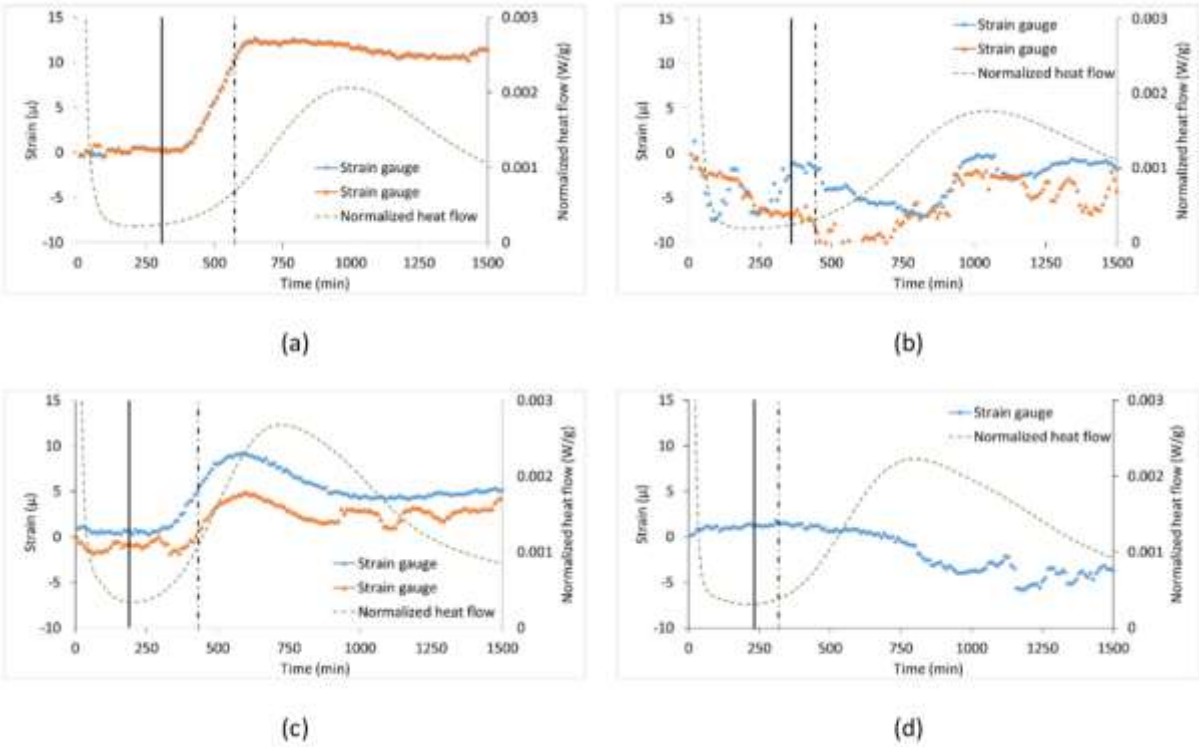


Figura 8 - Curva de tensão ao longo do tempo resultado do ensaio de anel de restrição.

Fonte: Adaptado de Lefever et al. (2020)

2.2. EMM-ARM

O ensaio denominado EMM-ARM (Elastic Modulus Measurement through Ambient Response Method) foi desenvolvido e originalmente apresentado por Azenha *et al.* (2010) e consiste na inspeção contínua do módulo de elasticidade em pastas cimentícias através da medição da frequência natural de vibração com uso de acelerômetros sob excitação ambiental da amostra em estudo.

O módulo de elasticidade de um material e a frequência natural de vibração da estrutura composta pelo mesmo material estão diretamente relacionados e quando se há o conhecimento da geometria da seção, massa específica do material, condições de apoio e vão livre desta peça, a relação pode ser matematicamente solucionada (RIBEIRO, 2019).

Pode-se considerar que a primeira proposta do EMM-ARM, apesar de não ocorrer sob este título, ocorreu na tese de Azenha (2009) que deu início à uma série de outros trabalhos feitos por este e outros autores que desenvolveram e validaram o método cada vez mais. Pode-se citar: Granja (2016), Silva *et al.*, (2013), Benedetti *et al.* (2016), Ribeiro (2019) e Souza (2021).

O estudo de Azenha *et al.* (2010) possibilitou a proposição de uma metodologia inovadora e não destrutiva de fazer estudo do módulo de elasticidade das pastas cimentícias, bem como a determinação do tempo em que a pasta se torna realmente uma estrutura capaz de resistir a tensões de compressão. É possível obter informação desde as mais primeiríssimas idades, com obtenção de dados das primeiras horas de ensaio, incluindo o processo de hidratação. Até este momento, as técnicas mais utilizadas necessitavam de um choque mecânico, portanto não era possível fazer o experimento antes da pasta obter um mínimo de resistência para ser submetida ao ensaio (AZENHA *et al.*, 2012).

A metodologia de Azenha veio a ser validada posteriormente com a contribuição realizada por Granja (2016), ao realizar o teste EMM-ARM e submeter a mesma pasta endurecida a outros testes. Para tal, o autor sugeriu alterações na versão original com o intuito de melhorar a rigidez dos apoios, a excitabilidade dos tubos e a resolução dos ensaios. Conclui-se que o EMM-ARM pode ser usado para caracterizar diversos materiais que possuem o endurecimento químico, como o concreto. O autor ainda aponta as limitações do método, como sua complexidade de execução e demonstra formas de tornar o método mais independente do operador.

Posteriormente, Ribeiro (2019) adaptou o ensaio para um modelo de baixo custo cuja interface pudesse ser utilizada de forma simples e fosse fácil fazer melhorias futuras. Nessa versão o ensaio consiste no uso de uma amostra de pasta vedada horizontalmente em um

cilindro de PVC tal qual uma viga engastada-livre sobre um bloco de concreto. Este corpo de prova é submetido a uma vibração de baixa frequência e os dados são lidos utilizando-se um acelerômetro em sua ponta livre que possui a função de monitorar em tempo real a evolução do módulo de elasticidade durante as primeiras idades com o auxílio de um Arduino.

Na Figura 9, é possível visualizar uma das configurações utilizadas por Ribeiro (2019) para fixação das peças e acelerômetro.

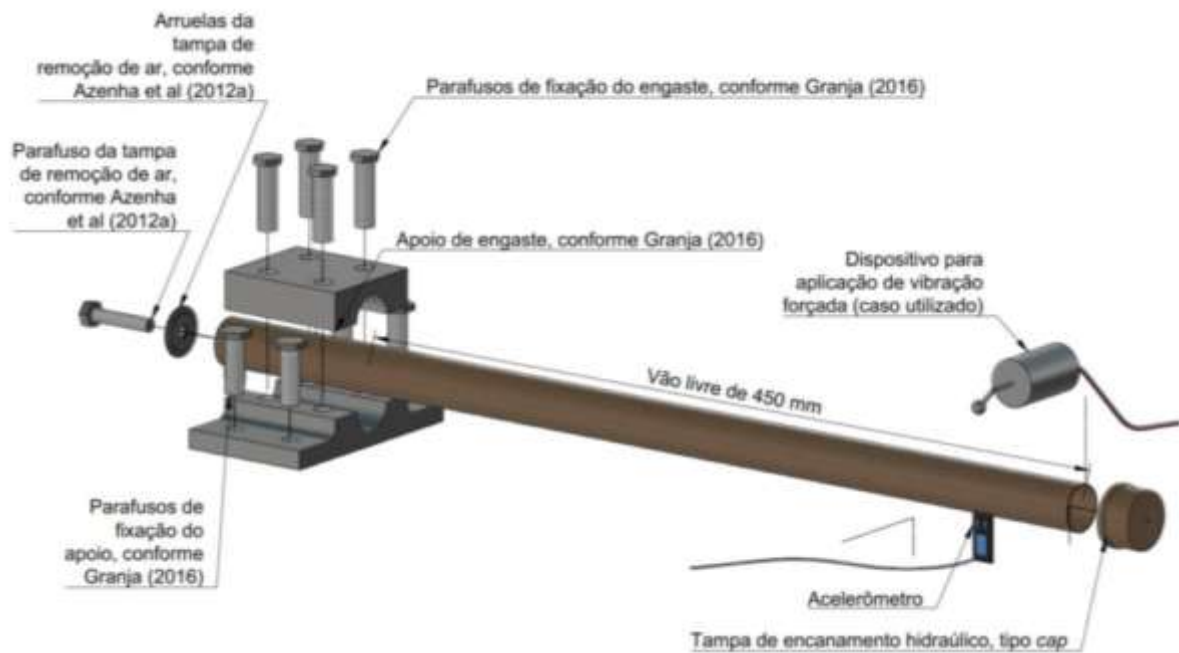


Figura 9 - Configuração EMM-ARM.

Fonte: Ribeiro (2019)

O ensaio necessita que haja uma excitação externa e que esta seja de baixa intensidade. Quando a força externa é intensa o corpo de prova tende a acompanhar o estímulo e a vibrar de acordo com frequência provocada e não na própria frequência natural. Como a intenção é estudar a frequência natural do objeto e assim estimar outras propriedades físicas, deve-se tomar este cuidado.

3. METODOLOGIA

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esta pesquisa é caracterizada por ser experimental. A Figura 10 representa o fluxograma das etapas do trabalho realizado.

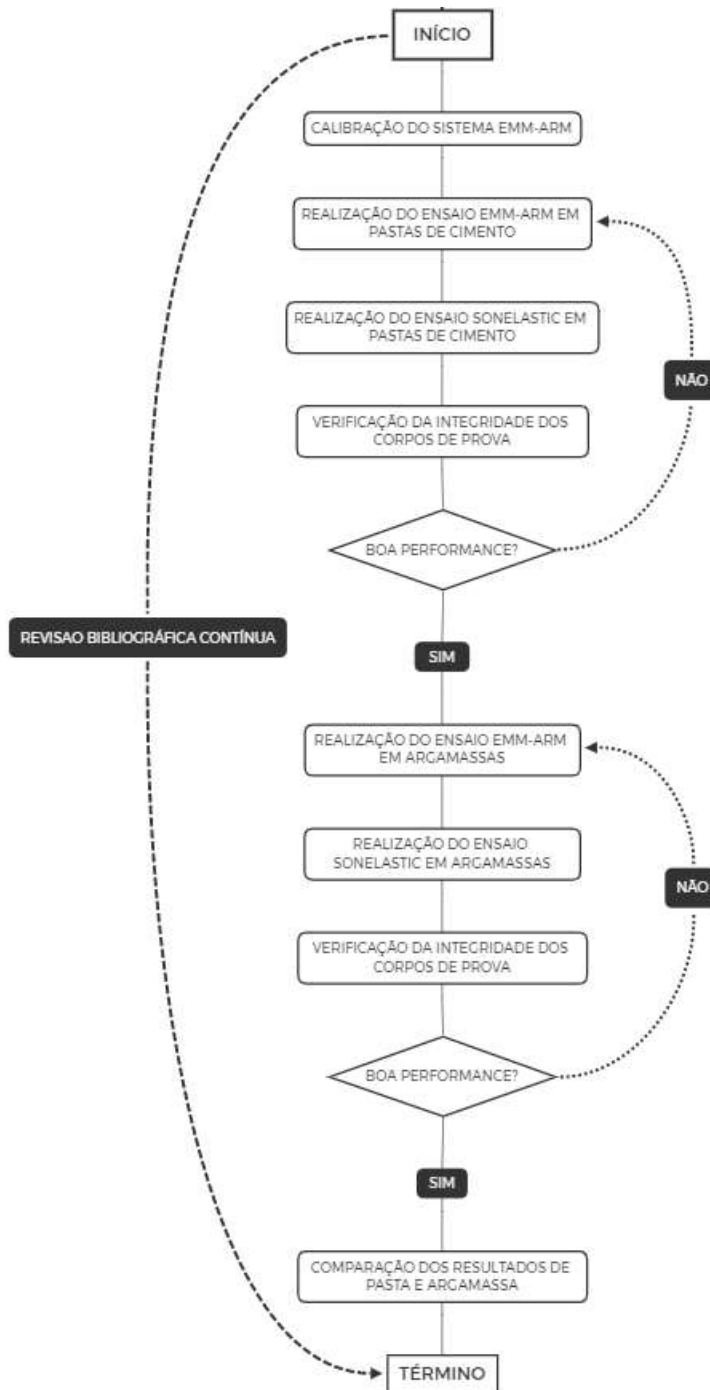


Figura 10 – Fluxograma das etapas.
Fonte: Elaboração própria

O programa experimental realizado foi montado de modo que fosse possível comparar resultados obtidos do ensaio EMM-ARM com pastas com os realizados com argamassas. A

ideia era avaliar a possibilidade de utilização de argamassas como forma de determinar a cinética de hidratação de cimentos através do ensaio de EMM-ARM e verificar se ao usar argamassa, as anomalias observadas nos ensaios com pastas por Souza (2021) deixariam de ocorrer.

Para alcançar o objetivo do trabalho, optou-se por utilizar como material de referência as mesmas pastas de cimento de Souza (2021) que apresentaram anomalias nos ensaios de EMM-ARM, ou seja, com 2% de nanossílica e água/cimento igual a 0,4. Para permitir a comparação, as argamassas foram produzidas com o mesmo teor de adição de nanossílica e com a mesma a/c. Cada ensaio EMM-ARM foi conduzido durante sete dias, com quatro corpos de prova como réplicas, ensaiados simultaneamente no mesmo ambiente.

As variáveis do programa experimental foram:

- Variável independente: Tipo de traço de ensaio (2 níveis: Pasta e Argamassa (1:3));
- Variável dependente: Evolução do módulo de elasticidade determinado pelo EMM-ARM;
- Variável de controle: Evolução do módulo de elasticidade pelo Sonelastic;
- Variáveis fixas: Água/cimento (0,4), teor de nanossílica (2%), condições de cura: umidade ($60 \pm 5\%$) e temperatura ($25 \pm 2^\circ\text{C}$).

3.2. MATERIAIS

Nesta seção serão descritas as características dos materiais que foram utilizados no desenvolvimento deste projeto.

3.2.1. AGLOMERANTE

Foi utilizado Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V - ARI), de acordo com as especificações da NBR 16697 (2018). A identificação comercial do material é “Cimento Extra Forte”, da marca CIPLAN, que possui resistência à compressão característica de 40MPa aos 28 dias, início da pega em 60 min e fim e pega em 180 min (CIPLAN, 2021).

A principal justificativa para a escolha de tal cimento é para permitir comparações dos resultados do presente trabalho aos resultados da dissertação Souza (2021), que utilizou o mesmo tipo de cimento.

3.2.2. ADITIVOS

Foi utilizado a nanossílica Levasil CB45 A, com 15% de teor de sólidos, de fornecimento da empresa Nouryon. Similarmente ao cimento, a escolha por este produto se deve ao fato de ser o mesmo utilizado por Souza (2021).

De acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, a nanossílica é fornecida no estado líquido, de cor clara/turva e possui pH de 9,5. Tem densidade relativa de 1,1 g/cm³, com solubilidade dispersível em água e viscosidade 3,5cP (NOURYON, 2021).

O aditivo super plastificante utilizado nesta pesquisa foi doado pela empresa BASF e é considerado da terceira geração, da marca Master Glenium[®] 51, que possui efeito dispersante na mistura pela cadeia de éter poli carboxílico modificado em sua composição, provocando maior trabalhabilidade à mistura sem alterar o tempo de pega.

Dentre as propriedades deste material pode-se destacar a aparência líquida branca turva, cuja densidade se reside entre 1,067g/cm³ e 1,107g/cm³, tem pH entre 5 e 7, teor de sólidos entra 28,5% e 31,5% e viscosidade menor que 150cps. (BASF, 2021)

3.2.3. AGREGADO MIÚDO

O agregado miúdo utilizado se trata de uma areia média quartzosa. A caracterização desta areia foi realizada por (OLIVEIRA; SANTANA, 2018), que determinou sua massa específica em 2,60g/cm³ e absorção em 1% e a curva granulométrica expressa na Figura 11. Para saber a umidade da areia no momento da moldagem, deixou-se uma porção com pesagem conhecida por sete dias para secagem e encontrou-se o valor de 6% de umidade.

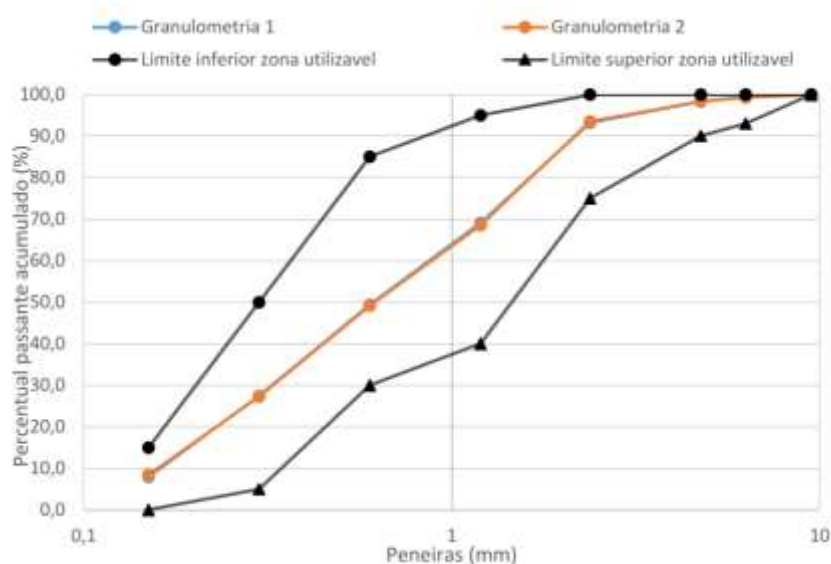


Figura 11 - Curva granulométrica da areia.
Fonte: Oliveira e Santana (2018)

3.2.4. ÁGUA DE AMASSAMENTO

Foi utilizada a água fornecida pela distribuidora local, a Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB). A água utilizada não apresentava impurezas visíveis.

3.2.5. TRAÇO DAS AMOSTRAS

Foram utilizados traços de pasta e argamassa com super plastificante, utilizando o teor efetivo de 2% de nanossílica, pelo fato de ser o mesmo utilizado por Souza, (2021). O traço da argamassa foi escolhido o 1:3, seguindo o mesmo traço recomendado pela NBR 7215 (ABNT, 2019), norma brasileira que estabelece os procedimentos para determinação da resistência à compressão de cimento Portland, que faz uso de argamassa para a realização dos ensaios. Os traços utilizados estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Traço das amostras.

Traços	(a/c)	Materiais (g)				
		CP V - ARI	Agregado Miúdo	Nanossílica	Super plastificante	Água
Pasta	0,4	3000	0	400	53	828,50
Argamassa	0,4	750	2250	100	10	208

Fonte: Autoria própria

As quantidades de nanossílica e de super plastificante foram determinadas considerando o teor dos sólidos destes materiais, uma vez que a nanossílica tem 15% de sólidos e o super plastificante possui 30% de sólidos. A quantidade de água já considera a água adicionada juntamente com a nanossílica e com o super plastificante. As quantidades apresentadas na Tabela 1 correspondem a uma quantidade de material suficiente para moldagem de 4 corpos de prova para ensaio EMM-ARM e cinco corpos de prova para ensaio Sonelastic.

3.3. MÉTODOS

3.3.1. SISTEMA DE ENSAIO SONELASTIC

O sistema Sonelastic é um ensaio de caracterização não destrutiva de módulos elásticos e amortecimento via excitação por impulso. Desta forma foi utilizado a frequência ressonante com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade dinâmico de acordo com a ASTM E1876-15 (ASTM, 2015) para reproduzir valores de referência para o módulo de elasticidade.

O ensaio conta com um computador para aquisição e processamento de dados, um captador acústico direcional (microfone), um pulsador automático (pistão) e um apoio para amostras. É recomendável utilizar corpos de prova de 16mm de diâmetro e altura entre 70 mm e 80 mm para o ensaio de pequenas amostras de material cimentício, como pastas de cimento e argamassas (ASTM, 2015; Ribeiro, 2019). A Figura 12 demonstra o esquema de montagem no equipamento.

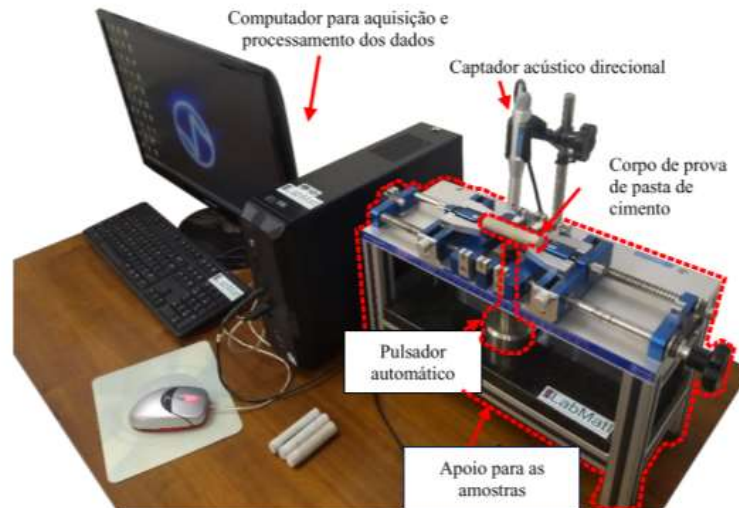


Figura 12 - Esquema de montagem do Sistema Sonelastic.

Fonte: Ribeiro (2019)

Para confeccionar os corpos de prova necessários para este equipamento utilizou-se um tubo PVC de diâmetro 16mm, do qual uma das pontas é vedada com fita crepe. O procedimento de moldagem é descrito no item 3.3.3.

3.3.2. SISTEMA DE ENSAIO EMM-ARM

O ensaio EMM-ARM consiste no monitoramento contínuo do módulo de elasticidade de materiais cimentícios através da medição da frequência natural de vibração, com uso de acelerômetros, da amostra em estudo, que é submetida a excitações oriundas do entorno do ambiente de ensaio. Estas excitações podem ser potencializadas por um ventilador ligado a uma distância aproximada de 1,7 m, com posição e intensidade devidamente calibradas para melhor desempenho do ensaio. A extremidade livre do corpo de prova sofre oscilações a serem captadas pelo sistema de aquisição de dados através dos acelerômetros, que continuamente faz a gravação destes dados em um cartão micro SD, que permite, posteriormente, a leitura e pós-processamento dos dados do ensaio no software MATLAB, com o auxílio de algoritmos desenvolvidos para tal fim por Ribeiro (2019), que também os apresenta em detalhes.

A Figura 13 ilustra as principais características do equipamento montado para o ensaio EMM-ARM em pastas de cimento e outras pequenas amostras, no qual os corpos de prova são tubos e PVC preenchidos com o material ensaiado e mantidos em uma condição de apoio engastada e livre, por meio da utilização de apoios semelhantes a mancais. Detalhes acerca do funcionamento do sistema de ensaio proposto por Ribeiro (2019) são apresentados no item 3.3.7.



Figura 13 - Configuração do ensaio EMM-ARM para pastas de cimento.

Fonte: Autoria própria

Este sistema de ensaio possui uma rigidez fornecida pelos blocos de concreto que permite considerar os apoios indesejáveis na extremidade. Utilizou-se a configuração com quatro apoios, como demonstrada na Figura 13, desta forma foi permitido ensaiar apenas quatro corpos de prova simultaneamente. O ventilador foi posicionado a cerca de 1,70 metros de distância dos apoios e apontado para os corpos de prova, foi realizada uma etapa de calibragem de modo a garantir que o posicionamento do ventilador estava adequado, como descrito no item 3.3.4.

3.3.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a mistura das pastas e argamassas, utilizou-se o misturador elétrico Mel 1200 V2 da empresa Menegotti (Figura 14). O aparelho possui potência de 1200W, frequência de 60Hz, rotação de 780RPM sem carga e faz o uso de uma pá misturadora com 120mm de diâmetro.



Figura 14 - Misturador Menegotti.

Fonte: Autoria própria

O processo de mistura da pasta de cimento durou o tempo total de três minutos na velocidade 2 do equipamento. Com os materiais devidamente pesados, adicionou-se primeiro o cimento, seguido da nanossílica, super plastificante e água, e fez-se a mistura por dois minutos. Em seguida, fez-se a raspagem das paredes do recipiente e nova utilização do misturador por mais 30 segundos. Esta última etapa se repetiu até o tempo total de três minutos ser atingido, para garantir que a pasta estivesse suficientemente homogênea e mantivesse trabalhabilidade enquanto fosse feito a moldagem dos materiais, conforme a Figura 15. Durante o processo de moldagem, foi necessário adicionar 5g de super plastificante para melhorar a trabalhabilidade e evitar formação de vazios nas amostras do ensaio EMM-ARM.



Figura 15 - Processo de mistura da pasta.

Fonte: Autoria própria

O processo de mistura da argamassa teve o mesmo tempo total da pasta, de três minutos. Por conta da perda de fluidez notada no processo de moldagem de corpos de prova com a pasta, optou-se por fazer duas misturas com a metade dos pesos descritos na Tabela 1. Para produção da argamassa, adicionou-se primeiro o cimento com a areia (levemente úmida) e misturou-se para que se tornasse homogêneo e então adicionou-se a nanossílica, o super plastificante e água. O misturador atuou por dois minutos. Em seguida, fez-se a raspagem das paredes do balde e nova utilização do misturador por mais 30 segundos. Essa última etapa se repetiu até o tempo total ser atingido para garantir que a argamassa estivesse bem homogênea e mantivesse trabalhabilidade enquanto fosse feito a moldagem das amostras.

Durante o processo de moldagem, foi necessário adicionar 4g de super plastificante para melhorar a trabalhabilidade e evitar formação de vazios na amostra. Nesta etapa de moldagem

da argamassa notou-se que o material começou a apresentar exsudação e assim, foi preciso verificar posteriormente se a argamassa se manteve homogênea ou se houve segregação.

Com a mistura pronta, faz-se a pesagem no material, conforme a Figura 16, utilizando um recipiente rígido de plástico e cujo volume foi previamente determinado, para que fosse possível calcular a densidade da amostra. Para determinação do volume do recipiente, o recipiente foi pesado vazio, e posteriormente completamente preenchido com água, até seu topo e novamente pesado. Com o peso do recipiente vazio e preenchido de água, e o peso específico já conhecido da água, de 1 g/cm^3 , determinou-se o volume do recipiente. A densidade da amostra foi calculada subtraindo-se, do peso do recipiente preenchido pela amostra, o peso do recipiente vazio, e dividindo o resultado pelo volume do recipiente.



Figura 16 - Pesagem da amostra para determinação da densidade da pasta.

Fonte: Autoria própria

Em seguida, iniciou-se o processo de moldagem das amostras. Para o Sonelastic, a moldagem consistiu no preenchimento da mistura utilizando uma seringa de 200 ml direto no tubo PVC de diâmetro de 16 mm que serviu como molde. Após o preenchimento completo dos tubos, tomou-se o cuidado de manter os corpos de prova na vertical, evitando derramamentos de material, sendo utilizado um suporte de isopor produzido especialmente para tal fim, no qual os moldes foram apoiados. Para garantir o adensamento da amostra, utilizou-se o motor de uma escova de dentes elétrica. A Figura 17 demonstra o posicionamento dos tubos e a peça utilizada para o adensamento dos corpos de prova para o ensaio Sonelastic.



Figura 17 - Processo de vibração das amostras para ensaio de Sonelastic.

Fonte: Autoria própria

Para o ensaio EMM-ARM foi necessário preencher com o material um tubo de PVC de 25 mm de diâmetro e 550 mm de comprimento, que compõe a amostra padrão utilizada para ensaios em argamassa e pastas de cimento (Azenha *et al.*, 2012; Ribeiro, 2019). Uma das extremidades do tubo foi previamente vedada com uma tampa soldável (*cap*) para tubos de PVC, devidamente colada.

No processo de moldagem, utilizou-se um sistema formado por seringa e mangueira de forma que o preenchimento do tubo seja controlado e não facilite a formação de vazios. Para a moldagem de corpos de prova de argamassa, a seringa e a mangueira foram substituídas por um funil. Durante o processo, utilizou-se a escova elétrica para ajudar no adensamento através do contato direto da máquina no molde do corpo de prova. Com o tubo completamente preenchido, vedou-se a outra extremidade com um conjunto de arruelas, porca, parafuso e massa de calafetar, conforme a Figura 18 e sugerido por Azenha *et al.* (2012) e Ribeiro (2019).

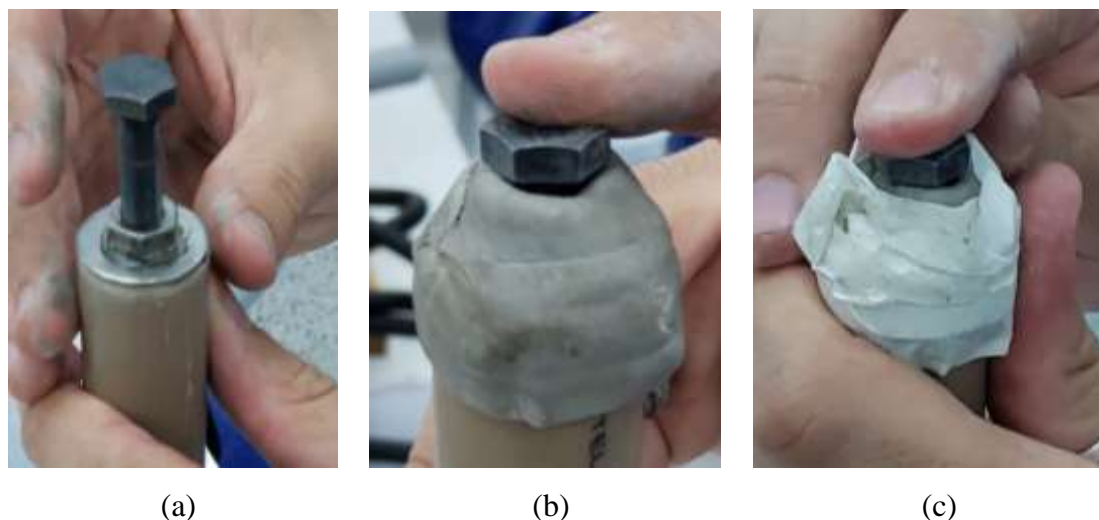


Figura 18 - Processo de vedação do corpo de prova para ensaio de EMM-ARM.

Fonte: Autoria própria

Na Figura 18a é possível ver o posicionamento do conjunto arruelas, porca e parafuso no tubo. Após o posicionamento, deve-se girar o parafuso de modo que o volume que entra no tubo ajuda na vedação adequada e retirada de vazios. Em seguida, deve-se usar a massa de calafetar para envolver a amostra e vedar possíveis pontos de vazamento de material, conforme demonstrado na Figura 18b. Por fim, utiliza-se fita crepe para proteger a massa e o sistema de vedação, como na Figura 18c. Com o tubo preparado, deve-se fazer sua pesagem, uma vez que a massa do corpo de prova é um dado necessário durante o pós-processamento dos dados do ensaio, posicioná-lo no apoio com cuidado para se garantir a condição de engaste, medir o vão livre, isto é, o comprimento desde a extremidade do apoio até a extremidade livre do corpo de prova, e posicionar o acelerômetro na extremidade livre. A Figura 19 demonstra o esquema completo do ensaio montado.



Figura 19 - Esquema completo do ensaio EMM-ARM.

Fonte: Autoria própria

A Tabela 2 descreve a identificação dos corpos de prova do ensaio EMM-ARM. Foram moldados 10 corpos de prova no total. Dois deles (Amostra 01 e Amostra 02) foram feitos com pasta de cimento e utilizados no período de teste do ensaio EMM-ARM descrito no item 3.3.4. Quatro corpos de prova de pasta (Amostras 03 a 06) e outras quatro de argamassa (Amostras 07 a 10) foram utilizados para investigar o uso da nanossílica. Vale ressaltar que a argamassa foi feita com duas misturas, a primeira moldou as amostras 07 e 08, enquanto que a segunda moldou as amostras 09 e 10.

Tabela 2 - Identificação da posição das amostras – EMM-ARM.

Tipo de mistura	Apoios			
	1	2	3	4
Pasta (Teste)	-	-	02	01
Pasta	05	06	04	03
Argamassa	07	08	10	09

Fonte: Autoria própria

3.3.4. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE ENSAIO EMM-ARM

Para que o ensaio EMM-ARM ocorra corretamente, deve-se haver excitação suficiente no corpo de prova, de modo que o acelerômetro seja capaz de medir as frequências de vibração e assim, ser possível estimar o módulo de elasticidade da amostra. É comum que a excitação ambiente (ex.: correntes de ar, caminhar de pessoas, etc.) não seja suficientemente intensa. Nesses casos, a excitação pode ser intensificada com o auxílio de um ventilador, que atende aos requisitos de ser uma fonte de excitação randômica e autônoma, isto é, não depende do comando de um usuário para funcionar. Neste trabalho, utilizou-se um ventilador da marca Mondial VTX-40-8P (MONDIAL, 2021).

Quando se utiliza um ventilador no ensaio EMM-ARM, é preciso posicioná-lo devidamente para que o estímulo causado não seja nem muito, nem pouco intenso, permitindo a melhor leitura possível no ensaio. Valores muito intensos de excitação poderiam causar danos no material, que estaria sujeito a excitações fortes em idades iniciais nas quais ainda não teria adquirido resistência, ou contaminar as medidas de aceleração com frequências espúrias, advindas do próprio funcionamento do ventilador e impossibilitando a estimativa da frequência da amostra. Por outro lado, valores pouco intensos de excitação poderiam impossibilitar a correta identificação da frequência das amostras. Isto requer um processo de calibragem, que consiste na testagem do sistema utilizando um corpo de prova cuja frequência de vibração é conhecida (geralmente o tubo vazio) sob estímulo do ventilador previamente posicionado a uma distância de 1,7 m aproximadamente.

A intensidade da excitação pode ser auferida a partir do valor RMS - *Root Mean Square*, ou valor quadrático médio, das acelerações medidas pelo sistema. Com base em valores de referência sugeridos por Granja (2016) e Ribeiro (2019), neste trabalho calibrou-se a posição e intensidade do ventilador para que o valor RMS esteja entre 0,003g e 0,015g durante a execução do ensaio EMM-ARM, pois este valor tende a oscilar de acordo com o preenchimento do tubo e com o endurecimento da amostra. Para tanto, durante a calibração do sistema, objetivou-se que o valor RMS da aceleração se mantivesse em torno de valores próximos a 0,009g.

Esta etapa do ensaio é muito sensível por conta da precisão do acelerômetro e da intensidade da excitação provocada pelo ventilador, totalmente condicionada pela orientação em que o ventilador se encontra e pelo “cone de ventilação” formado pela dispersão do vento. Outros fatores são igualmente impactantes na sensibilidade da calibração como o número de apoios a serem utilizados e a velocidade utilizada no ventilador, entre outros.

A priori uma posição foi definida e um ensaio EMM-ARM, com dois corpos de prova de pasta moldados para teste, foi realizado utilizando metade da quantidade dos materiais descritos no item 3.2.5. No entanto, os resultados obtidos não foram satisfatórios, não sendo possível medir a frequência natural da amostra durante todo o ensaio EMM-ARM, pois a leitura dos dados demonstrou a dominância de outras frequências que não a da amostra, principalmente a partir das 12hrs de ensaio conforme ilustrado na Figura 20.

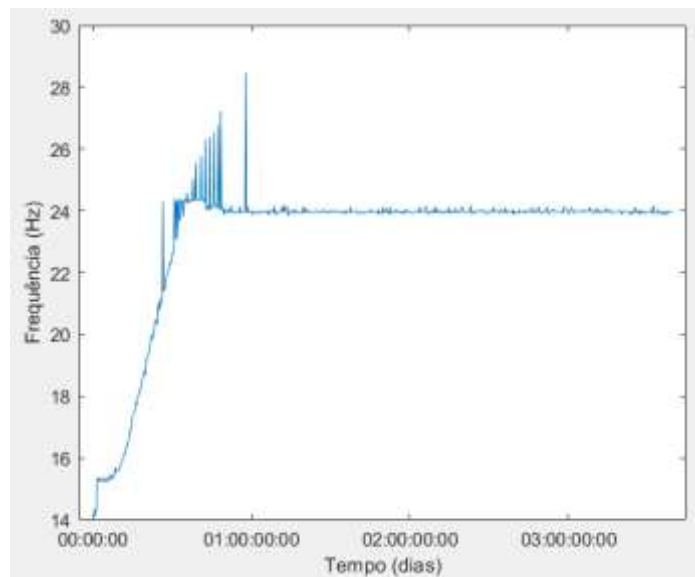


Figura 20 - Frequência da amostra 02 no domínio do tempo.

Fonte: Autoria própria

É possível perceber uma oscilação a partir de 12 horas e uma tendência da curva a se manter constante logo depois, de forma abrupta. Este não é o comportamento esperado para a evolução do módulo de elasticidade, e, conseqüentemente, da frequência natural da amostra, sendo esperada uma curva mais próxima do valor constante de uma forma mais suave, menos acentuada e sem muitas oscilações. Três hipóteses foram levantadas para explicar os resultados obtidos: 1) Houve erro de leitura proveniente do sistema; 2) Houve erro no procedimento de moldagem, incapacitando a amostra de trabalhar de forma compósita e 3) A excitação do ventilador, apesar da calibragem, não foi suficiente para excitar os corpos de prova.

Como forma de verificar a primeira hipótese levantada, fez-se um teste aplicando 3 pequenas excitações manuais, na forma de impactos, nos corpos de prova ensaiados. Desta forma, haveria de se ter uma leitura mais limpa da excitação e das frequências envolvidas. A Figura 21 demonstra o resultado captado pelo sistema. É possível notar uma única frequência preponderante na leitura dos dados, sendo esta a frequência provavelmente proveniente do corpo de prova, uma vez que a forma da curva no domínio da frequência, na Figura 21b, apresenta formato típico de frequências naturais de sistemas amortecidos, com um único pico intenso, com redução suave em ambas as caudas, que possuem uma determinada largura característica da ocorrência de amortecimento. Assim, a primeira hipótese foi descartada.

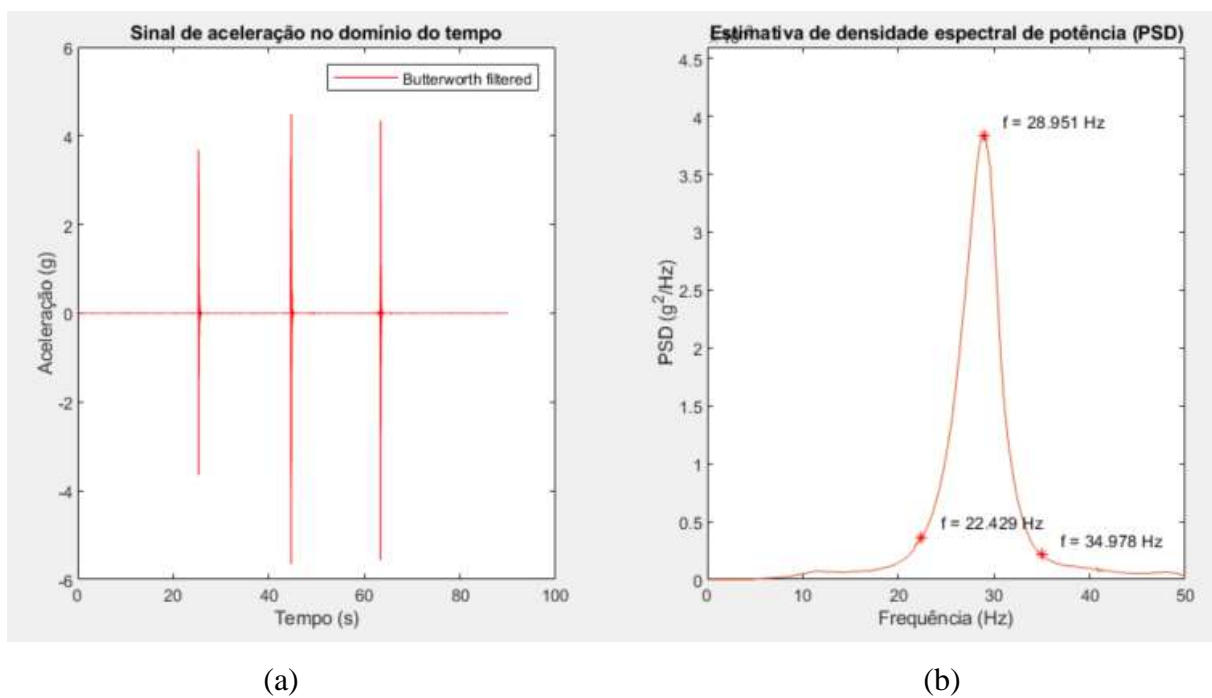


Figura 21 – (a) Aceleração no domínio do tempo; (b) Intensidade estimada em cada frequência (teste).

Fonte: Autoria própria

Para verificar a segunda hipótese, fez-se a serragem dos corpos de prova em 6 partes iguais com o auxílio de uma mesa de serra utilizada para o corte de barras de aço com diâmetros grandes. A Figura 22 mostra uma das seções obtidas após a serragem.



Figura 22 - Seção transversal do tubo serrado.

Fonte: Autoria própria

É possível notar na Figura 22 que não há presença de vazios visíveis, logo, aparentemente, não houve erros durante o procedimento de moldagem dos corpos de prova e a pasta foi corretamente adensada. No entanto com pouco esforço mecânico foi possível perceber que o corpo de prova descola do molde de PVC, o que dá abertura para refutar a ideia de que há uma ação 100% compósita, como deve ser de acordo com as premissas do ensaio.

Em relação à terceira hipótese, torna-se necessário refazer a calibragem do ventilador. De acordo com o resultado anterior, escolheu-se outra posição, mais próxima dos apoios e com o centro do ventilador direcionado ao ponto médio entre os quatro sistemas, o meio geométrico. O teste foi realizado com cada um dos quatro apoios, avaliando se a frequência das amostras posicionadas em cada apoio estavam melhor representadas na velocidade mínima, média ou máxima do ventilador. Optou-se por utilizar um corpo de prova de ensaio EMM-ARM já moldado e hidratado, oriundo de trabalhos anteriores, pois havia certeza em relação à integridade de sua moldagem, aderência entre amostra e tubo (isto é, de sua ação compósita), e do valor de sua frequência natural. Portanto, é necessário repetir o procedimento de calibragem até que todos os sistemas (um em cada apoio) tenham capacidade de fazer sua leitura boa o suficiente para determinar com clareza a frequência do corpo de prova.

Com esta etapa lograda, utilizou-se a fita crepe para fazer a marcação da posição do ventilador e pôs-se avisos para que o aparelho não fosse desligado ou movido durante a realização do ensaio.

3.3.5. PREPARAÇÃO PARA O ENSAIO EMM-ARM

Como forma de preparação para o ensaio EMM-ARM, é necessário preparar o molde a partir do tubo PVC, cortando-o em pedaços de aproximadamente 550 mm de comprimento, e registrar o comprimento, peso e diâmetros interno e externo do tubo. Estes dados são importantes para obter os valores referentes à inércia do tubo vazio, área da seção transversal, massa específica e massa linear do tubo, necessários ao cálculo do módulo de elasticidade a partir da frequência natural do corpo de prova. Uma folha de dados, apresentada no APÊNDICE A, foi elaborada para garantir a qualidade do ensaio e assegurar que todos os dados seriam aferidos.

Com o tubo cortado e suas medidas aferidas, usa-se uma tampa de PVC soldável (*cap*), cuja massa é previamente aferida. para fazer a vedação de uma das pontas com o auxílio de uma cola apropriada. Em seguida, monta-se o sistema de acordo com o descrito na seção 3.3.6 deste trabalho para fazer a medição da frequência natural do tubo vazio e posteriormente encontrar o seu módulo de elasticidade. Como todos os pedaços do tubo utilizados em ensaio foram cortados do mesmo, fez-se a média entre quatro valores estudados e encontrou-se que o módulo de elasticidade do tubo vazio é de 2,464 GPa.

Deve-se preparar a vedação da extremidade do tubo que irá se localizar na região do apoio. Para tal é necessário ter duas arruelas de diâmetro diferentes, uma porca e um parafuso com diâmetros compatíveis de tal forma que ao serem colados permitam a vedação do tubo e a eliminação do vazio ao inserir o volume do parafuso à medida em que se rosqueia a peça. Um exemplo do conjunto de vedação é ilustrado na Figura 23.



Figura 23 - Conjunto de vedação - Ensaio EMM-ARM.

Fonte: Ribeiro (2019)

3.3.6. EXECUÇÃO DO ENSAIO SONELASTIC

O ensaio Sonelastic tem o objetivo de medir o módulo de elasticidade dinâmico e pode ser utilizado para validar os dados aferidos no EMM-ARM. Desta forma, depois da preparação da mistura, utiliza-se o mesmo material para confecção de ambos os corpos de prova do Sonelastic e do EMM-ARM. Para utilizar o equipamento Sonelastic, o corpo de prova utilizado teve formato cilíndrico, com diâmetro de 16mm e comprimento entre 7 cm e 9 cm, para atender aos requisitos geométricos do equipamento, onde a razão do comprimento e o diâmetro do corpo de prova deve ser maior igual a 2, e, idealmente, comprimento igual a 5 vezes o diâmetro, com diâmetros mínimo e máximo igual a 5mm e 200mm, respectivamente. A Figura 24 demonstra os corpos de prova após desforma.



Figura 24 - Amostras para o ensaio Sonelastic.
Fonte: Autoria própria

A etapa de desforma ocorre removendo a fita crepe utilizada para isolar o fundo do tubo de moldagem e aplicando uma força em uma das extremidades do corpo de prova, sobre o material, desta forma, entende-se que quanto maior for a aderência do material com o molde, mais difícil será fazer essa separação. Pode-se utilizar desmoldante na superfície interna do molde para facilitar este processo.

Para realização deste ensaio e validação dos resultados obtidos no EMM-ARM, é necessário fazer medições sistemáticas a aproximadamente um, três e sete dias de moldagem. Estes tempos foram escolhidos estrategicamente para acompanhar o desenvolvimento da amostra de acordo com o endurecimento da mesma, com medidas representativas do início, meio e fim do ensaio EMM-ARM.

Foi necessário desformar os corpos de prova com cuidado, pois a primeira medição foi feita com apenas um dia após a mistura e o corpo de prova se encontrava muito frágil. Em

seguida, utilizou-se o paquímetro para aferir as medidas de comprimento e diâmetro do corpo de prova, além de uma balança para saber o peso, necessários como dados de entrada do software que opera o equipamento Sonelastic.



Figura 25 - Sonelastic – (a) Pistão e (b) microfone.
Fonte: Autoria própria

A utilização do *software* Sonelastic, no modo somente flexional, conta com uma excitação no inferior do corpo de prova através de um pistão, levando a uma emissão sonora através do objeto e captação do som pelo microfone. Obtendo os dados de onda, o software estima o módulo de elasticidade e o erro relativo da estimativa. A Figura 25a demonstra o pistão e a Figura 25b o microfone.

O ensaio Sonelastic permite medição do módulo de elasticidade dinâmico do material. Já o ensaio EMM-ARM afere um módulo de elasticidade próximo do estático, conforme relatado por trabalhos anteriores (DELSAUTE *et al.*, 2016; GRANJA, J. L. D., 2016; RIBEIRO, 2019). Para permitir conversão do módulo de elasticidade dinâmico em módulo de elasticidade estático, utilizou-se a equação (3), dada por Neville e Brooks (2011):

$$E_{estático} = 0,83 * E_{dinâmico} \quad (3)$$

3.3.7. EXECUÇÃO DO ENSAIO EMM-ARM

Esta etapa se dá desde a montagem e ligação do sistema até o fim da captação de dados, que pode ser entre cinco e sete dias. É importante ressaltar que a análise a ser descrita pode ser feita a qualquer momento durante o ensaio como uma forma de verificar a evolução e a coerência dos dados aferidos.

Durante um ensaio EMM-ARM, o sistema de aquisição de dados proposto por Ribeiro (2019) executa o seguinte ciclo de atividades: (i) inicia o sistema de aquisição de dados e o arquivo para armazenamento dos dados do ensaio; (ii) inicia um ciclo de amostragem, durante o qual o acelerômetro posicionado na extremidade do corpo de prova será amostrado com uma frequência de amostragem de 860 Hz por 90 segundos; (iii) salva o arquivo de dados no cartão micro SD; (iv) hiberna por cinco minutos, período após o qual o ciclo de atividades se reinicia. Assim, a cada cinco minutos o sistema gera um arquivo de dados que contém amostras da vibração do corpo de prova em termos de medições da aceleração do corpo de prova.

Após o término do ensaio, os dados são pós-processados para estimativa das frequências naturais do corpo de prova ao longo do ensaio e, a partir destas, do módulo de elasticidade do material ensaiado. A partir de cada arquivo de resultados, é feita uma estimativa de frequência natural e, a partir desta, é calculado o módulo de elasticidade do material. Sendo assim, o sistema de ensaio permite aferir um valor de módulo de elasticidade do material ensaiado a cada 5 minutos, sendo que a junção dos resultados de todos os arquivos permite a visualização da evolução desta propriedade.

Logo, ao fim do ensaio completo, de cinco a sete dias, espera-se ter mais de 900 arquivos de medição. A partir do uso do software MATLAB utiliza-se 4 diferentes algoritmos, desenvolvidos por Ribeiro (2019), que fazem a leitura e processamento dos dados para obtenção da evolução do módulo de elasticidade. Cada algoritmo possui um propósito diferente e permite uma análise específica a parte do conjunto de dados exposto.

O primeiro algoritmo é utilizado para analisar uma amostra captada pelo EMM-ARM, ou seja, os dados lidos em apenas um arquivo. Tal atividade é útil para inspecionar, pormenorizadamente, a qualidade das medições feitas pelo sistema durante um determinado ciclo de amostragem. Com este algoritmo é possível analisar principalmente três informações:

- O valor RMS que demonstra a média da intensidade da excitação em que a amostra foi submetida durante a medição, sendo este valor bastante útil na calibragem do sistema, devendo ser mantido entre 0,003g e 0,015g durante a execução do ensaio;
- A representação gráfica do estímulo sofrido pela amostra com a demonstração da aceleração captada pelo acelerômetro no domínio do tempo, representado na Figura 26a;
- A representação gráfica referente à estimada densidade espectral de potência (PSD) em relação a frequência detectada, onde se permite avaliar as principais frequências notadas e a ordem de grandeza em que se percebe este fenômeno, no domínio da frequência, como demonstrado na Figura 26b.

A Figura 26 demonstra um exemplo dos dois gráficos supracitados.

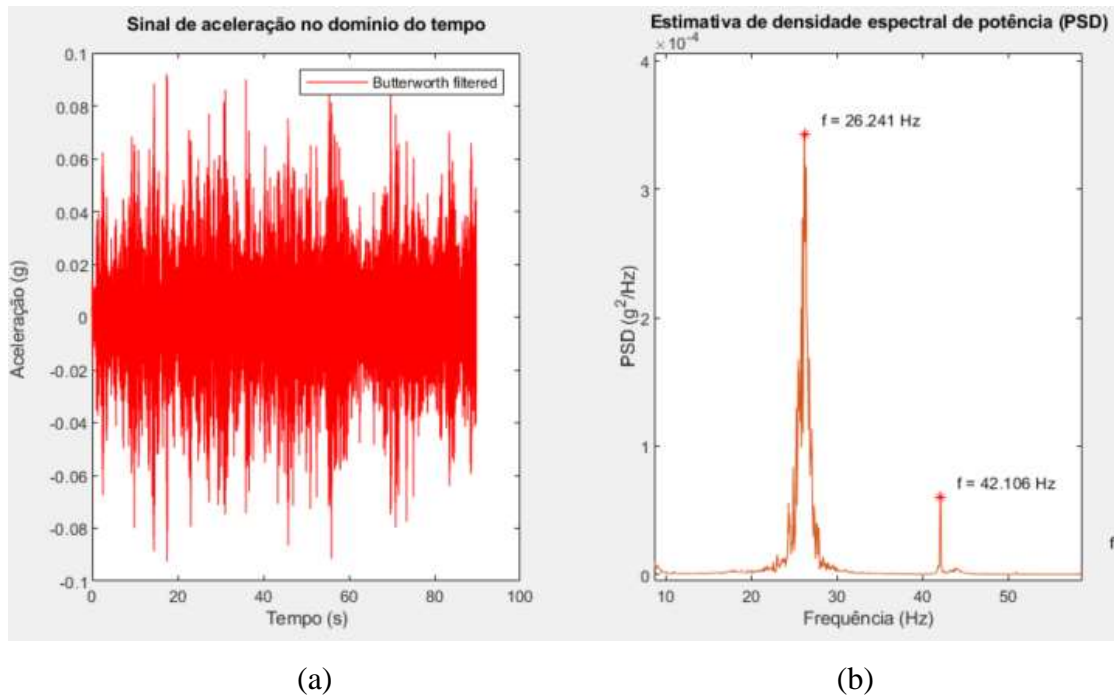


Figura 26 – (a) Aceleração no domínio do tempo; (b) Intensidade estimada em cada frequência.

Fonte: Autoria própria

O segundo algoritmo serve principalmente para analisar um conjunto de dados obtidos de um ensaio EMM-ARM. Este algoritmo é, essencialmente, a repetição automática do primeiro algoritmo para cada um dos arquivos de resultado gerados durante um ensaio EMM-ARM. Logo, é válido usá-lo para caracterização do gráfico do crescimento da frequência natural de uma determinada amostra ao longo do tempo. Desta forma, é importante que, na análise do primeiro algoritmo, a frequência da amostra seja preponderante e bastante perceptível, pois, assim, espera-se que o gráfico apresente o aspecto crescente com o endurecimento da amostra (pasta) até sua estabilização numa ordem de 28~30Hz para amostras com características similares às amostras ensaiadas neste trabalho, como exemplificado na Figura 27.

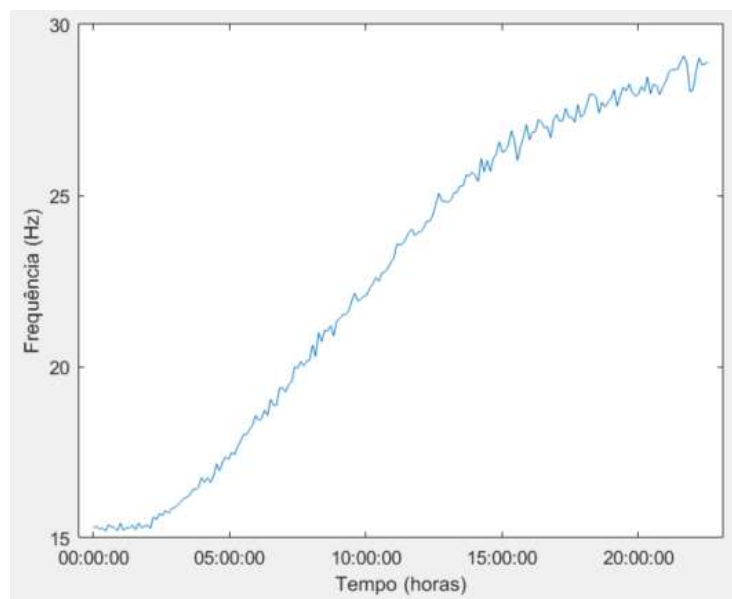


Figura 27 - Frequência de vibração no domínio do tempo.
Fonte: Autoria própria

O terceiro algoritmo utiliza como dado de entrada um arquivo de texto, criado a partir da execução do algoritmo anterior, com um resumo das informações lidas: registrando o tempo de leitura e a frequência registrada do primeiro, segundo e terceiro pico para fazer uma estimativa do módulo de elasticidade estático de cada amostra para cada leitura.

O quarto algoritmo é o responsável por fazer um ajuste dos dados de cada amostra e gerar uma curva de tendência média para a evolução do módulo de elasticidade ao decorrer do tempo. Além disso, o algoritmo encontra os parâmetros da equação (4) que representa o comportamento da curva.

$$f(t) = a_1 * e^{-\left(\frac{\tau_1}{t}\right)^{\beta_1}} + a_2 * e^{-\left(\frac{\tau_2}{t}\right)^{\beta_2}} \quad (4)$$

Se tratando de uma equação exponencial negativa, quando o valor do tempo t tende ao infinito, os expoentes tendem a zero e a equação tende a um valor assintótico, o que permite avaliar se há perda da ação composta do material caso a amostra demonstre tendência à assíntota em tempos prematuros.

3.3.8. VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE DOS CORPOS DE PROVA

Esta etapa consistiu na verificação do corpo de prova, onde avaliou-se a presença de vazios na peça e a aderência do material com o molde PVC, uma das principais hipóteses básicas para o funcionamento do EMM-ARM. Para tal, foi necessário fazer uso de uma serra policorte 12 polegadas da empresa Maxicorte para dividir o corpo de prova em diferentes pedaços

aproximadamente iguais para avaliação de sua integridade. A Figura 28 demonstra a serra de corte utilizada no procedimento.



Figura 28 - Mesa de serragem.

Fonte: Autoria própria

A partir do corte do corpo de prova do ensaio EMM-ARM, fez-se uma avaliação visual da seção cortada, verificando se há vazios visíveis. Caso haja, significa que pode ter ocorrido algum erro no procedimento de montagem do corpo de prova e deve-se averiguar a causa, não sendo possível utilizar os dados obtidos do ensaio de tal amostra. A Figura 29 demonstra o tubo de ensaio após o procedimento de serragem.



Figura 29 - Tubo de ensaio serrado.

Fonte: Autoria própria

Outra análise que se deve ser feita é a de aderência. Para tal é necessário aplicar uma força manual de compressão no corpo de prova seccionado e avaliar se o deslizamento entre as partes ocorre com ou sem facilidade. Deve-se ter em mente que a aderência ocorre como o fenômeno de força de atrito entre a superfície do material ensaiado e o tubo, logo, após repartir a peça em pedaços menores, esta força também diminui.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. PASTAS

A primeira bateria de ensaio utilizou as pastas como objeto de estudo. Exceto pela dificuldade de manuseio da pasta, devido à necessidade de se usar a seringa com mangueira, toda a montagem do experimento ocorreu sem maiores complicações e nos itens a seguir irão ser descritos os resultados do experimento.

4.1.1. SONELASTIC

Para a realização do ensaio Sonelastic, fez-se a desforma dos corpos de prova com aproximadamente 24 horas de moldagem. No entanto, por conta da fragilidade da amostra, duas peças quebraram. Os três corpos de prova restantes, nomeados como P-01, P-02 e P-03 estão representados na Figura 30.



Figura 30 - Corpos de prova - Pasta – Sonelastic.
Fonte: Autoria própria

A partir do desmolde, tirou-se as três medidas de comprimento e diâmetro com o auxílio de um paquímetro e fez-se a pesagem dos corpos de prova utilizando uma balança. As médias das medidas tiradas foram descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Medidas dos corpos de prova – Sonelastic – Pasta.

Amostra	L (mm)	D (mm)	P (g)
P-01	86,10	16,50	33,0
P-02	84,20	16,60	33,0
P-03	77,80	16,50	30,0

Fonte: Autoria própria

Com os dados inseridos no *software* do Sonelastic e fazendo o ajuste mecânico do aparelho, fez-se 10 medidas para cada corpo de prova em três diferentes idades, um, três e sete dias, aproximadamente. O software permite exportar os dados de ensaio no formato de planilha eletrônica e desta forma, foi possível tratar os dados e tirar a média entre as medidas de mesma idade e seu desvio padrão, o que resultou no gráfico expresso na Figura 31. Os dados do módulo de elasticidade estão em termos do módulo de elasticidade dinâmico.

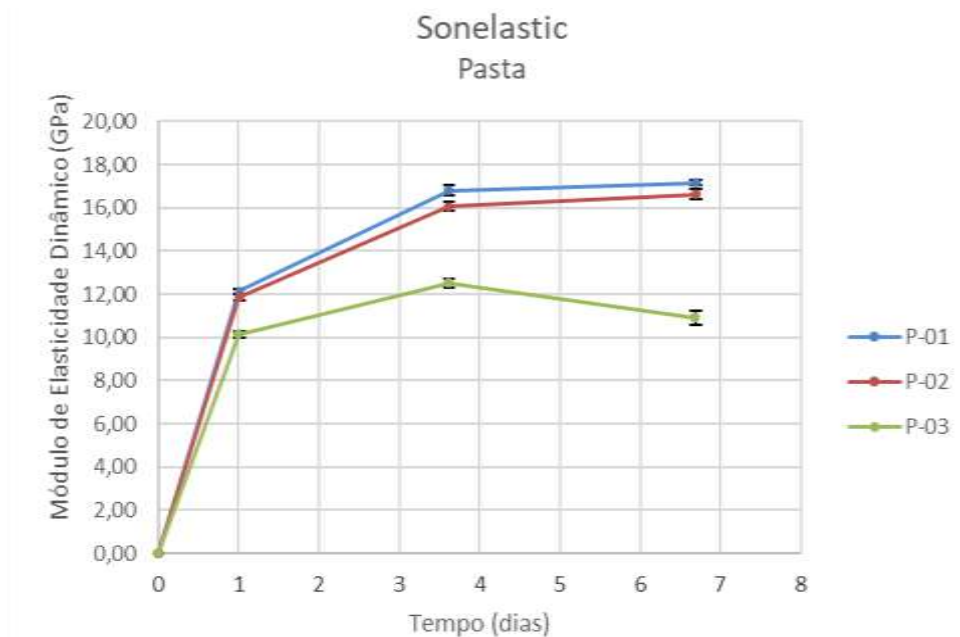


Figura 31 - Módulo de Elasticidade Dinâmico - Pasta – Sonelastic.
 Fonte: Autoria própria

É possível notar que a amostra P-03 não segue o mesmo comportamento das demais, este comportamento se justifica ao estudar a integridade da amostra, conforme a Figura 32. É possível notar um número considerável de fissuras que se estende ao longo da amostra, conclui-se então que a desforma e o manuseio da amostra durante os ensaios foram os responsáveis por danificar a peça.



Figura 32 - Fissuras no corpo de prova.
 Fonte: Autoria própria

Analisando as duas amostras restantes, chegou-se à conclusão de que o módulo de elasticidade do corpo de prova tem um acréscimo muito acentuado nas primeiras idades e se estabiliza à medida que se aproxima dos sete dias de idade. Esta informação corrobora com o

fato de que o cimento utilizado é o CP V – Alta Resistência Inicial (ARI), então espera-se que o ganho de resistência seja acentuado nas primeiras idades.

A Tabela 4 apresenta os valores calculados das médias do módulo de elasticidade dinâmico e o estático (convertido utilizando a equação (3)) e o seu desvio padrão associado considerando apenas as amostras válidas P-01 e P-02.

Tabela 4 - Média do Módulo de Elasticidade - Sonelastic – Pasta.

Tempo (dias)	Módulo Elasticidade (GPa)		Desvio padrão
	Dinâmico	Estático	
1,01	12,00	9,96	0,18
3,62	16,44	13,65	0,36
6,69	16,90	14,03	0,27

Fonte: Autoria própria

4.1.2. EMM-ARM

A partir da leitura dos dados fornecidos pelo sistema EMM-ARM, utilizando o software MATLAB, se tornou possível fazer um estudo da frequência natural de vibração em cada um dos quatro corpos de prova. Com o endurecimento da pasta espera-se que a frequência na qual o corpo de prova oscila tenha comportamento logarítmico.

Como dito anteriormente, o sistema EMM-ARM faz a leitura do movimento feito por uma viga engastada-livre sob excitação ambiental através de um acelerômetro. Em intervalos periódicos de aproximadamente cinco minutos o sistema capta as oscilações sofridas pela extremidade livre por 90 segundos. Desta forma, considerando cerca mil leituras, é possível concatenar todas essas informações em um gráfico mantendo o domínio do tempo (dias) como eixo das abcissas. Para além, o algoritmo permite transformar os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência (Hz), no qual é possível se identificar as frequências dominantes no sinal. A identificação de frequências adotada neste trabalho é baseada na identificação de picos no gráfico do domínio da frequência, conforme Ribeiro (2019), que é facilmente automatizada, uma vez que é impossível, dado o grande volume de dados produzidos durante um ensaio EMM-ARM, realizar a identificação de frequência manualmente em cada arquivo de resultados

A estratégia adotada neste trabalho, que se diferencia da utilizada por Ribeiro (2019), é a identificação dos três principais picos no domínio da frequência. Espera-se que o pico principal represente a frequência natural da amostra, enquanto os seguintes sejam ruídos externos de menor intensidade, como o próprio ventilador, por exemplo. No entanto, a depender das

relações de sinal-ruído da amostra, pode haver alternância na ordem desses picos (exemplo: o pico de maior intensidade se referir a um ruído) e, dessa forma, a estratégia de se identificar os três maiores picos tenta abordar estes possíveis casos, aumentando o sucesso de se identificar automaticamente a evolução da frequência natural da amostra.

A seguir, será feita uma análise mais aprofundada do ocorrido em cada uma das amostras ao longo do experimento. Utilizou-se os algoritmos desenvolvidos por Ribeiro (2019) e explicados no item 3.3.7 deste trabalho para analisar os dados de leitura de cada uma das quatro amostras ensaiadas.

O desenvolvimento da amostra 03 pode ser observado na Figura 33a, na qual percebe-se a perfeita captura dos dados da amostra demonstrada como primeiro pico, o mais incidente, com o comportamento logaritmo esperado sem qualquer interferência dos outros picos lidos. É possível afirmar que esta amostra recebeu o nível adequado de excitação durante todo o ensaio.

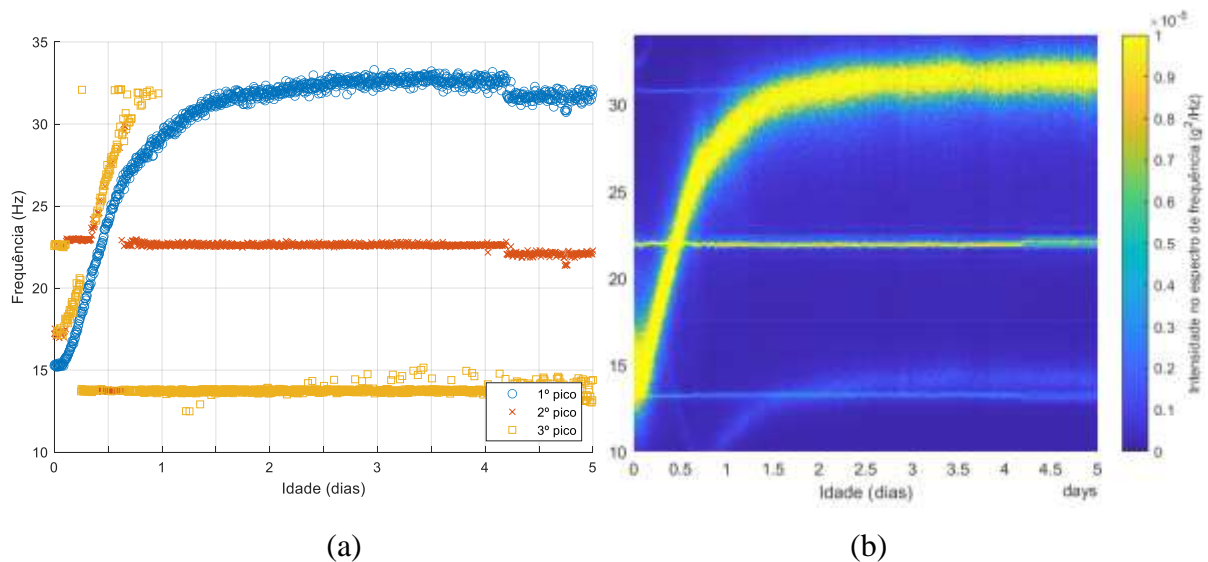


Figura 33 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor - Amostra 03.
Fonte: Autoria própria

Na Figura 33b apresenta-se um mapa de calor em que se leva em consideração a intensidade da frequência captada (picos), cada linha vertical deste gráfico representa o espectrograma de uma leitura do EMM-ARM, como o demonstrado na Figura 21 e na Figura 26. Como esta amostra possui o primeiro pico determinado de forma clara e ininterrupta, o segundo gráfico apenas corrobora com as informações evidenciadas em Figura 33a.

Ao estudar o resultado da amostra 04, conforme Figura 34, percebeu-se algo semelhante ao ocorrido na amostra 03, no entanto, sem tanta transparência. Na mesma Figura 34a percebe-se que o comportamento está bem definido no início do ensaio e começa a haver uma oscilação na leitura onde o primeiro pico deixa de ser a frequência natural da amostra, por isso a transição

na cor. Na mesma Figura 34b nota-se o mesmo comportamento da amostra anterior, no entanto, com menos intensidade.

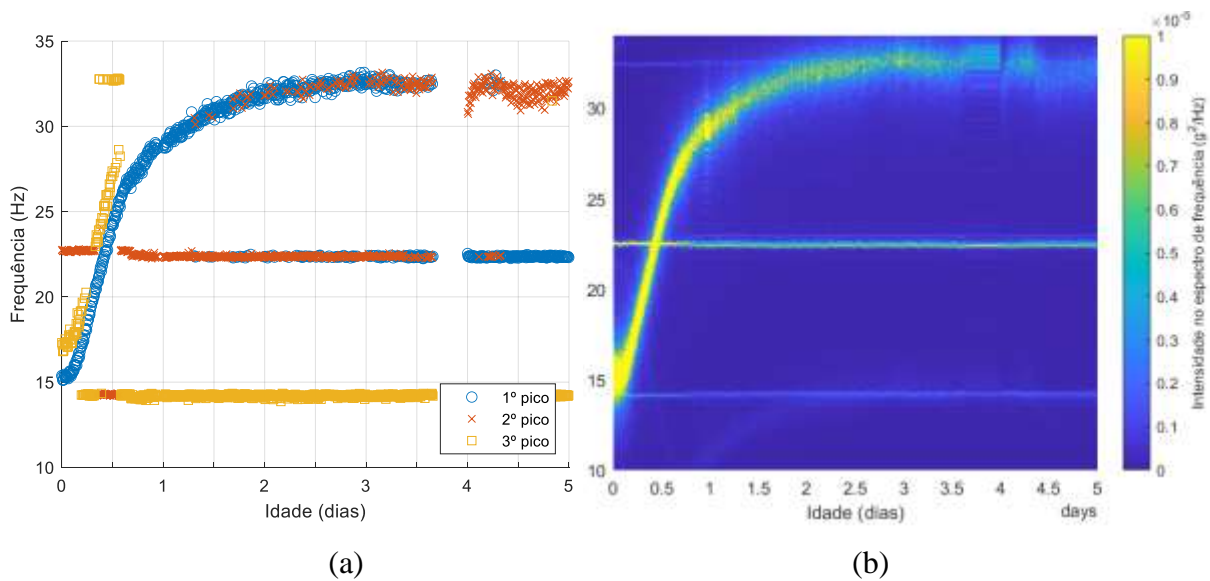


Figura 34 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor - Amostra 04.
Fonte: Autoria própria

A partir da amostra 05, demonstrada na Figura 35a, percebeu-se que após cerca de 18 horas após o início do ensaio não mais se capta o comportamento da amostra adequadamente e a frequência preponderante passa a ser a frequência do ventilador. Este comportamento provavelmente se justifica pela falta de excitação da amostra, no entanto, foi necessário verificar a integridade da peça e avaliar se o erro era proveniente da leitura feita pelo sistema, da excitação provocada pelo ventilador ou por algum erro no procedimento de moldagem. Mesmo o mapa de calor da Figura 35b não captou qualquer tendência adequada para a amostra.

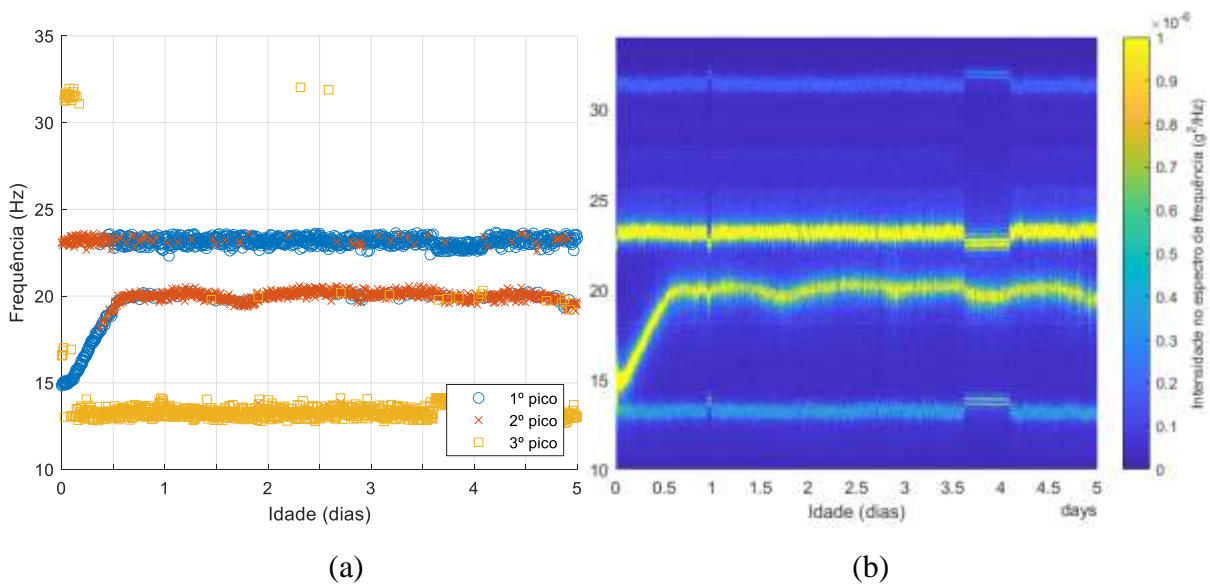


Figura 35 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor - Amostra 05.
Fonte: Autoria própria

Fazendo-se a análise da amostra 06, expressa na Figura 36a percebeu-se que esta leitura, apesar de não tão transparente quanto a encontrada na amostra 03 e de ter a frequência principal oscilando, possui uma curva de tendência cujo comportamento se assemelha ao esperado do corpo de prova. Isto indica que o ensaio não ocorreu da melhor forma, mas que havendo determinado tratamento dos dados, utilizando de filtros passa-faixa (reduzir a intensidade de um intervalo de frequências) no algoritmo e mesmo outros comandos disponíveis no software, pode-se encontrar um resultado satisfatório.

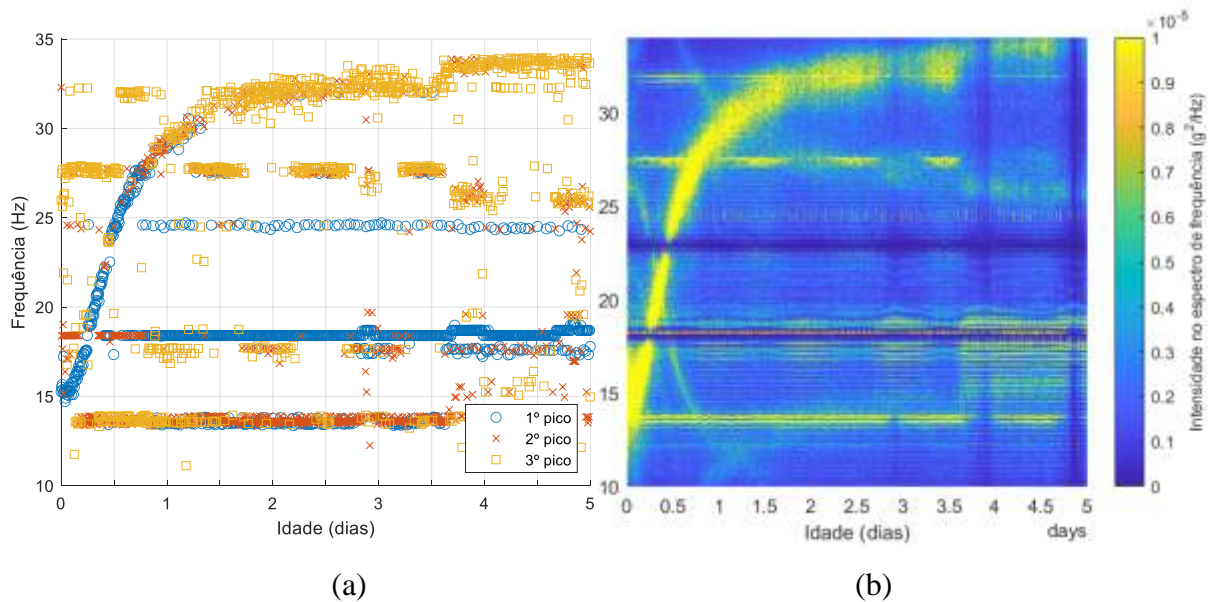


Figura 36 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor - Amostra 06.
Fonte: Autoria própria

Na Figura 36b é possível visualizar o mapa de calor com a curva logarítmica com melhor intensidade após a aplicação de filtros removendo alguns ruídos constantes na leitura. Logo, pode-se afirmar que apesar das interferências captadas, a amostra 06 se mostrou útil para a pesquisa.

A Figura 37 demonstra o resultado do isolamento das frequências captadas da amostra 06 utilizando uma ferramenta de limpeza de dados disponível no tratamento dos dados.

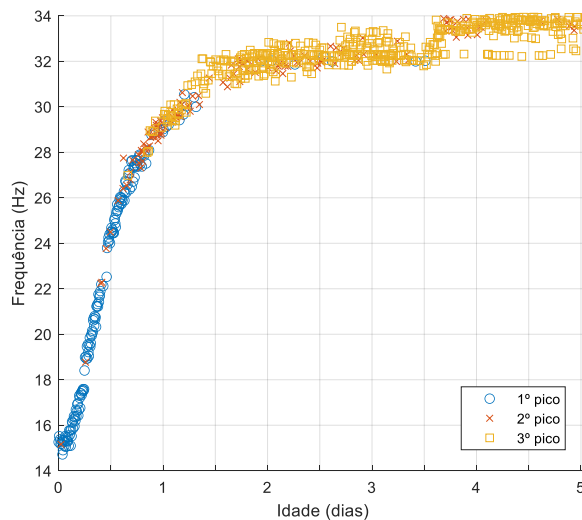


Figura 37 - Frequência em três picos filtrado - Amostra 06.
 Fonte: Autoria própria

Para o prosseguimento deste trabalho incluiu-se apenas os dados referentes as amostras 03, 04 e 06, pois a amostra 05 não apresentou dados confiáveis e foi descartada. Ao processar os dados utilizando o terceiro algoritmo foi possível traçar o gráfico do desenvolvimento do módulo de elasticidade no domínio do tempo, conforme Figura 38. Percebe-se que a curva possui comportamento no formato logarítmico, tal qual observado com a frequência. A curva também apresenta sobreposição dos dados entre as amostras, demonstrando que os valores estão próximos.

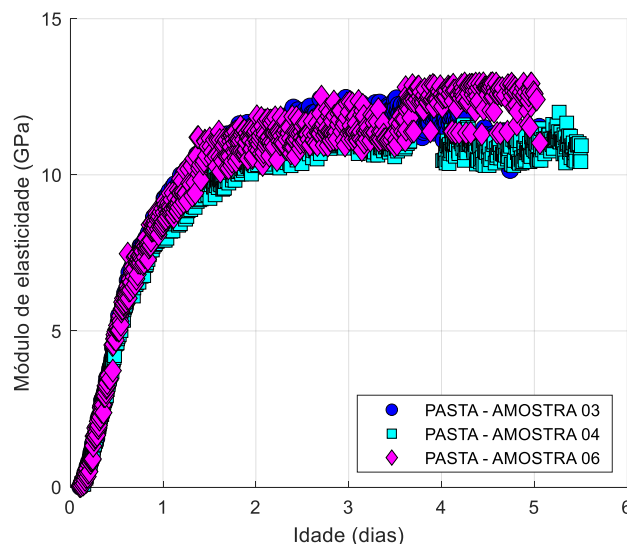


Figura 38 - Módulo de elasticidade estático – Pasta.
 Fonte: Autoria própria

A partir do último algoritmo foi possível demonstrar a curva de evolução média do módulo de elasticidade estático de cada uma das três amostras, utilizando a equação (3). Aproveitou-se a oportunidade para inserir os valores provenientes do ensaio Sonelastic e, assim, permitir uma

comparação entre os resultados. Conforme a Figura 39, percebe-se que as três amostras começam a apresentar valores diferentes quando se aproximam a um dia de moldagem e apesar da amostra da pasta 04 ser a que apresentou o menor valor e o mais distante das outras amostras ao fim dos sete dias, todas elas apresentaram valores próximos. A média entre os três foi de 11,90 GPa.

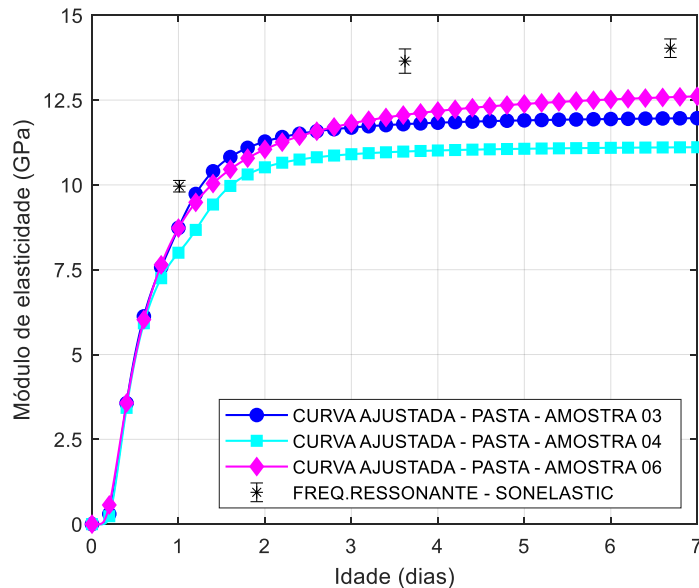


Figura 39 - Módulo de Elasticidade - EMM-ARM x Sonelastic – Pasta.
Fonte: Autoria própria

Os valores provenientes do Sonelastic são representados pelo asterisco na Figura 39. Percebe-se que o módulo de elasticidade estático (convertido utilizando a equação (3)) cresce acompanhando os dados do EMM-ARM, apesar de possuir intensidade maior, alcançando 14,03 GPa ao fim do experimento.

Através do ajuste das curvas na equação (4), o algoritmo encontra os parâmetros da equação que define seu comportamento. Estes valores estão expressos na Tabela 5. O R^2 é uma medida de qualidade do ajuste do modelo, quanto mais próxima de 1 mais eficientes são os parâmetros.

Tabela 5 - Parâmetros da equação de ajuste – Pasta.

Amostra	α_1	τ_1	β_1	α_2	τ_2	β_2	R^2
03	1,5834	1,0905	4,6915	10,4652	0,4175	1,7221	0,9321
04	1,4721	1,3363	5,7704	9,6900	0,4084	1,8407	0,9920
06	6,5197	0,4942	1,2854	6,5197	0,4853	1,2702	0,9873

Fonte: Autoria própria

Com a equação de cada reta pode-se fazer a consideração do tempo do ensaio Sonelastic em cada data e fazer uma comparação numérica dos resultados. Os valores encontrados a partir desta análise estão expressos na Tabela 6. Ao comparar os valores, entende-se que a diferença relativa entre a média dos valores proveniente do EMM-ARM em relação ao Sonelastic chega até 15,32% em 6,69 dias.

Tabela 6 - Valores EMM-ARM x Sonelastic – Pasta.

Idade (dias)	EMM-ARM (GPa)				Sonelastic (GPa)	Diferença relativa (%)
	Amostra 03	Amostra 04	Amostra 06	Média		
1,01	8,78	8,03	8,76	8,52	9,96	14,45
3,62	11,79	10,98	12,06	11,61	13,65	14,95
6,69	11,96	11,11	12,59	11,88	14,03	15,32

Fonte: Autoria própria

É possível considerar para a curva de cada amostra o seu quociente pelo valor máximo do módulo de elasticidade ($E_{Sonelastic,7dias}(-)$), determinado pelo ensaio Sonelastic, por este possuir validação, desta forma permite-se avaliar a assíntota e a forma como cada amostra se aproxima do seu valor máximo, conforme a Figura 40, assim, pode-se dizer que esta curva caracteriza a cinética de hidratação das pastas. Percebe-se que as três amostras se comportam de forma semelhante, apenas a amostra 06 se difere um pouco no percurso, com a curvatura mais acentuada e se tornando constante numa velocidade maior que as outras amostras, que apesar de não alcançar o valor encontrado no Sonelastic, possuem um comportamento mais suave e se aproximam um pouco mais.

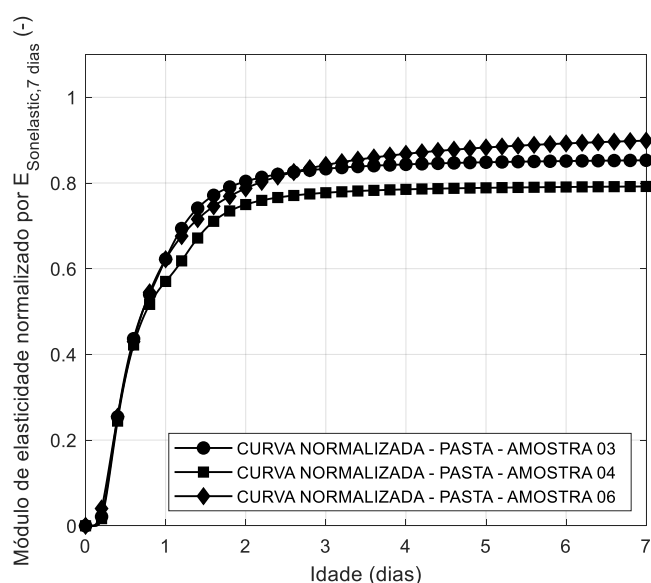


Figura 40 - Módulo de elasticidade normalizado pelo $E_{Sonelastic,7dias}(-)$ – Pasta.

Fonte: Autoria própria

4.1.3. VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE DOS CORPOS DE PROVA

A verificação da integridade dos corpos de prova começa após a serragem, onde faz-se a análise das seções cortadas uma por uma, em cada um de todos os tubos seccionados. Deve-se analisar principalmente a existência de vazios na amostra e a aderência da pasta com o tubo.

Considerando as quatro amostras moldadas com o material produzido numa mesma mistura, pode-se afirmar que houve pouca incidência de vazios, conforme a Figura 41, onde está representada amostra 05.



Figura 41 - Seções serradas do tubo – Pasta.
Fonte: Autoria própria

Nota-se pequenos furos em apenas algumas das seções, permitindo evidenciar que não houve comprometimento da integridade do corpo de prova. Todavia, ao analisar a aderência entre os materiais, percebe-se que com pouco esforço mecânico há deslizamento da pasta endurecida, tal fato se confirma no próprio procedimento de serragem, pois no contato com a lâmina de corte e o movimento da mesma provoca deslocamentos, causando cortes não uniformes das seções, como se pode ver no segundo pedaço da esquerda para direita da Figura 41. Pode-se perceber a facilidade de deslizamento da pasta no tubo ao analisar a Figura 42.



Figura 42 – Pasta deslizando do tubo.

Ao analisar outros conjuntos de corte, percebeu-se que as declarações feitas acima se perpetuam, exceto no que tange a aderência, que necessitou de um maior esforço para provocar o deslizamento entre os materiais. De acordo com a Figura 43, na amostra 06 não foi percebida qualquer evidência de vazios e ainda foi possível notar a seção mais uniforme e contendo

marcas escuras, isso se justifica pelo uso demasiado da serra durante a serragem, onde se percebe o corte pouco eficiente com o superaquecimento da lâmina e consequente marcas de queimadura na peça.



Figura 43 - Seções serradas do tubo - Pasta (II).
Fonte: Autoria própria

4.2. ARGAMASSAS

4.2.1. SONELASTIC

De forma análoga à realização do ensaio Sonelastic com a pasta de cimento, fez-se a desforma dos corpos de prova com aproximadamente 24 horas de moldagem. Como foram realizadas duas moldagens de argamassa, tomou-se o cuidado de se fazer corpos de prova com cada uma. Os quatro corpos de prova de argamassa, nomeados como A-01, A-02, A-03 e A-04, estão representados na Figura 44, nota-se apenas quatro unidades pois uma se rompeu na desforma.



Figura 44 - Corpos de prova - Argamassa – Sonelastic.
Fonte: Autoria própria

Fato curioso ocorre ao analisar a integridade da amostra, conforme a Figura 45, onde nota-se marcas superficiais na amostra, diferentemente do ocorrido com as pastas de cimento, estas não são formadas por fissuras e sim por vazios durante a moldagem e não comprometeram o desenvolvimento da amostra.



Figura 45 - Demonstração de vazios - Argamassa – Sonelastic.
Fonte: Autoria própria

A Tabela 7 identifica qual corpo de prova foi moldado em cada mistura de argamassa realizada e apresenta a média das três medidas feitas nos corpos de prova. As medidas de comprimento e diâmetro foram feitas utilizando um paquímetro e a pesagem utilizou-se uma balança.

Tabela 7 - Medidas dos corpos de prova – Sonelastic – Argamassa.

Amostra	Mistura	L (mm)	D (mm)	P (g)
A-01	1	82,60	16,60	39,0
A-02	1	82,40	16,60	38,0
A-03	2	84,20	16,60	39,0
A-04	2	84,40	16,60	40,0

Fonte: Autoria própria

O procedimento realizado no software e o tratamento de dados é o mesmo adotado para com as pastas de cimento, fez-se 10 medidas para cada corpo de prova em três diferentes idades, como feito com a pasta. A Figura 46 expressa o resultado do ensaio com seu desvio padrão, onde é possível notar que todas as amostras possuem o mesmo comportamento e convergem em um valor aproximado a 26GPa.

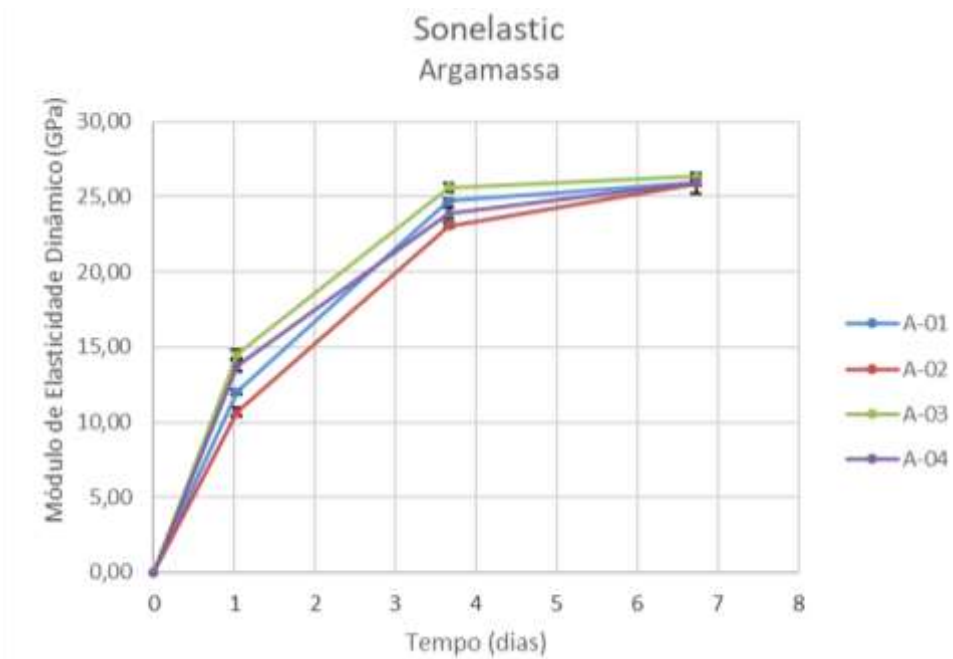


Figura 46 - Módulo de Elasticidade Dinâmico - Argamassa – Sonelastic.
Fonte: Autoria própria

A Tabela 8 apresenta os valores calculados das médias do módulo de elasticidade dinâmico e o estático (convertido utilizando a equação (3)) e o seu desvio padrão associado considerando todas as amostras.

Tabela 8 - Média do Módulo de Elasticidade - Sonelastic – Argamassa.

Tempo (dias)	Módulo Elasticidade (GPa)		Desvio padrão
	Dinâmico	Estático	
1,03	12,73	10,57	1,29
3,66	24,44	20,18	0,82
6,73	26,03	21,61	0,32

Fonte: Autoria própria

4.2.2. EMM-ARM

De forma análoga ao processamento dos dados das pastas, utilizou-se os algoritmos desenvolvidos por Ribeiro (2019) e explicados no item 3.3.7 deste trabalho para analisar os dados de leitura de cada uma das quatro amostras ensaiadas. A Figura 47a demonstra as frequências registradas na amostra 07, onde percebe-se, apesar da evolução bem definida e clara da frequência da amostra, a leitura não se manteve no primeiro pico. Fato corroborado na Figura 47b onde percebe-se a mudança na intensidade da medida, mas ainda permite uma visualização da curva proveniente da amostra. Na Figura 47c é possível visualizar de forma mais limpa o comportamento isolado da amostra através do uso de filtros no software MATLAB.

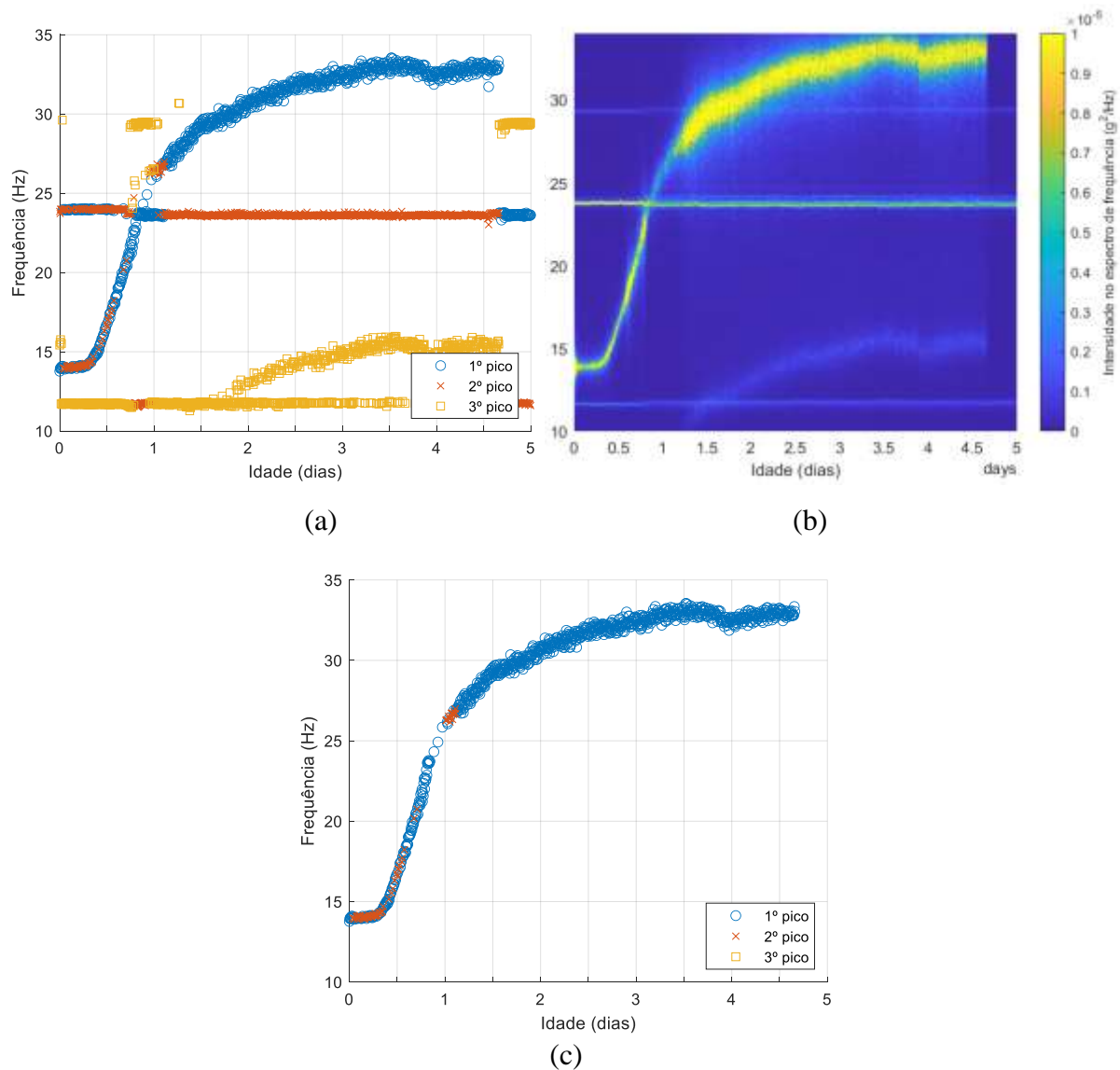


Figura 47 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor; (c) Frequência em três picos filtrado – Amostra 07.
 Fonte: Autoria própria

A amostra 08, representada na Figura 48a, demonstra que a leitura deste ensaio também não ocorreu da forma mais limpa, se mostrando necessário utilizar de filtros para estudar a amostra que durante todo o tempo do ensaio não teve leitura da amostra em primeiro pico e apenas alternou entre os segundo e terceiro. Na Figura 48b é possível visualizar o mapa de calor onde se vê com mais clareza a curva logarítmica da amostra e na Figura 48c mostra o comportamento isolado da curva da amostra após a aplicação dos filtros.

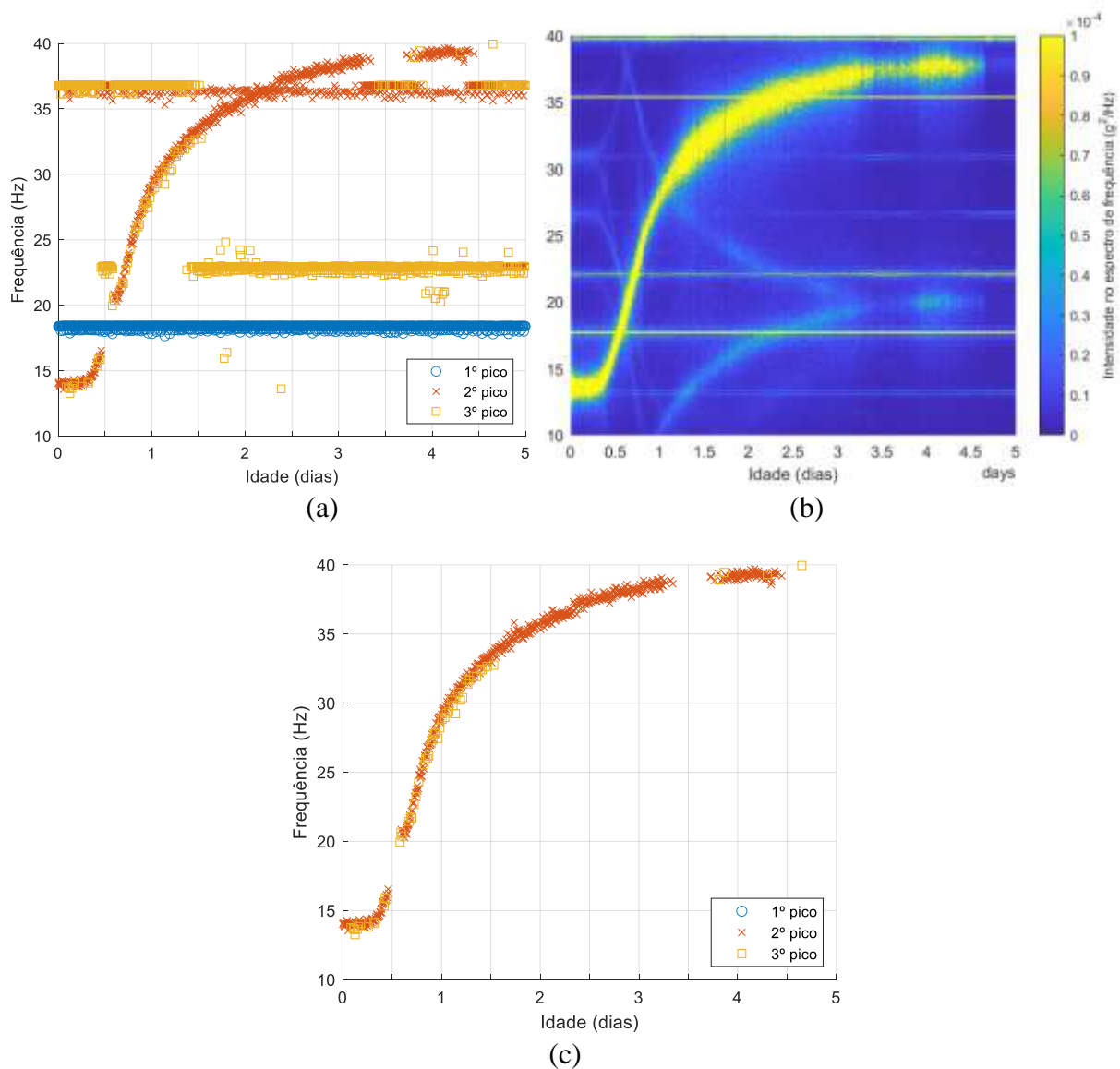
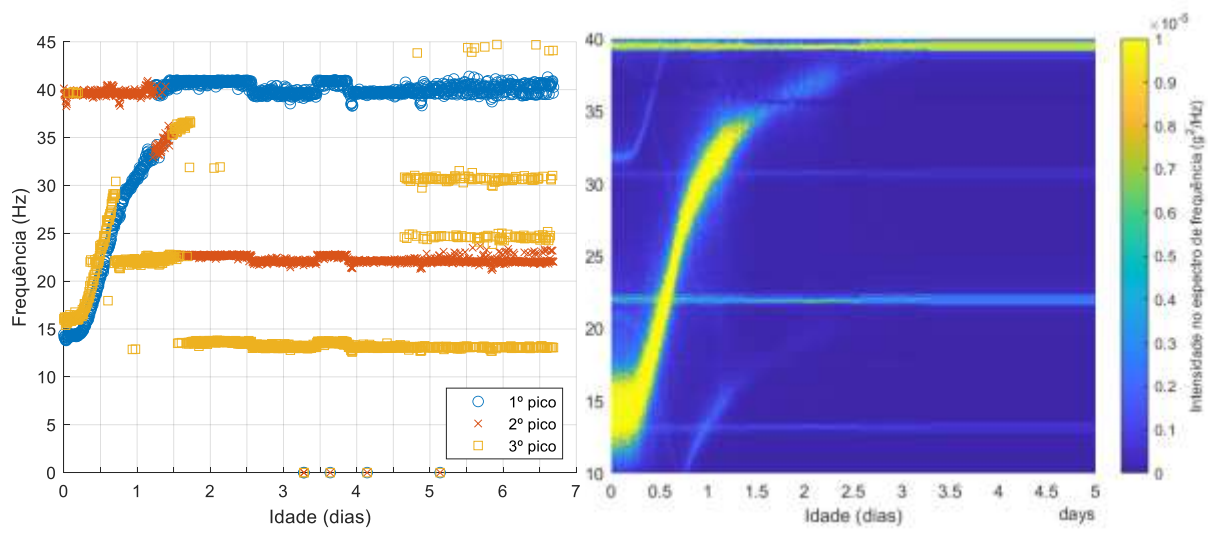
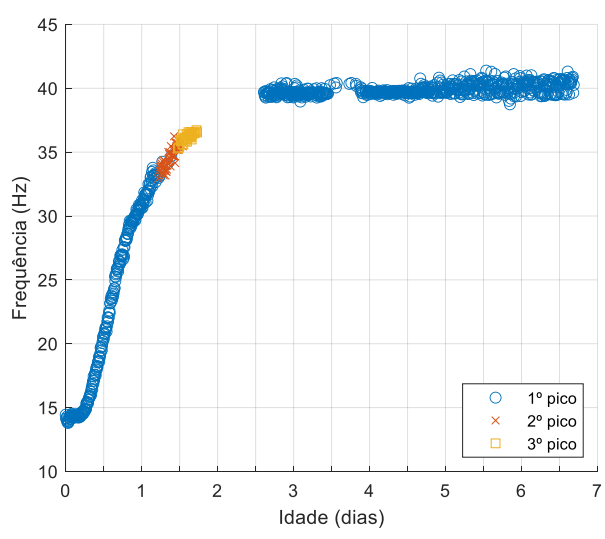


Figura 48 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor; (c) Frequência em três picos filtrado – Amostra 08.
 Fonte: Autoria própria

Inconvenientemente, uma falha ocorrida durante o ensaio, no qual a força do ventilador causou uma vibração que o deslocou gradativamente de sua posição original, prejudicou o desenvolvimento das amostras 09 e 10. A Figura 49a demonstra os dados da amostra 09, onde percebe-se que há oscilações na intensidade da leitura, de forma que a amostra não se mantém em primeiro pico de forma constante. A Figura 49b demonstra, através do mapa de calor que a leitura ocorreu de forma adequada até pouco mais de um dia, diminuindo sua intensidade até se mostrar nula. A Figura 49c representa o comportamento isolado da frequência medida da amostra após filtragem dos dados.



(a) (b)



(c)

Figura 49 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor; (c) Frequência em três picos filtrado – Amostra 09.
 Fonte: Autoria própria

Ocorre na amostra 10 o mesmo descrito na amostra 09, no entanto, percebe-se que a leitura se manteve mais constante no primeiro pico antes de sofrer a interferência pelos ruídos, como demonstrado na Figura 50a. O mapa de calor corrobora com o supracitado na Figura 50b, demonstrando que a intensidade da amostra foi medida por mais tempo antes de sofrer uma interrupção. A Figura 50c representa o comportamento isolado da frequência medida da amostra após filtragem dos dados.

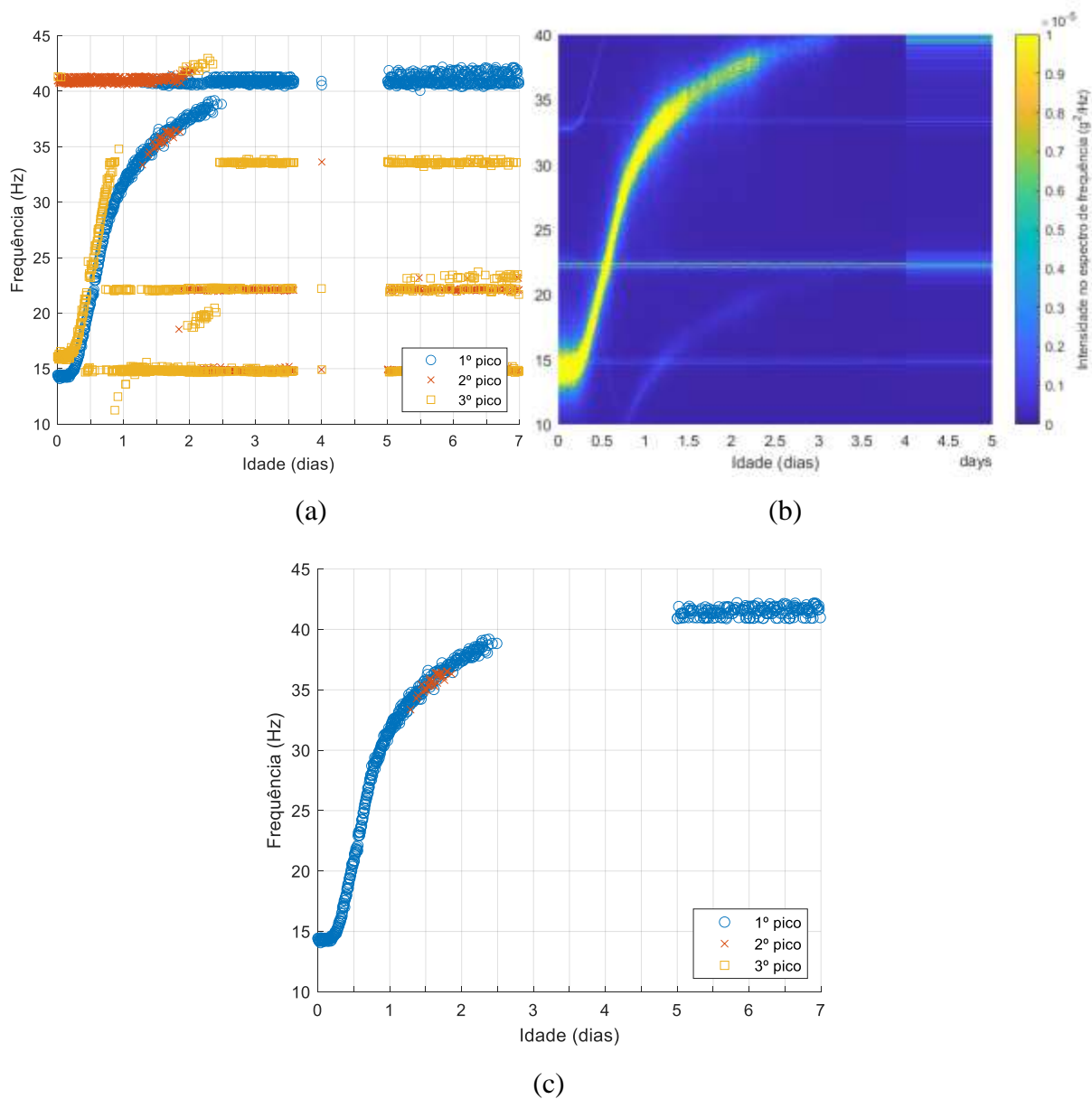


Figura 50 - (a) Frequência em três picos; (b) Mapa de calor; (c) Frequência em três picos filtrado – Amostra 10.
 Fonte: Autoria própria

A partir do terceiro algoritmo, permitiu-se criar a Figura 51, que demonstra a evolução do módulo de elasticidade estático ao longo do tempo. Para a argamassa considerou-se as quatro amostras. É possível observar que há uma descontinuidade a partir de cinco dias na amostra 07 e a partir de 3 dias na amostra 10, provocada pela ocorrência descrita com o ventilador. Nota-se também que a amostra 07 se aproxima do seu valor máximo de forma prematura quando comparada as outras amostras, que aparentam um comportamento adequado.

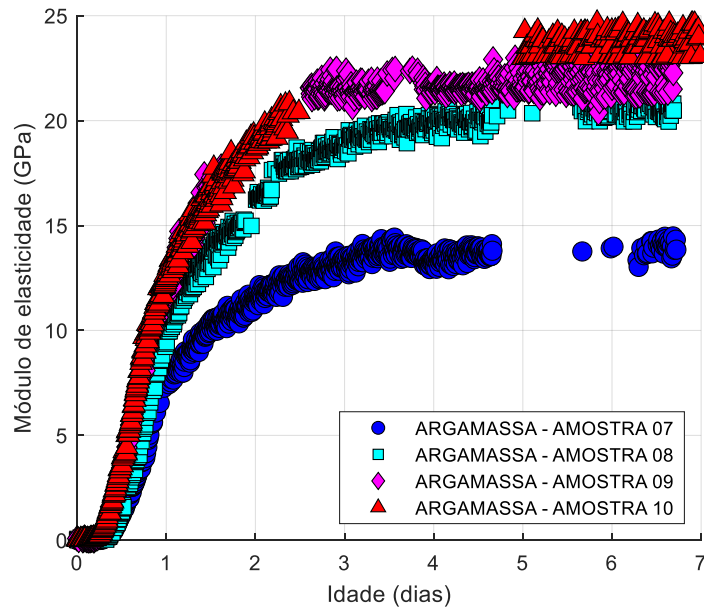


Figura 51 – Módulo de elasticidade estático – Argamassa.
 Fonte: Autoria própria

A partir do último algoritmo foi possível demonstrar a curva de evolução média do módulo de elasticidade estático de cada uma das amostras e os valores provenientes do ensaio Sonelastic para fazer uma comparação entre os resultados. Percebe-se que a medida em que o tempo avança as amostras apresentam valores levemente diferentes, a amostra 08 se encontra pouco afastada das demais, no entanto deve-se destacar a amostra 07 cujo comportamento se assemelha ao encontrado nas pastas, com módulo de elasticidade de 13,96 GPa ao fim dos sete dias, conforme a Figura 52. Como citado no item 3.3.3 houve exsudação da argamassa durante a moldagem e considerando a ordem de moldagem crescente, amostra 07 foi a primeira a ser confeccionada. Acredita-se que houve uma falha no procedimento de moldagem e este corpo de prova possuía menos agregados miúdos que a amostra 08, a última moldada da mesma mistura. Desta forma, a amostra 07 foi descartada da análise por apresentar resultados discrepantes.

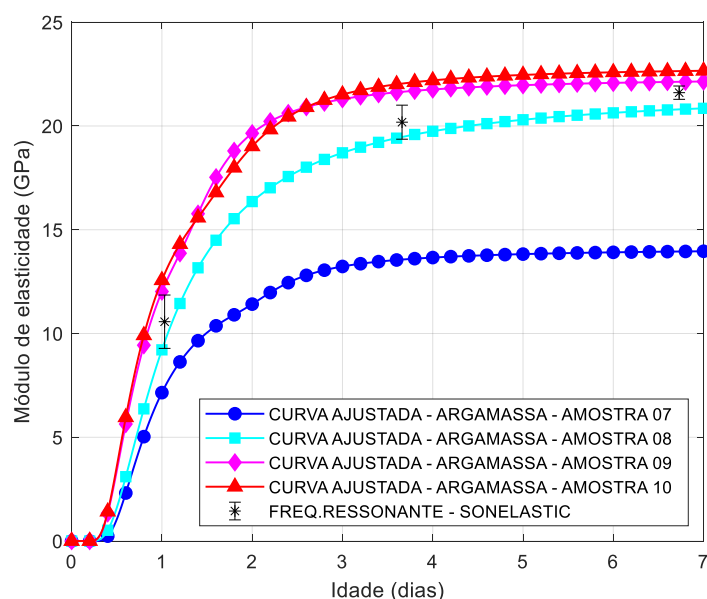


Figura 52 - Módulo de Elasticidade - EMM-ARM x Sonelastic – Argamassa.
 Fonte: Autoria própria

A média entre os valores encontrados nas três amostras válidas ao fim dos sete dias foi de 21,88 GPa. Os valores provenientes do Sonelastic são representados pelo asterisco na Figura 52, percebe-se que o módulo de elasticidade estático (convertido utilizando a equação (3)) cresce acompanhando os dados do EMM-ARM de perto, alcançando 21,61 GPa ao fim do experimento.

Através do ajuste das curvas na equação (4), o algoritmo encontra os parâmetros da equação que define seu comportamento. Estes valores estão expressos na Tabela 9. O R^2 é uma medida de qualidade do ajuste do modelo, quanto mais próxima de 1 mais eficientes são os parâmetros.

Tabela 9 - Parâmetros da equação de ajuste – Argamassa.

Amostra	a_1	τ_1	β_1	a_2	τ_2	β_2	R^2
08	10,8221	0,90775	1,6068	10,8221	0,9056	1,6115	0,9976
09	18,8027	0,6604	1,9393	3,5355	1,4866	5,5505	0,9963
10	3,5385	1,8597	4,4132	19,3113	0,6512	1,9702	0,8996

Fonte: Autoria própria

Com a equação de cada reta pode-se fazer a consideração do tempo do ensaio Sonelastic em cada data e fazer uma comparação numérica dos resultados. Os valores encontrados a partir desta análise estão expressos na Tabela 10. Ao comparar os valores, entende-se que a diferença relativa entre a média dos valores proveniente do EMM-ARM em relação ao Sonelastic chega até 1,15% em 6,69 dias.

Tabela 10 - Valores EMM-ARM x Sonelastic – Argamassa.

Idade (dias)	EMM-ARM (GPa)				Sonelastic (GPa)	Diferença relativa (%)
	Amostra 08	Amostra 09	Amostra 10	Média		
1,01	9,56	12,31	12,86	11,57	10,57	9,46
3,62	19,47	21,65	22,04	21,05	20,18	4,31
6,69	20,80	22,13	22,64	21,86	21,61	1,15

Fonte: Autoria própria

Ao considerar para a curva normalizada de cada amostra, conforme a Figura 53, percebe-se que as amostras 09 e 10 possuem um comportamento suave e alcançam o valor do Sonelastic. A amostra 08 já não teve o mesmo comportamento, por todo o gráfico a curva se mantém em um valor inferior, como se transladada na horizontal. Isto pode ter acontecido em decorrência do tempo de dormência da amostra antes da hidratação da pasta, levando a aparição de um trecho na horizontal antes de ocorrer a evolução do módulo de elasticidade.

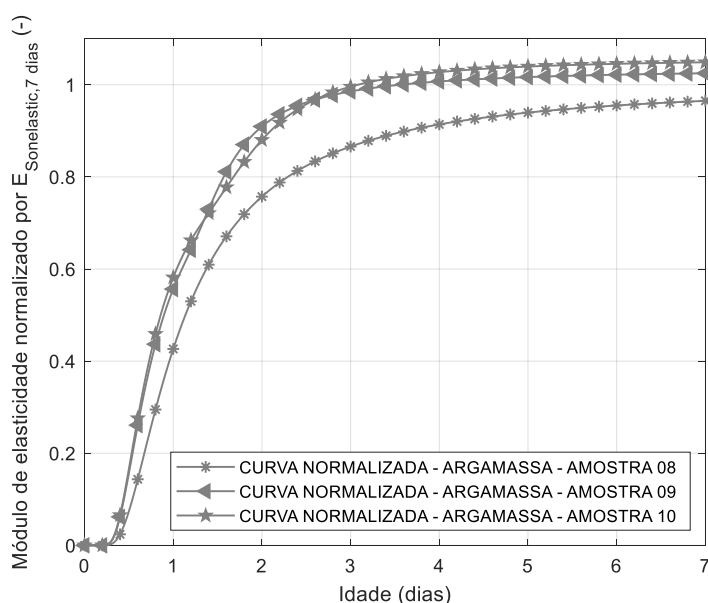


Figura 53 - Módulo de elasticidade normalizado pelo $E_{Sonelastic,7dias}(-)$ – Argamassa.

Fonte: Autoria própria

4.2.3. COMPARAÇÃO DOS DADOS DE PASTA E ARGAMASSA

Para entender de forma objetiva o comportamento cinético de hidratação dos corpos de prova de ambos os traços, fez-se um gráfico a partir dos valores normalizados de cada tipo de amostra e juntando os dados obtidos, conforme a Figura 54.

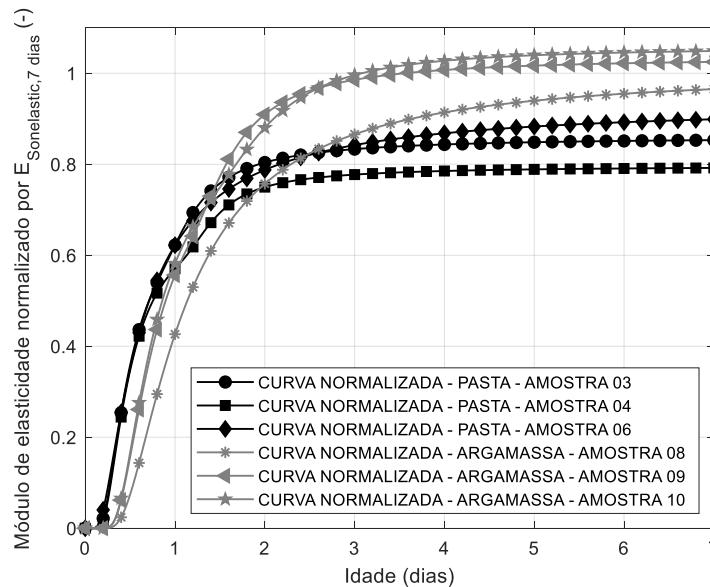


Figura 54 - Módulo de elasticidade normalizado pelo $E_{Sonelastic,7 dias}(-)$.
 Fonte: Autoria própria

Nota-se que as pastas possuem o comportamento assintótico muito mais rápidos que a argamassa, impedindo as amostras de alcançarem o valor de normalização. Enquanto que a argamassa apesar de um atraso na amostra 08, consegue alcança seu valor de referência com um comportamento mais suave. Esta comparação evidencia uma possível ocorrência de perda de aderência entre tubo e pasta, prejudicando a premissa do ensaio EMM-ARM de ação composta. Ou seja, mesmo que a amostra ensaiada no EMM-ARM tenha seu módulo de elasticidade crescendo como deve, de acordo com o ensaiado pelo Sonelastic, o ensaio EMM-ARM perde a eficiência na sua medição, apresentando este erro.

4.2.4. VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE DOS CORPOS DE PROVA

Durante o processo de serragem notou-se que o equipamento de corte teve mais dificuldade em serrar a argamassa que a pasta, chegando a soltar pequenas faíscas e acredita-se que isso ocorreu por conta dos pequenos agregados presentes na amostra.

Ao analisar as seções transversais dos corpos de prova após a serragem verifica-se a existência de vazios na amostra e a aderência da pasta com o tubo. Conforme a Figura 55, é possível notar que a seção da amostra 07 está uniformemente preenchida, logo, não há evidência de vazios.



Figura 55 - Corpo de prova serrado – Argamassa.
Fonte: Autoria própria

Observando o molde PVC percebe-se que pelo formato do corte há uma maior uniformidade da seção, mesmo nos pequenos trechos internos da amostra, que teve a lâmina passando em ambos os lados, o que demonstra que a argamassa não deslizou durante a serragem.

Analisando a aderência do tubo com a argamassa, percebe-se que há necessidade de uma força muito maior que a utilizada nas pastas para provocar o deslizamento da amostra. Desta forma, considerando os dois fatores avaliados, entende-se que nem a aderência ou a presença de vazios afetou a integridade das amostras de argamassa.

É válido ressaltar que visualmente não se percebe heterogeneidade na amostra, invalidando a insegurança gerada no processo de moldagem quanto à segregação da argamassa.

Apesar de se fazer dois processos de moldagem, a verificação da integridade não demonstrou qualquer diferença notável entre os corpos de prova, tal como esperado.

4.2.5. COMPARAÇÃO COM TRABALHOS ANTERIORES

Esta seção tem o objetivo de comparar o valor de referência encontrado por Souza (2021) em seu estudo. Como o traço adotado neste trabalho foi o mesmo do supracitado, esta análise busca entender se a hipótese da ocorrência da retração autógena nos corpos de prova com pastas de cimento pode ou não ser descartada.

Conforme a Figura 56 o valor da amostra de referência para a relação água/cimento de 0,4 é de aproximadamente 16 GPa ao tempo de sete dias. A média encontrada pelo EMM-ARM na idade semelhante da amostra de nanossílica deste trabalho foi 11,88 GPa, como expresso na Tabela 6. Logo, é possível afirmar que o valor encontrado possui diferença relativa de 25,75% em relação ao valor de referência encontrado por Souza (2021). Desta forma, não é possível descartar a hipótese de retração autógenas nas pastas de cimento.

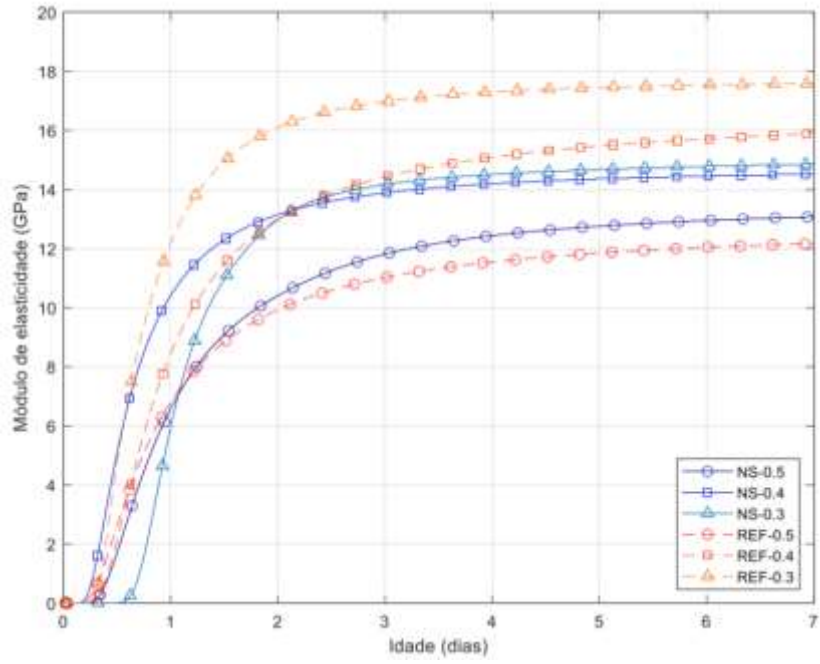


Figura 56 - Curvas médias do módulo de elasticidade
 Fonte: Souza (2021)

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo principal o estudo da evolução dos módulos de elasticidade de materiais cimentícios com adições de nanossílica determinados pela técnica EMM-ARM. Mostrou-se necessário fazer a caracterização cinética da hidratação de pastas e argamassas e avaliar se o uso da última é capaz de sanar as anomalias identificadas em pesquisas anteriores.

É possível dizer que este trabalho alcançou o seu objetivo principal permitindo uma comparação entre o uso do EMM-ARM com as pastas e com a argamassa, através da cinética de hidratação das amostras. De modo geral, os resultados da argamassa se encontram muito mais próximos do resultado proveniente do Sonelastic em relação a pasta de cimento, isto pode estar diretamente relacionado ao fenômeno de retração autógena, no entanto, como não foi feito um estudo com amostras de referência sem adição de nanossílica, não é possível fazer essa afirmação, mas considerando que a rigidez relativa da argamassa é maior que a da pasta, há um forte indício. Uma comparação possível que permite validar esta hipótese é a realização do ensaio Sonelastic utilizando como corpo de prova um dos pedaços da amostra utilizada no EMM-ARM após a verificação da integridade, pois assim os limites geométricos do ensaio de frequência ressonante passam a ser atendidos.

Ao avaliar a exequibilidade do ensaio EMM-ARM pode-se concluir que apesar da inicial complexidade, o sistema é prático, intuitivo e possui manuseio simples. Com poucos ajustes pode se tornar muito mais acessível, além de menos susceptível a erros provenientes de leitura por obstrução da excitação ambiental, provida pelo ventilador, ou pela instabilidade que ele apresenta.

Dentre as dificuldades encontradas na execução do trabalho pode-se destacar principalmente a moldagem dos corpos de prova de pasta utilizando a mangueira com tubo, que torna o manuseio muito mais demorado, no caso da argamassa, onde se utilizou o funil este processo foi muito mais rápido e os corpos de prova não perderam qualidade. Seria de muito proveito para a qualidade do ensaio que esta etapa fosse menos demorada. Outro ponto é a utilização do ventilador que torna o ensaio muito artesanal e suscetível a erros por interferências externas, pode ser mais adequado utilizar objetos menores que se alojem no próprio corpo de prova.

Em suma, consideram-se atendidos os objetivos específicos do presente trabalho e como sugestão para trabalhos futuros indica-se um esforço na resolução das dificuldades aqui encontradas, provenientes do procedimento de ensaio e da excitação ambiental, que torna o ensaio demorado, artesanal e demasiadamente suscetível às interferências externas.

6. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:2018 - Cimento Portland - Requisitos**. [S. l.: s. n.], 2018.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**Rio de Janeiro. [S. l.: s. n.], 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos (in Portuguese)**Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S. l.: s. n.], 2019.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade a compressão**.pdfRio de Janeiro: ABNT. [S. l.: s. n.], 2017.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1876:15 - Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. [s. l.], p. 17, 2015.

ATCP. **Sonelastic - Advanced Impulse Excitation Technique**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.sonelastic.com/pt/%0D>. Acesso em: 20 out. 2021.

AZENHA, Miguel *et al.* Continuous monitoring of concrete E-modulus since casting based on modal identification: A case study for in situ application. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 34, n. 7, 2012a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.004>

AZENHA, Miguel *et al.* Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: A novel method based on ambient vibration. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 40, n. 7, p. 1096–1105, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.014>

AZENHA, Miguel *et al.* Measurement of the E-modulus of cement pastes and mortars since casting, using a vibration based technique. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, [s. l.], v. 45, n. 1–2, 2012b. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9750-9>

AZENHA, Miguel. Numerical simulation of the structural behaviour of concrete since its early ages. [s. l.], v. 2009, n. December, p. 375, 2009. Disponível em: <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/57587>

BALAPOUR, Mohammad; JOSHAGHANI, Alireza; ALTHOEY, Fadi. **Nano-SiO₂ contribution to mechanical, durability, fresh and microstructural characteristics of concrete: A review**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.266>

BASF. **Glenium 51 - Aditivo super plastificante**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.master-builders-solutions.com/en-gb/products/masterglenium/masterglenium-51>. Acesso em: 21 out. 2021.

BENEDETTI, Andrea *et al.* Influence of temperature on the curing of an epoxy adhesive and its influence on bond behaviour of NSM-CFRP systems. **Composites Part B: Engineering**, [s.

l.], v. 89, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.034>

BERRA, M. *et al.* Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 35, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.132>

CIPLAN. **CP V ARI - Especificações técnicas**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ciplan.com.br/produtos/cimento-extra-forte/>. Acesso em: 21 out. 2021.

DELSAUTE, B. *et al.* Testing Concrete E-modulus at Very Early Ages Through Several Techniques: An Inter-laboratory Comparison. **Strain**, [s. l.], v. 52, n. 2, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/str.12172>

GONG, Jianqing *et al.* Silica Fume and Nanosilica Effects on Mechanical and Shrinkage Properties of Foam Concrete for Structural Application. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 2020, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/3963089>

GRANJA, José L. *et al.* Monitoring the early stiffness development in epoxy adhesives for structural strengthening. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, [s. l.], v. 59, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.02.005>

GRANJA, José Luís Duarte. Continuous characterization of stiffness of cement based materials: experimental analysis and micro-mechanics modelling. [s. l.], p. 398, 2016.

HOLT, Erika E. Early age autogenous shrinkage of concrete. **VTT Publications**, [s. l.], n. 446, 2001.

KONG, Deyu *et al.* Influence of nano-silica agglomeration on fresh properties of cement pastes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 43, p. 557–562, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.066>

LAVERGNE, F. *et al.* Effect of nano-silica particles on the hydration, the rheology and the strength development of a blended cement paste. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 95, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.007>

LEFEVER, Gerlinde *et al.* Combined use of superabsorbent polymers and nanosilica for reduction of restrained shrinkage and strength compensation in cementitious mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 251, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118966>

MATHWORKS. **MATLAB**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>. Acesso em: 21 out. 2021.

MENDES, T. M.; REPETTE, W. L. Effect of nano-silica on Portland cement matrix. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 12, n. 6, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000600009>

METHA, P. KUMAS; MONTEIRO, PAULO J. M. **Microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª Ediçãoed. [S. l.: s. n.], 2014. *E-book*.

MONDAL, Paramita *et al.* Comparative study of the effects of microsilica and nanosilica in concrete. **Transportation Research Record**, [s. l.], n. 2141, 2010. Disponível em:

<https://doi.org/10.3141/2141-02>

MONDIAL. **Manual - Ventilador de Mesa - VTX-40-8P**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.emondial.com.br/produtos/ventilador-de-mesa-vtx-40-8p-40cm/>. Acesso em: 21 out. 2021.

NAZAR, Sohaib *et al.* **Rheological properties of cementitious composites with and without nano-materials: A comprehensive review**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122701>

NETO, T. F. C.; GEYER, A. L. B. Effects of using chemical admixture with nanosilica in the consistency and mechanical strength of concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 12, n. 2, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000200009>

NEVILLE, Adam Matthew; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª Ediçãoed. [S. l.: s. n.], 2011.

NOGUEIRA, Geovana Souza Ferreira *et al.* Incorporação de nanossílica em compósitos cimentícios. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 23, n. 3, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0516>

NOURYON. **Levasil CB45 A - Colloidal Silica**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.nouryon.com/product/levasil-cb45-a-colloidal-silica-cas-7631-86-9/>. Acesso em: 21 out. 2021.

NUNES, N.L; FIGUEREDO, A.D. Retração do concreto de cimento portland. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP Departamento, Departamento de Engenharia de Construção Civil**, [s. l.], v. BT/PCC/452, n. 59, 2007.

OLIVEIRA, T. T.; SANTANA, F. B. F. **Dosagem do concreto autoadensável reforçado com fibras pelo método do empacotamento compressível**. 2018. - Universidade de Brasília, [s. l.], 2018.

RIBEIRO, Renan Rocha. **Desenvolvimento de um sistema para monitoramento do módulo de elasticidade de materiais cimentícios desde as primeiras idades**. 228 f. 2019. - Universidade de Brasília, [s. l.], 2019.

SAID, A. M. *et al.* Properties of concrete incorporating nano-silica. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 36, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.044>

SCHWARTZ, Mônica Martins; CASSOL, Gabriela. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O CONCRETO COM ADIÇÃO DE NANOSÍLICA E O CONCRETO COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA EM SUSPENSÃO. **IGNIS: Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo, Engenharias e Tecnologia de Informação**, [s. l.], v. 7, n. 2, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/223085.7.2-6>

SHAO, Hongyu *et al.* Electrical method to evaluate elastic modulus of early age concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 101, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.138>

SHIH, Jeng Ywan; CHANG, Ta Peng; HSIAO, Tien Chin. Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite. **Materials Science and Engineering A**, [s. l.], v. 424, n. 1–2, p. 266–274, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.03.010>

SILVA, Francisco Gabriel Santos; DANTAS, Alexon Braga. Estudo sobre a retração autógena em concretos de alto desempenho (CAD's). **IX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e V Encontro Latino americano de Pós-Graduação**, [s. l.], 2005.

SILVA, J. *et al.* Continuous stiffness assessment of cement-stabilised soils from early age. **Geotechnique**, [s. l.], v. 63, n. 16, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/geot.13.P.021>

SOUSA, Matheus Ian Castro; RÊGO, João Henrique da Silva. Hydration of ternary cement pastes with metakaolin and nanosilica at early ages. **Revista Materia**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 1–13, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1165>

SOUZA, Ana Luiza Rocha de. **EFEITOS DA MISTURA DE NANOSSÍLICA E SÍLICA ATIVA NA DURABILIDADE DO CONCRETO**. 170 f. 2021. - Universidade de Brasília, [s. l.], 2021.

WANG, Dongli *et al.* Experimental research for elastic modulus of cement paste at ultra-early age based on indentation technique. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 226, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.192>

YANG, Haibin *et al.* **Effects of nano silica on the properties of cement-based materials: A comprehensive review**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122715>

