

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MONITORAMENTO DO
MÓDULO DE ELASTICIDADE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS DESDE
AS PRIMEIRAS IDADES**

RENAN ROCHA RIBEIRO

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

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

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ENSAIO PARA MONITORAMENTO
DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS DESDE AS
PRIMEIRAS IDADES**

RENAN ROCHA RIBEIRO

ORIENTADOR: RODRIGO DE MELO LAMEIRAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO: E.DM-16A/19

BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2019

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

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ENSAIO PARA MONITORAMENTO
DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS DESDE AS
PRIMEIRAS IDADES**

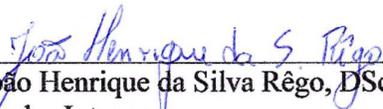
RENAN ROCHA RIBEIRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:



Prof. Rodrigo de Melo Lameiras, Dr. (ENC-UnB)
Orientador



Prof. João Henrique da Silva Rêgo, DSc. (ENC-UnB)
Examinador Interno



Prof. Luís Augusto Conte Mendes Veloso, DSc (ENM-UnB)
Examinador Externo

BRASÍLIA/DF, 12 DE AGOSTO DE 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

RIBEIRO, RENAN ROCHA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ENSAIO PARA MONITORAMENTO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS DESDE AS PRIMEIRAS IDADES

[Distrito Federal] 2019.

xxiii, 228p., 240 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2019).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Módulo de elasticidade

2. Primeiras idades

3. Materiais cimentícios

4. Análise Modal

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RIBEIRO, R. R. (2019) Desenvolvimento de um sistema de ensaio para monitoramento do módulo de elasticidade de materiais cimentícios desde as primeiras idades. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 224p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Renan Rocha Ribeiro

TÍTULO: Desenvolvimento de um sistema de ensaio para monitoramento do módulo de elasticidade de materiais cimentícios desde as primeiras idades.

GRAU: Mestre

ANO: 2019

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

Renan Rocha Ribeiro

E-mail: renan.rocha.ribeiro@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Rodrigo de Melo Lameiras, por propiciar o interessante tema e desafio, pelas valiosas orientações, pela presença e apoio inestimáveis durante todo o trabalho, e pela amizade cultivada ao longo deste tempo. Ao prof. João Henrique da Silva Rêgo, pelos caminhos abertos que enriqueceram imensamente o trabalho. À prof^{ta}. Graciela Nora Doz de Carvalho e ao prof. José Luis Vital de Brito, pelos auxílios imprescindíveis na experimentação dinâmica. Ao prof. Lineu José Pedroso, por ter me apresentado à Dinâmica de Estruturas, desempenhando irretocavelmente o papel de mestre. Ao prof. Miguel Azenha, pelo auxílio que marcou o início deste trabalho.

Às empresas Metacaulim do Brasil, Nouryon, Ciplan e BASF, cujas doações possibilitaram a realização do trabalho. Ao prof. Daniel Monteiro Rosa e prof. Edson Paulo da Silva, por abrirem as portas do Laboratório de Termo-Mecânica e Micro-Estrutura de Materiais Inteligentes da UnB. Ao Thiago Primo Sousa e ao Maycol Moreira Coutinho, por desprendidamente auxiliarem em tantos ensaios de frequência ressonante. Ao prof. Elton Bauer, por abrir as portas do Laboratório de Ensaios de Materiais da UnB, e à Patrícia e ao Elcio, pelas orientações durante os ensaios. Ao prof. Marcos Honorato de Oliveira, por abrir as portas do Laboratório de Estruturas da UnB, e ao “seu” Magno, pela ajuda e companhia.

A tantos amigos que auxiliaram de inúmeras formas, seja pela execução de ensaios, discussão de ideias, solução de dúvidas ou valiosa amizade: Nataniel Wontoon, Ian Barreto, John Kennedy, Matheus Galvão, Matheus Ian Sousa, Izabel Castro, Iarly Vanderlei, Arthur Mendes Lima, Mario Raul Freitas, Brenda Fontes, Pedro Cunha, Yuri Fraga, Diego Rosero, Henrique de Castro Filho, Jerfson Lima, Wilber Gomez, Luis Vinícius Silva, Danilo Nunes, Augusto Pippi, Luciano Vieira, Manoel Mangabeira, Wanderley Nicácio, Dagner Atauje. Àqueles cujos nomes não estão aqui pela memória falível, embora a gratidão que eu lhes dedique possa compensar este pequeno lapso.

Ao CNPq, FAP-DF, PECC/UnB, DPG/UnB pela estrutura e apoio disponibilizados.

À minha querida irmãs, Brenda e Carolina, pelo apoio e carinho sem os quais não haveria este trabalho. Aos meus pais, Sônia e Guido, cujas pegadas me guiam nos caminhos desta vida. À Luciana, por me acompanhar nessa jornada e em tantas outras que virão. À Deus, que permeia e completa tudo.

*“Ring the bells that still can ring
Forget your perfect offering
There is a crack in everything
That’s how the light gets in”*

Leonard Cohen

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ENSAIO PARA MONITORAMENTO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS DESDE AS PRIMEIRAS IDADES

Autor: Renan Rocha Ribeiro

Orientador: Rodrigo de Melo Lameiras, Dr.

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, agosto de 2019

A determinação experimental das propriedades mecânicas nas primeiras idades de materiais cimentícios é um desafio para a Engenharia atual, pois neste intervalo de tempo tais materiais passam por mudanças microestruturais intensas. Dentre as propriedades mecânicas, o módulo de elasticidade é de especial interesse. O ensaio EMM-ARM (*Elastic Modulus Measurement through Ambient Response Method*) foi desenvolvido visando solucionar limitações relacionadas ao estudo do comportamento de materiais cimentícios desde as primeiras idades. No entanto, ainda apresenta a limitação de ser baseado em instrumentações caras que restringem seu uso disseminado, além de necessitar de investigações metrológicas adicionais para caracterização de sua exatidão. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento, validação, análise metrológica e aplicação no estudo de cimentos com diferentes cinéticas de hidratação, de um sistema de ensaio de baixo custo para execução do ensaio EMM-ARM. O sistema de ensaio foi desenvolvido utilizando-se a plataforma de prototipagem rápida Arduino. O sistema foi validado para ensaios EMM-ARM em pastas de cimento e concreto, com vibração ambiente e forçada, por meio da comparação a resultados de métodos de ensaio consolidados. A análise metrológica foi realizada com base na NBR ISO 5725:2018, que permite avaliar a precisão e a tendência do método de ensaio. No estudo de cimentos com diferentes cinéticas de hidratação, as curvas de desenvolvimento do módulo de elasticidade, os tempos de fim de pega e a energia de ativação aparente dos cimentos estudados foram obtidos a partir de ensaios EMM-ARM. O sistema de aquisição de dados desenvolvido possuiu custo total de R\$90,00, tendo sido validadas as versões do sistema de ensaio para pastas de cimento e concretos. Os desvios-padrão de repetibilidade e reprodutibilidade encontrados foram, respectivamente, 7,01% e 8,20%, que são bastante próximos aos limites adotados em normas de métodos clássicos de determinação do módulo de elasticidade.

Palavras-chave: Módulo de elasticidade, primeiras idades, materiais cimentícios, análise modal.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A LOW-COST TEST SYSTEM FOR THE ELASTIC MODULUS MONITORING OF CEMENTITIOUS MATERIALS SINCE THE EARLY AGES

Author: Renan Rocha Ribeiro

Supervisor: Rodrigo de Melo Lameiras, Dr.

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, August 2019

The experimental evaluation of the early age mechanical properties of cementitious materials is a challenge for the current Engineering, as in this time span these materials pass through intense microstructural changes. Among the mechanical properties, the elastic modulus is of special interest. The EMM-ARM (Elastic Modulus Measurement through Ambient Response Method) test was developed aiming the solution of limitations when applied in the study of early age behaviour of cementitious materials. However, it still has the limitation of being based on expensive instrumentations, that restrain its widespread use, besides requiring further metrological investigations to characterize its accuracy. The present work presents the development, validation, metrological analysis and application in the study of cements with different hydration kinetics, of a low-cost test system for the EMM-ARM test. The development of the system was performed using the rapid-prototyping Arduino platform. The system was validated for EMM-ARM tests in cement pastes and concretes, with ambient and forced vibration, by comparison to consolidated test methods. The metrological analysis was based on the NBR ISO 5725:2018, that allows the assessment of the precision and trueness of the test method. In the study of cements with different hydration kinetics, the elastic modulus development curves, final setting time and apparent activation energy of the studied cements were obtained from EMM-ARM tests executed with the developed test system. The developed data acquisition system has a total cost of R\$90,00, with validated version of testing in cement pastes and concretes. The repeatability and reproducibility standard deviations were determined as being, respectively, 7,01% and 8,20%, which is quite close to limits adopted in standards of classical methods for elastic modulus determination.

Keywords: Elastic modulus, early age, cementitious materials, modal analysis.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 O MÓDULO DE ELASTICIDADE EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS.....	4
2.1.1 Módulo estático.....	6
2.1.2 Módulo dinâmico.....	8
2.2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.....	9
2.2.1 Compressão clássica.....	9
2.2.2 Métodos de propagação de ondas.....	11
2.2.3 Métodos da frequência ressonante.....	13
2.3 O ENSAIO EMM-ARM.....	16
2.3.1 Princípio de funcionamento.....	16
2.3.2 Fundamentação teórica.....	18
2.3.3 Revisão histórica do método e aplicações reportadas na literatura.....	30
2.3.4 Comparação entre métodos.....	33
2.4 SISTEMAS DE SENSORIAMENTO EXPERIMENTAL DE BAIXO CUSTO.....	36
2.4.1 Plataformas eletrônicas open-source de prototipagem eletrônica.....	36
2.4.2 Tipos de acelerômetros.....	38
2.4.3 Aplicações na Engenharia Civil.....	41
2.5 CONCEITOS DE METROLOGIA.....	44
3 METODOLOGIA.....	47
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	47
3.1.1 Delineamento geral.....	47
3.1.2 Apoios, corpos de prova e fontes de vibração.....	48
3.1.3 Protocolo do ensaio EMM-ARM e do processamento dos dados experimentais.....	51

3.1.4	Protocolos de mistura e moldagem	52
3.1.5	Determinação do módulo de elasticidade por métodos padrões.....	53
3.2	ETAPA 1: PROJETO DE UM SISTEMA DE ENSAIO DE BAIXO CUSTO PARA EXECUÇÃO DO EMM-ARM.....	56
3.2.1	Delineamento geral	56
3.2.2	Implementação e validação do software para processamento dos dados do ensaio	56
3.2.3	Projeto do sistema de aquisição de dados.....	58
3.2.4	Caracterização do sistema de aquisição de dados e dos acelerômetros	58
3.3	ETAPA 2: VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE ENSAIO	65
3.3.1	Delineamento geral	65
3.3.2	Materiais, moldagem e valores de referência	66
3.3.3	Configuração de ensaio	67
3.4	ETAPA 3: ANÁLISE METROLÓGICA DO SISTEMA PROPOSTO	71
3.4.1	Delineamento geral	71
3.4.2	Determinação da precisão do sistema de aquisição de dados sob condição de vibração ambiente	72
3.4.3	Determinação da exatidão do sistema de ensaio na execução do EMM-ARM.....	74
3.5	ETAPA 4: APLICAÇÃO DO SISTEMA NO ESTUDO DE CIMENTOS COM DISTINTAS CINÉTICAS DE HIDRATAÇÃO.....	80
3.5.1	Delineamento geral	80
3.5.2	Introdução sobre cimentos LC ³ e aditivos de nanossílica	82
3.5.3	Materiais e moldagem	83
3.5.4	Configuração de ensaio	85
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
4.1	IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> DE PROCESSAMENTO DE DADOS	88
4.1.1	Implementação do algoritmo de identificação modal	88

4.1.2 Implementação dos algoritmos de cálculo do módulo de elasticidade do material e de pós-processamento e apresentação gráfica dos resultados.....	91
4.1.3 Validação do algoritmo de identificação modal	93
4.2 PROJETO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	97
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ACELERÔMETROS E DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	99
4.3.1 Avaliação da estabilidade da frequência de amostragem do sistema.....	99
4.3.2 Levantamento das especificações dos acelerômetros.....	103
4.3.3 Avaliação do desempenho dos acelerômetros	108
4.3.4 Avaliação experimental do ruído	109
4.3.5 Escolha do acelerômetro.....	111
4.4 VALIDAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO SOB VIBRAÇÃO AMBIENTE.....	112
4.4.1 Versão para pasta de cimento	112
4.5 VALIDAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO SOB VIBRAÇÃO FORÇADA	116
4.5.1 Versão para pasta de cimento	116
4.5.2 Versão para concreto.....	119
4.6 ANÁLISE METROLÓGICA DO SISTEMA PROPOSTO.....	125
4.6.1 Estimação da precisão do sistema de aquisição de dados sob condição de vibração ambiente	125
4.6.2 Resultados dos ensaio EMM-ARM de cada batelada	128
4.6.3 Estimação da precisão do sistema de ensaio na execução do EMM-ARM.....	132
4.6.4 Estimação da tendência do sistema de ensaio na execução do EMM-ARM.....	135
4.6.5 Verificação da moldagem dos corpos de prova do ensaio EMM-ARM	137
4.7 ESTUDO DE CIMENTOS COM DISTINTAS CINÉTICAS DE HIDRATAÇÃO.....	140
4.7.1 Resistência à compressão	140
4.7.2 Evolução do módulo de elasticidade.....	141
4.7.3 Estimativa do tempo de fim de pega.....	147
4.7.4 Estimativa da energia de ativação	150

5 CONCLUSÕES	160
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	165
APÊNDICE A - PROJETO DA FONTE DE VIBRAÇÃO FORÇADA.....	183
APÊNDICE B - RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO	185
APÊNDICE C - DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES TRANSCENDENTAIS UTILIZADAS NO EMM-ARM.....	200
APÊNDICE D - REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS DOS RESULTADOS OBTIDOS NA VALIDAÇÃO DO ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO MODAL	208
APÊNDICE F - ESPECTROS DE FREQUÊNCIA PRODUZIDOS NA AVALIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM DO SISTEMA	211
APÊNDICE G - IDENTIFICAÇÃO DE DADOS ABERRANTES NA DETERMINAÇÃO DA PRECISÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	215
APÊNDICE H - GRÁFICOS DE ESTIMATIVA DO TEMPO DE FIM DE PEGA DOS CIMENTOS ESTUDADOS	218

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Taxas de carregamento normalizados para determinação do módulo estático.	6
Tabela 2-2: Alguns métodos de identificação modal.....	24
Tabela 2-3: Comparação das características técnicas de placas Arduino (ARDUINO, 2018c).	38
Tabela 2-4: Princípios utilizados em sensores MEMS (CHOLLET; LIU, 2016).	40
Tabela 3-1: Propriedades do sinal.....	57
Tabela 3-2 Acelerômetros MEMS avaliados.	60
Tabela 3-3 Especificações principais do ADS1115. Adaptado de Texas Instruments (2018).	61
Tabela 3-4 Especificações de referência de acelerômetros para EMM-ARM.	62
Tabela 3-5: Programa experimental da Etapa 4.....	81
Tabela 3-6: Traços das pastas de cimento estudadas.	84
Tabela 4-1: Resultados da validação do algoritmo de identificação modal.	93
Tabela 4-2: Influência da duração e frequência de amostragem no desempenho da implementação dos métodos de Meia-Potência e IFT para identificação do coeficiente de amortecimento.	95
Tabela 4-3: Erros relativos do teste da influência da duração e frequência de amostragem na implementação dos métodos de Meia-Potência e IFT para identificação do coeficiente de amortecimento.	96
Tabela 4-4: Resultados tabulados do histograma de frequência do intervalo entre amostras consecutivas do sistema de aquisição de dados.	101
Tabela 4-5: Estatísticas descritivas das séries de dados obtidas em cada amostragem.	102
Tabela 4-6: Resultados da análise de influência da heterogeneidade de intervalos de tempo entre amostras na identificação modal de um sinal conhecido.	102
Tabela 4-7: Especificações dos acelerômetros candidatos à incorporação ao sistema de monitoramento do ensaio EMM-ARM.	104
Tabela 4-8: Conversão entre sensibilidade em V/g para LSB/g.....	105
Tabela 4-9: Comparação das especificações documentadas com valores de referência para ensaio EMM-ARM.	106
Tabela 4-10: Resultados da monitorização do pórtico <i>shear-building</i> de três andares.	108
Tabela 4-11: Diferenças relativas à referência da monitorização do pórtico <i>shear-building</i> de três andares.	108
Tabela 4-12: Resultados da monitorização da laje de ensaios dinâmicos.....	109

Tabela 4-13: Diferenças relativas à referência da monitorização da laje de ensaios dinâmicos.	109
Tabela 4-14: Resultados da avaliação experimental da densidade espectral de ruído, em g/\sqrt{Hz} (valores fora dos parênteses) e do ruído RMS, em g_{RMS} (valores entre parênteses).	110
Tabela 4-15: Comparação entre os resultados do Sonelastic e EMM-ARM em pastas de cimento sob vibração ambiente.....	114
Tabela 4-16: Comparação entre os resultados das amostras de EMM-ARM em pastas de cimento sob vibração forçada.	117
Tabela 4-17: Comparações dos resultados do Sonelastic e EMM-ARM em concretos sob vibração forçada.....	121
Tabela 4-18: Parâmetros de ajuste das curvas de evolução do módulo de elasticidade aos resultados de validação do EMM-ARM com concreto.....	122
Tabela 4-19: Comparação dos resultados de compressão clássica com as curvas ajustadas ao ensaio EMM-ARM em concretos sob vibração forçada.....	123
Tabela 4-20: Parâmetros metrológicos do sistema de ensaio, baseados em uma série de 536 amostragens.	126
Tabela 4-21: Resultados da análise metrológica de precisão do sistema de aquisição de dados.	127
Tabela 4-22: Equação de correlação de precisão com a média para o sistema de aquisição de dados.	127
Tabela 4-23: Coeficientes das equações ajustadas.	131
Tabela 4-24: Resultados da estimação da precisão do ensaio EMM-ARM em pastas de cimento sob vibração ambiente, com o sistema de ensaio proposto neste trabalho.....	133
Tabela 4-25: Comparação entre os resultados do método de referência (compressão clássica) e os valores médios das equações ajustadas aos resultados do ensaio EMM-ARM, realizado com o sistema de ensaio proposto.	135
Tabela 4-26: Resultados obtidos nas equações ajustadas aos resultados do ensaio EMM-ARM, realizado com o sistema de ensaio proposto, nas idades de referência.	136
Tabela 4-27: Resultados da estimação da tendência do ensaio EMM-ARM em pastas de cimento sob vibração ambiente, com o sistema de ensaio proposto neste trabalho.....	136
Tabela 4-28: Estimativa da magnitude de tendência mínima a ser detectada no estudo de tendência do método.	137
Tabela 4-29: Variação da densidade das amostras utilizadas, de acordo com o trecho.....	138

Tabela 4-30: Coeficientes das equações ajustadas aos resultados experimentais de cada cimento.....	147
Tabela 4-31: Estimativas do tempo de fim de pega, pelo ensaio EMM-ARM, para os cimentos estudados.	148
Tabela 4-32: Estimativas do tempo de fim de pega obtidas pelos resultados do EMM-ARM corrigidos para idades equivalentes, considerando uma temperatura de referência de 30 °C.	158
Tabela G:1: Técnicas de consistência gráfica de Mandel para identificação de médias e desvios-padrão aberrantes.	215
Tabela G:2: Teste de Cochran para análise da variabilidade dentro de cada laboratório.	217
Tabela G:3: Teste de Grubbs para identificação de amostras extremas aberrantes, considerando um dado extremo.	217
Tabela G:4: Teste de Grubbs para identificação de amostras extremas aberrantes, considerando dois dados extremos.	217

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Curva tensão-deformação para agregado, pasta de cimento e concreto. Adaptado de Neville (1997) e Mehta e Monteiro (1994).	4
Figura 2-2: Definições do módulo de elasticidade e métodos de carregamento do ensaio. Adaptado da NBR 8522.	7
Figura 2-3: Compressômetro em um corpo de prova (ASTM, 2014). Indicados na figura: (A) LVDTs; (B) anel fixo; (C) anel móvel.....	10
Figura 2-4: (a) Molde para ensaio BTJASPE, com pistão e apoios superior e inferior e LVDTs (BOULAY <i>et al.</i> , 2013b); (b) Molde do ensaio TSTM (STAQUET <i>et al.</i> , 2012).....	11
Figura 2-5: Mecanismos de propagação de ondas P e S (SILVEIRA, 2018).	12
Figura 2-6: (a) Sistema de ensaio de excitação por impulso; (b) Sistema de ensaio de vibração forçada (ASTM, 2014b).	14
Figura 2-7: Sistemas de ensaio EMM-ARM para pasta de cimento (a) e concreto (b). Adaptado de Granja (2016). Cotas em mm.....	17
Figura 2-8: Representação de um S1GL (a) e seu equilíbrio de forças (b). Adaptado de Clough e Penzien (2003).	18
Figura 2-9: Diagrama de blocos do comportamento dinâmico de uma estrutura (NEWLAND, 2005).	22
Figura 2-10: Gráfico da amplitude de componente da matriz FRF de um SMGL com quatro graus de liberdade. Adaptado de He e Fu (2001).	26
Figura 2-11: Procedimento do método FDD adaptado utilizado neste trabalho. Adaptado de Granja (2016).....	27
Figura 2-12: Estudo comparativo de diferentes métodos de monitoramento do módulo de elasticidade (DELSAUTE <i>et al.</i> , 2016).....	34
Figura 2-13: Componentes principais da placa Arduino Uno (ARDUINO, 2019).	37
Figura 2-14: Principais tipos construtivos de acelerômetros IEPE: (a) compressão; (b) cisalhamento; (c) flexão (LEVINZON, 2015).....	39
Figura 2-15: Fatores que influenciam na capacitância (CHOLLET; LIU, 2016).	40
Figura 2-16: (a) Ilustração de um acelerômetro tipo <i>comb-drive</i> ; (b) Micrografia de um acelerômetro MEMS capacitivo, mostrando as vigas de apoio e ancoragem e os dentes do capacitor <i>comb-drive</i> .(ACAR; SHKEL, 2003; KAVITHA; DANIEL; SUMANGALA, 2016b).	41

Figura 2-17: Conceitos de exatidão, precisão e veracidade, utilizando a analogia de um alvo.	44
Figura 3-1: Fluxograma geral do trabalho.....	47
Figura 3-2: Configuração utilizada nos ensaios EMM-ARM em pasta de cimento, para vibrações ambiente e forçada.	48
Figura 3-3: Configuração utilizada nos ensaios EMM-ARM em concreto, para vibração forçada.....	48
Figura 3-4: Tampa para expulsão de ar: (a) fundo, que fica no interior do tubo; (b) topo, no qual é colada uma rosca; (c) tampa vista de cima e parafuso; (d) rosqueamento do parafuso na tampa.	49
Figura 3-5: Motor com carga excêntrica para aplicação vibração forçada.	50
Figura 3-6: Ensaio de módulo de elasticidade estático por compressão clássica: (a) aparato de ensaio com prensa e sistema de aquisição; (b) detalhe do posicionamento dos <i>clip-gages</i> para medição de encurtamento.....	53
Figura 3-7: Sistema de ensaio Sonelastic utilizado para amostras em pastas de cimento.	54
Figura 3-8: Corpos de prova para ensaio no sistema Sonelastic: (a) moldes; (b) corpos de prova.	55
Figura 3-9: Fluxograma da Etapa 1.	56
Figura 3-10: Fluxograma da subetapa de caracterização dos acelerômetros e do sistema de aquisição de dados.	59
Figura 3-11: <i>Breakout boards</i> de acelerômetros MEMS analisados.	61
Figura 3-12: Configurações de ensaio para avaliação do desempenho dos acelerômetros.....	63
Figura 3-13: Configuração de ensaio para avaliação experimental do ruído.....	63
Figura 3-14: Configuração do ensaio EMM-ARM em pastas de cimento, sob condição de vibração ambiente.....	68
Figura 3-15: Excitador fixado na extremidade livre do corpo de prova.	68
Figura 3-16: Configuração de ensaio EMM-ARM para concreto: (a) excitador utilizado no CPP; (b) excitado utilizado no CPG; (c) corpos de prova CPP e CPG e sistema de ensaio.....	69
Figura 3-17: Execução do ensaio de investigação metrológica do sistema de aquisição de dados.	72
Figura 3-18 Desenho experimental da determinação da exatidão do sistema de ensaio.	74
Figura 3-19: Trechos analisados para verificação da uniformidade da amostra do ensaio EMM- ARM.....	78

Figura 3-20: Posição relativa entre os corpos de prova de cada sistema (1 a 4) e o ventilador: (a) em planta; (b) em vista.....	78
Figura 3-21: Moinho de bolas utilizado para moagem do clínquer e gipsita.....	84
Figura 3-22: Configurações de ensaio: (a) sob temperatura ambiente; (b) sob temperatura elevada.....	86
Figura 3-23: Detalhamento da configuração de ensaio: (a) vista aramada; (b) corte transversal.	87
Figura 4-1: Algoritmo de identificação modal.	89
Figura 4-2: Sistema de aquisição de dados na versão protótipo (a) e soldada em uma placa perfurada (b).	98
Figura 4-3: Histograma de frequência do intervalo entre amostras consecutivas do sistema de aquisição de dados, para a série de dados obtida na Amostragem 1.	99
Figura 4-4: Histograma de frequência do intervalo entre amostras consecutivas do sistema de aquisição de dados, para a série de dados obtida na Amostragem 2.	99
Figura 4-5: Histograma de frequência do intervalo entre amostras consecutivas do sistema de aquisição de dados, para a série de dados obtida na Amostragem 3.	100
Figura 4-6: Histograma de frequência do intervalo entre amostras consecutivas do sistema de aquisição de dados, para a série de dados obtida na Amostragem 4.	100
Figura 4-7: Resultados do EMM-ARM com vibração ambiente e Sonelastic executados em pastas de cimento.	113
Figura 4-8: Resultados em escala semi-logarítmica do EMM-ARM com vibração ambiente e Sonelastic executados em pastas de cimento.....	115
Figura 4-9: Resultados do EMM-ARM com vibração forçada e Sonelastic executados em pastas de cimento.	116
Figura 4-10: Resultados em escala semi-logarítmica do EMM-ARM com vibração forçada e Sonelastic executados em pastas de cimento.....	119
Figura 4-11: Resultados do EMM-ARM com vibração forçada, Sonelastic e compressão clássica executados em concreto.	120
Figura 4-12: Resultados do EMM-ARM com vibração forçada, Sonelastic e compressão clássica executados em concreto, e equações ajustadas de evolução do módulo de elasticidade.	122

Figura 4-13: Resultados do EMM-ARM em escala logarítmica com vibração forçada, Sonelastic e compressão clássica executados em concreto, e equações ajustadas de evolução do módulo de elasticidade.....	123
Figura 4-14: Histogramas de frequência dos quatro sistemas construídos, para uma série de 536 amostragens.	125
Figura 4-15: Resultados do EMM-ARM para amostras da batelada 1 da análise metrológica.	129
Figura 4-16: Resultados do EMM-ARM para amostras da batelada 2 da análise metrológica.	129
Figura 4-17: Resultados do EMM-ARM para amostras da batelada 3 da análise metrológica.	130
Figura 4-18: Resultados do EMM-ARM para amostras da batelada 4 da análise metrológica.	130
Figura 4-19: Resultados do EMM-ARM para amostras da batelada 4 da análise metrológica.	131
Figura 4-20: Gráficos de correlação entre desvios-padrão e média, para o ensaio EMM-ARM realizado com o sistema proposto neste trabalho: (a) desvio-padrão de repetibilidade e média, com equação linear; (b) desvio-padrão de repetibilidade e média, com equação logarítmica; (c) desvio-padrão de reprodutibilidade e média, com equação linear; (d) desvio-padrão de reprodutibilidade e média, com equação logarítmica	134
Figura 4-21: Resistência à compressão dos cimentos testados.	140
Figura 4-22: Resultados dos ensaios EMM-ARM a temperatura ambiente e alta com cimento REF.	142
Figura 4-23: Resultados dos ensaios EMM-ARM a temperatura ambiente e alta com cimento LC3.....	142
Figura 4-24: Resultados dos ensaios EMM-ARM a temperatura ambiente e alta com cimento NANO.	143
Figura 4-25: Resultados dos ensaios EMM-ARM a temperatura ambiente e alta com cimento META.	143
Figura 4-26: Histórico de temperatura nos ensaios EMM-ARM dos cimentos REF e LC3 a temperatura ambiente e alta.....	144
Figura 4-27: Histórico de temperatura nos ensaios EMM-ARM dos cimentos NANO e META a temperatura ambiente e alta.	144

Figura 4-28: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento REF à temperatura ambiente.	147
Figura 4-29: Energia de ativação <i>versus</i> grau de hidratação para os cimentos estudados.	151
Figura 4-30: Energia de ativação obtida por ensaios de: (a) calorimetria isotérmica (KADA-BENAMEUR; WIRQUIN; DUTHOIT, 2000); (b) EMM-ARM (GRANJA, 2016). As diferentes curvas representam energias de ativação calculadas com pares de históricos de temperatura distintos (<i>e.g.</i> 10 °C e 20 °C; 16 °C e 31 °C).	151
Figura 4-31: Energia de ativação e históricos de temperatura do cimento REF.	153
Figura 4-32: Energia de ativação e históricos de temperatura do cimento LC3.	154
Figura 4-33: Energia de ativação e históricos de temperatura do cimento META.	154
Figura 4-34: Energia de ativação e históricos de temperatura do cimento NANO.	155
Figura 4-35: Grau de hidratação por idade equivalente dos cimentos estudados.	156
Figura 4-36: Módulo de elasticidade por idade equivalente dos cimentos estudados, considerando uma temperatura de referência de 30 °C.	157
Figura A-1: Projeto do dispositivo de vibração forçada para ensaio EMM-ARM.	183
Figura A-2: Solenóides testados: (a) comercial de carga máxima de 20 N (ALIEXPRESS, 2019a) (b) comercial de carga máxima de 55 N (ALIEXPRESS, 2019b); (c) artesanal com núcleo ferromagnético de neodímio.	184
Figura B-1: Resultados de granulometria a laser.	185
Figura B-2: Resultados de superfície específica pelo método BET para a argila calcinada.	186
Figura B-3: Resultados de superfície específica pelo método BET para o metacaulim.	187
Figura B-4: Resultados de superfície específica pelo método BET para o cimento REF.	188
Figura B-5: Resultados de superfície específica pelo método BET para o cimento LC3.	189
Figura B-6: Resultados de superfície específica pelo método BET para o cimento META.	190
Figura B-7: Resultados de FRX para a argila calcinada.	191
Figura B-8: Resultados de FRX para metacaulim.	192
Figura B-9: Resultados de FRX para filer carbonático.	193
Figura B-10: Resultados de FRX para cimento REF.	194
Figura B-11: Resultados de FRX para cimento LC3.	195
Figura B-12: Resultados de FRX para cimento META.	196
Figura B-13: Resultados de DRX para argila calcinada.	197
Figura B-14: Resultados de DRX para metacaulim.	197
Figura B-15: Resultados de DRX para filer carbonático.	198

Figura B-16: Resultados de DRX para cimento REF.....	198
Figura B-17: Resultados de FRX para cimento LC3.....	199
Figura B-18: Resultados de FRX para cimento META.....	199
Figura C-1: Modelo analítico de vibração livre de uma viga considerada como sistema contínuo.....	200
Figura C-2: Modelo analítico de uma viga esbelta engastada e livre com massa concentrada na extremidade livre.....	203
Figura C-3: Condição de contorno na seção central da viga biapoiada.....	203
Figura C-4: Modelo analítico de uma viga esbelta biapoiada com massa concentrada no centro.....	205
Figura C-5: Condição de contorno na seção central da viga biapoiada.....	206
Figura D-1: Representação gráfica do resultado do método <i>peak-picking</i> no resultado da DFT obtido pelo algoritmo FFT.....	208
Figura D-2: Representação gráfica do resultado do método <i>peak-picking</i> no resultado do PSD obtido pelo procedimento de Welch.....	208
Figura D-3: Representação gráfica dos resultados do método da Meia-Potência aplicado aos três picos de frequência identificados no sinal.....	209
Figura D-4: Representação gráfica dos resultados do método IFT aplicado aos três picos de frequência identificados no sinal.....	210
Figura F-1: Espectro de frequência obtido pelo algoritmo FFT do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 1.....	211
Figura F-2: PSD obtido pelo procedimento de Welch do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 1.....	211
Figura F-3: Espectro de frequência obtido pelo algoritmo FFT do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 2.....	212
Figura F-4: PSD obtido pelo procedimento de Welch do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 2.....	212
Figura F-5: Espectro de frequência obtido pelo algoritmo FFT do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 3.....	213
Figura F-6: PSD obtido pelo procedimento de Welch do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 3.....	213
Figura F-7: Espectro de frequência obtido pelo algoritmo FFT do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 4.....	214

Figura F-8: PSD obtido pelo procedimento de Welch do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 4.....	214
Figura G-1: Visualização gráfica da estatística h de Mandel, agrupada por sistema de aquisição de dados.....	215
Figura G-2: Visualização gráfica da estatística k de Mandel, agrupada por nível de frequência natural do tubo.....	216
Figura G-3: Visualização gráfica da estatística k de Mandel, agrupada por sistema de aquisição de dados.....	216
Figura H-1: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento REF à temperatura ambiente.	218
Figura H-2: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento REF à temperatura alta.	218
Figura H-3: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento LC3 à temperatura ambiente.	219
Figura H-4: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento LC3 à temperatura alta.	219
Figura H-5: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento META à temperatura ambiente.	220
Figura H-6: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento META à temperatura alta. ...	220
Figura H-7: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento NANO à temperatura ambiente.	221
Figura H-8: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento NANO à temperatura alta. ...	221

LISTA DE ABREVIATURAS

ADC - Analog to Digital Converter
BTJASPE - BéTon au Jeune Age, Suivi de la Prise et du module d'Elasticité
BTPULS - Béton Transimission par Ultra Sons
CPC - Corpo de prova pequeno
CPG - Corpo de prova grande
CSV - Comma Separated Values
DC - Direct Current
DFT - Discrete Fourier Transform
EEPROM - Electrically Erasable and Programmable Read Only Memory
EMA - Experimental Modal Analysis
EMM - ARM-Elastic Modulus Measurement through Ambient Response Method
FDD - Frequency Domain Decomposition
FFT - Fast Fourier Transform
FRF - Função de Resposta em Frequência
I/O - Input/Output
IDE - Integrated Development Environment
IEPE - Integrated Electronic Piezo-Electric
IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Ame'nagement et des Re'seaux
IFT - Inverse Fourier Transform
ISO - International Organization for Standardization
ITD - Ibrahim Time Domain
JCGM - Joint Committee For Guides In Metrology
LED - Low Emitter Diode
LSB - Least significant byte
LSCE - Least-squares Complex Exponential
LVDT - Linear Variable Differential Transducer
MEMS - Microelectromechanical Systems
NSD - Noise Spectral Density
NSD - Noise Spectral Density
NUFFT - Non-uniform Fast Fourier Transform
ODR - Output Data Rate
OMA - Output-Only/Operational Modal Analysis
PP - Peak-Picking

PP/BFD - Peak-Picking/Basic Frequency Domain)
PSD - Power Spectral Density
PVC - Policloreto de Vinila
PWM - Pulse Width Modulation
RD-PP/FDD - Randon Decrement/Frequency Domain Decomposition
RMS - Root Mean Square
S1GL - Sistema de 1 (um) Grau de Liberdade
SMAGS - Smart Aggregates
SMGL - Sistema de Múltiplos Graus de Liberdade
SNR - Signal to Noise Ratio
SRA - Shrinkage-Reducing Admixture
SRAM - Static Random Access Memory
SSI-COV - Covariance-driven Stochastic Subs-space Identification
TCE - Termopar externo
TCI - Termopar interno
TMA - Traditional Modal Analysis
TSTM - Temperature Stress Testing Machine

1 INTRODUÇÃO

Boa parte dos esforços da engenharia podem ser resumidos como a busca pela previsão do comportamento de sistemas submetidos a ações externas. Busca-se construir modelos que, representando o sistema de forma mais aproximada possível, forneçam suporte para atividades como projeto, otimização, e recuperação.

No campo da Engenharia Civil, os sistemas são comumente estruturas sólidas, feitas de um ou mais materiais, e as ações externas são carregamentos de diferentes naturezas, como forças gravitacionais, forças aplicadas por diferentes agentes ou carregamentos térmicos oriundos de gradientes de temperatura no sistema. O comportamento de interesse da estrutura é completamente descrito pelas tensões e deformações, ou deslocamentos, provocados pelas ações externas, que são inter-relacionáveis por meio das propriedades mecânicas do material que compõe a estrutura.

Na Teoria da Elasticidade, tais propriedades mecânicas são o módulo de elasticidade, o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson, utilizados para descrever completamente o material e a relação tensão-deformação em sólidos elásticos. O desenvolvimento teórico dessas constantes remonta desde Galileu Galilei, em 1638, com contribuições de importantes nomes como Robert Hooke, Edme Mariotte, Thomas Young, Gabriel Lamé, Claude-Louis Navier e Augustin-Louis Cauchy, dentre outros, sendo estes dois últimos grandes responsáveis pela formulação matemática da elasticidade na forma atualmente conhecida (WIEDERHORN *et al.*, 2011).

O concreto e os materiais cimentícios em geral, que estão entre os mais utilizados na construção civil em todo o mundo, passam por fases em suas vidas nas quais suas propriedades mecânicas se modificam gradualmente. Essas mudanças ocorrem desde a mistura, na qual se encontram em estado fluido, passando pela fase de endurecimento nas primeiras idades, na qual sofrem a transição de um estado fluido para sólido, e, posteriormente, envelhecimento, na qual as propriedades viscoelásticas são relevantes.

Comumente, as propriedades mecânicas destes materiais são aferidas e estudadas apenas em idades relativamente avançadas da fase endurecida, pois é o estado em que o material estará em serviço na estrutura final e ao qual as investigações e verificações corriqueiras se referem. Apesar disso, diversas aplicações requerem o conhecimento das propriedades mecânicas, ou até de sua evolução, desde as primeiras idades ou tão logo o material cimentício entre em contato

com a água. Pode-se citar operações de protensão, análises de fissuração térmica em concreto massa, pré-fabricação de peças, uso de fôrmas deslizantes ou procedimento de desforma como exemplos de aplicações com especial interesse nas propriedades mecânicas desde as primeiras idades. Ainda, no caso de desenvolvimento de um novo material cimentício, é necessária a caracterização de sua cinética de hidratação, que pode ser feita sob a perspectiva do desenvolvimento de suas propriedades mecânicas.

Dentre as propriedades mecânicas de maior interesse em materiais cimentícios, além dos já mencionados módulos de elasticidade e de cisalhamento, e do coeficiente de Poisson, pode-se citar a resistência à compressão, parâmetros de retração e de viscoelasticidade. O presente trabalho se concentra no módulo de elasticidade, que além de possuir aplicações diretas em diversas verificações de projeto, é um indicador do desenvolvimento microestrutural do material.

A determinação experimental do módulo de elasticidade nas primeiras idades apresenta dificuldades práticas, especialmente pela transição da fase fluida para sólida e o ainda intenso desenvolvimento microestrutural. Alguns métodos de ensaio, como ondas ultrassônicas ou metodologias estáticas adaptadas, estão disponíveis, embora apresentem limitações que vão desde a natureza do módulo obtido a equipamentos caros e de difícil implementação em situações práticas.

Tendo isto em consideração, Azenha (2009) propôs um método de ensaio denominado EMM-ARM (*Elastic Modulus Measurement through Ambient Response Method*) voltado para monitoramento contínuo do módulo de elasticidade de materiais cimentícios em geral desde as primeiras idades. O método pode ser entendido como uma adaptação dos métodos tradicionais baseados na frequência ressonante do corpo de prova, visando sua aplicação desde a fase fluida do material. O ensaio foi subsequentemente utilizado em diversos materiais, como argamassas, solos-cimento e resinas epóxi, sendo otimizado por Granja (2016).

Entretanto, em seu atual estágio de desenvolvimento, o EMM-ARM ainda é baseado em instrumentações caras que restringem o amplo acesso à metodologia. Além disso, a metodologia de ensaio se beneficiaria de validações metrológicas sob a ótica da NBR ISO 5725 (ABNT, 2018a), e sua robustez e difusão no meio técnico se fortaleceriam por meio de aplicações adicionais, como caracterização de novos materiais cimentícios. A solução destas limitações de custo e caracterização metrológica, e a aplicação do EMM-ARM em novos materiais cimentícios, contribuiria para a consolidação do método de ensaio no meio técnico-científico.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma versão de baixo custo de um sistema de ensaio para o método EMM-ARM, voltado para ensaios em pastas de cimento e concretos. Para tanto, os seguintes objetivos específicos são traçados:

- Implementar um *software* de processamento dos dados experimentais do EMM-ARM, utilizando o ambiente MATLAB;
- Desenvolver um sistema de ensaio de baixo custo, composto por um sistema de aquisição de dados baseado na plataforma Arduino e por acelerômetros de baixo custo;
- Validar o sistema de ensaio desenvolvido, utilizando-o em ensaios EMM-ARM de pasta de cimento e concreto;
- Analisar metrologicamente o sistema proposto, utilizando a NBR ISO 5725 (ABNT, 2018a, 2018b, 2018c);
- Aplicar o sistema de ensaio para caracterização da evolução, nas primeiras idades, do módulo de elasticidade de pastas de cimento produzidas com quatro cimentos de cinéticas de hidratação distintas, visando a determinação da evolução do módulo de elasticidade e da energia de ativação aparente desde as primeiras idades, e do tempo de fim de pega:

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O MÓDULO DE ELASTICIDADE EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Materiais cimentícios são produtos de reações químicas que acontecem quando o cimento, composto principalmente por silicatos tricálcicos e dicálcicos, reage com a água para formar produtos de hidratação com poder aglomerante (CONSTANTINIDES, 2013). Sua utilização na construção civil se dá na forma de pastas de cimento, argamassas ou concretos, que são materiais de construção que diferem entre si essencialmente pelos tipos de agregado presentes. O concreto contém todos os constituintes presentes em pastas e argamassas, e, por isso, seu estudo pode ser estendido, até certa medida, para a compreensão destes, justificando sua escolha como centro da discussão mais aprofundada apresentada a seguir.

O concreto é um material heterogêneo e multifásico, podendo ser dividido, de forma geral, em três constituintes a nível microscópico: pasta, agregado e zona de transição entre a pasta e o agregado (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Segundo estes autores, o agregado é a fase que mais influencia no módulo de elasticidade do concreto. A Figura 2-1 apresenta, qualitativamente, as curvas de tensão-deformação para o agregado, pasta de cimento e concreto, com base nas curvas apresentadas por Neville (1997), e as fases de comportamento do concreto, conforme Mehta e Monteiro (1994).

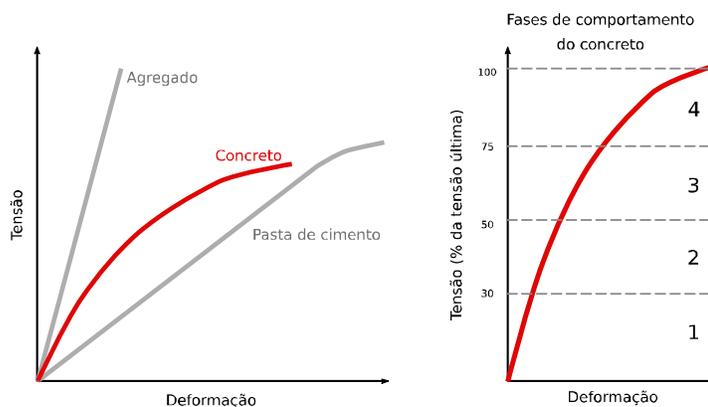


Figura 2-1: Curva tensão-deformação para agregado, pasta de cimento e concreto. Adaptado de Neville (1997) e Mehta e Monteiro (1994).

Observa-se que o agregado é muito mais rígido que a pasta de cimento, sendo, portanto, razoável esperar que influencie fortemente no módulo de elasticidade do concreto. Também se nota que, enquanto o agregado e a pasta de cimento, considerados separadamente, conservam um comportamento linear em uma faixa razoável de tensões e deformações, o concreto possui

um comportamento notadamente não-linear desde pequenas deformações. Tal fenômeno é explicado por processos de microfissuração progressiva observados nesse material, pouco presentes no agregado e mais acentuados que na pasta de cimento, devido à interface entre agregado e pasta, ou seja, a zona de transição, que é uma região de concentração de tensões e heterogeneidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 2012).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), o comportamento do concreto pode ser dividido em quatro fases, de acordo com a Figura 2-1: uma primeira fase de microfissuras estáveis e comportamento praticamente linear, que ocorre a tensões menores que 30% da tensão última; uma segunda fase, entre 30% e 50% da tensão última, em que microfissuras na zona de transição aumentam, embora permaneçam em um sistema estável e não haja microfissuração na matriz cimentícia, causando diminuição de seção resistente e, conseqüentemente, perda de rigidez; uma terceira fase, em que as microfissuras na zona de transição se tornam instáveis e na qual há aumento de microfissuração na matriz cimentícia; e uma última fase, em que as microfissuras se tornam contínuas devido à sua rápida propagação na matriz e na zona de transição, e o concreto experimenta grandes deformações, mesmo que sob tensões constantes.

Nota-se, assim, que o comportamento do concreto é fortemente influenciado pelo aparecimento de microfissuras, especialmente nas interfaces entre agregado e pasta de cimento (NEVILLE, 2012). Por isso, é razoável supor que diferentes velocidades de carregamento levem a diferentes comportamentos de tensão-deformação, uma vez que, quanto maior a velocidade de aplicação do carregamento, menor é a energia transferida e o tempo disponível para a formação e propagação de fissuras.

Além disso, o fenômeno de fluência também contribui para a dependência do comportamento do concreto em relação à velocidade de carregamento. A fluência é a deformação que ocorre em um material sob tensão constante, e, no concreto, pode ser explicada pela cedência de vazios internos, escoamento viscoso da pasta, ou movimentos da água do gel cimentício, ainda em hidratação, devido a condições de carregamento ou gradientes de umidade (BAŽANT, 1975; WASHA, 1956). Segundo Neville (1997), quando um carregamento é aplicado ao concreto, parte da deformação observada é devida a deformações elásticas, que ocorrem instantaneamente, e parte devido à fluência, que se inicia imediatamente após a aplicação da carga e progride enquanto a carga seja sustentada. Quanto menor o intervalo de tempo de aplicação da carga, ou maior a velocidade de carregamento, como em ensaios

dinâmicos nos quais o material é submetido a vibrações, menor é a parcela da fluência e menor é a deformação para um dado nível de tensão.

Assim, torna-se claro que curva tensão-deformação do concreto não é exclusivamente uma característica do material, sendo fortemente influenciada pela configuração do ensaio em termos de velocidade do carregamento (NEVILLE, 2012). Na literatura, definem-se dois tipos de módulo de elasticidade, estático e dinâmico, de acordo com a taxa de carregamento utilizada, a serem discutidos a seguir.

2.1.1 Módulo estático

O módulo estático é aquele obtido em condições de carregamento estático, isto é, em taxa de carregamento menores que determinados limites. É o valor de interesse em projetos usuais, nos quais as cargas são predominantemente estáticas, sendo sua determinação experimental influenciada pela microfissuração e pequenas contribuições da fluência, resultando em um módulo menor que o dinâmico (NEVILLE, 2012). A Tabela 2-1 apresenta taxas de carregamento utilizadas por várias normas para determinação do módulo estático por compressão de corpos de prova endurecidos. Alternativamente, parte delas permite o controle da deformação.

Tabela 2-1: Taxas de carregamento normatizados para determinação do módulo estático.

Norma	Referência	Taxa de carregamento (MPa/s)
NBR 8522:2017	(ABNT, 2017)	0,45 ± 0,15
BS 1881: Part 121: 1983	(BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1983)	0,6 ± 0,4
ASTM C469	(ASTM, 2014a)	0,25 ± 0,05

Como a curva tensão-deformação do concreto é não-linear, convencionou-se a definição de dois tipos de módulos de elasticidade estático: tangente inicial e módulo secante (MEHTA; MONTEIRO, 1994). O módulo tangente inicial, também denominado apenas módulo de elasticidade, é igual à inclinação da curva tensão-deformação em sua origem, enquanto o módulo secante é igual à inclinação da curva tensão-deformação entre dois pontos *A* e *B* especificados no método de ensaio. De acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017), os métodos de ensaio para cada módulo são diferentes: enquanto o módulo tangente inicial é obtido através de um módulo secante computado após três ciclos de carga e descarga entre tensões especificadas, o módulo secante é obtido sem tais ciclos de carga. A definição de cada tipo de módulo no gráfico tensão e deformação, bem como a representação qualitativa do método de ensaio de cada um, é ilustrada na Figura 2-2.

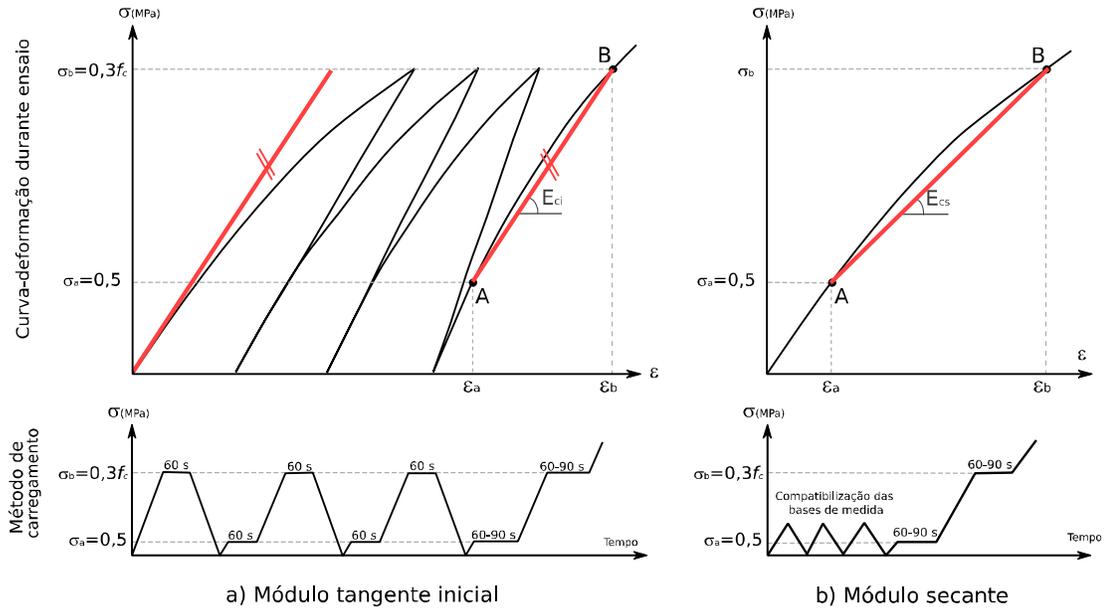


Figura 2-2: Definições do módulo de elasticidade e métodos de carregamento do ensaio. Adaptado da NBR 8522.

O módulo secante é de interesse especial pois é um artifício que permite separar, ainda que de forma arbitrária, deformações elásticas daquelas devido à fluência (NEVILLE, 2012). De acordo com o autor, a deformação elástica é considerada como a que ocorre durante o carregamento até um dado nível de tensão (*e.g.* ϵ_b na Figura 2-2b), ainda que no curto intervalo de tempo necessário para atingir tal tensão já atue o fenômeno da fluência. Por causa disso, o módulo de elasticidade secante é o utilizado na maior parte das verificações de projeto (ABNT, 2014). Pela inspeção da curva não-linear de tensão-deformação do concreto, nota-se que o módulo secante é dependente do nível de tensão utilizado (*e.g.* σ_b na Figura 2-2b), sendo necessário informá-lo junto ao módulo obtido (NEVILLE, 2012).

Ainda não existe uma relação geral entre resistência e módulo de elasticidade estático do concreto (NEVILLE, 2012). Algumas relações são propostas na literatura e em normas técnicas, mas sem uma aceitação generalizada para qualquer traço por, até o momento, não ter sido encontrada uma relação inequívoca entre essas duas propriedades (ABNT, 2014; AGUILAR *et al.*, 2016; MEHTA; MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 2012). Embora as metodologias de ensaio se refiram à obtenção do módulo estático para compressão, Neville (2012) comenta que pode-se considerar o módulo estático à tração igual ao de compressão, o que é adotado, por exemplo, na NBR 6118 (ABNT, 2014).

2.1.2 Módulo dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é obtido por métodos de ensaios dinâmicos, isto é, que submetem o corpo de prova a um estado de vibrações ou velocidades de carregamento elevadas sob tensões usualmente muito baixas (NEVILLE, 2012). Projetos de estruturas submetidas a ações dinâmicas, como terremoto ou impactos variados, devem utilizar o módulo dinâmico para obtenção de resultados mais próximos da realidade.

Como o nível de tensão é muito baixo e a taxa de deformação imposta é muito alta, ocorre uma diminuição nas microfissuras e deformações devido à fluência que influenciam o resultado do módulo de elasticidade estático (BISCHOFF; PERRY, 1991). Assim, o módulo dinâmico é consideravelmente maior que o estático, traduzindo apenas efeitos praticamente elásticos. Pode-se considerar o módulo dinâmico aproximadamente igual ao módulo estático tangente inicial, uma vez que este também se relaciona a um nível de tensões muito pequeno (NEVILLE, 2012), embora já tenha sido observado que não há uma correspondência exata entre o módulo dinâmico e os módulos estáticos. Características do meio material afetam de forma diferente estas duas propriedades, que não se relacionam unicamente por um comportamento físico (BASTGEN; HERMANN, 1977).

2.2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

A determinação do módulo de elasticidade em materiais frágeis à tração, como o concreto, não é feita com esforços de tração, como empregado em materiais poliméricos e metais (WIEDERHORN *et al.*, 2011). De fato, a tração é um esforço que implica menores complicações durante o ensaio, pois não induz efeitos de flambagem como a compressão. Porém, pela fragilidade a este tipo de esforço, se torna impossível aplicar a magnitude de carregamento necessária para medições acuradas de deformações requeridas para determinação do módulo de elasticidade, sem que o material se rompa (WIEDERHORN *et al.*, 2011). Assim, para materiais cimentícios em geral, métodos estáticos de determinação do módulo de elasticidade utilizam esforços de compressão.

Os métodos dinâmicos são alternativas aos métodos estáticos, embora forneçam, em geral, as versões dinâmicas das propriedades do material. Estas técnicas, introduzidas em 1930, estão entre as mais utilizadas para testes de materiais, pois permitem ensaios a níveis de tensões muito abaixo do limite elástico, além de reduzirem a ocorrência de fenômenos complexos como fluência e histerese (WIEDERHORN *et al.*, 2011).

Nos próximos itens, alguns métodos de determinação do módulo de elasticidade do concreto são apresentados, não tendo-se a pretensão de apresentar uma listagem exaustiva abrangendo todos os métodos atualmente disponíveis. Em geral, todos estes métodos são aplicáveis a demais materiais cimentícios, *i.e.* pastas de cimento e argamassas.

2.2.1 Compressão clássica

Os métodos baseados em compressão com carregamentos cíclicos podem ser denominados métodos clássicos, por serem antigos e bastante difundidos. Baseiam-se em uma definição clássica para o módulo de elasticidade: a razão entre uma dada tensão e uma dada deformação. Em geral, estes métodos limitam a taxa de carregamento ou deformação a pequenos valores, o que leva à determinação do módulo de elasticidade estático.

Devido a complicações próprias do concreto, a metodologia clássica, referida neste trabalho simplesmente como compressão clássica, envolve ciclos de carregamento, conforme discutido no item 2.1 e ilustrado na Figura 2-2. O ensaio consiste na compressão, pela utilização de uma prensa, de um corpo de prova padronizado, seguido pela medição da tensão aplicada e deformação sofrida pelo corpo de prova por meio de extensômetros ou outros dispositivos

apropriados, como LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) ou compressômetros com relógios digitais (Figura 2-3). Essa metodologia é tratada por diversas normas, como a NBR 8522, BS 1881, e ASTM C469 (ABNT, 2017; ASTM, 2014a; BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1983).

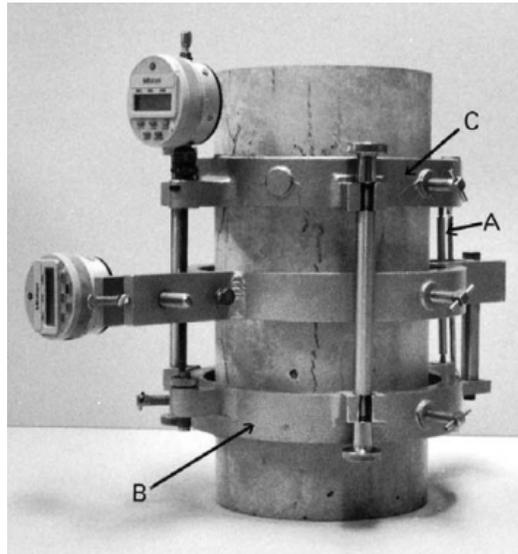


Figura 2-3: Compressômetro em um corpo de prova (ASTM, 2014). Indicados na figura: (A) LVDTs; (B) anel fixo; (C) anel móvel.

É possível encontrar, na literatura, outros métodos que permitem contornar algumas limitações importantes da compressão clássica, principalmente no estudo das primeiras idades, dentre as quais as principais são a impossibilidade de se ter um corpo de prova suficientemente sólido para aplicação da compressão e a falta de controle de temperatura durante o ensaio. Um destes métodos é o BTJASPE (*BéTon au Jeune Age, Suivi de la Prise et du module d'Elasticité*), desenvolvido na IFSTTAR (*Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux*) e apresentado por Boulay *et al.* (2013a). O método consiste na utilização de um molde, apresentado na Figura 2-4a, no qual a amostra do material cimentício, ainda em estado fresco, é inserida e imediatamente submetida a carregamentos cíclicos automáticos de carga e descarga, com deformação imposta controlada, impostos por um pistão superior. A deformação do conjunto amostra-molde é aferida por meio de três LVDTs, e a temperatura é controlada por meio da circulação de água no entorno do molde. Como a amostra é confinada pelo molde, o módulo de elasticidade da amostra é obtido por meio de um gráfico que o relaciona ao módulo de elasticidade do conjunto amostra-molde, obtido por meio de simulações numéricas.

O TSTM (*Temperature Stress Testing Machine*) é outro método capaz de permitir o monitoramento do módulo de elasticidade desde as primeiras idades (GRANJA, 2016), embora seu uso original esteja ligado à determinação de deformações autógenas, térmicas e de secagem (STAQUET *et al.*, 2012). A Figura 2-4b ilustra o molde utilizado no ensaio, que consiste em uma extremidade fixa e outra móvel, ligada a um motor capaz de aplicar cargas de compressão e tração na amostra, utilizando controle da taxa de carga ou deformação aplicada. O conjunto é posteriormente acondicionado em um sistema de controle de temperatura. Staquet *et al.* (2012) apresentam a utilização desse método para monitoramento do módulo de elasticidade desde as primeiras idades.

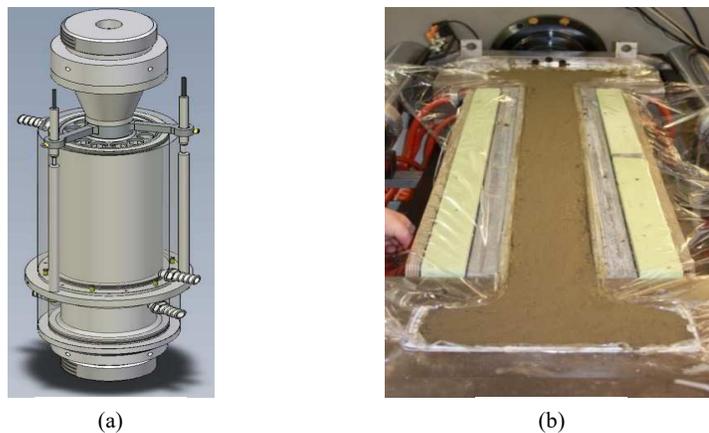


Figura 2-4: (a) Molde para ensaio BTJASPE, com pistão e apoios superior e inferior e LVDTs (BOULAY *et al.*, 2013b); (b) Molde do ensaio TSTM (STAQUET *et al.*, 2012).

2.2.2 Métodos de propagação de ondas

Os métodos baseados em propagação de ondas, ou acústicos, são divididos em duas categorias: métodos de transmissão de ondas e de reflexão de ondas (GRANJA *et al.*, 2014a). Diversas fontes de ondas podem ser utilizadas, embora as mais comuns se baseiem em ondas ultrassônicas.

Os métodos ultrassônicos utilizam transdutores capazes de emitir ou captar ondas ultrassônicas. Quando se utiliza apenas um transdutor para emissão e captação da onda, o método é denominado reflexão ou eco ultrassônico, enquanto a utilização de dois transdutores, um para emissão e outro para captação, caracteriza o método de transmissão (RILEM, 2012). É possível utilizar dois tipos de ondas de naturezas distintas: ondas P, denominadas de pressão ou primárias; e ondas S, denominadas de cisalhamento (*shear*) ou secundárias. A diferença entre ambos os tipos de ondas é o mecanismo pelo qual se propagam no meio, conforme sugerido pelos seus próprios nomes e ilustrado na Figura 2-5.

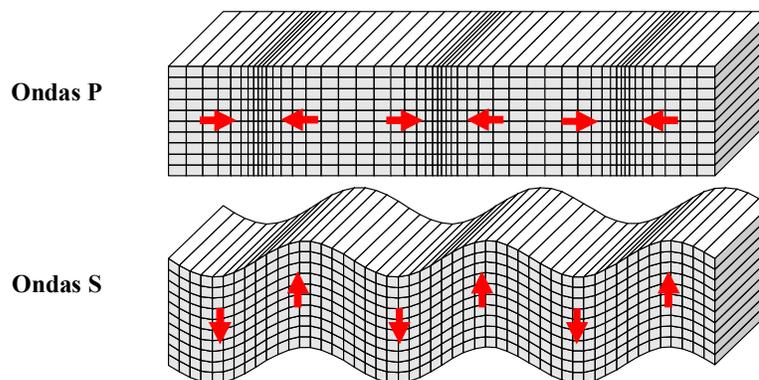


Figura 2-5: Mecanismos de propagação de ondas P e S (SILVEIRA, 2018).

Ambos tipos de onda podem ser utilizados no monitoramento de propriedades em concretos, inclusive simultaneamente. Devido a suas naturezas distintas, são utilizadas para obter informações diferentes sobre o meio em que se propagam. Ondas S tendem a ser melhores indicadores do processo de pega de materiais cimentícios, uma vez que, por praticamente não se propagarem em fluidos (DELSAUTE *et al.*, 2016) pois estes possuem resistência ao cisalhamento virtualmente nula, são mais sensíveis ao grau de conectividade da matriz sólida (CARETTE; STAQUET, 2015). Estudos sobre o processo de pega requerem análise conjunta das curvas de evolução das velocidades de ondas P e S, de modo a identificar pontos notáveis que se relacionam com o início e final da pega (CARETTE; STAQUET, 2016).

Usualmente, a velocidade de propagação de um pulso de onda é a propriedade medida, por ser de fácil mensuração, embora a atenuação da onda transmitida, de difícil mensuração, também possa ser utilizada para caracterização do material ensaiado (RILEM, 2012). A estimativa das propriedades de materiais é dada por equações analíticas obtidas pela teoria de propagação de ondas, valendo-se das hipóteses de um meio elástico isotrópico de dimensões infinitas (CLOUGH; PENZIEN, 2003). Segundo RILEM (2012), as equações que relacionam a velocidade de ondas de pressão (ondas P) e de cisalhamento (ondas S) é a propriedades do meio são:

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad (2-1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E_d}{2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)}} \quad (2-2)$$

Em que E_d é o módulo dinâmico do meio, ν é o coeficiente dinâmico de Poisson, ρ é a densidade do meio, V_p é a velocidade das ondas P e V_s é a velocidade das ondas S.

A correlação entre as velocidades de propagação da onda ultrassônica e as propriedades mecânicas do concreto é, geralmente, feita empiricamente, não sendo possível definir uma lei geral. Diversos outros fatores presentes no concreto, que é um material heterogêneo, influenciam nas características de propagação da onda e afastam as condições de ensaio das hipóteses utilizadas nas equações (2-1) e (2-2), tais como: tamanho do agregado, natureza do cimento, idade do concreto, geometria do corpo de prova, condições de cura, porosidade, e quantidade de água nos poros (RILEM, 2012). Em ensaios em materiais no estado fresco, Carette e Staquet (2015) discutem a influência do teor de ar e da composição do cimento e Neville (2012) comenta a grande influência local provocada por agregados.

Além disso, não há uma correspondência analítica entre as propriedades obtidas em condições dinâmicas (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) e suas equivalentes estáticas, normalmente de interesse em projetos usuais (CARETTE, 2015; NEVILLE, 2012). Dessa forma, nem sempre é possível obter uma boa estimativa de propriedades mecânicas estáticas por ensaios ultrassônicos.

Atualmente estão disponíveis equipamentos comerciais desenvolvidos especialmente para ensaios ultrassônicos em materiais cimentícios. Pode-se citar o FreshCon, desenvolvido na Universidade de Stuttgart (REINHARDT; GROSSE, 2004), e o BTPULS (*Béton Transmission par Ultra Sons*) (BOULAY *et al.*, 2013a). Algumas pesquisas têm estudado a utilização de SMAGS (*Smart Aggregates*) para métodos ultrassônicos, pelos quais os transdutores são incorporados ao material, evitando interferências na interface sensor/corpo de prova, que ocorrem no método tradicional (DUMOULIN *et al.*, 2014; GU *et al.*, 2006; KONG *et al.*, 2013; SONG; GU; MO, 2008).

2.2.3 Métodos da frequência ressonante

O método geral de determinação do módulo de elasticidade dinâmico de materiais por excitação de impulso é normatizado na ASTM E1876-15 (ASTM, 2015) e por ressonância sônica ou forçada na ASTM E1875-13 (ASTM, 2013), sendo utilizadas internacionalmente como referências para esses tipos de ensaio (WIEDERHORN *et al.*, 2011). Essas normas não possuem restrições quanto ao material a ser ensaiado, embora indiquem que alguns materiais, dentre os quais está o concreto, possuem normas próprias que especificam parâmetros de ensaio

mais adequados para o material em estudo, como tamanho do corpo de prova e preparo da amostragem. Para o concreto, a norma específica é a ASTM C215 (ASTM, 2014b), que apresenta a metodologia de ensaio tanto para impulso quanto ressonância forçada.

Ambos os métodos se baseiam na relação direta entre o módulo de elasticidade e as frequências de vibração de um corpo, que pode ser deduzida analiticamente a partir das equações de equilíbrio dinâmico (CLOUGH; PENZIEN, 2003). O ensaio consiste em excitar um corpo de prova e captar sua resposta vibratória. Diferentes sensores podem ser utilizados para captar a resposta vibratória, como: microfones, que aferem a frequência sonora emitida pelo corpo de prova; acelerômetros, que aferem as acelerações observadas nos corpos de prova; ou outros sensores que consigam monitorar a velocidade ou deslocamento do corpo de prova em vibração, como *strain gages*. A Figura 2-6 apresenta, genericamente, os sistemas de ensaios conforme a ASTM C215.

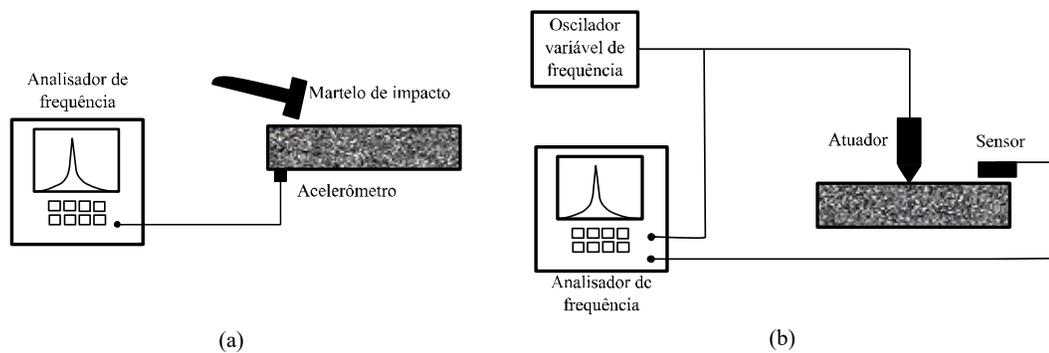


Figura 2-6: (a) Sistema de ensaio de excitação por impulso; (b) Sistema de ensaio de vibração forçada (ASTM, 2014b).

A diferença entre ambas as técnicas está na forma de excitação. Enquanto no ensaio de excitação por impulso o corpo de prova é golpeado e deixado em condição de vibração livre, no ensaio de ressonância forçada o corpo de prova é excitado continuamente por um atuador, que varre uma faixa de frequências que, necessariamente, deve abranger as primeiras frequências naturais do corpo de prova. Em ambos os ensaios, os sinais de resposta do corpo de prova são tratados para permitir obtenção das frequências naturais de vibração, que são, então, relacionadas ao módulo de elasticidade e parâmetros de amortecimento. Frequências de vibração de diferentes naturezas podem ser determinadas: transversal, devido à, principalmente, esforços de flexão; longitudinal, devido à esforços normais; torcional, devido à esforços de torção (ASTM, 2014b). A depender da natureza da frequência analisada, é possível obter o módulo de elasticidade longitudinal ou transversal, e, conseqüentemente, o coeficiente de Poisson.

No Brasil, um sistema de ensaio chamado Sonelastic, desenvolvido pela ATCP Engenharia Física (ATCP, 2018), permite a execução das metodologias propostas pela ASTM E1876-15, E1875-13 e C215. Na literatura, diversas aplicações do sistema podem ser encontradas, envolvendo caracterizações de diferentes materiais, como concreto, madeira, e materiais compósitos (COSSOLINO *et al.*, 2009; OTANI; PEREIRA, 2014, 2013; PRADO; HAACH, 2013; QUINAY; D'ALMEIDA, 2017; VLADIMIRO *et al.*, 2017).

O ensaio EMM-ARM, apresentado por Azenha *et al.* (2010), é uma adaptação, visando ensaios nas primeiras idades de materiais cimentícios, dos ensaios anteriores, uma vez que também se baseia no monitoramento da frequência fundamental de vibração de um corpo de prova. No entanto, modificam-se dois aspectos fundamentais: o corpo de prova, que é mantido em um molde para permitir ensaios desde as primeiras idades; e o método de excitação, que utiliza a excitação ambiente para promover baixos níveis de tensão durante o ensaio. O ensaio EMM-ARM será apresentado em detalhes no item 2.3.

2.3 O ENSAIO EMM-ARM

O EMM-ARM é um ensaio originalmente apresentado por Azenha *et al.* (2010) para monitoramento contínuo do módulo de elasticidade de concretos e outros materiais cimentícios desde as primeiras idades. Neste item são apresentados o princípio de funcionamento do ensaio EMM-ARM, a fundamentação teórica de Dinâmica das Estruturas e Identificação Modal necessária para compreensão do ensaio e seus resultados, e uma breve revisão histórica do desenvolvimento do método e de novas aplicações reportadas na literatura.

2.3.1 Princípio de funcionamento

A frequência natural de vibração de uma estrutura é uma propriedade diretamente dependente do módulo de elasticidade de seu material. Se conhecidas todas as demais propriedades da estrutura (geometria da seção, massa específica do material, condições de apoio do corpo e vão livre), é possível obter inequivocamente seu módulo de elasticidade a partir da frequência natural de vibração. Esse é o princípio fundamental do EMM-ARM, que se baseia no monitoramento contínuo da frequência natural de vibração transversal de corpos de prova para estimar o módulo de elasticidade do material dessas amostras.

O corpo de prova do ensaio é composto por tubos, de plástico ou metal, preenchidos com o material a ser analisado (comumente um material cimentício, como pasta de cimento ou concreto), e apoiados de forma semelhante a vigas, na forma engastada e livre ou biapoiada. Devido à forma de apoio, os corpos de prova se comportam como vigas e predomina a vibração transversal ao seu eixo longitudinal, causada por esforços de flexão. Como a seção transversal do sistema é composta pelo material do tubo e do material testado, na estimativa do módulo de elasticidade do material a partir da frequência natural do sistema é necessário utilizar o conceito de seção homogeneizada.

A Figura 2-7 apresenta as duas versões de configurações de ensaio apresentadas por Granja (2016) para ensaios EMM-ARM em pasta de cimento (Figura 2-7a) e concreto (Figura 2-7b). As soluções são resultados de estudos visando otimizar, em relação às primeiras implementações propostas por Azenha *et al.* (2010) e Azenha *et al.* (2012a), a confiabilidade quanto à rigidez dos apoios, a resolução dos ensaios e a excitabilidade dos tubos.

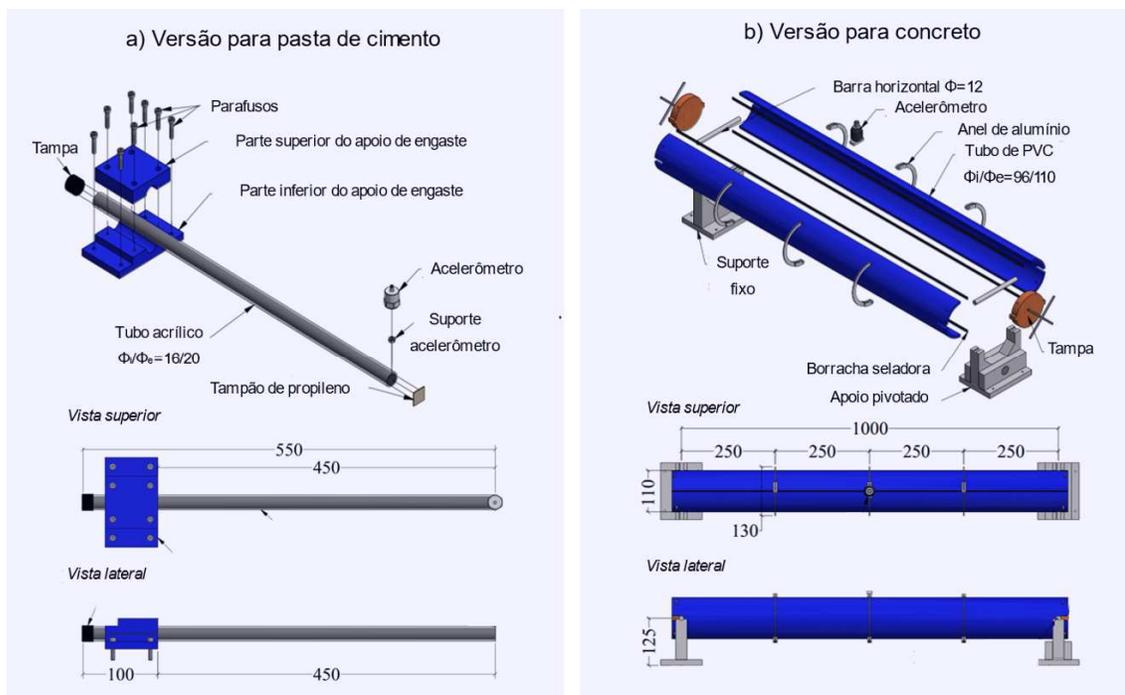


Figura 2-7: Sistemas de ensaio EMM-ARM para pasta de cimento (a) e concreto (b). Adaptado de Granja (2016). Cotas em mm.

É de interesse notar que os tubos utilizados satisfazem a hipótese de vigas esbeltas, uma vez que a altura de sua seção é da ordem de 1/10 do seu vão. Assim, as formulações utilizadas para relacionar a frequência de vibração ao módulo de elasticidade, apresentadas de forma inicial nos itens 2.3.2 e 4.1.2, e detalhadamente no APÊNDICE C, podem se aproveitar de simplificações advindas da teoria de vigas esbeltas.

Como o próprio nome sugere, a implementação original apresentada por Azenha *et al.* (2010) utiliza apenas a excitação ambiental, potencializada com o uso de um ventilador direcionado aos corpos de prova, para induzir um nível de vibrações razoável. Além de eliminar a necessidade de uma fonte de excitação artificial, que seria mais um elemento de ensaio a ser considerado, essa opção se justifica pelo baixo nível de tensão induzido durante o ensaio. Isso favorece o monitoramento desde as primeiras idades do material, nas quais as ligações microestruturais ainda estão em desenvolvimento. No entanto, o estudo de otimização apresentado por Granja (2016) sugeriu a utilização de uma fonte artificial de excitação para ensaio em concreto, visando melhor resolução e precisão dos resultados.

2.3.2 Fundamentação teórica

Neste item são apresentados, de forma geral: os modelos analíticos utilizados para descrever o comportamento dinâmico de estruturas, que servem de apoio para as técnicas de identificação modal utilizadas no EMM-ARM; o modelo contínuo utilizado no ensaio EMM-ARM para estimar o módulo de elasticidade do material a partir das frequências naturais do sistema; conceitos gerais de processamento e análise espectral de sinais, necessários para tratamento dos dados experimentais do ensaio; os tipos de identificação modal (operacional e experimental); e alguns métodos de identificação modal, com ênfase nos métodos não-paramétricos, que são adotados neste trabalho.

2.3.2.1 Modelos analíticos da Dinâmica das Estruturas

Os sistemas mais básicos na análise dinâmica são os sistemas de um grau de liberdade (SIGL). A representação clássica desses sistemas é apresentada na Figura 2-8, na qual: c representa o amortecimento da estrutura, que gera forças amortecedoras dissipativas $f_D(t)$; k representa a elasticidade da estrutura, que gera forças elásticas restauradoras $f_S(t)$; m representa a massa do sistema, que gera forças inerciais $f_I(t)$; e $v(t)$ e $p(t)$ representam, respectivamente, o deslocamento da estrutura e a força excitadora imposta.

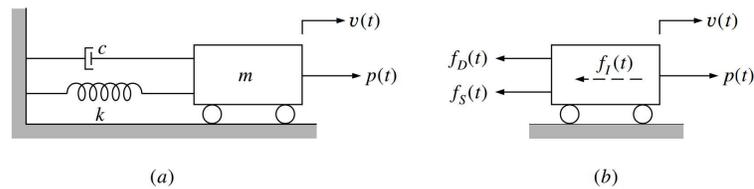


Figura 2-8: Representação de um SIGL (a) e seu equilíbrio de forças (b). Adaptado de Clough e Penzien (2003).

Apesar de serem abstrações, esses sistemas incluem as propriedades físicas essenciais de qualquer estrutura (massa, rigidez e amortecimento) e permitem o estabelecimento de conceitos aplicáveis em análises dinâmicas de estruturas mais complexas (He e Fu, 2001). O equilíbrio dinâmico, apresentado na Figura 2-8b, leva à equação do movimento do sistema, denominada modelo direto (CAETANO, 1992):

$$m \cdot \ddot{v}(t) + c \cdot \dot{v}(t) + k \cdot v(t) = p(t) \quad (2-3)$$

em que: m , c , e k são, respectivamente, a massa, amortecimento e rigidez do sistema; $v(t)$, $\dot{v}(t)$ e $\ddot{v}(t)$ são, respectivamente, o deslocamento, velocidade e aceleração do sistema; e $p(t)$ é uma excitação imposta. A determinação da solução $v(t)$ da equação (2-3) é vastamente explorada na

literatura (BLEVINS, 1979; CHOPRA, 2012; CLOUGH; PENZIEN, 2003), sendo composta por funções harmônicas (senos ou cossenos) com uma dada frequência de oscilação. Caso o amortecimento tenha sido desprezado, o que simplifica os cálculos envolvidos, obtém-se a chamada frequência natural do sistema, denotada por ω , na unidade de rad/s. A consideração do amortecimento leva à frequência natural amortecida, denotada por ω_D . A definição de cada frequência é dada nas equações (2-4) e (2-5):

$$\omega = \sqrt{k/m} \quad (2-4)$$

$$\omega_D = \omega \sqrt{1 - \xi^2} = \omega \sqrt{1 - \left(\frac{c}{2m\omega}\right)^2} \quad (2-5)$$

em que ξ é denominado razão de amortecimento, dada pela razão entre o amortecimento c e o amortecimento crítico calculado por $2m\omega$, conforme indicado na equação (2-5) (CLOUGH; PENZIEN, 2003). Caso se deseje trabalhar com a frequência na unidade de Hz, para a qual se utiliza a notação f , utiliza-se a relação $\omega = 2\pi f$. Para pequenos valores do amortecimento c , a frequência natural amortecida é muito próxima da não amortecida. Esta é uma hipótese fundamental utilizada nos métodos de identificação modal discutidos no item 2.3.2.4.

A resposta $v(t)$ de um sistema, inicialmente em repouso e então submetido a uma excitação imposta $p(t)$ harmônica, denominada vibração forçada, é de interesse prático neste trabalho, devido às configurações de ensaio EMM-ARM e aos métodos de identificação modal utilizados. Seja $\bar{\omega}$ a frequência de oscilação da carga harmônica de amplitude p_0 , a resposta do sistema é (CLOUGH; PENZIEN, 2003):

$$p(t) = p_0 \cdot \text{sen}(\bar{\omega}t) \Rightarrow v(t) = \frac{p_0}{k} \left(\frac{1}{1 - \bar{\omega}/\omega} \right) \cdot \left[\text{sen}(\bar{\omega}t) - \frac{\bar{\omega}}{\omega} \text{sen}(\omega t) \right] \quad (2-6)$$

A equação (2-6) mostra que, caso uma excitação harmônica de frequência $\bar{\omega}$ seja imposta ao sistema, a resposta do sistema conterà tal frequência, bem como sua própria frequência natural ω . A equação (2-6) é válida para estruturas sem amortecimento. A resposta para estruturas com amortecimento é dada em Clough e Penzien (2003), e nela é interessante notar que termos que contém a frequência ω do sistema decaem rapidamente com o tempo, permanecendo apenas parcelas harmônicas com a frequência da excitação. Esse é o caso de estruturas reais, que então passam a oscilar na frequência da excitação harmônica. Quando $\bar{\omega}$

→ ω , a resposta $v(t)$ tende ao infinito no caso não amortecido e a um máximo no caso amortecido. Nesse caso se diz que o sistema entra em ressonância.

Os conceitos desenvolvidos para S1GL podem ser estendidos a estruturas reais discretizadas em múltiplos graus de liberdade (SMGL). Nesse caso, a equação (2-3) se transforma em uma equação matricial, denominada modelo modal (CAETANO, 1992). Ao se aumentar os graus de liberdade, o sistema passa a ter múltiplas frequências naturais, em número igual à quantidade de graus de liberdade, bem como configurações geométricas de vibração em cada frequência, denominadas modos de vibração ou deformadas modais. No limite, um sistema contínuo possui infinitas frequências de vibração e deformadas modais.

O modelo modal apresenta alguns inconvenientes e limitações em certas aplicações, como na análise de estruturas com amortecimento viscoso geral e modelagem de sistemas a partir de dados experimentais (RODRIGUES, 2004; SILVA, 2005). Nesses casos, é mais adequado utilizar a representação no espaço de estado, que é base para diversos métodos de identificação modal já empregados na análise de dados do EMM-ARM (AZENHA *et al.*, 2011, 2012a; CAETANO, 1992; GRANJA, 2016; PEETERS; DE ROECK, 2001; RODRIGUES, 2004; SILVA, 2005).

2.3.2.2 Modelo contínuo da frequência natural de vigas aplicado ao ensaio EMM-ARM

Os modelos apresentados anteriormente são discretos, pois representam uma estrutura contínua por um número finito de pontos. Embora seja possível empregar discretizações cada vez mais refinadas, apenas um número infinito de graus de liberdade pode reproduzir o comportamento de uma estrutura real (CLOUGH; PENZIEN, 2003). A análise dinâmica de estruturas como sistemas contínuos recai em equações diferenciais parciais que, embora sejam de solução difícil ou impossível em muitos casos, possuem soluções fechadas para estruturas simples, como vigas. Como o corpo de prova do ensaio EMM-ARM pode ser analisado como uma viga esbelta, é possível utilizar a abordagem de sistemas contínuos, incorporando simplificações advindas da teoria de vigas esbeltas de Euler-Bernoulli, para obtenção de uma equação que relaciona a frequência natural da estrutura ao módulo de elasticidade do material.

A formulação apresentada neste item abrange apenas vibrações de flexão em vigas esbeltas, que é o esforço predominante no ensaio EMM-ARM. Abordagens aprofundadas, considerando outros tipos de esforços, como cisalhamento, torção e compressão-tração, podem ser encontradas em Blevins (1979), Clough e Penzien (2003), Pedroso (2007) e Rao (2011).

Além disso, a depender da configuração de ensaio EMM-ARM utilizada, pode ser necessário considerar o efeito de massas concentradas, que é abordado no item 4.1.2 e no APÊNDICE C.

O equilíbrio dinâmico de um elemento diferencial de viga esbelta, com propriedades constantes ao longo de seu comprimento, em vibração livre devido a esforços de flexão leva à equação do movimento dada pela equação diferencial parcial abaixo (RAO, 2011):

$$\left(\frac{EI}{\rho A}\right) \cdot \frac{\partial^4 y_{(x,t)}}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 y_{(x,t)}}{\partial t^4} = 0 \quad (2-7)$$

em que: E é o módulo de elasticidade, I é o momento de inércia da seção, ρ é a massa específica do material e A é a área da seção transversal da viga. Conforme demonstrado em Rao (2011), a solução da equação (2-7), após aplicação do método da separação de variáveis, é dada na equação (2-8) e é composta pela função de oscilação harmônica (2-9) e de deformadas modais (2-10), sendo as frequências naturais da estrutura definidas pela equação (2-11):

$$y(x,t) = T(t) \cdot Y(x) \quad (2-8)$$

$$T(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \quad (2-9)$$

$$Y(x) = C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x) + C_3 \cosh(\beta x) + C_4 \sinh(\beta x) \quad (2-10)$$

$$\omega = (\beta L)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} \therefore \beta = \sqrt[4]{\frac{\rho A \omega^2}{EI}} \quad (2-11)$$

em que C_1, C_2, C_3, C_4 são constantes calculáveis pelas condições de contorno da viga, e A e B pelas condições iniciais, L é o comprimento do vão livre da viga. Na definição das condições de contorno, é importante considerar a rigidez real dos apoios utilizados nos experimentos, que nem sempre coincidem com as idealizações de apoio simples ou engaste.

Como explicado no item 2.3.1, a rigidez à flexão EI presente na equação (2-11), no caso do EMM-ARM, se refere à rigidez à flexão homogeneizada da seção compósita, composta pelo material do tubo e o material ensaiado. Denominando como \overline{EI} a rigidez à flexão homogeneizada da seção compósita, sua relação com as propriedades individuais do tubo e do material é dada por:

$$\overline{EI} = E_t \cdot I_t + E_m \cdot I_m \quad (2-12)$$

em que E_t e I_t são, respectivamente, o módulo de elasticidade e o momento de

inércia da seção transversal do tubo, e E_m e I_m o módulo de elasticidade e a inércia da seção transversal do material ensaiado. A equação (2-12) só é válida caso haja ação compósita total entre o tubo e o material testado, que é uma hipótese admitida no ensaio EMM-ARM. No ensaio EMM-ARM, todos os parâmetros envolvidos nas equações (2-9) a (2-11) são conhecidos, com exceção da rigidez à flexão da seção compósita. A substituição das equações (2-8) a (2-11) na equação (2-7) leva a uma única equação cuja solução numérica permite determinar a rigidez \bar{EI} . O APÊNDICE C apresenta a dedução destas equações para ambas as versões de ensaio (pasta de cimento e concreto) apresentadas no item 2.3.1, considerando a presença de massas concentradas que modelam, por exemplo, os acelerômetros ou dispositivos de excitação para aplicação de vibração controlada, promovendo uma maior precisão na estimativa do módulo de elasticidade do material.

2.3.2.3 Tipos de identificação modal

Tipos de identificação modal se referem, de forma geral, aos métodos de obtenção e tratamento de dados experimentais visando a obtenção dos parâmetros modais de uma estrutura, isto é, suas frequências naturais, modos de vibração, amortecimentos modais e fatores de participação modal (ARAÚJO, 2015). No âmbito do ensaio EMM-ARM, apenas as frequências naturais são de interesse, embora os demais parâmetros modais possam ser estimados com base nos mesmos dados experimentais e ofereçam potencialidades a serem exploradas (GRANJA, 2016).

Utilizando uma abstração típica da disciplina de identificação de sistema, a estrutura pode ser entendida como um sistema que converte *inputs* (ações excitantes), por meio de suas propriedades (massa, rigidez, amortecimento, condições de contorno), em *outputs* (vibração) (RODRIGUES, 2004). A Figura 2-9 ilustra esse conceito: conhecendo-se os *inputs* e *outputs*, pode-se estimar propriedades de interesse da estrutura.

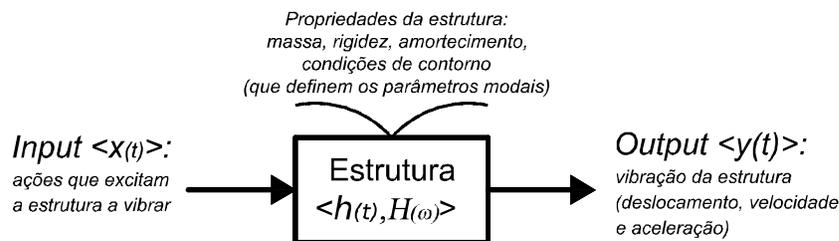


Figura 2-9: Diagrama de blocos do comportamento dinâmico de uma estrutura (NEWLAND, 2005).

A principal distinção entre os tipos de identificação modal disponíveis é quanto à origem da excitação utilizada, que pode ser proveniente de: fontes controladas, geradas por equipamentos como martelos de impulso ou mesas vibratórias; ou de fontes ambientais, geradas por ações que ocorrem naturalmente em torno do ensaio, como o caminhar de pessoas, passagem de automóveis, correntes de ar, ou tremores de terra (SILVA, 2005).

Os tipos de identificação envolvendo fontes controladas de excitação foram historicamente desenvolvidas primeiro e têm sua origem na Engenharia Mecânica, na qual as estruturas, cujas dimensões são usualmente pequenas, permitem ensaios em laboratório, favorecendo a utilização de máquinas para excitação (RODRIGUES, 2004). A obtenção das propriedades modais se baseia na análise da relação entre as entradas e saídas do sistema, sendo necessário, portanto, conhecê-las completamente. Segundo Araújo (2015), essas abordagens receberam o nome de Análise Modal Tradicional, ou Clássica (TMA, em inglês), sendo também referidas por Análise Modal Experimental (EMA, em inglês), que será adotado no âmbito desse trabalho (GRANJA, 2016; REYNDERS, 2012).

Por necessitar do controle total da excitação imposta, esse tipo de identificação apresenta limitações em relação à simulação de situações de serviço, onde as ações impostas no sistema raramente são conhecidas de forma determinística, e para estruturas muito grandes, nas quais a excitação artificial é onerosa (RODRIGUES, 2004). Isso motivou o desenvolvimento de um segundo tipo de identificação modal: a Análise Modal Operacional (OMA, do inglês *Output-Only* ou *Operational Modal Analysis*), que utiliza ações naturais do ambiente ao entorno do ensaio para provocar o estado de vibração necessário na estrutura (ARAÚJO, 2015).

Uma vez que a excitação não é controlada, e, portanto, não é conhecida deterministicamente como na EMA, é necessário descrevê-la probabilisticamente (REYNDERS, 2012). Uma das premissas para tal descrição é que as ações ambiente possam ser classificadas como ruído branco (PEETERS; DE ROECK, 2001). Ruído branco, que é um conceito idealizado e que não ocorre na prática, se refere a processos cujas componentes de frequência se distribuem igualmente em todo o espectro de interesse e que possuem média, no domínio do tempo, igual a zero (BENDAT; PIERSOL, 2010). Por conta disso, estas condições produzem estados de vibração cujas componentes de frequência referentes às frequências naturais da estrutura sobressaem das demais componentes, permitindo sua identificação. Em contrapartida, caso as ações ambientes possuam frequências dominantes, isto é, forem ruídos

coloridos, os métodos de identificação modal não conseguirão distinguir entre tais frequências e as frequências naturais da estrutura (PEETERS; DE ROECK, 2001).

Na sua proposta original, o ensaio EMM-ARM utilizava a identificação modal do tipo OMA, se aproveitando das vantagens comentadas no item 2.3.1, relacionadas, principalmente, à autonomia do ensaio e ao baixo nível de tensão induzida. Granja (2016) propôs o uso do tipo de identificação EMA para ensaios em concreto. Dentre outros motivos para essa mudança, pode-se citar que a configuração de ensaio proposta pelo autor tornou o corpo de prova muito rígido para ser excitado apenas por ações ambiente.

2.3.2.4 Métodos de identificação modal

Os métodos de identificação modal podem ser classificados em relação ao domínio em que as análises são realizadas: tempo ou frequência. A Tabela 2-2 apresenta alguns métodos de identificação modal de acordo com o domínio de análise (AGILENT TECHNOLOGIES, 2000; ARAÚJO, 2015; CAETANO, 1992; GRANJA, 2016; HE; FU, 2001; PEETERS; DE ROECK, 2001; REYNDERS, 2012; RODRIGUES, 2004).

Tabela 2-2: Alguns métodos de identificação modal.

Frequência	Tempo
PP/BFD (<i>Peak-Picking/Basic Frequency Domain</i>)	Direto - ARMA
FDD (<i>Frequency Domain Decomposition</i>)	LSCE (<i>Least-squares Complex Exponential</i>)
<i>Circle-fit</i>	SSI-COV (<i>COVariance-driven Stochastic Sub-space Identification</i>)
RD-PP/FDD (utilização da técnica <i>Random Decrement</i> com a PP ou FDD)	ITD (<i>Ibrahim Time Domain</i>)

Neste trabalho são utilizados apenas dois métodos do domínio da frequência: seleção de picos ou *peak-picking* (PP) e FDD em uma variante modificada para as condições de ensaio EMM-ARM, doravante denominado IFT (*Inverse Fourier Transform*) (GRANJA, 2016). Estes métodos também recebem a classificação de não-paramétricos, por não envolverem o ajuste de um modelo no seu procedimento de identificação modal. Por simplicidade, os conceitos necessários para compreensão desses métodos são apresentados a seguir para SIGL. Como o ensaio EMM-ARM envolve o uso de um único acelerômetro monitorando sempre o mesmo grau de liberdade, já que basta a identificação da frequência natural do primeiro modo, considera-se não haver perda de generalidade por essa abordagem.

Os métodos PP e IFT, e outros do domínio da frequência, consistem na análise da função de resposta em frequência (FRF) da estrutura, que contém informações de todos os parâmetros

modais da estrutura. Em referência à Figura 2-9, seja uma excitação qualquer $x(t)$ e a resposta do sistema $y(t)$, com representações no domínio da frequência dadas pelas transformadas de Fourier $X(\omega)$ e $Y(\omega)$, respectivamente, então a FRF é definida como:

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (2-13)$$

A FRF pode ser qualitativamente entendida como a lei que define como o sistema converte *inputs* em *outputs*, sendo definida pelas propriedades da estrutura (massa, rigidez e amortecimento) e características da excitação imposta. Sua dedução matemática é apresentada com diferentes abordagens na literatura, podendo ser obtida simplesmente utilizando a transformada de Fourier na equação (2-3) (CLOUGH; PENZIEN, 2003; HE; FU, 2001; MONTALVÃO E SILVA, 1999; NEWLAND, 2005). Para um S1GL amortecido, como na Figura 2-8, a FRF é (CLOUGH; PENZIEN, 2003):

$$H(\bar{\omega}) = \frac{1}{k(-\beta^2 + 2 \cdot i \cdot \beta \cdot \xi + 1)} \quad (2-14)$$

em que $\beta = \bar{\omega}/\omega$ e i representa o número complexo $\sqrt{-1}$. Evidencia-se, assim, que a FRF, além de ser função da frequência de excitação $\bar{\omega}$, depende de todas propriedades da estrutura. Similarmente ao comentado anteriormente na equação (2-6), para $\bar{\omega} \rightarrow \omega$ a estrutura entra em ressonância e a FRF atinge um máximo, em torno do qual seu comportamento é controlado pelo valor de ξ . Em SMGL o conceito é análogo, com a FRF se tornando uma matriz, composta de FRFs que inter-relacionam cada grau de liberdade (HE; FU, 2001). A Figura 2-10 apresenta o gráfico da amplitude de um elemento da matriz FRF de um SMGL com quatro graus de liberdade. Os diversos picos evidenciam as frequências naturais de vibração do sistema.

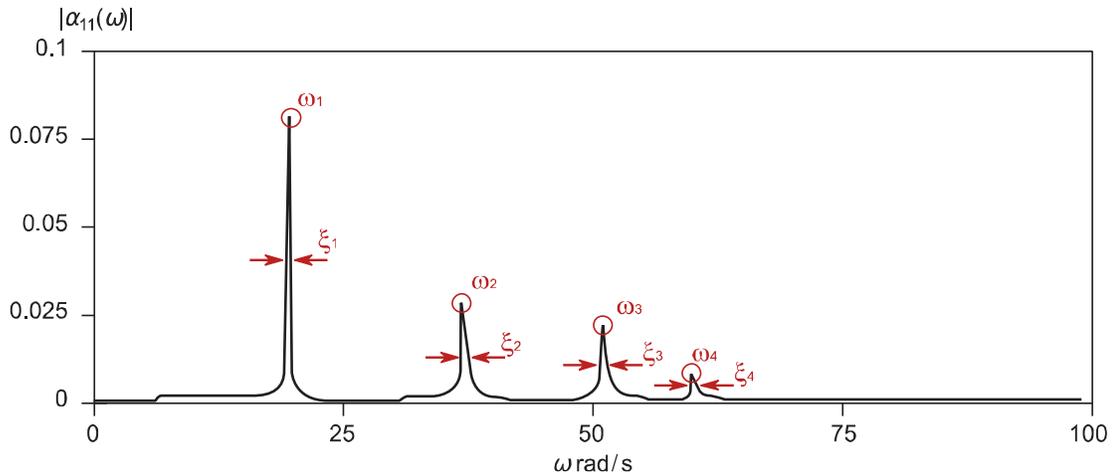


Figura 2-10: Gráfico da amplitude de componente da matriz FRF de um SMGL com quatro graus de liberdade. Adaptado de He e Fu (2001).

A partir da representação gráfica da FRF, pode-se proceder com a identificação modal. O método PP parte do pressuposto que, em torno de um pico da FRF, apenas um modo de vibração domina, fazendo o SMGL se comportar como S1GL. Segundo o método, as frequências naturais de vibração são as coordenadas referentes aos picos, e os coeficientes de amortecimento são calculados pela largura dos picos, dada pelo método da meia-potência (CLOUGH; PENZIEN, 2003; HE; FU, 2001; NEWLAND, 2005):

$$\xi_i = \frac{\omega_d^2 - \omega_e^2}{4 \cdot \omega_i^2} \quad (2-15)$$

em que ω_i é a frequência relacionada ao pico considerado e ω_d e ω_e são as frequências relacionadas aos pontos de potência igual a metade do pico, *i.e.* amplitude $1/\sqrt{2}$ vezes ao máximo considerado, à sua direita e esquerda, respectivamente (HE; FU, 2001). O método PP funciona bem para sistemas com baixo amortecimento e frequências naturais bem espaçadas, o que assegura naturalmente que um pico da FRF influencie pouco nos demais e não seja capaz de mascará-los no gráfico (PEETERS; DE ROECK, 2001). No entanto, por ser não-paramétrico, exige um relativo alto grau de interpretação e experiência do usuário no momento de seleção dos picos, que podem não se referir a ressonâncias e sim a ruídos no sinal.

O método FDD pode ser entendido como uma extensão do método PP, pois, em relação a este, propõe a decomposição em valores singulares da matriz FRF para fornecer informações adicionais para a escolha dos picos (REYNDERS, 2012). Para determinação das frequências naturais e coeficientes de amortecimento, Brincker, Zhang e Andersen (2001) propõe a transposição de regiões do gráfico da FRF, em torno dos picos, para o domínio do tempo por

meio da transformada inversa de Fourier, obtendo-se a resposta da estrutura no tempo. Novamente utilizando a hipótese de que na ressonância um SMGL se comporta como um S1GL, a frequência é estimada por regressão linear dos pontos de resposta nula e o amortecimento pelo decremento logarítmico. Elimina-se, de certa forma, a arbitrariedade quanto à seleção dos picos presente no método PP. A Figura 2-11 ilustra o processo empregado no método FDD.

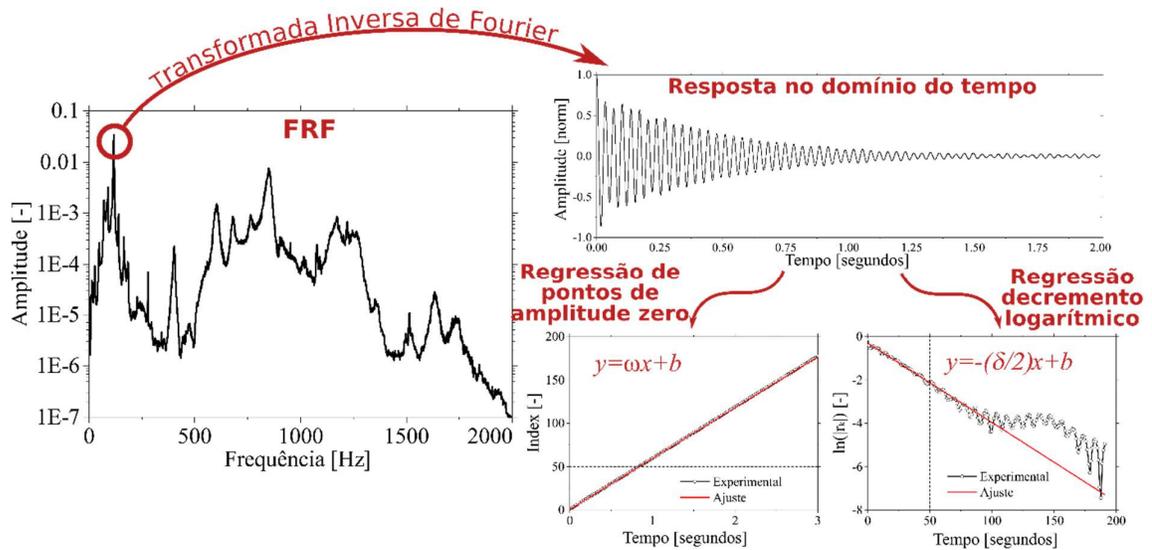


Figura 2-11: Procedimento do método FDD adaptado utilizado neste trabalho. Adaptado de Granja (2016).

O decremento logarítmico é um conceito deduzido para vibrações livres de S1GL amortecidos, sendo abordado, por exemplo, em Clough e Penzien (2003). O cálculo do decremento se inicia pela identificação dos valores extremos r_k da resposta no domínio do tempo, isto é, as ordenadas máximas e mínimas locais do sinal. Computa-se, em seguida, o decremento logarítmico de cada ponto, dado por (BRINCKNER; VENTURA; ANDERSEN, 2001):

$$\delta = \frac{2}{k} \cdot \ln \left(\frac{r_0}{|r_k|} \right) \quad (2-16)$$

em que k se refere ao índice ordenatório do extremo (*e.g.* primeiro, segundo, terceiro, etc.), r_0 se refere ao valor inicial da resposta no tempo e r_k é o valor do k -ésimo extremo. Caso o sinal fosse perfeito, bastaria tomar um extremo e calcular seu decremento. No entanto, devido a ruídos e outros erros, o método calcula o decremento em diversos picos e procede com o ajuste da equação abaixo:

$$\ln(|r_k|) = -\frac{\delta}{2} \cdot k + \ln(r_0) \Rightarrow y = -\frac{\delta}{2} \cdot x + b \quad (2-17)$$

Cujo coeficiente angular fornece o decremento mais bem ajustado à resposta no tempo obtida. O coeficiente de amortecimento é, então, calculado por (BRINCKER; ZHANG; ANDERSEN, 2001; CLOUGH; PENZIEN, 2003):

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} \quad (2-18)$$

No ensaio EMM-ARM, tipicamente apenas um grau de liberdade do corpo de prova é monitorado e tem-se interesse apenas na sua primeira frequência de vibração. Assim, apesar de se tratar da identificação de um SMGL, não se obtém uma matriz de FRF pois só se possui dados de um grau de liberdade. Nesse caso, não sendo possível proceder com a etapa de decomposição em valores singulares, adapta-se o método FDD e utiliza-se apenas a metodologia de transposição da região em torno do pico da FRF para o domínio do tempo, e a subsequente identificação das frequências e coeficiente de amortecimento. Opta-se por denominar tal método adaptado como IFT, evidenciando o papel central da transformada inversa de Fourier e a não utilização da decomposição em valores singulares.

2.3.2.5 Processamento de sinais para obtenção da FRF

Os métodos de identificação utilizados neste trabalho se baseiam na FRF da estrutura. Assim, é importante a descrição de como essa função é obtida de dados experimentais. Neste ponto, os tipos de identificação modal (EMA e OMA) se diferem. Na identificação EMA, os dados experimentais compõem tanto a resposta da estrutura quanto a excitação imposta, enquanto em OMA apenas a resposta da estrutura é registrada, sendo a excitação modelada estatisticamente por meio da hipótese de ruído branco.

Independentemente do tipo de identificação modal considerado, os dados experimentais se encontram originalmente no domínio do tempo, sendo séries temporais de, por exemplo, acelerações, como no caso do EMM-ARM. A partir desses dados, a obtenção da FRF não se faz, usualmente, diretamente pela aplicação da transformada de Fourier às séries temporais, pois, pelo rigor matemático, os registros obtidos experimentalmente, principalmente por serem finitos, não satisfazem as condições para aplicação da transformada de Fourier (CAETANO, 1992; KREYSZIG, 2011; NEWLAND, 2005).

Essa dificuldade é superada pela análise não das séries amostradas, mas sim das suas funções de correlação (NEWLAND, 2005). As funções de correlação possuem as mesmas informações de frequências dos sinais a que se referem, além de satisfazerem as condições para aplicação da transformada de Fourier. A transformada de Fourier das funções de correlação é denominada função de densidade espectral de potência (PSD), que é, então, a base para os métodos de identificação modal (NEWLAND, 2005). As funções PSD são chamadas de autoespectros, quando se referem à função de autocorrelação de um determinado sinal, ou espectros cruzados, quando se referem à função de correlação entre dois sinais.

Esse caminho formal foi o procedimento padrão adotado até o fim dos anos 1960, quando, com o advento do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT) aliado ao processamento digital de sinais, tornou-se mais eficiente estimar a PSD diretamente a partir da transformada de Fourier das séries temporais, e não mais das funções de correlação (NEWLAND, 2005). Nessa metodologia, a função PSD obtida acaba sendo filtrada por uma função janela (*window function*), que realiza um processo de suavização na função (NEWLAND, 2005). Atualmente, diversas metodologias para cálculo do PSD são disponíveis na literatura, dentre as quais cita-se o procedimento do periodograma médio de Welch (WELCH, 1967), amplamente utilizado em diversas áreas (BENDAT; PIERSOL, 2010) e, por isso, adotado nesse trabalho.

De posse das funções PSD dos dados experimentais, que os representa no domínio da frequência, a FRF pode ser obtida considerando as particularidades de cada método de identificação modal. Para condições de EMA, na qual se tem os dados da excitação imposta e reposta da estrutura, a FRF é calculada por (HE; FU, 2001):

$$H(\omega) = \frac{S_{xy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} \quad (2-19)$$

em que S_{xy} é o espectro cruzado entre os sinais da excitação $x(t)$ e resposta $y(t)$ e S_{xx} é o autoespectro do sinal da excitação. Já para condições de OMA, é necessário utilizar a hipótese de que a excitação pode ser modelada estatisticamente como um ruído branco, que, baseado na discussão apresentada no item 2.3.2.3, leva a:

$$S_{xx}(\omega) = S_0 \quad (2-20)$$

onde S_0 é uma constante e se refere à intensidade do ruído branco (REYNDERS, 2012). Assim, partindo da relação entre os autoespectros da resposta e excitação (NEWLAND, 2005):

$$S_{yy}(\omega) = |H(\omega)|^2 \cdot S_{xx}(\omega) \quad (2-21)$$

Tem-se que:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{S_{yy}(\omega)}{S_0} \quad (2-22)$$

Ou seja, a magnitude da FRF ao quadrado é igual ao autoespectro da resposta dividido por uma constante referente à intensidade do ruído branco. Assim, a análise do autoespectro da resposta da estrutura permite identificar as frequências de ressonância da FRF e, com as devidas correções para considerar a potência ao quadrado, os coeficientes de amortecimento.

2.3.3 Revisão histórica do método e aplicações reportadas na literatura

A técnica EMM-ARM foi oficialmente proposta por Azenha *et al.* (2010), que apresentaram a técnica como suporte ao estudo do comportamento estrutural do concreto nas primeiras idades. A técnica foi subsequentemente desenvolvida, melhorada e aplicada a diferentes materiais e finalidades. Inicialmente concentrados apenas em questões de validação, diversos trabalhos já utilizam o EMM-ARM como técnica para monitoramento do módulo de elasticidade, demonstrando a maturidade atual do ensaio.

Na literatura, é possível encontrar relatos do uso de EMM-ARM para estudo das propriedades mecânicas de pastas de cimento, concreto, solo-cimento, resinas epóxi e argamassas. Originalmente proposto para monitorização da evolução do módulo de elasticidade, o EMM-ARM já foi aplicado para identificação do calor de hidratação e tempo de fim de pega, e adaptado para estudos de propriedades viscoelásticas, além de ser utilizado como suporte para análises de tensões térmicas em concreto massa, tomada de decisão em indústrias de pré-moldados e faseamento da construção.

A tese de Azenha (2009) pode ser considerada como a primeira menção do EMM-ARM na literatura, onde a técnica original é apresentada para pastas de cimento e concreto. No entanto, a tese não utiliza o nome EMM-ARM, que só aparece no artigo de Azenha *et al.* (2010), que pode ser considerada a publicação seminal sobre a técnica. A partir dessa publicação, diversos trabalhos utilizando a técnica foram publicados. Em uma busca nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus*, e *Google Scholar* foi possível encontrar 30 trabalhos que utilizam o EMM-ARM, entre artigos de revista, de conferências, teses de doutorado e mestrado.

Seguindo uma ordem cronológica, após a primeira publicação de Azenha *et al.* (2010), o EMM-ARM foi utilizado para o estudo da influência da composição da pasta de cimento na evolução do módulo de elasticidade e calor de hidratação, conforme Maia *et al.* (2011). O uso em solo cimento é relatado pela primeira vez em Azenha *et al.* (2011), que comparou os resultados do EMM-ARM com as técnicas de compressão clássica e *bender-extender*.

Azenha *et al.* (2012a) detalharam o sistema original do EMM-ARM para ensaios em pastas de cimento e argamassas por meio de um molde engastado e livre com comprimento de 550 mm e diâmetro interno de 16 mm. No sistema de ensaio descrito, o engaste era realizado por um sargento e um tubo de aço para reforço da extremidade engastada. No mesmo ano, Azenha *et al.* (2012b) apresentaram um estudo de caso da aplicação em campo do EMM-ARM para monitorização do módulo de elasticidade de concreto em uma fábrica de pré-moldados, visando suporte para tomada de decisão, com resultados promissores da utilização da técnica em ambientes não-laboratoriais. Este trabalho também apresenta uma variação do sistema de ensaio originalmente proposto para concreto, na forma de um perfil reutilizável de formato U de aço, aberto na extremidade superior, para possibilitar o adensamento do material por vibradores, além do primeiro relato de boa correspondência entre resultados de ensaios de ultrassom e EMM-ARM.

Boulay *et al.* (2013b) relataram um estudo interlaboratorial, a ser comentado no próximo item, em que diversos métodos de determinação do módulo de elasticidade foram comparados entre si. Nesse estudo, o método EMM-ARM foi classificado como quase-estático.

Maia *et al.* (2012b) e Maia *et al.* (2012a) avaliaram o potencial do EMM-ARM para monitorar continuamente a evolução do módulo de elasticidade, a transição entre a fase fluido para sólido, e o limite de percolação em pastas de cimento com diferentes composição, constatando adequada sensibilidade da técnica para esses fins. Maia *et al.* (2012c) utilizaram o EMM-ARM para avaliação do efeito do uso de SRA (aditivo de redução de retração) em pastas de cimento até sete dias de idade.

Silva *et al.* (2013) apresentaram um estudo de adaptação do EMM-ARM para monitoramento do módulo de elasticidade de solos-cimento até 28 dias de idade, comparando os resultados com as técnicas de *bender-extender*, ultrassom, e compressão clássica não-confinada. Estudos sobre a aplicabilidade do EMM-ARM continuaram com Vieira (2014), que também propôs uma variante do EMM-ARM na forma do monitoramento da frequência natural de uma haste, de material conhecido, parcialmente envolvida por uma amostra do material a ser

analisado. A obtenção do módulo de elasticidade a partir da frequência obtida experimentalmente foi feita por meio do ajuste de modelos numéricos. Os trabalhos de Silva *et al.* (2014a, 2014b, 2016) continuaram o aperfeiçoamento do EMM-ARM para aplicação em solos-cimento, tratando de melhorias no molde e processo de amostragem.

Granja *et al.* (2014a) apresentaram a comparação do EMM-ARM com diferentes métodos de determinação o módulo de elasticidade, a ser comentado no próximo item. O trabalho de Azenha *et al.* (2014) utilizou o EMM-ARM para obtenção da evolução do módulo de elasticidade, que foi posteriormente utilizada na análise de tensões de origem térmica originadas na construção de um trecho de um vertedouro de barragem em concreto.

Os trabalhos de Fernandes *et al.* (2014) e Granja *et al.* (2014b) foram os primeiros a estudar a aplicação do EMM-ARM em adesivos estruturais do tipo CFRP (polímero reforçado com fibras de carbono) utilizados em reforço estrutural, visando controle de qualidade contínuo. Granja *et al.* (2015) apresentaram a utilização do EMM-ARM para monitoramento do desenvolvimento da rigidez e identificação da cinética de hidratação de adesivos epóxi, bem como sua comparação com ensaios normatizados para tais materiais. O trabalho de Fernandes *et al.* (2015), além de utilizar o EMM-ARM, propôs uma relação entre a evolução do módulo de elasticidade e a máxima força de arrancamento de adesivos epóxis, sugerindo o potencial do ensaio EMM-ARM como ferramenta de controle de qualidade em reparos estruturas com resinas epoxídicas. Na mesma linha, Benedetti *et al.* (2016) e Benedetti *et al.* (2015) apresentaram um estudo da influência da temperatura de cura na rigidez e resistência à arrancamento de sistemas de reforço estrutural baseados em FRP (polímeros reforçados com fibras), utilizando o EMM-ARM como metodologia de monitoramento do módulo de elasticidade.

Granja e Azenha (2015) apresentaram um estudo de melhoramentos no sistema de ensaio EMM-ARM e aplicação em campo para suporte na tomada de decisões durante a fase de execução de estruturas. Na aplicação em campo, avaliou-se a influência do nível de ruído do ambiente de campo e da impossibilidade, comum em campo, de se compatibilizar a temperatura de cura da estrutura real e do ensaio realizado, além da identificação da relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade para o concreto estudado. Este estudo está alinhado à tese de doutorado de Granja (2016), no qual o sistema de ensaio do EMM-ARM foi otimizado, com a sugestão de utilização de excitação artificial na versão para concreto, validado sob aspectos metrológicos, e utilizado para estudo da influência da temperatura no processo de

hidratação, para suporte na tomada de decisão em campo, para caracterização de propriedades viscoelásticas e para estudo de adesivos epóxi nas primeiras idades. Os resultados referentes à melhorias no sistema de ensaio foram relatados em Granja e Azenha (2017).

Azenha *et al.* (2016) apresentaram uma revisão bibliográfica da aplicação do EMM-ARM ao estudo de solo-cimento, comentando as diferentes soluções desenvolvidas para o sistema de ensaio, como moldes, aparelhos de apoio, métodos de identificação modal, e formas de amostragem. Aguilar *et al.* (2016) apresentaram uma avaliação de diversas técnicas não-destrutivas baseadas na frequência de vibração (ressonância ao impacto e EMM-ARM), sugerindo relações entre a resistência à compressão e módulo de elasticidade e relações entre módulo de elasticidade estático e dinâmico visando aplicações para controle de qualidade de concreto.

Recentemente, Faria *et al.* (2017) utilizaram o EMM-ARM como metodologia auxiliar em seu trabalho, que trata do desenvolvimento de um equipamento para caracterização do comportamento viscoelástico do concreto sob tensões de tração devido a restrições a deformações de retração. Velay-Lizancos *et al.* (2017) utilizaram o EMM-ARM no estudo das primeiras idades de concretos com adições de cinzas de biomassas. Mazaheripour *et al.* (2018) utilizaram o EMM-ARM para obtenção de resultados experimentais para validação de predições do desenvolvimento de propriedades elásticas de concretos, em fase de endurecimento, obtidas a partir de análises micromecânicas.

2.3.4 Comparação entre métodos

A comparação entre diferentes métodos experimentais para determinação do módulo de elasticidade é bastante explorada na literatura. Maia *et al.* (2012a) compararam resultados de módulo de elasticidade em pastas de cimento obtidos por meio do ensaio EMM-ARM com métodos quase-estático e ultrassônico baseado na onda P. Os autores identificaram uma relação linear entre o módulo de elasticidade obtido pelo método quase-estático e pelo ultrassônico, e uma boa correlação entre os resultados do EMM-ARM e os valores quase-estáticos, embora as tendências dos dois métodos diverjam em idades avançadas.

Delsaute *et al.* (2016) apresentaram um estudo interlaboratorial envolvendo três laboratórios e oito métodos diferentes de monitoramento da evolução da rigidez, identificados pelos autores como: compressão clássica (**QS₀**), método BTJASPE (**QS₁**), compressão clássica seguindo o protocolo do método BTJASPE (**QS₂**), TSTM (**QS₃**), EMM-ARM (**RF**), e método

ultrassônico por FreshCon (**HF₁**), BTPULS (**HF₂**), e SMAGS (**HF₃**). Os resultados obtidos são compilados na Figura 2-12.

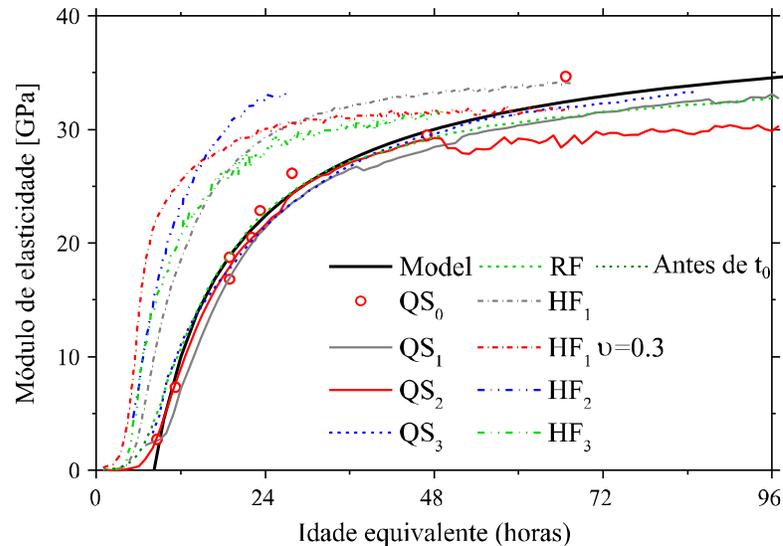


Figura 2-12: Estudo comparativo de diferentes métodos de monitoramento do módulo de elasticidade (DELSAUTE *et al.*, 2016).

É possível observar que o EMM-ARM (**RF**) apresentou boa concordância o modelo matemático de referência (**Model**) e os demais ensaios quase-estáticos com bastante aproximação. Além disso, houve uma boa correspondência entre os grupos de métodos considerados estáticos (**QS₀**, **QS₁**, **QS₂**, **QS₃**, **RF**) e dinâmicos (**HF₁**, **HF₂**, **HF₃**), embora com maior dispersão observada neste último grupo. No gráfico, o resultado **HF₁ v=0.3** refere-se à um ensaio ultrassônico no qual não foi monitorado as ondas S e, portanto, a evolução do coeficiente de Poisson dinâmico não pôde ser obtida, requerendo a adoção de um valor constante igual a 0,3, introduzindo diferenças significativas em relação aos demais métodos dinâmicos. O resultado **Antes de t₀** refere-se aos resultados obtidos no EMM-ARM (**RF**) antes do tempo de pega, sendo apresentados de forma distinta pois, nessas idades, as hipóteses utilizadas pelo EMM-ARM para cálculo do módulo de elasticidade podem não ser verdadeiras (DELSAUTE *et al.*, 2016).

Boulay *et al.* (2013b) relatam um estudo interlaboratorial envolvendo três laboratórios e seis técnicas para monitoramento das propriedades mecânicas do concreto nas primeiras idades, de modo a avaliar a correspondência entre as medidas de cada metodologia. As técnicas utilizadas foram: i) EMM-ARM; ii) compressão clássica no estado endurecido; iii) carregamento cíclico no equipamento BTJASPE; iv) carregamento cíclico no equipamento TSTM; v) ultrassom com equipamentos convencionais; vi) ultrassom utilizando SMAGs (*smart*

aggregates) como sensores. As técnicas de i) a iv) foram identificadas como metodologias estáticas, *i.e.* fornecem o módulo de elasticidade estático, e seus resultados apresentaram boa concordância. As técnicas v) e vi) foram identificadas como metodologias ultrassônicas, fornecendo o módulo de elasticidade dinâmico. Os autores constataram uma boa concordância entre os resultados do EMM-ARM e os de compressão clássica, TSTM e BTJASPE, comentando que as diferenças observadas podem ser devido a técnicas de mistura das amostras, ao histórico de temperatura durante os ensaios e na taxa de carregamento utilizada, que variaram nos ensaios interlaboratoriais apresentados pelos autores.

Um estudo de validação do EMM-ARM em pastas de cimento pela comparação com diferentes metodologias de ensaio (ultrassom, *bender-extender*, resistência à penetração pela agulha de Vicat e compressão clássica) e o uso da técnica para obtenção da energia de ativação são apresentados por Granja *et al.* (2014a). Nesse trabalho, os autores constataram a boa repetibilidade do EMM-ARM, o potencial para sua utilização em campo para cálculo da energia de ativação de materiais cimentícios, a dificuldade da utilização dos métodos ultrassônicos nas primeiras idades devido à interferências como bolhas de ar, e a vantagem do EMM-ARM como ferramenta de coleta de dados contínuos e quantitativos acerca do módulo de elasticidade.

2.4 SISTEMAS DE SENSORIAMENTO EXPERIMENTAL DE BAIXO CUSTO

Neste item serão apresentados conceitos relativos aos componentes utilizados para construção de sistemas de sensoriamento experimental de baixo custo. Um sistema de sensoriamento experimental é composto, basicamente, por: i) um microcontrolador, que é o componente responsável por processamento de dados (*e.g.* cálculos, armazenamento) e gerenciamento da comunicação entre os demais componentes do sistema; ii) sensores, que são componentes capazes de interagir com o ambiente e produzir sinais e medições de interesse; iii) demais periféricos, como módulos para conexão de cartão SD ou outra mídia de armazenamento, componentes de interface com o usuário, comunicação e transmissão de dados (*e.g.* *wi-fi*, *bluetooth*, tela *LCD*), e componentes eletrônicos para funcionamento dos circuitos (*e.g.* resistores, capacitores, osciladores de cristal, fonte de alimentação).

2.4.1 Plataformas eletrônicas open-source de prototipagem eletrônica

Plataformas eletrônicas *open-source* de prototipagem eletrônica estão se popularizando cada vez mais como alternativas acessíveis, tanto do ponto de vista econômico quanto técnico, para o projeto de sistemas eletrônicos para os mais diversos fins, com uma vasta gama de opções de baixo custo disponíveis comercialmente (*e.g.* Arduino, Raspberry Pi, Adafruit, Intel Edison, Teensy) (CHACON; OLLER, 2017). Neste trabalho, a plataforma Arduino foi utilizada como base para construção do sistema de sensoriamento baixo custo, devido a, principalmente, experiências prévias do autor na plataforma e o grande volume de informações disponíveis na Internet sobre o sistema.

Segundo a página eletrônica oficial da plataforma, o Arduino foi concebido como uma ferramenta rápida de prototipagem para usuários sem uma grande experiência em eletrônica ou programação, consistindo em uma única placa que possui um microcontrolador, com todos os componentes eletrônicos complementares necessários para seu funcionamento, conectado a pinos para conexão e comunicação imediata com periféricos (ARDUINO, 2018a). Com as placas dessa plataforma, a criação de um sistema de controle consiste em conectar diferentes periféricos ao microcontrolador e programá-lo por meio de uma IDE (*Integrated Development Environment*) baseada nas linguagens C/C++.

Atualmente, a plataforma Arduino possui diversas placas com características e aplicabilidades distintas (ARDUINO, 2018b). A Figura 2-13 apresenta os componentes

principais da versão Uno da plataforma Arduino, uma das mais simples disponíveis e a utilizada como base do sistema desenvolvido neste trabalho.

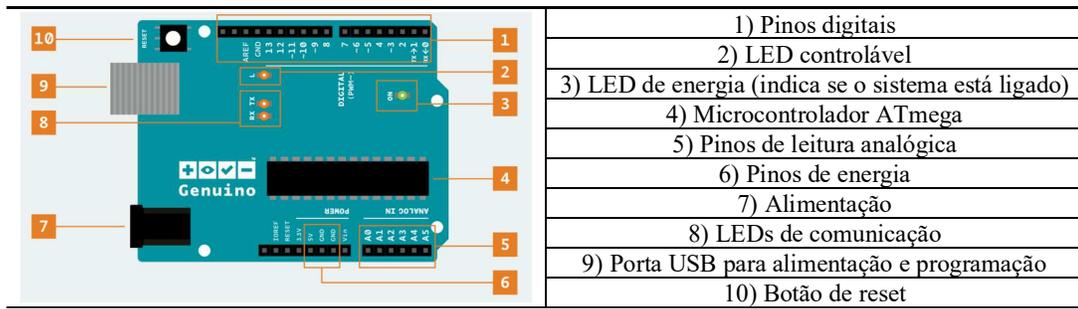


Figura 2-13: Componentes principais da placa Arduino Uno (ARDUINO, 2019).

A versão Uno é tida como a versão de entrada da plataforma Arduino, prezando pelo baixo custo e simplicidade, e possuindo apenas funcionalidades básicas. Dentro do escopo deste trabalho, essa versão foi considerada como suficiente para implementação da primeira versão do sistema de sensoriamento proposto. A transição para outras placas da plataforma Arduino é feita sem dificuldades, pois a linguagem de programação utilizada é a mesma, sendo necessário, quando muito, apenas adaptações nos circuitos eletrônicos para respeitar possíveis diferenças nos valores de voltagem de operação/interface.

As especificações técnicas mais importantes da versão Uno são apresentadas na Tabela 2-3, juntamente com outras três versões populares da plataforma: Micro, Mega e Due. Diversas outras versões, com funcionalidades específicas já incorporadas à placa, como conexão *wi-fi*, ou características particulares, como portabilidade ou baixo consumo de energia, também são disponíveis (ARDUINO, 2018c).

Tabela 2-3: Comparação das características técnicas de placas Arduino (ARDUINO, 2018c).

Nome	Processador	Voltagem de operação /interface	Velocidade do CPU	Pinos analógicos I/O ¹	Pinos digitais IO/PWM ²	Memória EEPROM ³ (kB)	Memória SRAM ⁴ (Kb)	Memória Flash ⁵ (kB)
Uno	ATmega 328P	5 V / 7-12 V	16 MHz	6/0	14/6	1	2	32
Micro	ATmega 32U4	5 V / 7-12 V	16 MHz	12/0	20/7	1	2.5	32
Mega 2560	ATmega 2560	5 V / 7-12 V	16 MHz	16/0	54/15	4	8	256
Due	ATSAM 3X8E	3.3 V / 7-12 V	84 MHz	12/2	54/12	-	96	512

Notas:

1: I/O – se refere a *Input/Output*, isto é, se um determinado pino do microcontrolador é de entrada (*input*) ou saída (*output*) de dados.

2: PWM – se refere a *Pulse Width Modulation*, e é uma técnica que permite obter uma saída analógica a partir de um pino digital por meio da modulação da largura de um trem-de-pulsos digitais.

3: EEPROM – se refere a *Electrically Erasable and Programmable Read Only Memory*, é uma memória de dados, não volátil e modificável durante a execução do programa, que serve para armazenagem de dados que não devem ser perdidos caso o sistema seja desligado ou reiniciado.

4: SRAM – se refere a *Static Random Access Memory*, é uma memória de dados volátil para armazenamento dos dados processados durante a execução do programa.

5: Flash – memória de programa, não volátil, que serve para armazenar as instruções (programa) a serem executadas pelo microcontrolador.

O processo usual de desenvolvimento de aparatos eletrônicos por meio da plataforma Arduino é, inicialmente, se chegar em um protótipo funcional utilizando alguma das placas apresentadas na Tabela 2-3. Uma vez atingido esse objetivo, e caso o projetista julgue necessário, o circuito é transportado para outros formatos mais permanentes e com potencial melhor desempenho (*e.g.* menor ruído, menor consumo de energia, menor tamanho), como placas perfuradas soldadas ou circuitos impressos.

2.4.2 Tipos de acelerômetros

Acelerômetros são sensores capazes de traduzir uma aceleração imposta em um sinal eletrônico, visando a mensuração de tal aceleração. Diversos tipos de arquiteturas e materiais podem ser utilizados na produção de um acelerômetro. Os primeiros acelerômetros eram do tipo resistivos em ponte, pesando em torno de 450g, seguidos por acelerômetros baseados em *strain gages*, e, finalmente, pelos acelerômetros piezoelétricos e piezoresistivos amplamente utilizados atualmente (WALTER, 2007). Também se tornou comum uma classe de acelerômetros baseada no padrão IEPE (*Integrated Electronics Piezo-Electric*), que consiste em englobar, em um único encapsulamento, um transdutor piezoelétrico e os eletrônicos

necessários para amplificação do sinal gerado pelo transdutor (LEVINZON, 2015). A Figura 2-14 apresenta esquematicamente os três principais tipos construtivos de acelerômetros IEPE (compressão, cisalhamento e flexão), que se diferenciam no tipo de esforço introduzido no material piezoelétrico.

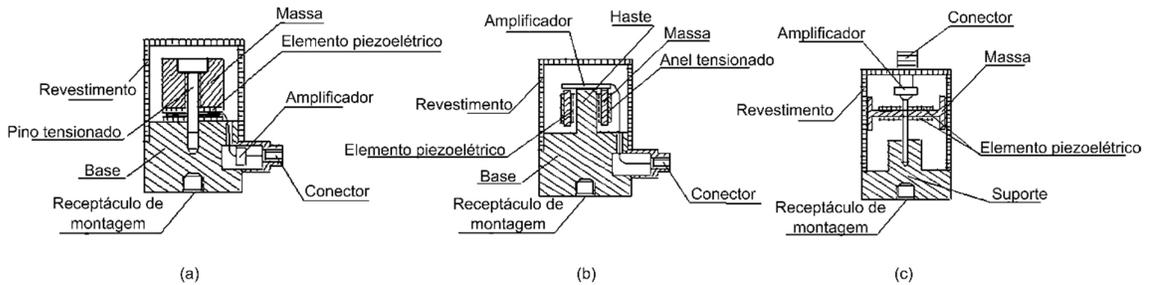


Figura 2-14: Principais tipos construtivos de acelerômetros IEPE: (a) compressão; (b) cisalhamento; (c) flexão (LEVINZON, 2015).

No âmbito dos sensores eletrônicos de baixo custo, popularizou-se os acelerômetros MEMS. Sistemas microeletromecânicos, ou MEMS (*Microelectromechanical Systems*) descrevem uma área de pesquisa na qual elementos mecânicos, como vigas e membranas, são manufaturadas em uma escala microscópica e utilizados em conjunto com circuitos eletrônicos para diversas finalidades (*e.g.* sensores de pressão ou acelerômetros) (CHOLLET; LIU, 2016). A partir dos anos 1990, MEMS se tornaram cada vez mais populares para a produção de acelerômetros (ANDREJAŠIĆ; POBERAJ, 2008).

Chollet e Liu (2016) apontam as vantagens da utilização de MEMS como sendo a miniaturização, a possibilidade de se tirar proveito de fenômenos físicos que ocorrem apenas em escalas microscópicas ou menores, e o desenvolvimento de ferramentas que operam e permitem explorar tais escalas com baixos custos. No escopo deste trabalho, no qual são utilizados acelerômetros MEMS, a principal vantagem a ser explorada é a miniaturização, que implica em componentes de menores custos e que interferem menos no comportamento da estrutura a ser estudada.

Sensores de qualquer tipo se baseiam em um processo de transdução, isto é, na capacidade de converter um tipo de energia presente no fenômeno estudado em uma energia dentro do sistema de sensoriamento, de modo a permitir a quantificação do fenômeno. Na Tabela 2-4 são apresentados os tipos de transdução, juntamente com as propriedades físicas medidas e natureza do sinal gerado, adequados para sensores MEMS.

Tabela 2-4: Princípios utilizados em sensores MEMS (CHOLLET; LIU, 2016).

Tipo de transdução	Propriedade física medida	Sinal primário gerado
Piezoresistivo	Tensão/deformação	Resistência
Capacitivo	Deslocamento	Capacitância
Piezoelétrico	Tensão/deformação	Carga elétrica
Indutivo	Deslocamento	Relutância

Os acelerômetros comerciais atuais são piezoresistivos ou capacitivos (DAS; SAHA, 2018). Segundo estes autores, acelerômetros capacitivos possuem a vantagem de não apresentarem variações significativas com mudanças na temperatura, ao contrário dos piezoresistivos. Os acelerômetros capacitivos apresentam uma banda de frequências mais adequada à vibrações estruturais e um baixo nível de ruídos (KAVITHA; DANIEL; SUMANGALA, 2016a).

O princípio de funcionamento de acelerômetros MEMS capacitivos, utilizados nesse trabalho, é medir a aceleração com base em variações de capacitância provocadas por mudanças na geometria de um capacitor. De Halliday, Resnick e Walker (2012), a capacitância de um capacitor de placas paralelas é uma propriedade dependente dos seguintes fatores:

$$C \propto \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{g} \quad (2-23)$$

em que ϵ_0 é a constante de permissividade do vácuo, ϵ_r é a constante dielétrica do meio entre as placas do capacitor, A é a área das placas, e g é a distância entre as placas, conforme ilustrado na Figura 2-15.

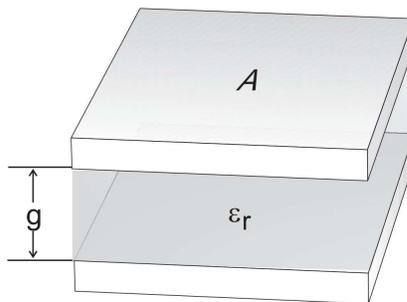


Figura 2-15: Fatores que influenciam na capacitância (CHOLLET; LIU, 2016).

Uma topologia comum em acelerômetros MEMS capacitivos é a *comb-drive*, em que uma estrutura similar a um pente é utilizada para a massa de prova, com os “dentes” do pente, que são móveis por estarem ligados à massa de prova, formando capacitores com “dentes” que permanecem fixos. A Figura 2-16 apresenta (a) uma ilustração desse tipo de estrutura e (b) uma foto de micrografia de um sensor baseado nessa arquitetura.

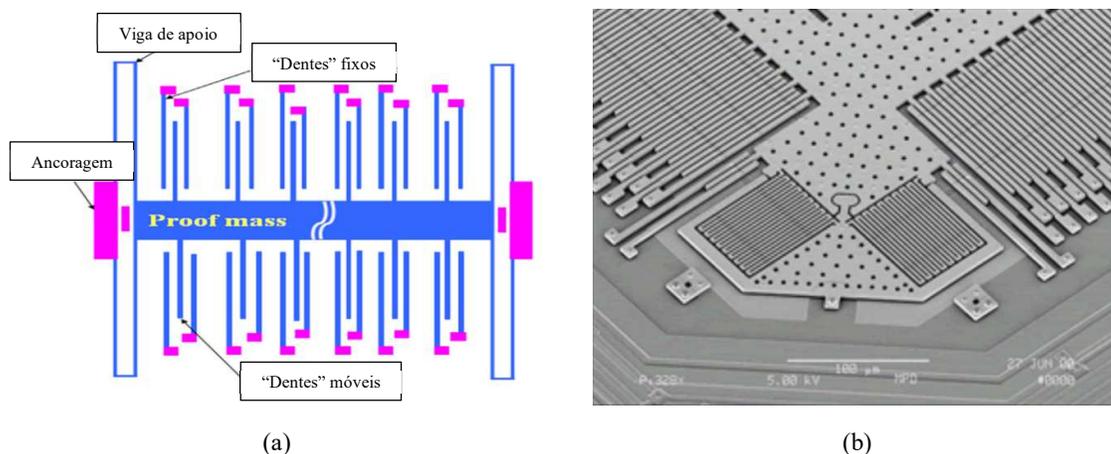


Figura 2-16: (a) Ilustração de um acelerômetro tipo *comb-drive*; (b) Micrografia de um acelerômetro MEMS capacitivo, mostrando as vigas de apoio e ancoragem e os dentes do capacitor *comb-drive*.(ACAR; SHKEL, 2003; KAVITHA; DANIEL; SUMANGALA, 2016b).

A massa de prova é a estrutura de detecção do sensor: na ocorrência de uma aceleração, a massa de prova sofre uma força inercial e se desloca, deslocando conjuntamente os dentes e alterando a área de sobreposição dos capacitores, o que, de acordo com a equação (2-23), altera a capacitância total do sistema. A variação na capacitância é traduzida em variação de voltagem por circuitos condicionadores de sinal, que podem estar integrados ao próprio MEMS.

Nesse ponto, diferenciam-se dois tipos de sensores: analógicos e digitais. De forma geral, os sensores analógicos produzem como sinal de saída uma variação contínua de voltagem, que é lida por sistemas de aquisição de dados capazes de convertê-lo em valores digitais por meio de um conversor analógico-digital (ADC) próprio. Como a conversão analógico-digital e o projeto de um ADC constituem dificuldades relativamente grandes, muitos sensores MEMS comerciais integram, em suas placas, conversores analógicos-digitais (ADC) dedicados que já executam o processo de conversão, entregando ao sistema de aquisição um valor digital, cuja leitura é mais simples.

2.4.3 Aplicações na Engenharia Civil

A utilização de sistemas baixo custo, baseados em Arduino, e acelerômetros MEMS é explorada há algum tempo na área de Engenharia Civil, principalmente para monitoramento dinâmico de estruturas, monitoramento da integridade estrutural, desenvolvimento de modelos didáticos e desenvolvimento de sistemas de ensaio de baixo custo.

Andò, Baglio e Pistorio (2014) e Andò, Baglio e Pistorio (2018) apresentaram o desenvolvimento de um sistema de baixo custo com múltiplos sensores para alertas sobre a

condição de estruturas sob terremotos, baseado em placas de Arduino Uno conectadas em uma rede sem fio. Após caracterização experimental do sensor utilizado (MMA 7361) e avaliações comparativas com outros dispositivos comerciais, simulando situações reais de terremotos, os autores confirmaram que sistemas de baixo custo, baseados na plataforma Arduino, podem ser utilizados em sistemas de sensoriamento.

Peralta *et al.* (2014) apresentaram o desenvolvimento de um sistema similar, denominado SAVER, para monitoramento de risco sísmico em edifícios, baseado em uma rede de acelerômetros de baixo custo e placas Arduino Uno, conectados a uma rede de dados *web*, que permite o acesso remoto aos dados experimentais obtidos em campo. Sun *et al.* (2015) reportaram o desenvolvimento de um sistema sem fio, composto por placas Arduino Due, acelerômetros ADXL 345, e sistemas ADC desenvolvidos pelos autores, o qual foi ensaiado experimentalmente em um modelo de pórtico *shear-building* de três andares sob uma mesa sísmica.

Duc, Anh e Dinh (2017) apresentaram o uso da plataforma Arduino para avaliação de parâmetros modais (frequências, amortecimento e modos de vibração) de um modelo de viga engastada e livre. Os autores utilizaram a placa Arduino Uno, juntamente com o acelerômetro ADXL 345, e compararam sua performance com um sistema de monitoramento profissional, atestando o bom desempenho do sistema de baixo custo nas condições experimentais utilizadas. Patel e Patel (2017) apresentaram um uso similar da placa Arduino Uno, com o acelerômetro ADXL 335, para monitoramento da condição de peças mecânicas por meio do monitoramento do seu comportamento dinâmico. Varanis, Silva e Mereles (2018) reportaram o uso da placa Arduino Mega e dos acelerômetros ADXL 335 e MPU 6050 para monitorização das frequências naturais de um modelo de pórtico *shear-building* de três andares, atestando o bom desempenho do sistema utilizado.

Lo Iacono, Navarra e Oliva (2017) reportaram o desenvolvimento de um sistema de sensoriamento remoto de baixo custo, vinculado a um armazenamento na nuvem de baixo, e que utiliza o acelerômetro MPU 6000 e um microcontrolador especialmente projetado para o sistema. O trabalho também reportou a aplicação do sistema no monitoramento contínuo de um viaduto recentemente danificado por um deslizamento de terra, sendo que resultados preliminares indicaram a robustez e confiabilidade do sistema.

Kavitha, Daniel e Sumangala (2016) apresentaram o projeto e desenvolvimento de acelerômetros MEMS piezoresistivos e capacitivos especificamente para monitoramento da

saúde estrutural de estruturas de concreto sob eventos sísmicos. Bedon *et al.* (2018) apresentaram o desenvolvimento e caracterização de um sistema de monitoramento, baseado em uma placa para aquisição de dados desenvolvida pelos autores e um acelerômetro MEMS de baixo custo, e a subsequente aplicação para monitoramento das frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento de uma ponte estaiada.

2.5 CONCEITOS DE METROLOGIA

A ISO 5725:1994 (ISO, 1994), que é a norma internacional para validação metrológica de métodos quantitativos, ganhou recentemente uma tradução brasileira sob o nome NBR ISO 5725 (ABNT, 2018a), composta por seis partes. Para compreensão dessa norma é necessário a utilização da NBR ISO 3534-1 (ABNT, 2010), que padroniza vocabulário e símbolos utilizados em estatística e probabilidade, também tradução de uma norma originalmente da ISO (*International Organization for Standardization*). O *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms – VIM*, publicado pela JCGM (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY, 2012), também é um documento relevante para a área de metrologia na padronização de terminologias em análises metrológicas, embora se aplique à língua inglesa e francesa apenas.

A análise metrológica de um método quantitativo implica em definir sua exatidão. A NBR ISO 5725 (ABNT, 2018a) utiliza dois termos para descrição da exatidão: veracidade e precisão. Segundo a norma, a precisão de um método se refere ao grau de concordância entre um conjunto de resultados, enquanto a veracidade se refere ao grau de concordância entre a média aritmética de um conjunto de resultados e o valor verdadeiro da propriedade investigada. A Figura 2-17 ilustra graficamente esses conceitos, utilizando a analogia de um alvo.

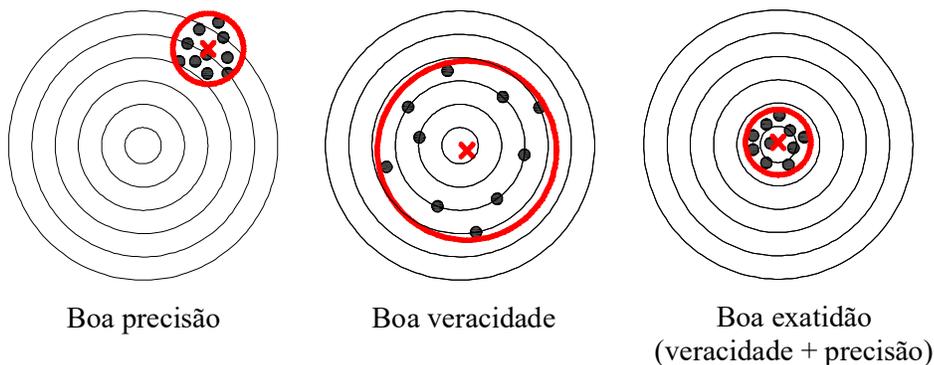


Figura 2-17: Conceitos de exatidão, precisão e veracidade, utilizando a analogia de um alvo.

Não é incomum, seja devido à tradução livre de termos de outras línguas ou a costumes próprios de áreas do conhecimento específicas, que esses conceitos adquiram outros sentidos ou sejam substituídos por outros (*e.g.* precisão por acurácia e veracidade por tendência). Assim, é importante tomar como referência uma norma metrológica e um vocabulário oficial que, no caso do Brasil, e no âmbito do presente trabalho, são, respectivamente, a NBR ISO 5725-Partes 1, 2 e 4 e NBR ISO 3534- Parte 1 (ABNT, 2010, 2018a, 2018b, 2018c).

Como ilustrado na Figura 2-17, a precisão avalia a variabilidade intrínseca do método considerado, considerando a dispersão relativa entre repetições feitas em uma mesma amostra ou amostras consideradas idênticas. Repetições de um ensaio em materiais e situações consideradas idênticas normalmente não produzem resultados idênticos devido a diversas fatores de erros. A NBR ISO 5725 divide tais fatores em seis grupos, relativos à fonte geradora do erro:

- a) Operador: diversos métodos de ensaio são sensíveis à mudança do operador (*e.g.* um operador agita uma solução com maior energia, ou possui um tempo de reação menor no momento de interromper um cronômetro);
- b) Equipamento utilizado: os equipamentos utilizados nos ensaios podem ter variações pequenas, não relacionadas à calibração, mas que afetam o método (*e.g.* as pás de um misturador podem ter sido fabricadas mais esbeltas, ou o motor girar em uma velocidade menor que em outros);
- c) Calibração do equipamento: os procedimentos de calibração possuem uma faixa de variação, sendo que equipamentos diferentes, ambos considerados calibrados, podem apresentar leituras diferentes em uma mesma propriedade;
- d) Ambiente: o ambiente onde o ensaio é realizado pode interferir no resultado obtido (*e.g.* variações de temperatura, umidade, poluição, luminosidade);
- e) Intervalo de tempo entre medições: a amostra pode sofrer modificações significativas entre aferições muito espaçadas (*e.g.* na medição do módulo de elasticidade do concreto nas primeiras idades por métodos pontuais, como compressão clássica, repetições em uma mesma idade devem ser feitas o mais próximo possível para evitar que o módulo se desenvolva significativamente entre duas repetições consecutivas);
- f) Variabilidade intrínseca das amostras: amostras podem apresentar variabilidades devido a possíveis heterogeneidades do objeto estudado ou do processo de amostragem (*e.g.* dois corpos de prova de concreto produzidos da mesma batelada podem apresentar relações diferentes de água/cimento ou agregado/pasta capazes de afetar ensaios).

Para descrição da precisão de um método, avalia-se a variabilidade em duas condições extremas da variabilidade: repetibilidade e reprodutibilidade. Na condição de repetibilidade, a variabilidade de repetições do método é avaliada em uma condição de ensaio na qual os fatores a) a e) são controlados e não introduzem variação nos resultados. Já na condição de

reprodutibilidade, permite-se que todos os fatores atuem. Dessa forma, a repetibilidade é a situação de menor variabilidade e a reprodutibilidade a de maior. Dentre os fatores apresentados anteriormente, o único fator realmente incontrolável é a variabilidade das amostras, por ser uma característica do próprio material estudado. A precisão é expressa em termos de desvio-padrão para as condições de repetibilidade e reprodutibilidade.

Para avaliar a veracidade, compara-se resultados do método com o valor verdadeiro para a grandeza medida. Como nem sempre é possível obter tal valor, a norma permite tomar o resultado de um ensaio já normatizado e amplamente utilizado como valor verdadeiro. A veracidade é expressa em termos de tendência, que, segundo a NBR ISO 3534-1 (ABNT, 2010), refere-se à expectativa do erro de estimação, isto é, no intervalo de valores em torno da média dentro do qual espera-se que os resultados do método se localizem. A tendência estima a quantidade de erros sistemáticos no método de mensuração, que desviam o valor medido de forma consistente do valor tomado como real, seja subestimando-o ou superestimando-o.

Nas avaliações metrológicas propostas pela norma, é necessária uma análise estatística prévia para identificação de dados suspeitos e aberrantes. Essa análise permite identificar erros significativos que sejam devidos a fatores não esperados ou aceitáveis, e que não ocorreriam caso o método de ensaio tenha sido executado corretamente. Os testes utilizados pela norma são o teste de h e k de Mandel, Cochran e Grubbs, cujo uso é detalhado na NBR ISO 5725 (ABNT, 2018a). De forma geral, os testes consistem em calcular um índice estatístico e compará-lo a valores críticos que definem intervalos de classificação para dados normais, suspeitos, ou aberrantes.

3 METODOLOGIA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

3.1.1 Delineamento geral

Este trabalho foi composto por quatro etapas: (1) projeto de um sistema de ensaio de baixo custo para execução do EMM-ARM; (2) validação do sistema de ensaio; (3) análise metrológica do sistema de ensaio; e (4) estudo de cimentos com distintas cinéticas de hidratação. Paralelamente à execução do trabalho, foi feito um processo de revisão bibliográfica contínua. A Figura 3-1 apresenta um fluxograma geral do trabalho.

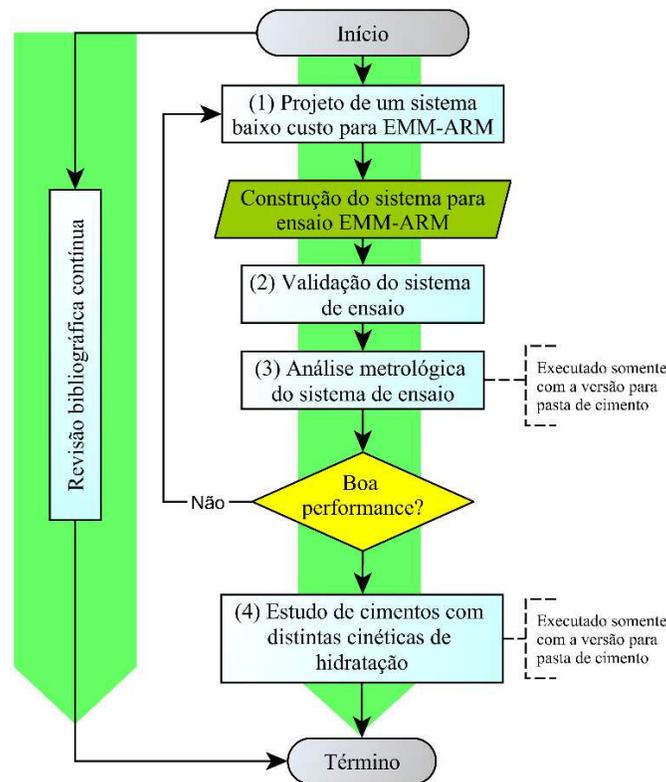


Figura 3-1: Fluxograma geral do trabalho.

O desenvolvimento do sistema de baixo custo para o ensaio EMM-ARM envolveu a construção das versões para pasta de cimento e concreto, que, conforme apresentado no item 2.3.1, engloba as peças mecânicas (apoios, moldes e vedações dos moldes) e sistema de aquisição de dados, e a implementação do *software* de processamento de dados. As peças mecânicas utilizadas nesse trabalho, detalhadas no item 3.1.2, foram fabricadas a partir das

soluções propostas por Granja (2016) e Azenha *et al.* (2012a), não sendo objetos de desenvolvimento, estudo ou análises no presente trabalho.

3.1.2 Apoios, corpos de prova e fontes de vibração

Os apoios e corpos de prova adotados neste trabalho foram oriundos de pequenas adaptações feitas nas soluções otimizadas propostas por Granja (2016), apresentadas no item 2.3.1 e na Figura 2-7. A Figura 3-2 e a Figura 3-3 apresentam as configurações de ensaio EMM-ARM utilizadas neste trabalho.

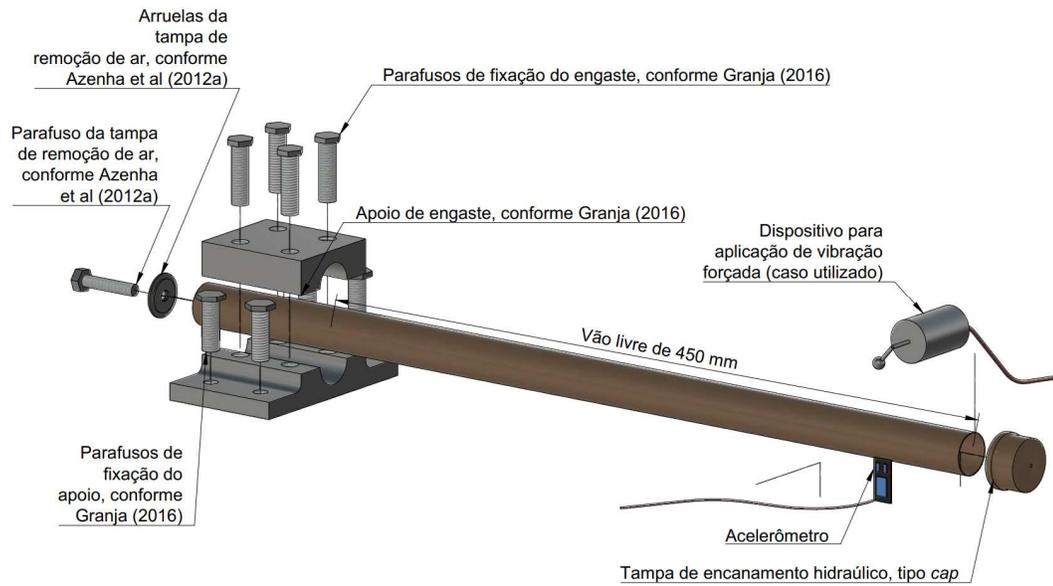


Figura 3-2: Configuração utilizada nos ensaios EMM-ARM em pasta de cimento, para vibrações ambiente e forçada.

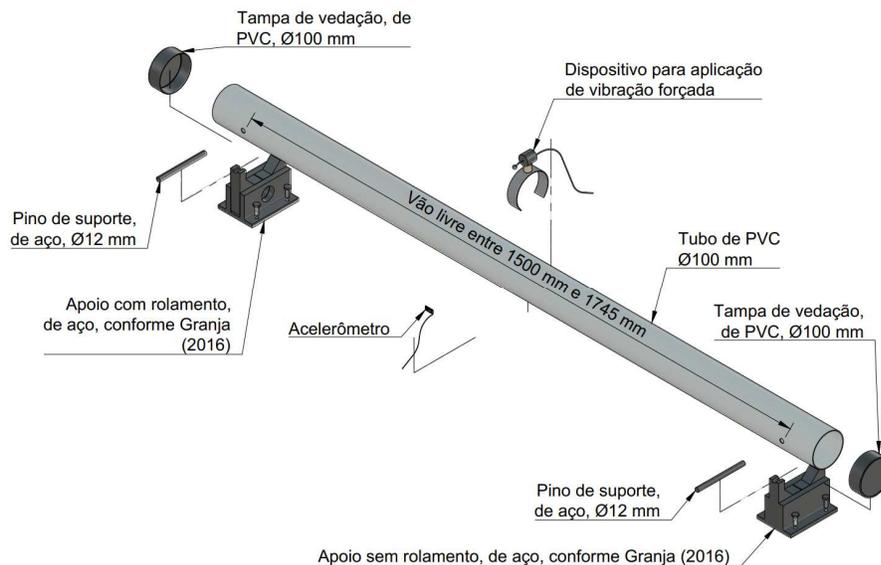


Figura 3-3: Configuração utilizada nos ensaios EMM-ARM em concreto, para vibração forçada.

Na versão para pasta de cimento, o tubo acrílico do corpo de prova foi substituído por um tubo de PVC, típico de instalações hidráulicas de água fria, de ½ polegada ou 25 mm, sendo conservado o vão livre sugerido de 45 cm. Na extremidade livre do tubo, foram utilizadas tampas próprias de encanamento, comercialmente denominadas *caps*, soldadas com cola própria para PVC previamente à moldagem. Já na extremidade que fica próxima ao engaste, foram utilizadas tampas para remoção de ar baseadas nas recomendações de Azenha *et al.* (2012a), formadas por duas arruelas de metal e uma porca coladas entre si, que permitem, após seu posicionamento e fixação, com massa de calafetar e fita adesiva, na extremidade do tubo de PVC a ser tampada, a introdução progressiva de um parafuso, a ser rosqueado até que todo o ar no interior do tubo seja expulso e comecem a surgir extravasamentos pela massa de calafetar. Nesse instante o rosqueamento é interrompido, novas camadas de vedação são aplicadas à tampa, e o processo de moldagem é finalizado. A Figura 3-4 apresenta a tampa utilizada.



Figura 3-4: Tampa para expulsão de ar: (a) fundo, que fica no interior do tubo; (b) topo, no qual é colada uma rosca; (c) tampa vista de cima e parafuso; (d) rosqueamento do parafuso na tampa.

Conforme indicado na Figura 3-2, neste trabalho foram utilizadas, nos ensaios em pastas de cimento, configurações de ensaio sob vibração ambiente e vibração forçada. A configuração de ensaio sob vibração ambiente se baseou na proposta de Azenha *et al.* (2012a), que utilizou um ventilador direcionado aos corpos de prova do ensaio para potencializar a vibração ambiente.

Já a vibração forçada foi inspirada na proposta de Granja (2016), que utilizou um atuador eletromagnético para realização do ensaio EMM-ARM em concreto e demonstrou que

seu uso pode melhorar a precisão do ensaio EMM-ARM em ambientes muito ruidosos. Neste trabalho, após estudos preliminares apresentados no APÊNDICE A, desenvolveu-se o dispositivo de excitação, para aplicação de vibração forçada, apresentada na Figura 3-5, composto por um motor com uma carga excêntrica fixada ao seu eixo. Seu princípio de funcionamento se baseia no giro do motor que, devido à excentricidade da carga, aplica uma carga normal ao eixo de rotação do motor, gerada pela inércia da carga. Durante o ensaio, o motor é fixado ou à extremidade livre, nos corpos de prova de pasta de cimento, ou no centro do vão, nos corpos de prova de concreto. Para que os sistemas de monitoramento pudessem controlar os motores de excitação, mas se mantivessem eletricamente isolados dos ruídos gerados pelos motores, foi desenvolvido um módulo de controle, ao qual os sistemas de monitoramento foram conectados e a partir do qual eram capazes de controlar a potência e duração dos giros.



Figura 3-5: Motor com carga excêntrica para aplicação vibração forçada.

Na versão para concreto, o tubo de PVC seccionado ao longo do comprimento e unido com abraçadeiras de alumínio, mostrado na Figura 2-7, que visa permitir a reutilização do tubo, foi substituído por um tubo inteiriço de PVC, típico de instalações de esgoto, de diâmetro igual a 100 cm, sendo, portanto, não reutilizável. As tampas utilizadas foram tampas próprias para encanamento, soldadas com cola apropriada para encanamentos e cola quente. Os pinos de apoio foram feitos de aço, com diâmetro igual a 12 mm. Conforme indicado na Figura 3-3, foram utilizados dois comprimentos livres para os corpos de prova de concreto: 1500 mm e 1745 mm.

Além disso, nos ensaios de concreto utilizou-se somente a configuração de ensaio voltada para a vibração forçada. A utilização de uma fonte de excitação forçada é imprescindível para execução do ensaio EMM-ARM em concretos com o sistema de monitoramento desenvolvido neste trabalho. Em testes preliminares, identificou-se que a condição de vibração ambiente, mesmo potencializada com uso de um ventilador, não é capaz de provocar um nível de excitação detectável pela sensibilidade dos acelerômetros utilizados

neste trabalho. Somente com a utilização do dispositivo da Figura 3-5 foi possível realizar o ensaio EMM-ARM em concretos. Detalhes adicionais a respeito da configuração de ensaio em concretos são apresentados no item 3.3.2.2.

3.1.3 Protocolo do ensaio EMM-ARM e do processamento dos dados experimentais

Em todos os ensaios EMM-ARM realizados, utilizou-se uma taxa de amostragem de 860 Hz, suficientemente alta para detecção da frequência fundamental dos corpos de prova utilizados, e amostragens durante 90 segundos em intervalos de cinco minutos. Nos ensaios EMM-ARM com vibração forçada, os motores foram ativados durante 30 ms nos ensaios em pasta de cimento, e 200 ms nos ensaios em concreto, na potência nominal dos motores, sendo que, imediatamente após o término do tempo de acionamento dos motores, dava-se início às amostragens, simulando-se uma situação de impulso seguido de vibração livre.

Todos os dados experimentais foram processados com o *software* de processamento de dados desenvolvido neste trabalho, utilizando-se a identificação modal *peak-picking* realizada sobre as estimativas do PSD, obtidas pelo procedimento de Welch, conforme detalhado no item 4.1.1. Os PSD foram obtidos a partir de segmentos de 16384 pontos, com uma sobreposição de 50%, e filtrados por uma janela Hamming. Antes da identificação modal, a média da amostra era removida para reduzir a presença de ruídos de corrente (DC) contínua. Um filtro passa-alta de frequência, com frequência de corte de 2 Hz, foi utilizado para remover completamente a presença de sinais de corrente contínua (DC) no domínio da frequência. Filtros passa-baixa Butterworth de 8ª ordem e filtros rejeita-faixa foram aplicados para remover ruídos persistentes, embora somente em algumas amostras e não de uma forma sistemática, sendo explicitados, ao longo do texto, os casos que necessitaram tal intervenção.

Previamente a todos os ensaios EMM-ARM, eram realizados ensaios EMM-ARM com os tubos vazios utilizados para armazenagem das amostras. Estes ensaios visavam estimar o módulo de elasticidade do material dos tubos, que é necessário na estimativa do módulo de elasticidade das amostras. Os tubos também eram medidos (diâmetro interno e externo, e comprimento total) e pesados.

3.1.4 Protocolos de mistura e moldagem

3.1.4.1 Protocolo de mistura de pastas de cimento

O procedimento de mistura de pastas de cimento consistiu em uma adaptação da NBR 16606 (ABNT, 2018d): (i) verter toda a água na cuba, com o superplastificante já adicionado; (ii) adicionar o cimento durante até 60 s. Caso a operação de adição do cimento termine antes dos 60 s, deixa-se o conjunto em repouso até se completar esse tempo; (iii) misturar o conjunto em velocidade baixa (velocidade em rpm conforme NBR 1660); durante 60 s; (iv) interromper a mistura e raspar as bordas da cuba e pás do misturador por 30 s; (v) retomar a mistura, na velocidade alta (velocidade em rpm conforme NBR 16606).

3.1.4.2 Moldagem dos corpos de prova de pasta de cimento para EMM-ARM

A moldagem de cada corpo de prova de pasta de cimento do EMM-ARM levou de 6 a 8 minutos e foi feita com auxílio de uma seringa de 100 mL, uma mangueira de plástico flexível de 8 mm de diâmetro, e um vibrador portátil. O tubo de PVC utilizado como molde foi previamente fechado em sua extremidade a permanecer livre durante o ensaio, com a outra extremidade permanecendo aberta para permitir a inserção do material.

O procedimento de moldagem consistiu em: (i) inserir 100 mL de pasta no tubo a ser moldado utilizando a seringa e a mangueira flexível, inserida até o fundo do tubo; (ii) aplicar vibração no fundo do tubo por 30 s; (iii) repetir os passos (i) e (ii); (iv) completar com pasta o volume restante do tubo, em um processo simultâneo de preenchimento e remoção da mangueira flexível; (v) aplicar vibração no fundo do tubo por 30 s; (vi) vedar a extremidade aberta com a tampa para expulsão de ar, procedendo conforme descrito no item 3.1.2.

3.1.4.3 Moldagem dos corpos de prova de concreto para EMM-ARM

A moldagem de cada corpo de prova de concreto do EMM-ARM levou aproximadamente 15 minutos, sendo necessários pelo menos dois operadores. O tubo de PVC utilizado como molde foi previamente fechado, em uma das suas extremidades, com uma tampa de vedação de PVC. Os pinos de apoio foram previamente posicionados e fixados no tubo, e as furações de encaixe dos pinos no tubo de PVC vedadas com uso de cola quente.

Durante a moldagem os tubos foram mantidos na vertical, com uma pequena inclinação para permitir a inserção do concreto e seu deslizamento controlado até o fundo, evitando a

segregação que poderia ocorrer em uma queda abrupta. Enquanto um operador procedia com a inserção do concreto, o outro operador aplicava vibrações nas paredes do tubo por meio de uma agulha de vibração. Após o completo preenchimento do tubo, a tampa superior foi inserida e vedada com cola quente e fita crepe.

3.1.5 Determinação do módulo de elasticidade por métodos padrões

3.1.5.1 Compressão clássica

Para realização do ensaio de compressão clássica, seguiu-se a NBR 8522 (ABNT, 2017). Como a determinação do módulo de elasticidade de pastas de cimento não é normatizada no Brasil, adaptou-se a NBR 8522 (ABNT, 2017) quanto à dimensão dos corpos de prova, utilizando corpos cilíndricos de diâmetro igual a 5 cm e altura igual a 10 cm, conforme Pelisser, Gleize e Michel (2011). Para os ensaios de referência em concreto, utilizou-se corpos de prova de diâmetro igual a 10 cm e altura igual a 20 cm, conforme indicado na NBR 8522 (ABNT, 2017). A Figura 3-6 apresenta detalhes de execução do ensaio em um corpo de prova de pasta de cimento. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.

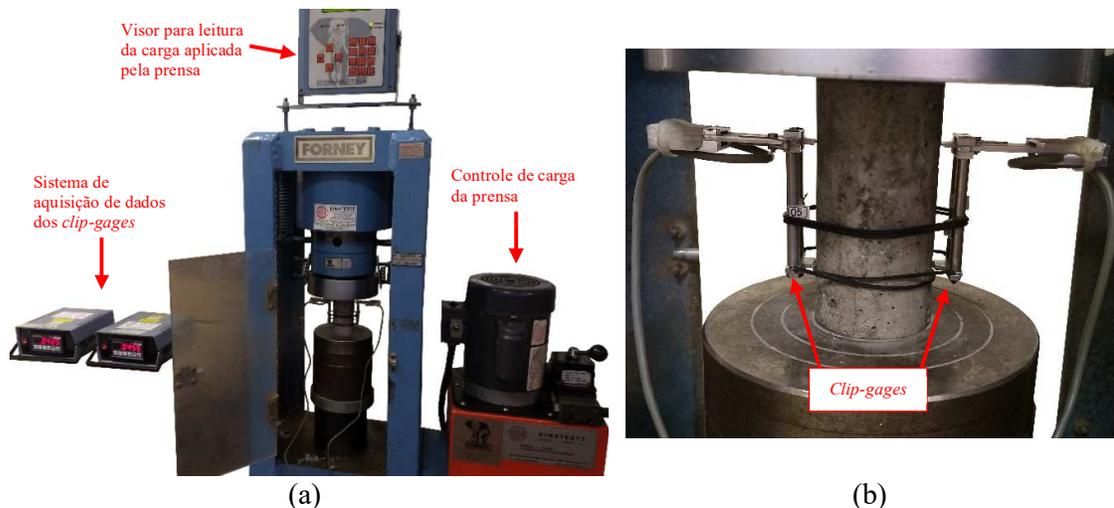


Figura 3-6: Ensaio de módulo de elasticidade estático por compressão clássica: (a) aparato de ensaio com prensa e sistema de aquisição; (b) detalhe do posicionamento dos *clip-gages* para medição de encurtamento.

3.1.5.2 Frequência ressonante

Para realização do ensaio de frequência ressonante, utilizou-se o sistema Sonelastic, produzido pela ATCP Engenharia Física (OTANI *et al.*, 2014), e as considerações da ASTM E1876-15 (ASTM, 2015). O sistema Sonelastic possui diferentes apoios adequados para

amostras de diferentes tamanhos. Neste trabalho, utilizou-se o apoio para pequenas amostras nos ensaios em pastas de cimento, apresentado na Figura 3-7, e o suporte ajustável para barras e cilindros modelo SA-BC, nos ensaios em concretos. Os ensaios de frequência ressonante foram realizados no Laboratório de Termo-Mecânica e Micro-Estrutura de Materiais Inteligentes, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília.

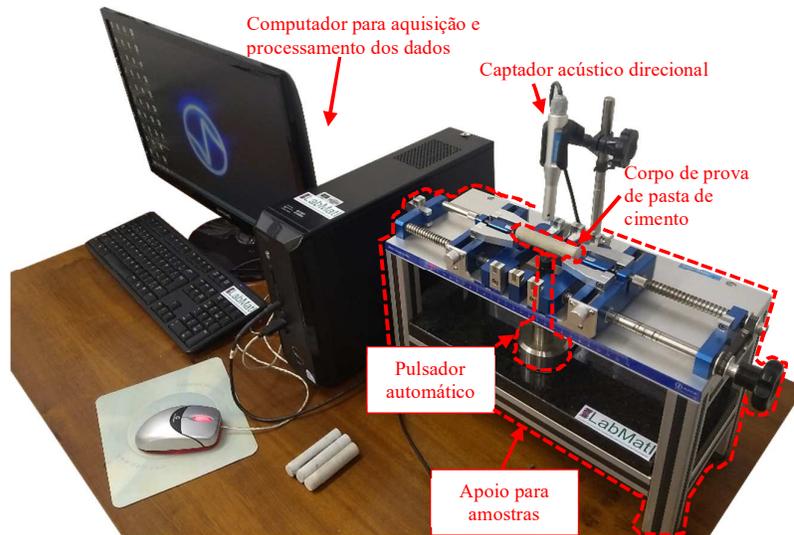


Figura 3-7: Sistema de ensaio Sonelastic utilizado para amostras em pastas de cimento.

Os corpos de prova de pastas de cimento foram cilindros de diâmetro 16 mm e altura entre 70 mm e 80 mm, em concordância com proporções sugeridas pela ASTM E1876-15 (ASTM, 2015). Estes corpos de prova foram moldados em tubos de PVC fechados, em uma das extremidades, por uma tampa rosqueada e serrados ao longo de seu comprimento para permitir a desforma das amostras. A Figura 3-8 ilustra os moldes e os corpos de prova utilizados nos ensaios em pastas de cimento. Os corpos de prova de concreto utilizados nos ensaios de frequência ressonante foram cilindros de diâmetro 10 cm e altura 20 cm, idênticos aos utilizados no ensaio de compressão clássica. Previamente ao ensaio de frequência ressonante, todos os corpos de prova foram medidos e pesados, conforme exigido pelo método de ensaio.



Figura 3-8: Corpos de prova para ensaio no sistema Sonelastic: (a) moldes; (b) corpos de prova.

3.2 ETAPA 1: PROJETO DE UM SISTEMA DE ENSAIO DE BAIXO CUSTO PARA EXECUÇÃO DO EMM-ARM

3.2.1 Delineamento geral

A Figura 3-9 apresenta o fluxograma da etapa de projeto do sistema de ensaio, com a descrição das suas subetapas. As subetapas realizadas nessa etapa servem simultaneamente a ambas as versões do sistema de ensaio. Todos os algoritmos desenvolvidos nesta etapa utilizaram o MATLAB versão 2017a como plataforma de programação.

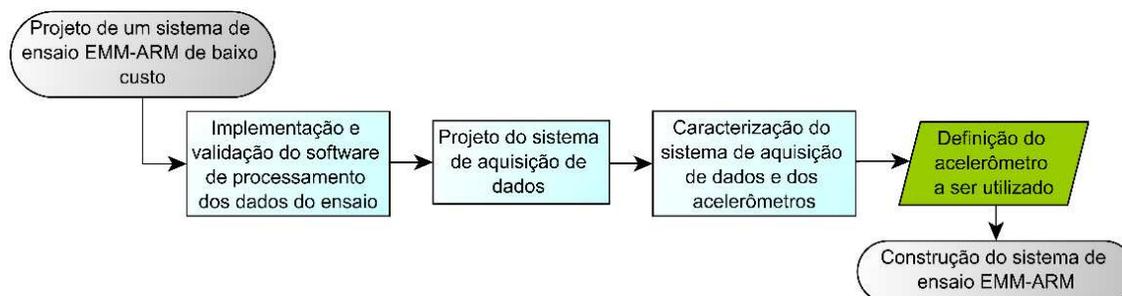


Figura 3-9: Fluxograma da Etapa 1.

3.2.2 Implementação e validação do software para processamento dos dados do ensaio

O *software* de processamento dos dados foi composto pelos seguintes módulos, a serem executados sequencialmente: (i) um algoritmo de identificação modal, cujo resultado fornecido é a identificação da frequência natural do sinal analisado; (ii) um algoritmo de cálculo do módulo de elasticidade do material a partir da frequência natural identificada pelo algoritmo anterior; (iii) um algoritmo de pós-processamento e apresentação gráfica dos dados. A plataforma de programação MATLAB R2017a foi escolhida para o desenvolvimento e validação do algoritmo devido à sua vasta biblioteca de funções já implementadas. No algoritmo de identificação modal, foi implementada a estimativa tanto das frequências naturais, quanto de seus respectivos coeficientes de amortecimentos. Embora para determinação do módulo de elasticidade apenas a frequência seja de interesse, novas aplicações do EMM-ARM sugerem o uso do amortecimento para monitoramento da evolução de propriedades viscoelásticas do material ensaiado (GRANJA, 2016). Justifica-se, portanto, a implementação de algoritmos capazes de identificar o amortecimento, embora sua utilização não faça parte do escopo deste trabalho.

A validação dos algoritmos desenvolvidos consistiu em executá-los com dados gerados artificialmente, dos quais já se conheciam os valores dos parâmetros a serem. Isso permitiu detectar e corrigir erros de implementação.

Para a validação do algoritmo de identificação modal, o MATLAB foi utilizado para gerar amostragens de sinais artificiais, definidos pela equação de um SMGL amortecido, com três graus de liberdade, dada por (CLOUGH; PENZIEN, 2003):

$$v(t) = \sum_{i=1}^3 e^{(-\xi_i \omega_i t)} \cdot \left[v(0) \cdot \cos(\omega_{D_i} t) + \left(\frac{\dot{v}(0) + v(0) \cdot \xi_i \cdot \omega_i}{\omega_{D_i}} \right) \sin(\omega_{D_i} t) \right] \quad (3-1)$$

em que ξ_i , ω_i , e ω_{D_i} são, respectivamente, o coeficiente de amortecimento, a frequência natural e a frequência natural amortecida, em rad/s, do i -ésimo modo de vibração, e $v(0)$ e $\dot{v}(0)$ são as condições iniciais referente à deformação e velocidade. As propriedades utilizadas para geração do sinal são apresentadas na Tabela 3-1.

Tabela 3-1: Propriedades do sinal.

Modo	$v(0)$	$\dot{v}(0)$	ξ (%)	f (Hz)
1	1	1	0.5	10
2			0.1	30
3			0.05	50

Essas propriedades foram escolhidas para simular as condições esperadas em um ensaio EMM-ARM realizado com as configurações de ensaio adotadas neste trabalho, conforme item 3.1.2: frequências de vibração espaçadas, frequências de vibração a serem identificadas variando na faixa de 10 Hz a 50 Hz, e valores baixos de amortecimento. A duração do sinal artificial foi de 90 segundos, e a frequência de amostragem foi de 700 Hz, se aproximando às condições de ensaio EMM-ARM utilizadas neste trabalho, conforme 3.1.2.

O algoritmo de identificação modal foi executado com o sinal artificial gerado, sendo considerado validado quando as frequências e coeficientes de amortecimento identificados se aproximassem satisfatoriamente das frequências inseridas no sinal, sendo admitidas pequenas diferenças devido a erros numéricos dos métodos de identificação adotados.

Para validação do algoritmo de cálculo do módulo de elasticidade foi utilizada a equação (4-1) em conjunto com uma sequência de valores de módulo de elasticidade simulando uma evolução típica de materiais cimentícios, produzida pela equação (3-5), para se produzir uma sequência de dados contendo uma sequência de frequências naturais típica de um ensaio EMM-ARM. O algoritmo de cálculo do módulo de elasticidade foi, então, executado com estes, sendo

considerado validado quando a evolução do módulo de elasticidade coincidissem com a sequência de valores de módulo de elasticidade inicialmente utilizados.

3.2.3 Projeto do sistema de aquisição de dados

O projeto do sistema de aquisição de dados consistiu na definição dos componentes eletrônicos necessários para execução do ensaio EMM-ARM, e na implementação do *script* de funcionamento a ser executado pelo sistema. Essas duas definições são interdependentes e foram desenvolvidas concomitantemente.

O protótipo do sistema foi concebido e montado inicialmente utilizando-se a placa de prototipagem Arduino Uno, juntamente com matrizes de contato (*solderless breadboards*), cabos de encaixe e módulos eletrônicos de sensores. Uma vez produzido um protótipo funcional, o sistema eletrônico foi transportado para uma placa perfurada soldável, na qual todos os componentes necessários foram soldados para se obter uma solução mais robusta para uso nos ensaios de validação, análise metrológica e aplicação.

3.2.4 Caracterização do sistema de aquisição de dados e dos acelerômetros

A Figura 3-10 apresenta o fluxograma da subetapa da caracterização dos acelerômetros e do sistema de aquisição de dados. Esta subetapa possuiu o objetivo de levantar informações que embasassem a escolha do acelerômetro a ser utilizado no construtivo do sistema de aquisição de dados final, para que este fosse capaz de executar o ensaio EMM-ARM adequadamente. O sistema de aquisição de dados utilizado nas avaliações dessa subetapa é o da versão protótipo. Ao final desta subetapa, foi construída a versão definitiva montada sob uma placa perfurada soldável.

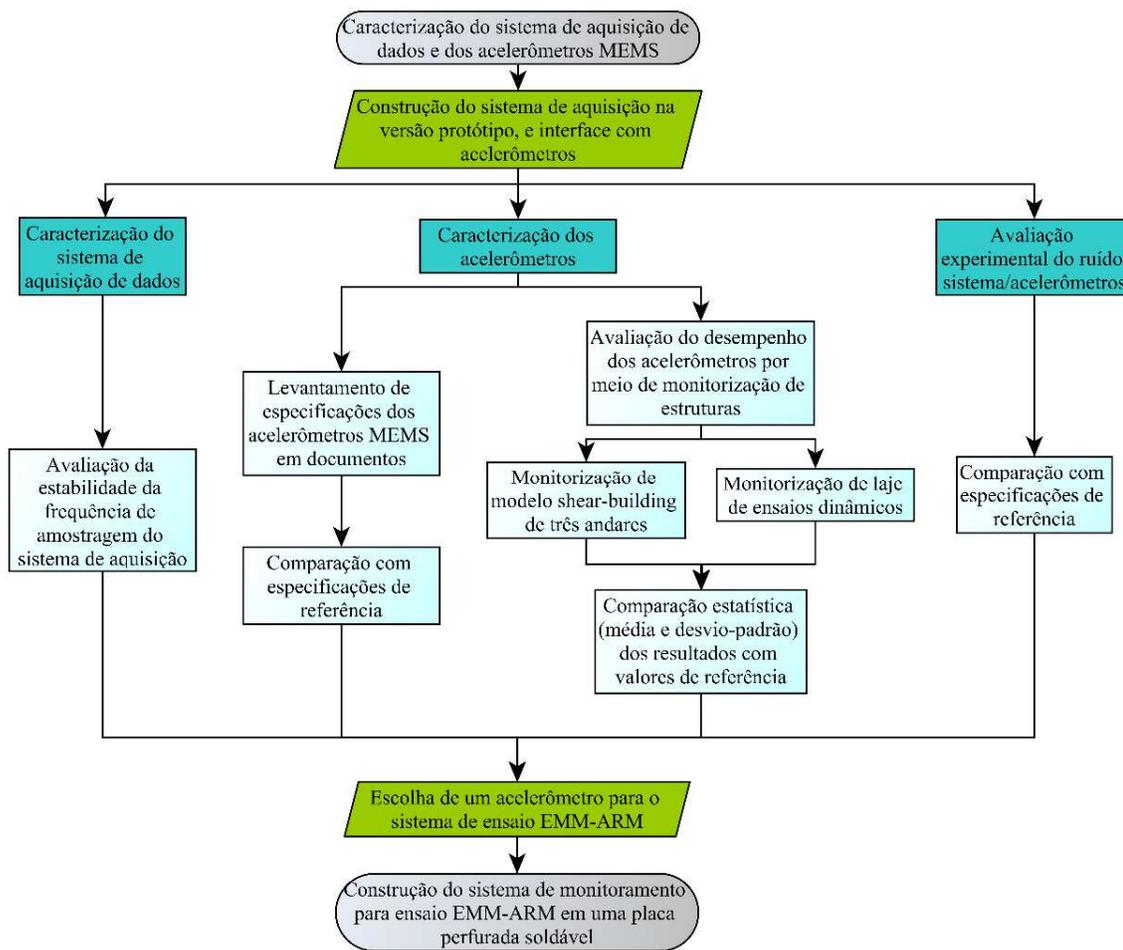


Figura 3-10: Fluxograma da subetapa de caracterização dos acelerômetros e do sistema de aquisição de dados.

A caracterização do sistema de aquisição de dados consistiu na avaliação da estabilidade da frequência de amostragem do sistema de aquisição de dados, identificando se há a ocorrência de discrepâncias ou heterogeneidades entre os intervalos de amostragens, e suas influências nos resultados de identificação modal. Tais avaliações são importantes pois os algoritmos de identificação modal implementados possuem a premissa de que todas as amostras de aceleração são igualmente espaçadas de um mesmo valor, admitindo que a frequência de amostragem seja constante durante toda a amostragem. Qualquer desvio dessa hipótese introduz erros na identificação modal do sinal.

Para a avaliação da estabilidade da frequência de amostragem do sistema de aquisição de dados, foram analisadas quatro séries de amostragens do sistema, compostas por, a cada amostragem, um valor de aceleração e o instante decorrido desde a última amostra. As séries foram executadas com uma frequência de amostragem teórica (*i.e.* programada no sistema de aquisição de dados, sendo diferente da frequência real devido a instabilidades naturais do

sistema eletrônico) de 860 Hz e foram analisadas as 69148 primeiras amostras de cada série. Sendo assim, caso o sistema se comportasse perfeitamente durante a amostragem, o intervalo entre duas amostras seria de, aproximadamente, 1163 μ s. As séries de dados de cada amostragem foram utilizadas para produção de histogramas de frequências e cálculo de estatísticas descritivas (média, mediana, desvio-padrão, assimetria e curtose), de forma a caracterizar sua distribuição. Em seguida, as quatro séries de intervalos entre amostras foram usadas para gerar amostragens artificiais de um sinal com frequências conhecidas, conforme descrito no item 3.2.2, simulando o comportamento real de amostragem do sistema de aquisição de dados. Os sinais artificiais obtidos foram processados pelo algoritmo de identificação modal, e o impacto da heterogeneidade da frequência de amostragem do sistema na precisão da identificação modal foi investigada.

A caracterização dos acelerômetros consistiu no estudo da adequação e desempenho de acelerômetros candidatos à incorporação ao sistema de monitoramento do ensaio EMM-ARM. Para tanto, foi realizada uma investigação preliminar das características dos acelerômetros escolhidos, comparando-se especificações informadas pelos seus fabricantes em documentações oficiais com valores de referência, reportados na literatura de conjuntos acelerômetro-sistema de aquisição de dados utilizados em ensaios EMM-ARM. Em seguida, foram realizadas determinações experimentais do desempenho dos acelerômetros na identificação modal de estruturas reais.

Os acelerômetros caracterizados são do tipo MEMs, de baixo custo e de fácil disponibilidade no mercado. A Tabela 3-2 apresenta os acelerômetros avaliados neste estudo, bem como o tipo (digital ou analógico), fabricante do sensor, *breakout board* utilizado neste trabalho, e o documento de especificação consultado para levantamento dos dados. Todos os acelerômetros são triaxiais, isto é, são capazes de medir aceleração em três eixos distintos.

Tabela 3-2 Acelerômetros MEMS avaliados.

Sensor	Tipo	Fabricante	<i>Breakout board</i>	Documento de especificação
MPU6050	Digital	InvenSense	GY-521	(INVENSENSE, 2013)
BMI160	Digital	Bosch Sensortec	GY-BMI160	(BOSCH SENSORTECH, 2015)
ADXL335	Analógico	Analog Devices	GY-61	(ANALOG DEVICES, 2010)
MMA8452	Digital	NXP Semiconductors	MMA845X module	(NXP SEMICONDUCTOR, 2016)
MMA7361	Analógico	NXP Semiconductors	MMA7361 Apex Electrix module	(NXP SEMICONDUCTOR, 2008)
MMA7455	Digital	NXP Semiconductors	Não identificado	(NXP SEMICONDUCTOR, 2009)

O termo *breakout board* se refere ao módulo utilizado, isto é, ao componente eletrônico que inclui o sensor e circuitos eletrônicos auxiliares (de interface de comunicação, de condicionamento de sinal, alimentação, etc.), que possibilita a interface imediata com o microcontrolador sem necessidade de circuitos adicionais. A Figura 3-11 apresenta os *breakout boards* dos acelerômetros avaliados, juntamente com uma escala milimétrica.

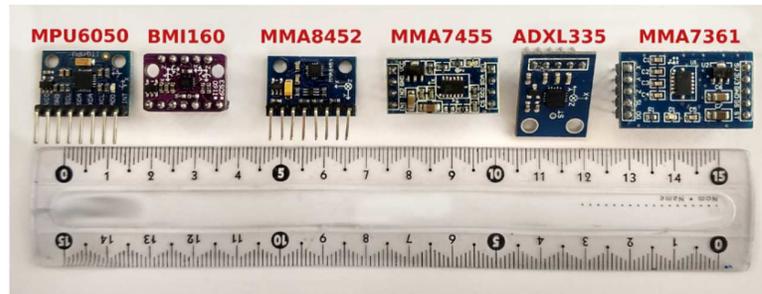


Figura 3-11: *Breakout boards* de acelerômetros MEMS analisados.

Para os acelerômetros analógicos (ADXL335 e MMA7361), um conversor analógico-digital (ADC) externo foi utilizado, para que o desempenho de tais sensores não fosse comprometido pelo ADC do microcontrolador, que possui características limitadas quando comparadas aos ADCs incorporadas nas *breakout boards* dos acelerômetros digitais. O ADC utilizado é o ADS1115, fabricado pela Texas Instruments, e com as especificações apresentadas na Tabela 3-3 (TEXAS INSTRUMENTS, 2018).

Tabela 3-3 Especificações principais do ADS1115. Adaptado de Texas Instruments (2018).

Especificação	Mínimo	Máximo
Energia	2 V	5.5V
Voltagens de entrada	± 0.256 V	± 6.144 V
Temperatura ambiente de operação	-40 °C	+125 °C
Resolução	16-bit	
Ganho	± 6.144 V, ± 4.096 V, ± 2.058 V, ± 1.024 V, ± 0.512 V, ± 0.256 V	
Taxa de amostragem	8, 16, 32, 64, 128, 250, 475, 860 Hz	
Variação na taxa de amostragem	-10%	+10%
Ruído	125 μ V _{RMS}	

As especificações tomadas como referência na previsão de adequação dos acelerômetros para o ensaio EMM-ARM são apresentadas na Tabela 3-4. Todas as referências consultadas utilizaram acelerômetros analógicos, sendo também levantadas as especificações do ADC utilizado e sua correspondente resolução, para permitir a comparação aos acelerômetros MEMS digitais.

Tabela 3-4 Especificações de referência de acelerômetros para EMM-ARM.

Especificações	Concreto ¹	Pasta de cimento ¹	Epóxi ²	Solo-cimento ²
Sensibilidade (V/g)	>10	>0,5	0,1	10
Escala de medição	±0,1 a ±0,5g	±0,5 a ±10g	±50g	±0,5g
Banda (Hz)	De 0,1 a 1000	De 1 a 1000	Até 10000	Até 1000
Frequência ressonante (Hz)	> 10.000	>10.000	>50.000	> 10.000
Acelerômetro	PCB 393B12	PCB 352B	PCB352C34	PCB393B12
ADC (resolução)	NI 4431 (24-bit)	NI 9234 (24-bit)	NI-9233 (24-bit)	NI-9233 (24-bit)
NSD ($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$) ³	0,13	2	3,4	0,13
Referência consultada	(GRANJA, 2016)	(GRANJA, 2016)	(GRANJA <i>et al.</i> , 2015)	(SILVA <i>et al.</i> , 2014a)

Notas:

1 – Requisitos informados na referência consultada.

2 – Para estas aplicações, não foram encontradas recomendações de requisitos na literatura. Assim, os valores apresentados são referentes às especificações dos acelerômetros utilizados em ensaios EMM-ARM reportados nas referências consultadas.

3 - Densidade espectral de ruído (NSD) para uma banda de 100 Hz.

A avaliação do desempenho dos acelerômetros foi feita pela monitorização de duas estruturas, um modelo de pórtico *shear-building* de três andares e uma laje de ensaios dinâmicos do Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília, e a comparação dos resultados obtidos com valores de referência das frequências identificadas. Para o modelo de pórtico *shear-building*, os valores de referência foram obtidos pela monitorização do mesmo pórtico com um acelerômetro modelo 752A13 da Endevco, com sensibilidade de 967,6 mV/g, um sistema de aquisição de dados da Lynx, composto por quatro placas do tipo AI 2164 com oito canais de aquisição cada, e um notebook com o *software* AqDados 7, por meio do qual o sistema de aquisição é configurado e os dados são visualizados e processados. Para a laje de ensaios dinâmicos, os valores de referência foram obtidos nos trabalhos de Carmona, Avila e Doz (2015) e Carmona, Avila e Doz (2017).

Na monitorização do pórtico, foi utilizado um ventilador para provocar excitações na estrutura, simulando uma condição de OMA, inspirado na configuração de ensaio EMM-ARM proposta por Azenha *et al.* (2012a). O ventilador foi posicionado a 70 cm do centro do pórtico e ajustado no modo de menor velocidade, que provoca um fluxo de ar médio de 0,790 m³/s e potência de 76,50 W (ELETROBRÁS, 2017). Os sensores foram posicionados na barra horizontal superior do pórtico, sendo alimentados pelo *notebook* e, quando necessário, por uma bateria de 9V.

Na monitorização da laje de ensaios dinâmicos, o sistema de aquisição e sensores foram posicionados no centro da laje, sendo alimentados por uma bateria de 9V. A laje foi excitada

por um impacto com calcanhar de uma pessoa de aproximadamente 70 kg localizada no seu centro, e monitorada durante a subsequente vibração livre. A Figura 3-12 apresenta as estruturas monitoradas e configurações de ensaio adotadas. Em ambas avaliações, a frequência de amostragem foi de 200 Hz para acelerômetros digitais e 250 Hz para acelerômetros analógicos, com amostragem de duração de 60 segundos.

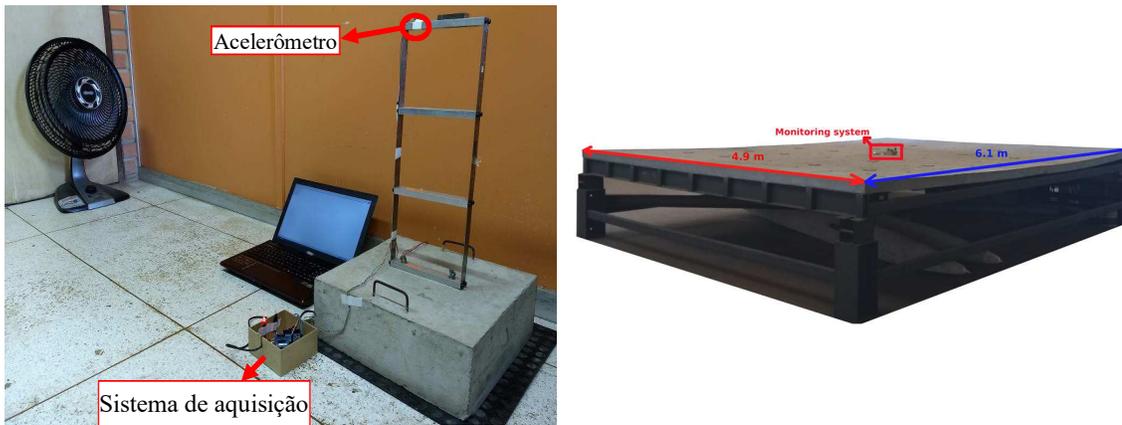


Figura 3-12: Configurações de ensaio para avaliação do desempenho dos acelerômetros.

Por fim, foi realizada a avaliação experimental do ruído dos conjuntos acelerômetro-sistema de aquisição de dados. A metodologia utilizada se baseou no trabalho de Kwong (2017), consistindo na determinação da densidade espectral de ruído e valor RMS (*root mean square* ou valor quadrático médio) do ruído. Os dados experimentais foram obtidos a partir de uma amostragem de 10 minutos, com frequências de amostragem de 200 Hz e 250 Hz para acelerômetros digitais e analógicos respectivamente, com o sistema de aquisição de dados e o sensor em um estado de absoluto repouso. Para promover o isolamento de vibrações ambientais indesejadas, os acelerômetros foram posicionados dentro de um bloco de espuma, conforme Figura 3-13. O conjunto foi posicionado sobre uma bancada de concreto rígida.

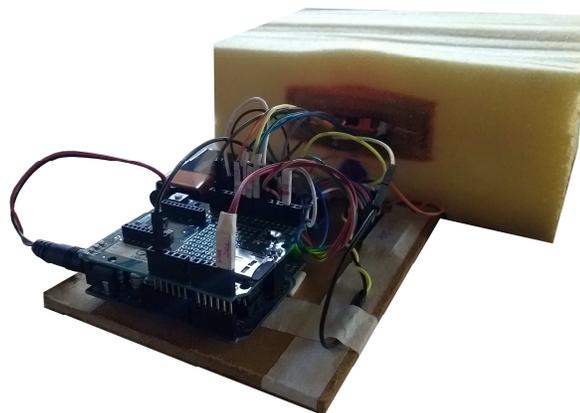


Figura 3-13: Configuração de ensaio para avaliação experimental do ruído.

A equação para cálculo da densidade espectral de ruído (NSD) na banda de interesse entre f_1 e f_2 é dada pela equação (3-2):

$$\text{NSD} = \sqrt{\frac{1}{f_2 - f_1} \cdot \sum_{f=f_1}^{f_2} |P(f)|} \quad (3-2)$$

Em que: f_2 é a maior frequência de interesse a ser detectada pelo acelerômetro; f_1 é a menor frequência de interesse, podendo ser tomada como 1/100 de f_2 de acordo com (KWONG, 2017); e $P(f)$ é a densidade espectral de energia no sinal na frequência f . Como as configurações do EMM-ARM utilizadas neste trabalho apresentaram frequências entre 10 Hz e 40 Hz, foi adotado um valor de f_2 igual a 100 Hz.

O valor RMS do ruído foi calculado pela equação (3-3):

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N a(i)^2} \quad (3-3)$$

Em que: N é o número total de amostras realizadas; e $a(i)$ se refere às amostras de aceleração no tempo. Detalhes metodológicos aprofundados das etapas de avaliação do desempenho dos acelerômetros na identificação modal de estruturas, e da avaliação experimental do ruído dos conjuntos acelerômetro-sistema de aquisição de dados, podem ser consultados em Ribeiro e Lameiras (2019). Os resultados de todas as etapas foram reunidos de forma a embasar a escolha de um dos acelerômetros da Tabela 3-2 para utilização no sistema para ensaios EMM-ARM. Uma vez escolhido o sensor, o sistema de monitoramento na versão soldada (Figura 4-2b) foi construído para utilização nas etapas subsequentes.

3.3 ETAPA 2: VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE ENSAIO

3.3.1 *Delineamento geral*

A partir dos resultados da Etapa 1, quatro sistemas de monitoramento na versão soldada (Figura 4-2b) foram construídos e utilizados nos estudos dessa etapa e das posteriores. As versões do sistema para ensaios em pasta de cimento e concreto foram validadas quanto a sua capacidade de monitorar a evolução do módulo de elasticidade dos materiais desde as primeiras idades. A validação foi feita comparando-se os resultados obtidos por meio do sistema com resultados de ensaios de referência de compressão clássica, realizado de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017), e frequência ressonante, realizado com o equipamento Sonelastic, obtidos em diferentes idades.

O ensaio EMM-ARM foi realizado até aproximadamente sete dias de idade com a pasta de cimento e dez dias com concreto. Cada ensaio EMM-ARM foi composto de quatro replicatas em pastas de cimento e de duas replicatas em concreto.

A validação da versão do sistema para ensaios em pasta foi feita considerando as duas formas de excitação dos corpos de prova apresentadas no item 3.1.2: ambiente, potencializada com o uso de um ventilador conforme a proposta original do ensaio; forçada, utilizando o dispositivo apresentado no item 3.1.2. Na validação do uso da vibração controlada, foi investigada a possibilidade de o dispositivo de vibração causar danos à amostra durante o ensaio, por vibração excessiva. Para isso, foram moldados, além dos corpos de prova submetidos normalmente ao ensaio EMM-ARM, corpos de prova extras, mantidos inicialmente em repouso ao lado do ensaio EMM-ARM em execução. Após três dias de ensaio EMM-ARM, iniciou-se o EMM-ARM nos corpos de prova em repouso. A obtenção de valores de módulo de elasticidade maiores para os corpos de prova inicialmente em repouso, quando comparados aos submetidos ao ensaio EMM-ARM sob vibração forçada desde após a moldagem, poderia sugerir que a vibração imposta foi demasiadamente alta e foi capaz de provocar danos na amostra durante o ensaio.

Já a validação da versão do sistema para ensaios em concreto foi feita somente com a forma de excitação forçada. Como discutido no item 3.1.2, o sistema de ensaio desenvolvido neste trabalho só é capaz de realizar o ensaio EMM-ARM em amostras de concreto se provocado um nível de vibração suficiente alto, que não ocorre sob condições de vibração ambiente.

3.3.2 Materiais, moldagem e valores de referência

3.3.2.1 Pasta de cimento

As pastas de cimento utilizadas nesta etapa foram produzidas com um cimento LC³ composto por 50% de clínquer, 15% de filer carbonático, 30% de argila calcinada, e 5% de gipsita em massa, e um cimento referência composto por 95% de clínquer e 5% de gipsita em massa. Estes cimentos são os mesmos utilizados na Etapa 4, tendo sido produzidos conforme descrito no item 3.5.3.

Foi utilizada uma relação água/cimento de 0,48 e consistência de 130 mm ± 5 mm no teste de mini-slump. A pasta feita com cimento referência não requereu ajuste da consistência com uso de superplastificante. Já a pasta feita com o cimento LC³ foi ajustada com o uso de 0,069%, em termos de sólidos, de superplastificante Glenium® 51, aditivo poli carboxílico produzido pela BASF, em relação ao peso do cimento. Como o superplastificante utilizado possui 30% de sólidos em suspensão aquosa, isso equivaleu à adição de 1,15g de aditivo superplastificante para cada 500 g de cimento.

No ensaio sob vibração ambiente, foi utilizado somente o cimento LC³ para produção das pastas. Na moldagem, foram produzidos quatro corpos de prova para ensaio de frequência ressonante no equipamento Sonelastic, de acordo com o item 3.1.5.2, e dois corpos de prova para ensaio EMM-ARM, nas dimensões apresentadas no item 3.1.2 e seguindo o protocolo de moldagem apresentado no item 3.1.4.2. Assim, a moldagem consistiu em uma batelada na proporção de 600 g de cimento LC³, 287,03 g de água, e 1,38 g de aditivo superplastificante.

No ensaio sob vibração forçada, foram utilizados os cimentos LC³ e referência. Na moldagem, foram produzidos quatro corpos de prova para ensaio de frequência ressonante e dois corpos de prova para o ensaio EMM-ARM, para cada cimento. Assim, a batelada para produção da pasta de cimento referência consistiu em 600 g de cimento e 288 g de água, e a batelada para produção da pasta de cimento LC³ foi idêntica à do ensaio anterior. A densidade específica da pasta, em ambas as moldagens, foi determinada preenchendo-se e pesando um recipiente de peso e volume conhecidos.

Os corpos de prova do Sonelastic foram utilizados para determinação do módulo de elasticidade em 3 idades distintas, fornecendo valores de referência para o ensaio EMM-ARM. Os resultados do ensaio de frequência ressonante, originalmente em termos de módulo de

elasticidade dinâmico, foram convertidos para valores estáticos utilizando-se a equação (3-4) sugerida por Neville (2012):

$$E_{\text{estático}} = 0,83 \cdot E_{\text{dinâmico}} \quad (3-4)$$

em que os valores de módulo de elasticidade estático e dinâmico possuem a mesma unidade. Os corpos de prova do Sonelastic foram envolvidos em plástico filme, para se evitar troca de umidade com o ambiente, e mantidos ao lado do ensaio EMM-ARM, sendo retirados somente durante a determinação do módulo de elasticidade por frequência ressonante. Tais procedimentos foram adotados para que as amostras de ambos ensaios, EMM-ARM e Sonelastic, possuíssem históricos de temperatura e umidade similares, e, portanto, apresentassem aproximadamente o mesmo desenvolvimento do módulo de elasticidade.

3.3.2.2 Concreto

O concreto utilizado foi usinado, sendo que a consistência verificada no ato de recebimento do caminhão-betoneira foi de 14 cm e a resistência à compressão média aferida aos 43 dias de idade foi de 17,70 MPa. Foram moldados três corpos de prova cilíndricos, de diâmetro igual a 10 cm e altura igual a 20 cm, que foram utilizados para realizar um ensaio de frequência ressonante, no equipamento Sonelastic, e um ensaio de determinação de módulo de elasticidade por compressão clássica, segundo a NBR 8522. O ensaio de frequência ressonante foi realizado em dois corpos de prova, sendo o valor do módulo de elasticidade estático obtido com o uso da equação (3-4). Posteriormente, realizou-se o ensaio de módulo de elasticidade estático, utilizando os três corpos de prova, com a resistência do concreto sendo estimada a partir de um corpo de prova e o módulo de elasticidade sendo determinado a partir dos outros dois corpos de prova restantes.

3.3.3 Configuração de ensaio

3.3.3.1 Pasta de cimento

A Figura 3-14 apresenta a configuração de ensaio utilizada na validação do sistema de ensaio para pastas de cimento sob condição de vibração ambiente. A figura é apenas ilustrativa das distâncias entre o ventilador e corpos e prova e posicionamento dos sistemas de aquisição de dados, pois o ensaio foi realizado somente com dois corpos de prova.

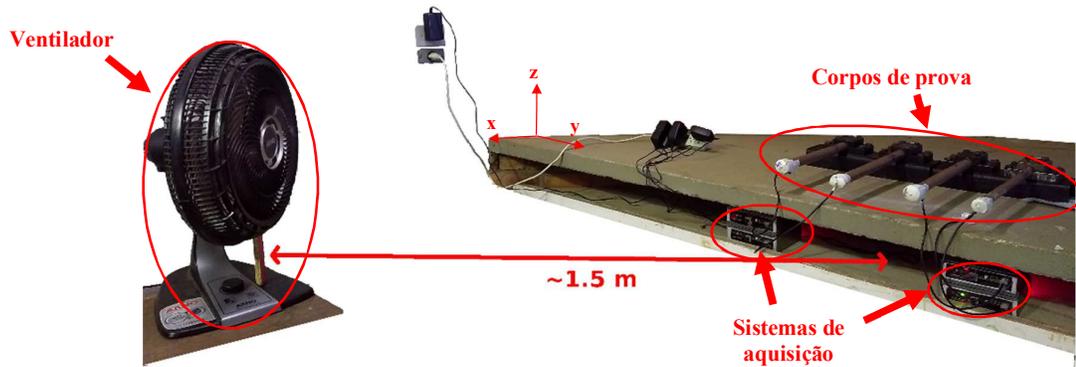


Figura 3-14: Configuração do ensaio EMM-ARM em pastas de cimento, sob condição de vibração ambiente.

Os acelerômetros foram posicionados de forma a medirem acelerações na direção do eixo z, conforme sistema de eixos indicado na Figura 3-14. Esta configuração de ensaio foi calibrada experimentalmente, equilibrando-se um nível de excitação capaz de produzir um SNR (razão sinal-ruído) razoável, mas sem induzir vibrações excessivas no corpo de prova. Fixou-se uma aceleração limite de 20 mg, com base em referências apresentadas por Granja (2016). O ventilador utilizado possui diâmetro de 45 cm e foi usado na sua menor velocidade, que possui fluxo de ar médio de $0,790 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma potência de 76,50 W (ELETROBRÁS, 2017).

A configuração de ensaio utilizada na validação do sistema de ensaio para pastas de cimento sob condição de vibração forçada, utilizando o excitador apresentado no item 3.1.2, é idêntica à da Figura 3-14, com apenas a retirada do ventilador e a fixação do excitador na extremidade livre do corpo de prova. A Figura 3-15 apresenta o excitador posicionado na extremidade livre do corpo de prova.

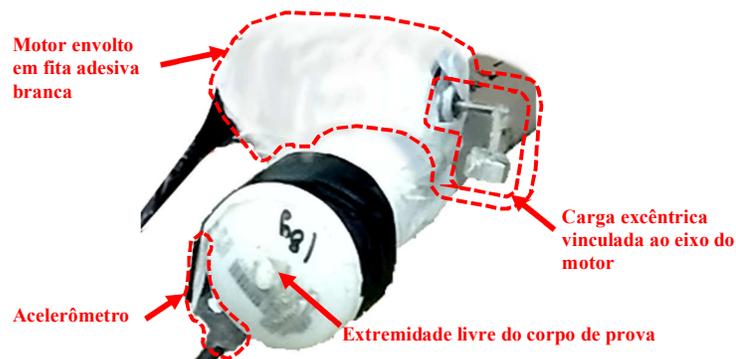


Figura 3-15: Excitador fixado na extremidade livre do corpo de prova.

3.3.3.2 Concreto

Com discutido nos itens anteriores, o sistema de ensaio desenvolvido neste trabalho só é capaz de realizar ensaios em amostras de concreto sob condições de vibração forçada, devido à necessidade de se excitar os corpos de prova em um nível compatível com a sensibilidade dos acelerômetros utilizados. Assim, a configuração de ensaio utilizada na validação do sistema de ensaio para concreto envolveu somente a versão sob vibração forçada.

A Figura 3-16 apresenta detalhes da configuração de ensaio utilizada, com os excitadores utilizados, os corpos de prova, a forma de fixação utilizada para permitir o livre giro da massa excêntrica, e o sistema de ensaio em funcionamento.

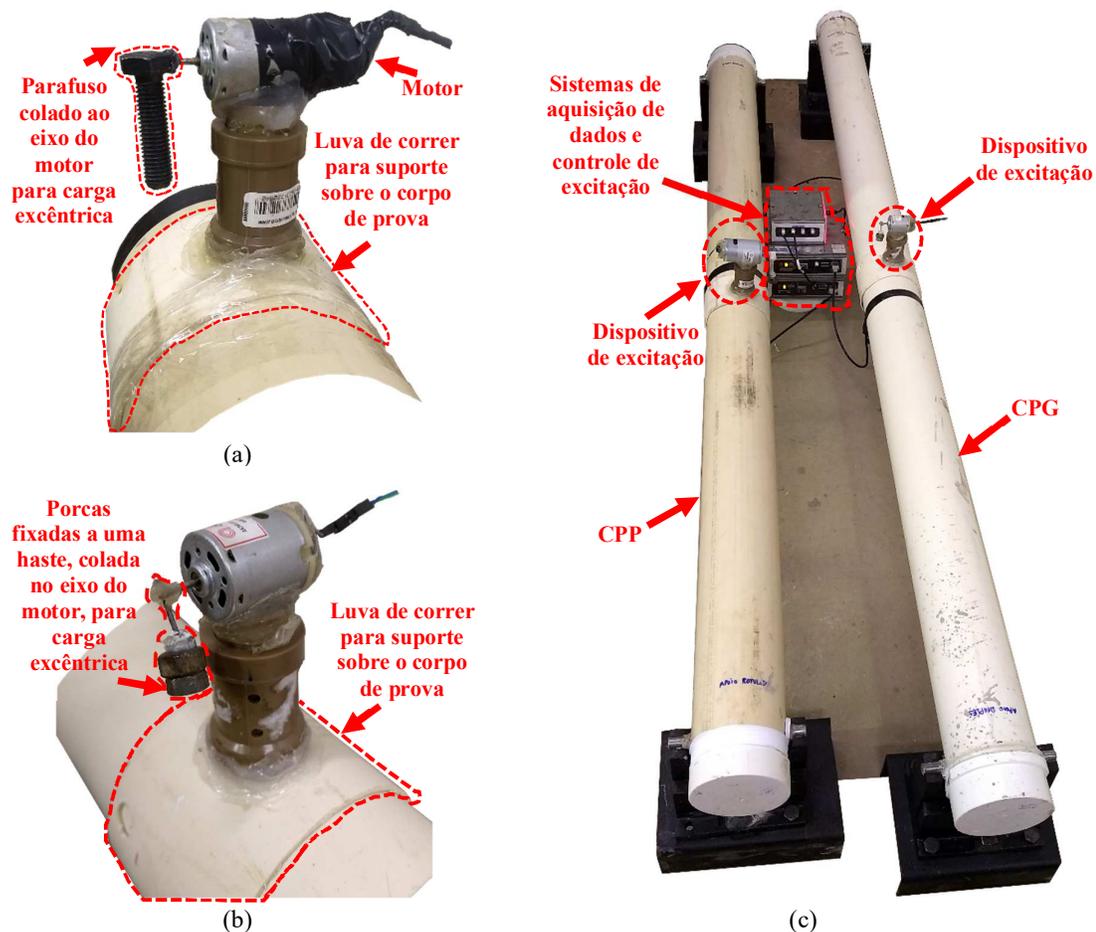


Figura 3-16: Configuração de ensaio EMM-ARM para concreto: (a) excitador utilizado no CPP; (b) excitado utilizado no CPG; (c) corpos de prova CPP e CPG e sistema de ensaio.

Na validação foram testados dois corpos de prova com comprimento distintos, denominados CPG (corpo de prova grande) e CPP (corpo de prova pequeno). Seus comprimentos total e de vão livre, isto é, de apoio a apoio, foram, respectivamente, 1,86 m e

1.745 mm para o CPG e 1,62 m e 1.500 mm para o CPP. Estes comprimentos foram testados preliminarmente, realizando o ensaio EMM-ARM com vibração forçada nos tubos vazios, de modo a determinar se eles apresentariam excitabilidade compatível com os acelerômetros. Devido ao seu menor comprimento, e conseqüente maior rigidez, o excitador utilizado no CPP requereu uma carga com maior excentricidade e peso, conforme mostrado na Figura 3-16a.

3.4 ETAPA 3: ANÁLISE METROLÓGICA DO SISTEMA PROPOSTO

3.4.1 *Delineamento geral*

As análises metrológicas conduzidas neste trabalho seguiram a metodologia apresentada na NBR ISO 5725 (ABNT, 2018a, 2018b, 2018c) com adaptações, comentadas a seguir, quando necessário. Previamente à análise metrológica do sistema de ensaio, analisou-se a precisão o sistema de aquisição de dados, com o objetivo de permitir identificar sua influência nos parâmetros metrológicos aos do sistema de ensaio.

Os parâmetros metrológicos do sistema de ensaio incluem imprecisões introduzidas pelo sistema de aquisição e por ambos os fatores, ligados à execução do EMM-ARM, como a produção dos materiais ensaiados, moldagem dos corpos de prova, e variações ambientais durante o ensaio. Assim, a análise isolada do sistema de aquisição de dados permitiu avaliar a importância destes diversos fatores na precisão do ensaio EMM-ARM executado com o sistema de ensaio desenvolvido neste trabalho.

Conforme apresentado no item 2.5, a determinação da exatidão de um método de ensaio engloba a determinação de sua precisão (desvios-padrão de repetibilidade e reprodutibilidade) e veracidade (tendência do método). Para determinação da precisão, são necessários dados experimentais obtidos sob condições de repetibilidade e reprodutibilidade, de uma dada quantidade de laboratórios e níveis da grandeza medida. Para a determinação da veracidade, são necessários valores verdadeiros da grandeza medida, que, ao serem comparados aos valores obtidos a partir do método, permitem a determinação da tendência do método.

Na análise metrológica do sistema de aquisição de dados, como não se obtiveram valores de referência para a grandeza medida, o estudo consistiu apenas na determinação da precisão do sistema. O estudo do sistema de aquisição de dados também contou com um estudo, em cada sistema de aquisição de dados construído, da distribuição estatística de amostragens tomadas repetidamente sob um mesmo corpo de prova, de modo a identificar indícios da tendência específicos de cada sistema, como uma possível superestimação das frequência medidas.

Na análise metrológica do sistema de ensaio na execução do ensaio EMM-ARM, que incluiu a determinação da precisão e veracidade, somente a versão para ensaio em pasta de cimento foi estudada. Valores de referência do material estudado foram obtidos pelo ensaio de

compressão clássica conforme NBR 8522 (ABNT, 2017) Assim, foi possível o cálculo dos desvios-padrão de repetibilidade e reprodutibilidade, e do intervalo de tendência do sistema.

Os estudos realizados foram feitos apenas para a condição de vibração ambiente, já que os resultados obtidos na etapa de validação do sistema de ensaio para pastas de cimento sob vibração forçada sugeriram que o dispositivo de vibração proposto neste trabalho induzia danos nas amostras, requerendo ajustes específicos fora do escopo deste trabalho.

3.4.2 Determinação da precisão do sistema de aquisição de dados sob condição de vibração ambiente

A precisão do sistema de aquisição de dados foi determinada por meio do monitoramento simultâneo, com os quatro sistemas de aquisição construídos, de um único tubo de PVC, idêntico ao do molde utilizado no ensaio EMM-ARM em pastas, vazio submetido à condição de vibração ambiente, potencializada com um ventilador. A configuração de ensaio utilizada é idêntica à utilizada para ensaios em pastas. A Figura 3-17 ilustra a execução do ensaio metrológico, o tubo utilizado e o posicionamento dos acelerômetros.

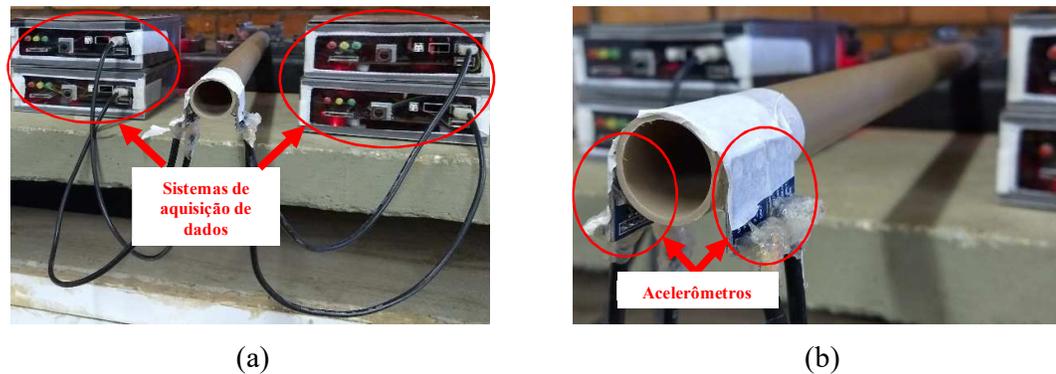


Figura 3-17: Execução do ensaio de investigação metrológica do sistema de aquisição de dados.

Previamente à análise metrológica propriamente dita, investigou-se a distribuição estatística de séries de resultados de cada sistema de aquisição, de forma a investigar características específicas de cada sistema (*e.g.* presença de viés nos dados). Para tanto, cada sistema de aquisição realizou 536 amostragens de aceleração do tubo, espaçadas 10 segundos entre si, com duração de 1 minuto e 30 segundos e com frequência de amostragem de 860 Hz. A amostragem foi feita simultaneamente com os quatro sistemas. Os dados experimentais foram processados com o *software* desenvolvido nesse trabalho para identificação da frequência natural do tubo, utilizando um filtro Butterworth de 8ª ordem com frequência de corte de 50 Hz. Foram produzidos os histogramas de frequência, e determinadas das estatísticas descritivas de

média, mediana, desvio-padrão, bem como os valores máximo e mínimo da série de dados obtidos na identificação da frequência de cada sistema.

A determinação da precisão se baseou na metodologia apresentada na NBR ISO 5725 (ABNT, 2018a, 2018b, 2018c) consistindo na determinação dos desvios-padrão de repetibilidade e reprodutibilidade. Como premissa, cada sistema de aquisição de dados foi considerado como um laboratório distinto. As replicatas consistiram em amostras de aceleração do tubo, realizadas a cada 5 minutos, com duração de 1 minuto e 30 segundos e com frequência de amostragem de 860 Hz. Os quatro sistemas de aquisição realizaram aferições no mesmo tubo, conforme configuração apresentada na Figura 3-17, e ao mesmo tempo. Os dados experimentais foram processados com o *software* desenvolvido no presente trabalho para identificação da frequência natural do tubo, utilizando um filtro Butterworth de 8ª ordem com frequência de corte de 50 Hz.

Essas condições de ensaio implicam que o desvio-padrão de repetibilidade englobe somente fatores de erro relacionados à variabilidade da condição de excitação e relação entre ruído/sinal (SNR), e erros numéricos do *software* de processamento de dados. Para fins do presente ensaio, considerou-se tais fatores como análogos à variabilidade intrínseca das amostras, prevista na NBR ISO 5725, já que, são incontornáveis. Já o desvio-padrão de reprodutibilidade, além dos fatores incluídos no caso de repetibilidade, incluiu também os fatores de erro relativos às características do equipamento de medição e à sua calibração. Os fatores de erro relativos a operador, ambiente e intervalo de tempo, previstos na NBR ISO 5725 (ABNT, 2018a, 2018b, 2018c) e discutidos no item 2.5, não se aplicaram a este ensaio metrológico.

Foram definidos três níveis de frequência a serem mensurados, 19 Hz, 23 Hz e 30 Hz, que cobrem parte da faixa de frequências normalmente obtida durante o ensaio EMM-ARM realizado com as configurações de ensaio apresentadas no item 3.1.2. Para se obter tais frequências a partir de um único tubo de PVC, diferentes comprimentos de vão livre foram produzidos a partir do ajuste apropriado do tubo em seu apoio.

Foram realizados os testes h e k de Mandel, teste de Cochran e o teste de Grubbs para identificação de dados aberrantes. Após esse tratamento estatístico e o tratamento apropriado a quaisquer dados aberrantes ou suspeitos identificados, foram calculados os desvios-padrão de repetibilidade e de reprodutibilidade, além da equação de correlação da precisão com a média.

3.4.3 Determinação da exatidão do sistema de ensaio na execução do EMM-ARM

3.4.3.1 Desenho experimental

Um estudo metrológico de um método de ensaio requer a definição da quantidade de laboratórios envolvidos, da quantidade de replicatas a serem executadas por laboratório, e de quais níveis de ensaio (valores médios a serem obtidos no ensaio) serão utilizados. Algumas disposições da NBR ISO 5725 quanto ao desenho experimental foram adaptadas ao ensaio EMM-ARM devido a suas características próprias. O desenho experimental utilizado na determinação metrológica da exatidão do sistema de ensaio na execução do ensaio EMM-ARM é ilustrado na Figura 3-18. Na figura, são utilizados ícones com cores distintas para representar a variação das condições metrológicas dentro do experimento.

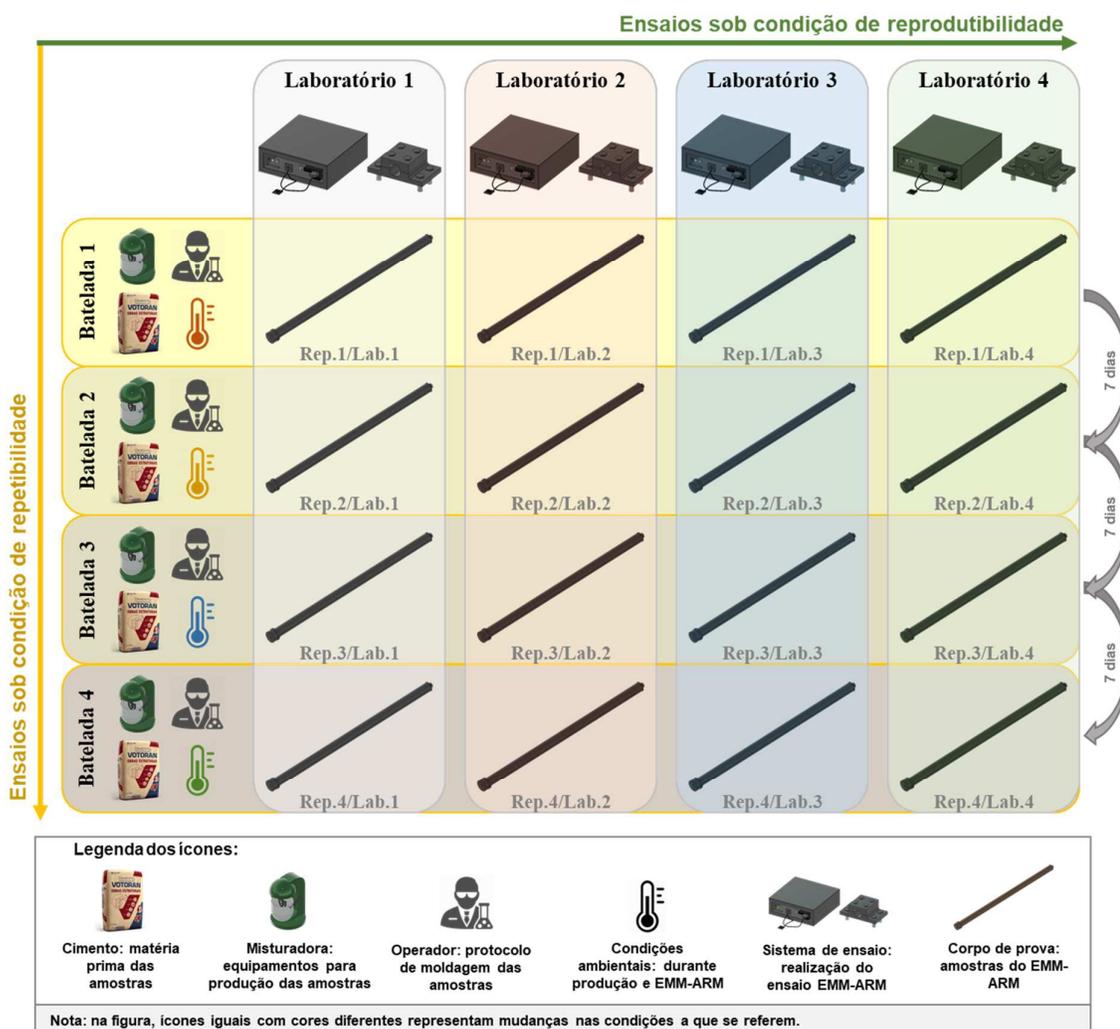


Figura 3-18 Desenho experimental da determinação da exatidão do sistema de ensaio.

Sendo o objetivo desta etapa a determinação da exatidão do sistema de ensaio em sua utilização para execução do ensaio EMM-ARM, definiu-se, com base na terminologia da NBR ISO 5725 (ABNT, 2018a, 2018b, 2018c), que cada um dos quatro sistemas de ensaio construídos representaria um laboratório distinto, conforme ilustrado na Figura 3-18. A única diferença entre laboratórios foi, portanto, o sistema de ensaio utilizado para execução do ensaio EMM-ARM. Assim, o desvio-padrão de reprodutibilidade apresentado neste trabalho se refere a uma condição de reprodutibilidade que engloba, além dos fatores de erro presentes na condição de repetibilidade, somente variações entre os sistemas de ensaio.

Tal definição difere da NBR ISO 5725 (ABNT, 2018a, 2018b, 2018c), que incorpora ao desvio-padrão de reprodutibilidade fatores de erro relacionados a operadores de cada laboratório, que, no ensaio EMM-ARM, poderiam influenciar na moldagem dos corpos de prova. A norma também considera a utilização de equipamentos totalmente distintos durante a execução do ensaio em diferentes laboratórios, o que abrangeria, no ensaio EMM-ARM, também os equipamentos utilizados para produção dos corpos de prova, dentre os quais a misturadora tem maior importância. Ambos os fatores não estão presentes na condição de reprodutibilidade reproduzida neste trabalho, como ilustrado na Figura 3-18, que mantém a mesma cor para os ícones de operador e misturadora para todos os laboratórios.

A condição de repetibilidade, segundo a NBR ISO 5725 (ABNT, 2018a, 2018b, 2018c), requer a realização de replicatas em curtos intervalos de tempo. No entanto, o ensaio EMM-ARM é de relativa longa duração (usualmente executado durante sete dias em uma mesma amostra) e, devido às características do ensaio, não é possível utilizar um mesmo sistema de ensaio para executar diversas replicatas simultaneamente.

Assim, foram realizadas quatro replicatas por laboratório, cada uma com duração de aproximadamente sete dias, o que levou a um intervalo de tempo, entre replicatas, de aproximadamente sete dias. Mesmas replicatas de cada laboratório foram ensaiadas simultaneamente (*e.g.* as replicatas nº 1 de todos os laboratórios foram ensaiadas simultaneamente), sendo os corpos de prova utilizados moldados a partir de uma mesma batelada. Considerando um único laboratório, suas quatro replicatas foram executadas com corpos de prova produzidos com materiais misturados em diferentes bateladas, mas produzidos com mesmo cimento, operador e equipamentos (mesma misturadora), conforme ilustrado na Figura 3-18, que utiliza mesma cor em todos os ícones desses fatores, em todas as bateladas.

Nesse desenho experimental, a realização de todas as replicatas de um dado laboratório teve uma duração de aproximadamente quatro semanas. Devido à impossibilidade, relativa à infraestrutura disponível, de se garantir condições isotérmicas idênticas para realização de todas as replicatas, no desvio-padrão de repetibilidade incorporou-se o fator de erro ambiental, pois a temperatura ambiente no local de realização dos ensaios sofreu alterações durante essas quatro semanas de ensaios. Isso é ilustrado na Figura 3-18, que utiliza diferentes cores para os ícones referentes a condições ambientais em cada batelada. A temperatura durante cada um dos ensaios foi monitorada com o sensor de temperatura e umidade incorporado ao sistema de aquisição de dados.

Por fim, como o resultado do ensaio EMM-ARM não é apenas um valor pontual do módulo de elasticidade, mas sim sua evolução ao longo dos sete dias de ensaio, os níveis a serem utilizados neste estudo metrológico abrangeram o intervalo de evolução apresentado pelo material utilizado nos ensaios. Assim, foram estabelecidos 12 níveis a serem utilizados na determinação da precisão (*i.e.* dos desvios-padrão de repetibilidade e reprodutibilidade), definidos como aqueles relacionados às idades de 2h, 4h, 8h, 16h, 20h, 24h, 48h, 72h, 96h, 120h, 144h, 168h. A partir dos resultados experimentais obtidos, esses níveis corresponderam a valores médios de módulo de elasticidade respectivamente iguais a: $3,445 \times 10^{-5}$ GPa, 0,0136 GPa, 0,3982 GPa, 2,0783 GPa, 2,8281 GPa, 3,4985 GPa, 6,5646 GPa, 7,5808 GPa, 8,0476 GPa, 8,3186 GPa, 8,4955 GPa e 8,6198 GPa.

Os valores de referência necessários para determinação da veracidade foram obtidos por ensaios de compressão clássica realizados conforme a NBR 8522. Foram moldados 15 corpos de prova cilíndricos, de diâmetro igual a 5 cm e altura igual a 10 cm, de cada batelada utilizada neste estudo, conforme Figura 3-18, para determinação do módulo em três dias de idade distintos. Dado o desenho experimental adotado para a análise metrológica, corpos de prova obtidos de bateladas diferentes, mesmo que seus históricos de temperatura difiram entre si, foram considerados amostras do mesmo material, sob condições de repetibilidade. Sendo assim, os resultados de módulo de elasticidade por compressão clássica obtidos de corpos de prova das diferentes bateladas são considerados, em conjunto, como valores de referência para o estudo da veracidade. Isso possibilitou a obtenção de valores de referência em cinco idades diferentes (1 dia, 3 dias, 5 dias, 5 dias e 7 dias), cada idade com uma replicata mínima de cinco corpos de prova, abrangendo valores de módulo de elasticidade respectivamente de 3,6759 GPa, 8,6317 GPa, 8,8987 GPa, 8,8606 GPa e 9,0062 GPa.

3.4.3.2 Materiais, moldagem e obtenção de valores de referência

As pastas de cimento utilizadas nas amostras dos ensaios da análise metrológica foram produzidas com cimento CP II F-32 da Votorantim Cimentos, oriundos de um único saco de 50 kg. Foi utilizada uma relação água/cimento de 0,48 e consistência de 120 mm \pm 5 mm no teste de mini-slump, ajustada com o uso de 0,09 em termos de sólidos de superplastificante MasterGlenium® 51, aditivo poli carboxílico produzido pela BASF, em relação ao peso do cimento. Como o superplastificante utilizado possui 30% de sólidos em suspensão aquosa, isso equivalou à adição de 1,5g de aditivo superplastificante para cada 500 g de cimento.

Em cada moldagem foram produzidos 15 corpos de prova cilíndricos de diâmetro igual a 5 cm e altura igual a 10 cm, de acordo com o item 3.1.5.2, e quatro corpos de prova para ensaio EMM-ARM, nas dimensões apresentadas no item 3.1.2 e seguindo o protocolo de moldagem apresentado no item 3.1.4.2. Para isso, cada moldagem consistiu em três bateladas na proporção: 2100 g de cimento, 1003,59 g de água, e 6,3 g de aditivo superplastificante. As primeiras bateladas foram utilizadas para moldar os corpos de prova cilíndricos. A última batelada foi utilizada para, em sequência: (i) moldar o restante dos corpos cilíndricos; (ii) determinar a densidade específica da pasta, preenchendo-se e pesando um recipiente de peso e volume conhecidos; (iii) moldar os corpos de prova do EMM-ARM.

Os valores de referência para o ensaio EMM-ARM foram obtidos pela realização do ensaio de módulo de elasticidade estático por compressão clássica, segundo a NBR 8522 (ABNT, 2017) com os 15 corpos de prova cilíndricos. Embora a norma preveja ensaio somente em corpos de prova de concreto, de diâmetro igual a 10 cm e altura igual a 20 cm, todas as especificações, como taxa de carregamento admissível, foram adaptadas para os corpos de prova reduzidos utilizados neste trabalho.

Para verificação da correta moldagem dos corpos de prova, após o término do ensaio EMM-ARM, todos os corpos de prova foram serrados em quatro partes ao longo de seu comprimento. O comprimento do vão livre, aproximadamente 45 cm conforme item 3.1.2, foi dividido em três trechos de 15 cm, sendo a quarta parte referente ao comprimento restante de engaste entre 9 e 10 cm, a depender do comprimento total do tubo utilizado como molde. Todos os trechos foram medidos e pesados, para permitir o cálculo da variação da densidade em cada trecho. Os resultados encontrados foram comparados ao limite de 0,5% proposto por Azenha *et al.* (2012a). A Figura 3-19 ilustra a divisão dos trechos e a identificação adotada para os mesmos.

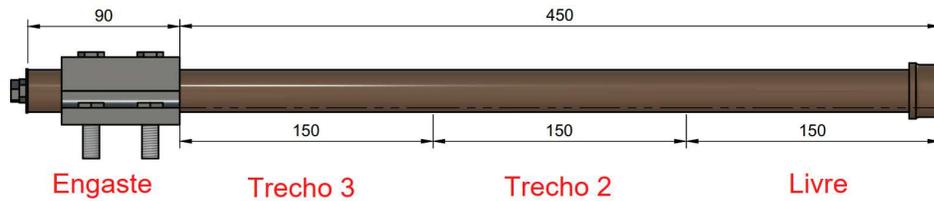


Figura 3-19: Trechos analisados para verificação da uniformidade da amostra do ensaio EMM-ARM.

3.4.3.3 Configuração de ensaio

A configuração de ensaio utilizada neste estudo é semelhante à apresentada na Figura 3-14. A condição de vibração ambiente foi utilizada pois os resultados obtidos, na etapa de validação, com vibração forçada sugeriram que tal excitação, na forma desenvolvida neste trabalho, poderia provocar danos ao corpo de prova capazes de influenciar o módulo de elasticidade medido. A Figura 3-20 apresenta o posicionamento, mantido exatamente igual em todas as replicatas utilizadas, dos quatro sistemas de ensaio em relação ao ventilador.

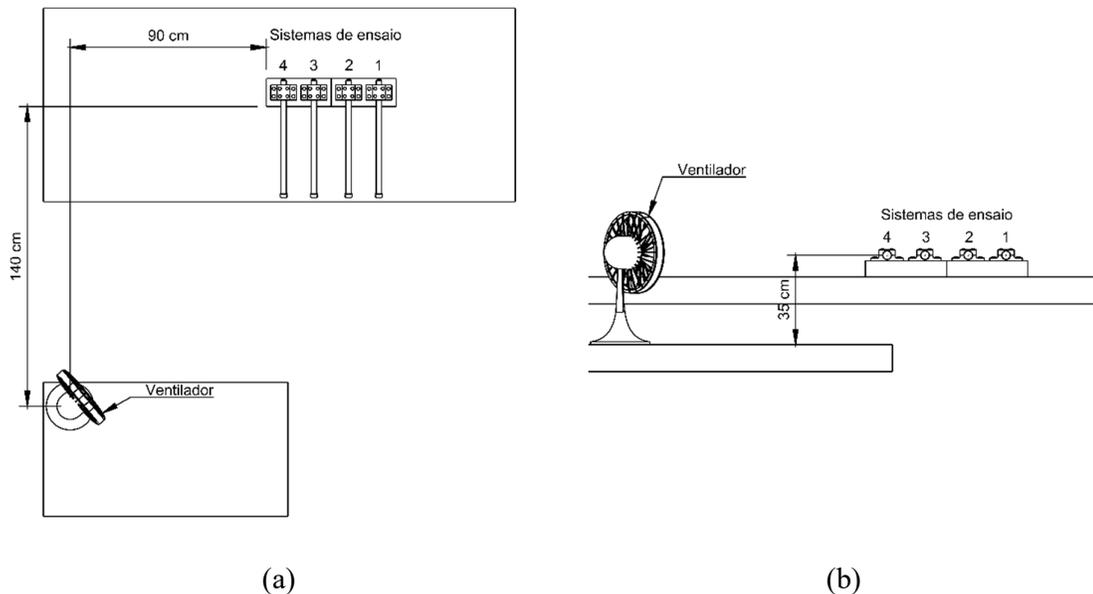


Figura 3-20: Posição relativa entre os corpos de prova de cada sistema (1 a 4) e o ventilador: (a) em planta; (b) em vista.

3.4.3.4 Tratamento dos dados

Previamente ao tratamento estatístico, os dados experimentais de cada ensaio EMM-ARM foram ajustados à uma curva de evolução do módulo de elasticidade (CARETTE, 2015; GRANJA, 2016), dada por:

$$f(t) = a_1 \cdot e^{-\left(\frac{\tau_1}{t}\right)^{\beta_1}} + a_2 \cdot e^{-\left(\frac{\tau_2}{t}\right)^{\beta_2}} + a_3 \quad (3-5)$$

Em que a_1 , a_2 , a_3 , τ_1 , τ_2 , β_1 , e β_2 são os parâmetros de ajuste. O ajuste dessa curva é necessário pois permite a obtenção dos valores do módulo de elasticidade nos 12 níveis estabelecidos, uma vez que os resultados experimentais brutos podem conter amostras fora de sincronia, sem uma correspondência exata entre si ou com as idades que definem os níveis estabelecidos.

Os valores de módulo obtidos a partir da equação (3-5) foram tratados estatisticamente com os testes h e k de Mandel, Cochran e Grubbs, que permitem a identificação e correto tratamento de dados suspeitos e aberrantes. A aplicação, equações e procedimentos a serem adotados no caso de dados suspeitos ou aberrantes são descritos na NBR ISO 5725 (ABNT, 2018a, 2018b, 2018c), partes 2 e 4 e foram seguidos em sua totalidade neste trabalho. As equações para cálculo dos valores críticos dos testes estatísticos foram obtidos de Wilrich (2013).

3.5 ETAPA 4: APLICAÇÃO DO SISTEMA NO ESTUDO DE CIMENTOS COM DISTINTAS CINÉTICAS DE HIDRATAÇÃO

3.5.1 Delineamento geral

Nesta etapa, o sistema de ensaio desenvolvido foi utilizado para estudar pastas de cimento produzidas com cimentos com diferentes cinéticas de hidratação. Além do estudo fornecer indicações a respeito da sensibilidade e capacidade do sistema mensurar materiais com diferentes comportamentos, objetivou-se a produção e análise de dados relevantes sobre novos cimentos ainda em desenvolvimento e fase de estudo no meio científico. Foram estudados quatro tipos de cimento: (i) um cimento Portland de referência, composto por 95% de clínquer e 5% de gipsita, em massa; (ii) um cimento LC³ produzido com argila calcinada, composto por 50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de filer carbonático e 5% de gipsita, em massa; (iii) um cimento LC³ produzido com metacaulim, composto por 50% de clínquer, 30% de metacaulim, 15% de filer carbonático e 5% de gipsita, em massa; (iv) um cimento Portland com adição de 1% de nanossílica. Fixou-se a relação água/cimento das pastas em 0,48 e a consistência em 130 mm ± 5 mm.

Além dos resultados de evolução do módulo de elasticidade desde as primeiras idades de cada cimento, o EMM-ARM foi utilizado para se estimar o instante de fim de pega e a energia de ativação de cada cimento, seguindo as metodologias sugeridas por Granja (2016). Para se estimar o tempo de fim de pega, utilizou-se o método de se considerar como tempo de fim de pega o primeiro instante a atingir 50% do valor de pico na curva da primeira derivada da evolução do módulo de elasticidade, conforme sugerido por Granja (2016). Para se estimar a energia de ativação, adota-se o método “*speed method*”, apresentada em D’Aloia (2003) e utilizada por Granja (2016) em resultados do EMM-ARM. Este método calcula a energia de ativação em função do grau de hidratação utilizando-se a equação:

$$E_{ativ,apar}(\alpha) = -\frac{R}{\frac{1}{T_1(\alpha)} - \frac{1}{T_2(\alpha)}} \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_1(\alpha)}{\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_2(\alpha)} \right] \quad (3-6)$$

Em que: $E_{ativ,apar}$ é a energia de ativação aparente, ou energia de ativação global da reação de hidratação; R é a constante universal dos gases, $T_1(\alpha)$ e $T_2(\alpha)$ são as temperaturas no grau de hidratação α em dois ensaios realizados em temperatura distintos; e $(d\alpha/dt)(\alpha)$ é o valor da primeira derivada do grau de hidratação no tempo, para o grau de hidratação α .

De posse da energia de ativação do cimento, equações de maturidade são utilizadas para transformar os dados dos ensaios EMM-ARM (evolução do módulo de elasticidade, grau de hidratação e tempo de fim de pega) em termos de idades equivalentes. A equação de idade equivalente, apresentada em D'Aloia (2003), é dada por:

$$t_{equivalente} = \sum_{\tau=0}^t e^{\frac{E_{ativ,apar}}{R} \left(\frac{1}{T(\tau)} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \cdot \Delta t \quad (3-7)$$

Em que: $E_{ativ,apar}$ é a energia de ativação aparente, ou energia de ativação global da reação de hidratação; R é a constante universal dos gases; $T(\tau)$ é a temperatura no instante τ ; T_{ref} é a temperatura adotada como referência; e Δt é o intervalo de tempo no qual a temperatura $T(\tau)$ é considerada como constante. Nas análises realizadas, adotou-se arbitrariamente uma temperatura de referência de 30 °C.

A estimativa da energia de ativação requer a realização do ensaio EMM-ARM em duas temperaturas distintas entre si. Para a temperatura mais baixa, optou-se por realizar os ensaios EMM-ARM à temperatura ambiente dentro de uma câmara com isolamento térmico, o que produziu um histórico de temperatura de 25 °C ± 5 °C e 20 °C ± 5 °C durante os ensaios realizados. Para a temperatura alta, utilizou-se uma resistência térmica dentro da câmara, que produziu um histórico de temperatura de 40 °C ± 4°C e 45 °C ± 4°C durante os ensaios realizados. Em cada temperatura, foram realizados ensaios EMM-ARM em duplicata com cada cimento. Por fim, para caracterização mecânica do comportamento dos materiais usados, a resistência à compressão dos cimentos foi determinada a 1, 3 e 7 dias de idade, seguindo a NBR 7215 (ABNT, 2019). A Tabela 3-5 resume o programa experimental desta etapa.

Tabela 3-5: Programa experimental da Etapa 4.

Variáveis independentes			Identificação	Variáveis dependentes					
Relação a/c	Consistência	Cimento		EMM-ARM				NBR 7215	
0,48	130 mm ± 5 mm	Referência	REF	Evolução do módulo de elasticidade – temperatura ambiente	Evolução do módulo de elasticidade – temperatura alta	Tempo de fim de pega – temperatura ambiente	Tempo de fim de pega – temperatura ambiente	Energia de ativação	Resistência à compressão do cimento: 1, 3 e 7 dias de idade
		LC ³	LC3						
		LC ³ com metacaulim	META						
		Referência com 1% de nanossílica	NANO						

3.5.2 Introdução sobre cimentos LC³ e aditivos de nanossílica

O cimento LC3 é uma mistura ternária entre argila calcinada, calcário e cimento Portland. Sua origem está ligada à busca por materiais cimentícios suplementares (SCMs) de baixo impacto ambiental, menor custo, e ampla disponibilidade ao redor do mundo, que possam substituir parte do cimento Portland na produção de cimentos para uso geral (SCRIVENER, 2014).

O princípio por trás do uso de uma mistura acoplada de argila calcinada e filer calcário se baseia na constatação de que há um aumento no volume de sólidos ao se realizar uma mistura ternária de cimento-calcário-argila, em comparação a misturas de apenas cimento-calcário ou cimento-argila, e cuja sinergia permite substituições de até 45% do clínquer por SCMs na proporção de 2:1 de argila-filer sem que haja perdas consideráveis de desempenho mecânico (ANTONI et al., 2012). Tal fenômeno pode ser explicado pela reação entre o aluminato presente na argila calcinada, o carbonato de cálcio presente no filer calcário e o hidróxido de cálcio do material cimentício, formando compostos hidratados de carboaluminatos (SCRIVENER, 2014):



Assim, nota-se que as contribuições da argila calcinada e do calcário na hidratação do material cimentício se baseiam em reações complementares às que ocorrem na reação de hidratação do cimento Portland, apresentando, assim, atividades pozolânicas. As argilas caulínicas apresentam elevado potencial pozolânico quando calcinadas, isto é, termicamente ativadas, sendo as mais utilizadas para a produção de cimentos LC³ (AVET; SCRIVENER, 2018a). A reatividade destas argilas está relacionada à formação de metacaulim durante o processo de calcinação, que é seu principal produto reativo (AVET; SCRIVENER, 2018a). Assim, quanto maior a quantidade de metacaulim na argila, mais reativa ela será.

No mercado, é possível encontrar, atualmente, o metacaulim sendo vendido como produto para adição em concretos, sendo já conhecidos seus benefícios para a durabilidade e desempenho mecânico (HELENE; MEDEIROS, 2004; WANG et al., 2013). No entanto, o metacaulim puro, apesar de seu desempenho superior quando comparado a outras argilas, não é um material economicamente interessante para ser utilizado na produção de cimentos LC³, já que pode custar até três vezes o preço do cimento Portland comum (AVET; SCRIVENER,

2018a). É de maior interesse a utilização de argilas calcinadas menos nobres, que são, por conta disso, de menor custo de produção.

A nanossílica como aditivo em materiais cimentícios de alto desempenho se desenvolveu do uso, relativamente já estabelecido, de sílica ativa, ou microssílica, cujo benefícios relacionados à atividades pozolânicas e consequente redução de porosidade e aumento de durabilidade são amplamente conhecidas (MONDAL et al., 2010). Os cimentos com adição de nanossílica apresentam desenvolvimento microestrutural intenso nas primeiras idades, devido à alta reatividade da nanossílica causada pela sua elevada área específica e capacidade de criar pontos de nucleação para hidratação do cimento (SANCHEZ; SOBOLEV, 2010; SINGH *et al.*, 2013).

Segundo Singh *et al.* (2013), há dois mecanismos principais de hidratação do cimento na presença de nanossílica: formação de $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, que reage com Ca^{2+} disponível, formando partículas de C-S-H de maneira distribuída no meio e que servem como pontos de formação de fases C-S-H mais compactas, cuja formação deixa de depender apenas da área superficial dos grãos de cimento e passa a ocorrer também no espaço poroso entre grãos; reação pozolânica entre a nanossílica e hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que é formado durante a hidratação do cimento, produzindo partículas adicionais de C-S-H e consumindo o hidróxido de cálcio, que pouco contribui no desenvolvimento da resistência

3.5.3 *Materiais e moldagem*

Os cimentos utilizados neste estudo foram produzidos a partir da moagem de aproximadamente dois quilogramas de clínquer e gipsita, em proporção adequada, por três horas em um moinho de bolas com doze esferas de aço padronizadas segundo a NBR NM 511 (ABNT, 2001). A Figura 3-21 apresenta o moinho de bolas utilizado. Para se produzir os cimentos LC³, o filer carbonático e a argila calcinada ou metacaulim foram misturados manualmente com o clínquer e gipsita já moídos.



Figura 3-21: Moinho de bolas utilizado para moagem do clínquer e gipsita.

O metacaulim utilizado foi do tipo MecaulimHP-Ultra, obtido por meio de doação pela Metacaulim do Brasil, em sacos de 25 kg. O clínquer, argila calcinada e gipsita utilizados foram obtidos por doação da cimenteira CIPLAN, de Brasília, no ano de 2017. O filer carbonático utilizado foi o GFI 325 Calcário Calcítico Industrial, produzido pela GoiásFiller e vendido em sacos de 30 kg. O APÊNDICE B apresenta os resultados de granulometria a laser, superfície específica pelo método BET, fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX) de cada um desses materiais e dos cimentos produzidos. A nanossílica utilizada foi a Levasil CB 45-A, obtida por meio de doação da empresa Nouryon, e cujos detalhes técnicos podem ser consultados em Nouryon (2019).

Em todas as pastas de cimento, foi utilizada uma relação água/cimento de 0,48 e consistência de $130 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ no teste de mini-slump, ajustada com uso de superplastificante MasterGlenium® 51, aditivo poli carboxílico produzido pela BASF. O traço em peso utilizado em cada pasta de cimento é apresentado na Tabela 3-6. Nesta tabela, as quantidades dos aditivos são dadas em termos de sólidos, embora sejam comercializados em suspensão coloidal. Assim, faz-se necessário corrigir os valores dados considerando a diluição da suspensão, o que implica em maiores quantidades de aditivos e correção da quantidade de água para levar em conta a água presente na suspensão coloidal.

Tabela 3-6: Traços das pastas de cimento estudadas.

Identificação	Cimento	:	Água	:	Superplastificante ¹	:	Nanossílica ²
REF	1	:	0,48	:	0	:	0
LC3	1	:	0,48	:	0,00069	:	0
META	1	:	0,48	:	0,00068	:	0
NANO	1	:	0,48	:	0,00225	:	0,0015

Nota:

1 – Em termos de sólidos. O superplastificante utilizado tem 30% de sólidos, e o restante de água, que deve ser considerada no cálculo da água a ser efetivamente adicionada à pasta.

2 – Em termos de sólidos. A nanossílica utilizada tem 15% de sólidos, e o restante de água, que deve ser considerada no cálculo da água a ser efetivamente adicionada à pasta.

Em cada moldagem, foram produzidos dois corpos de prova para ensaio de frequência ressonante no equipamento Sonelastic, de acordo com o item 3.1.5.2, e dois corpos de prova para ensaio EMM-ARM, nas dimensões apresentadas no item 3.1.2 e seguindo o protocolo de moldagem apresentado no item 3.1.4.2. Assim, a moldagem consistiu em uma batelada na proporção de: 600 g de cimento e a proporção adequada de água, superplastificante e nanossílica. A densidade específica da pasta foi determinada preenchendo-se e pesando um recipiente de peso e volume conhecidos.

Os corpos de prova do Sonelastic foram utilizados para determinação do módulo de elasticidade em uma idade, fornecendo valores de referência para o ensaio EMM-ARM. Os resultados do ensaio de frequência ressonante, originalmente em termos de módulo de elasticidade dinâmico, foram convertidos para valores estáticos utilizando-se a equação (3-4).

Os corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão foram moldados, armazenados durante a cura e ensaiados de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019) Em cada idade, foram ensaiados no mínimo quatro corpos de prova.

3.5.4 Configuração de ensaio

A configuração de ensaio utilizada nessa etapa foi montada visando a maior estabilidade de temperatura possível ao longo dos ensaios sob temperatura ambiente e de um meio de aquecimento e manutenção do ambiente aquecido ao longo dos ensaios sob temperatura alta. A configuração do ensaio deveria respeitar as restrições de distância dos corpos de prova ao ventilador, por dos motivos: para que não houvesse uma excessiva vibração que pudesse danificar o material cimentício em processo hidratação; para que os apoios e corpos de prova não vbrassem nas frequências de funcionamento do ventilador, contaminando os resultados.

Com base em todas essas considerações, chegou-se à configuração de ensaio apresentada na Figura 3-22. Utilizou-se uma estufa, posicionada horizontalmente, como câmara térmica, dentro da qual foram posicionados os sistemas de ensaio, visando promover um grau de isolamento térmico de modo a atenuar as oscilações ambientais de temperatura, e permitir a execução de ensaios a temperaturas elevadas. Para permitir a excitação dos corpos de prova, removeu-se o anteparo frontal de vidro da estufa, criando uma abertura para seu interior que permitiu que um ventilador posicionado de fora da câmara pudesse promover vibrações nos corpos de prova. O ventilador, fixado a uma estrutura de altura ajustável, teve sua posição ajustada experimentalmente para se atingir o nível ideal de vibração dos corpos de prova. A

estrutura utilizada para fixar o ventilador também contribuiu para isolar os sistemas de ensaio das vibrações advindas do motor do ventilador. Nos ensaios sob temperatura elevada, um anteparo de isopor foi construído para potencializar o isolamento térmico.

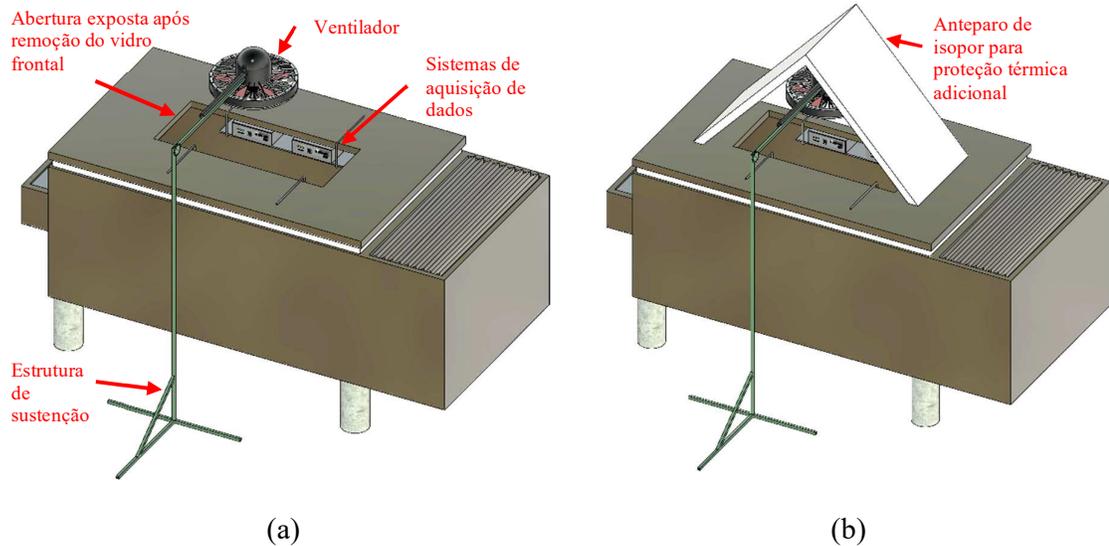


Figura 3-22: Configurações de ensaio: (a) sob temperatura ambiente; (b) sob temperatura elevada.

A configuração de ensaio é detalhada adicionalmente na Figura 3-23. A Figura 3-23a apresenta uma vista aramada da configuração, com a indicação dos principais componentes e suas posições, incluindo os corpos de prova no interior da câmara. A Figura 3-23b apresenta um corte transversal, ao longo da menor dimensão da câmara, com a posição dos corpos de prova e a sua distância às pás do ventilador. Este posicionamento foi mantido constante ao longo de todos os ensaios realizados. Tomando como referência o sistema de eixo da Figura 3-23b, os acelerômetros foram posicionados para aferir as acelerações na direção do eixo x , de modo que suas amostragens não sofressem interferência do fluxo direto de ar promovido pelo ventilador, que possuía, na velocidade utilizada nos ensaios, uma frequência em torno de 21 a 22 Hz. A opção por tomar acelerações ao longo do eixo x , perpendicular à direção do fluxo, favoreceu a captação da frequência natural de vibração dos tubos, já que a oscilação nessa direção é causada principalmente por componentes turbulentos do fluxo de ar perpendicular, que já não possuem uma frequência única específica e se aproximam da hipótese de ruído branco. A temperatura interna foi monitorada, a cada 60 segundos nos ensaios a temperatura ambiente e a cada 1 segundo nos ensaios a temperatura elevada, por dois termopares tipo K. A temperatura externa foi monitorada por um termopar. Os posicionamentos dos termopares internos (1 e 2), localizados próximos dos corpos de prova, e externo, localizado na parte externa da carcaça da estufa, são indicados na Figura 3-23a, de acordo com a legenda.

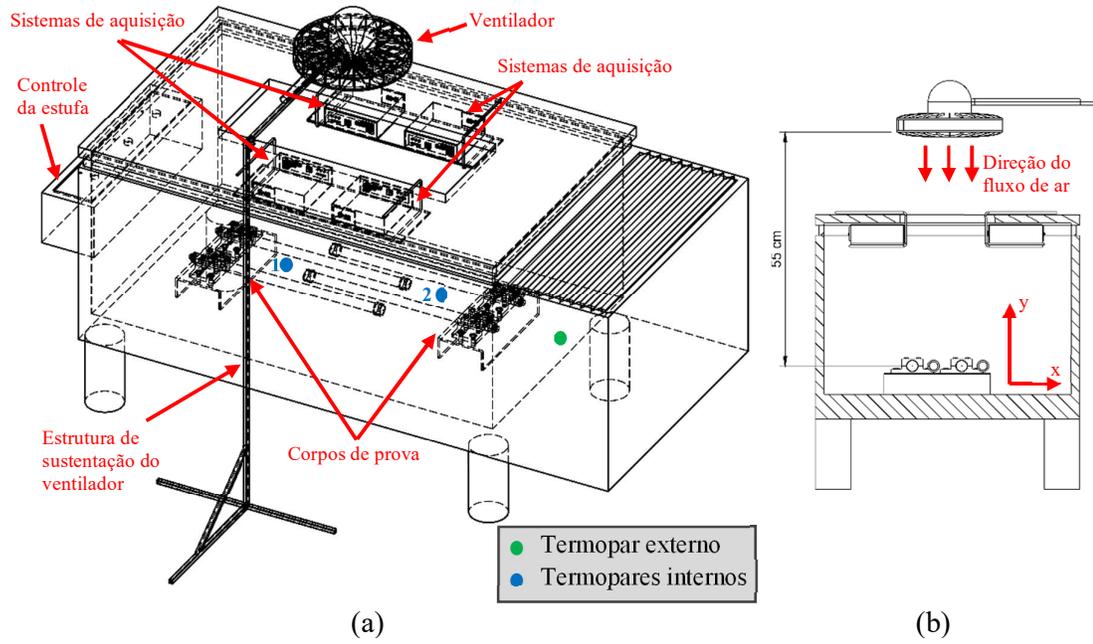


Figura 3-23: Detalhamento da configuração de ensaio: (a) vista aramada; (b) corte transversal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SOFTWARE DE PROCESSAMENTO DE DADOS

O *software* de processamento de dados foi composto por três algoritmos a serem executados sequencialmente: (i) algoritmo de identificação modal; (ii) algoritmo de cálculo do módulo de elasticidade do material; (iii) algoritmo de pós-processamento e apresentação gráfica dos resultados. Neste item, os algoritmos desenvolvidos são detalhados e sua validação é apresentada.

4.1.1 Implementação do algoritmo de identificação modal

No processamento dos dados de um ensaio EMM-ARM completo, é necessário a execução do algoritmo de identificação modal em todas as amostragens realizadas. Em um ensaio EMM-ARM típico do presente trabalho, com amostragens da aceleração do corpo de prova aproximadamente a cada 5 a 8 minutos durante 7 dias, produz-se cerca de 1350 arquivos de amostragens. Assim, o processamento desses dados requer que o algoritmo de identificação modal seja executado em cada um desses arquivos, de modo a obter a frequência natural do corpo de prova em cada instante de amostragem. A Figura 4-1 apresenta o algoritmo de identificação modal desenvolvido, sendo destacado em amarelo as ações a serem executadas iterativamente em cada arquivo de ensaio.

Após a inicialização, na qual o usuário realiza a configuração de parâmetros iniciais (*e.g.* configuração de filtros a serem utilizados) e indica a localização dos arquivos de resultados experimentais a serem processados, o algoritmo executa a identificação modal iterativamente em cada um destes arquivos. O processo iterativo pode ser dividido, essencialmente, em seis etapas sequenciais: (i) leitura e pré-processamento dos dados experimentais, que no contexto desse trabalho consistem em acelerações do corpo de prova aferidas durante o ensaio EMM-ARM e seus respectivos instantes de medição; (ii) pré-processamento dos dados com aplicação de filtros digitais e remoção da média; (iii) obtenção da transformada discreta de Fourier (DFT) do sinal, utilizando o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT); (iv) obtenção das funções de densidade espectral, utilizando o procedimento de Welch (WELCH, 1967); (v) execução de métodos de identificação modal não-paramétricos (*peak-picking*, meia potência, IFT); (vi) salvamento dos resultados obtidos, registrando, em um arquivo de texto (extensão .txt), o instante de amostragem e as frequências naturais identificadas em cada um dos métodos.

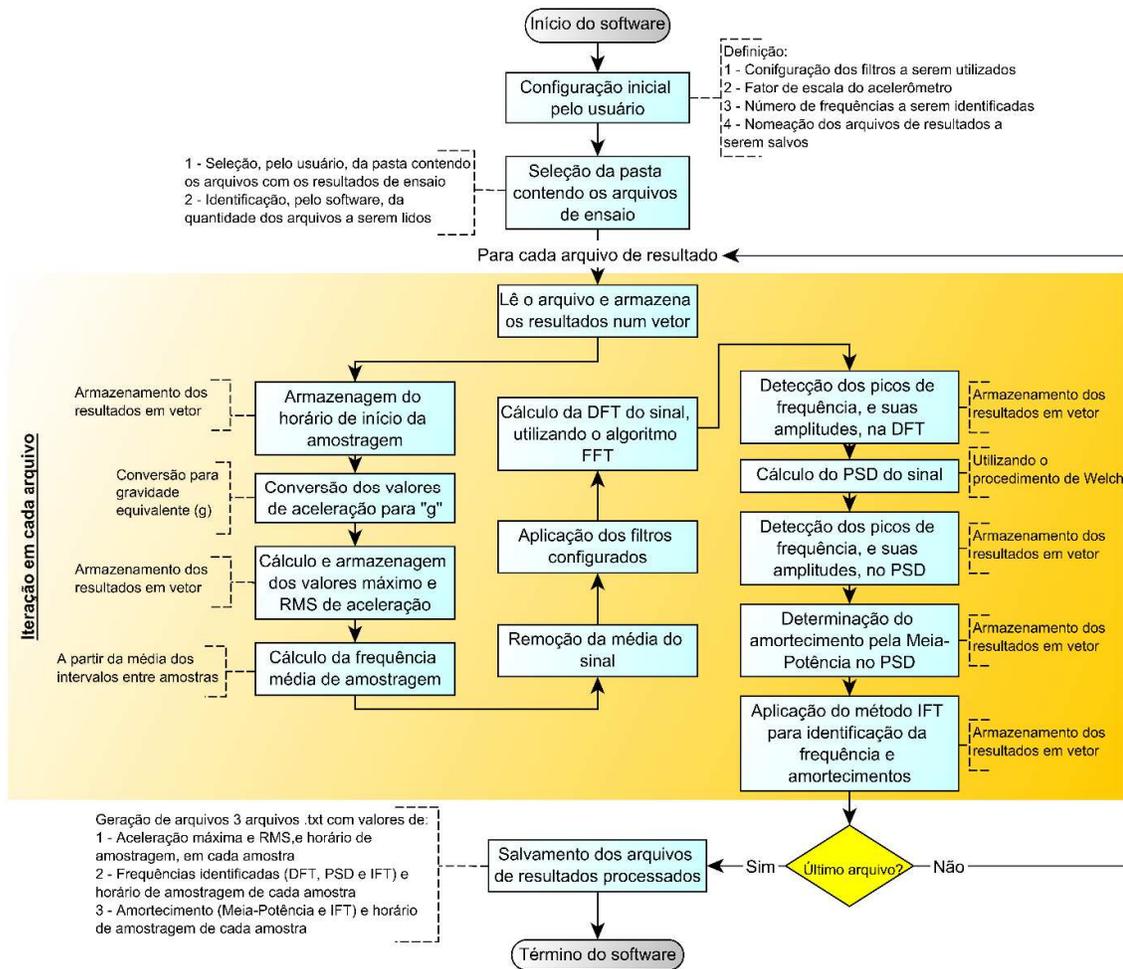


Figura 4-1: Algoritmo de identificação modal.

Como premissa para o desenvolvimento do algoritmo e do sistema de aquisição de dados, definiu-se que os dados experimentais estariam contidos em um arquivo de texto (extensão .txt), que seria lido pelo algoritmo e armazenado em um vetor de dados. O pré-processamento consistiu na remoção da média do conjunto de dados e na aplicação de filtros digitais. A remoção da média do conjunto de dados visa corrigir eventuais erros advindos do processo de amostragem, devido principalmente à instrumentação, que causam um efeito de *drift* nos dados (NEWLAND, 2005). Esse efeito leva à introdução de uma tendência linear nos dados, provocando distorções na forma de picos acentuados no espectro de frequências em frequências próximas de zero, o que, por sua vez, prejudica a automação de métodos de identificação modal baseados no domínio da frequência. Implementou-se a possibilidade de se escolher entre quatro tipos de filtros digitais, com frequências de corte configuráveis (RODRIGUES, 2004): (i) passa-baixa Butterworth de oitava ordem; (ii) passa-alta Butterworth de oitava ordem; (iii) passa-baixa Chebyshev de oitava ordem; (iv) filtro rejeita-faixa. Além

disso, também se implementou a possibilidade de se realizar a decimação do sinal em uma dada frequência, que é usual em processos de identificação modal (RODRIGUES, 2004). Para criação e aplicação dos filtros, e obtenção das representações do sinal no domínio da frequência (transformada discreta de Fourier e funções de densidade espectral), utilizou-se funções nativas do MATLAB e do *Signal Processing Toolbox*, uma biblioteca com funções específicas para processamento de sinais.

Os métodos de identificação modal não-paramétricos *peak-picking*, meia potência e IFT, apresentados no item 2.3.2.4, foram implementados. Apesar da literatura indicar que métodos paramétricos apresentam melhor performance no ensaio EMM-ARM, por serem menos sensíveis a ruídos (AZENHA *et al.*, 2012b; GRANJA, 2016), os algoritmos não-paramétricos, quando aplicados a sistemas de ensaio com baixo amortecimento e frequências naturais espaçadas entre si, como o caso dos corpos de prova do EMM-ARM, produzem resultados que podem ser suficiente precisos, a depender da aplicação. Além disso, são de implementação simplificada, especialmente se comparados a algoritmos de identificação modal paramétricos. Em trabalhos futuros, prevê-se a implementação de algoritmos de identificação modal paramétricos, a serem incorporados no *software* de processamento de dados.

A implementação dos métodos *peak-picking*, meia potência e IFT foi feita de forma que os processos sejam inteiramente automáticos, sem intervenção do usuário. Como o processamento dos dados de um ensaio EMM-ARM completo envolve a identificação da frequência e do amortecimento de uma grande quantidade de sinais, considerou-se que a seleção manual do pico pelo usuário, tarefa típica dos métodos não-paramétricos, não seria um procedimento padrão, a ser utilizado no processamento de todos os arquivos, viável. Assim, partindo dos pressupostos de que as frequências de interesse são razoavelmente espaçadas, e de que o SNR é satisfatoriamente alto, produzindo picos de frequência evidentes, foram implementados critérios que possibilitam a seleção automática dos picos. Apesar disso, foi implementada a opção do usuário informar o número, ou nome, dos arquivos de resultado de ensaio dos quais se deseja visualizar representações gráficas relacionadas ao processo de identificação modal, para auxiliar o tratamento de casos em que as hipóteses anteriores não sejam atendidas plenamente.

Previamente ao término do algoritmo, os resultados do processamento são salvos em arquivos de texto para serem utilizados nos algoritmos seguintes. São gerados três arquivos de texto, que contém: (i) valores de aceleração máxima e RMS, associados ao horários de início

de amostragem, de cada amostra; (ii) valores das frequências naturais identificadas por cada método, associados ao horários de início de amostragem, de cada amostra; (iii) valores do coeficiente de amortecimento identificados por cada método, associados ao horários de início de amostragem, de cada amostra. Alternativamente, o algoritmo permite, nas suas configurações iniciais, decidir quais métodos de identificação modal serão utilizados, sendo possível desabilitar métodos não desejados para diminuição do tempo de processamento.

4.1.2 Implementação dos algoritmos de cálculo do módulo de elasticidade do material e de pós-processamento e apresentação gráfica dos resultados

A implementação do algoritmo de cálculo do módulo de elasticidade consistiu no desenvolvimento de seis módulos sequenciais: (i) leitura do arquivo de texto gerado pelo algoritmo de identificação modal, que contém os horários de amostragem e frequências identificadas em cada amostra; (ii) definição das propriedades físicas (massa linear do PVC, da tampa da extremidade livre do tubo, a massa do acelerômetro e a massa do dispositivo de vibração, quando aplicável) e geométricas (comprimento livre, e diâmetros interno e externo) do molde; (iii) cálculo do módulo de elasticidade do PVC a partir da frequência natural do tubo, obtida da média de resultados de ensaios EMM-ARM realizados com o tubo vazio (sem material), conforme descrito no item 3.1.3; (iv) estimativa do parâmetro $(EI)_{compósito}$, isto é, do produto do módulo de elasticidade pela inércia do sistema compósito tubo/material, por meio da formulação aproximada dada nas equações (4-1) e (4-3), que considera o efeito da massa concentrada inserida pelo acelerômetro, da frequência natural; (v) utilizando as estimativas do parâmetro $(EI)_{compósito}$, obtidas no passo anterior, obtenção do valor desse parâmetro a partir da solução numérica da equação transcendental, ou equação de frequência, de vibração da viga, modelada como um sistema contínuo com massa concentrada, dada nas equações (4-2) e (4-4); (vi) cálculo do módulo de elasticidade do material ensaiado, utilizando a hipótese de seção perfeitamente compósita.

Para a análise de resultados de ensaio de pastas de cimento, nos quais o corpo de prova é uma viga engastada e livre com uma massa na ponta, oriunda do acelerômetro e tampa de fechamento do tubo, a equação simplificada da primeira frequência natural é (BLEVINS, 1979):

$$f_{compósito} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{3 \cdot (EI)_{compósito}}{L^3 \cdot (M_p + 0,24 \cdot M)} \right]^{1/2} \quad (4-1)$$

em que: $f_{compósito}$ é a frequência natural do sistema compósito, em Hz; $(EI)_{compósito}$ é o produto do módulo de elasticidade pela inércia do sistema compósito, em $Pa \cdot m^4$; L é o vão livre do sistema compósito, em m; M_p é a massa localizada na extremidade livre, dada pela soma das massas da tampa e acelerômetro e M é a massa do sistema compósito, em kg.

A equação transcendental, ou de frequência, de vibração de uma viga engastada e livre com uma massa concentrada na ponta, analisada como sistema contínuo, é (AZENHA *et al.*, 2012a; PEDROSO, 2015):

$$(a)^3 \cdot [\cosh(a \cdot L) \cdot \cos a \cdot L + 1] + \left(\frac{\omega^2 \cdot m_p}{(EI)_{compósito}} \right) \cdot [\cos(a \cdot L) \cdot \sinh(a \cdot L) - \cosh(a \cdot L) \cdot \sin(a \cdot L)] = 0 \quad (4-2)$$

Em que: $a = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 \cdot \bar{m}}{(EI)_{compósito}}}$; ω é a frequência do sistema, em rad/s; \bar{m} é a massa linear do sistema, em kg/m; m_p é a massa concentrada na ponta do sistema.

Para a análise de resultados de ensaio de concretos, nos quais o corpo de prova é uma viga biapoiada com uma massa concentrada no centro do seu vão, oriunda do acelerômetro e, no caso do presente trabalho, de um motor para indução de vibração forçada, a equação simplificada da primeira frequência natural é (BLEVINS, 1979):

$$f_{compósito} = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\frac{3 \cdot (EI)_{compósito}}{L^3 \cdot (M_p + 0,49 \cdot M)} \right]^{1/2} \quad (4-3)$$

A equação transcendental, ou de frequência, de vibração de uma viga biapoiada com uma massa concentrada no centro do seu vão, considerando apenas os casos de modos simétricos que engloba a frequência fundamental da viga (1º modo de vibração), analisada como sistema contínuo, é (BAKER, 1967; CLOUGH; PENZIEN, 2003; GRANJA, 2016; PEDROSO, 2005):

$$4 \cdot a^3 \cdot (EI)_{compósito} \cdot \cosh\left(a \cdot \frac{L}{2}\right) \cdot \cos\left(a \cdot \frac{L}{2}\right) + M \cdot \omega^2 \cdot \left[\cos\left(a \cdot \frac{L}{2}\right) \cdot \sinh\left(a \cdot \frac{L}{2}\right) - \sin\left(a \cdot \frac{L}{2}\right) \cdot \cosh\left(a \cdot \frac{L}{2}\right) \right] \quad (4-4)$$

Em que: $a = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 \cdot \bar{m}}{(EI)_{compósito}}}$; ω é a frequência do sistema, em rad/s; \bar{m} é a massa linear

do sistema, em kg/m; M é a massa concentrada na ponta do sistema; e L é o vão livre da viga. A dedução matemática das equações (4-1) a (4-4) é apresentada no APÊNDICE C.

Por fim, o *software* apresenta os resultados obtidos em um gráfico de evolução do módulo de elasticidade ao longo da idade do material. Ao algoritmo de apresentação gráfica dos resultados foram implementadas duas funcionalidades: (i) possibilidade de se escolher entre um gráfico de evolução do módulo de elasticidade em escala decimal ou semi-logarítmica (eixo das abscissas, correspondente ao tempo, em escala logarítmica), para melhor visualização de resultados de ensaios de longa duração; (ii) possibilidade de se ajustar uma curva de evolução do módulo de elasticidade, dada pela equação (3-5), aos resultados experimentais, e apresentá-la em conjunto com os mesmos ou isoladamente. No caso de ajuste da curva, um arquivo de texto é gerado com os resultados do ajuste: coeficientes da equação ajustada, coeficiente R² da regressão e erros residuais em cada ponto da curva.

4.1.3 Validação do algoritmo de identificação modal

Os resultados obtidos na validação do algoritmo de identificação modal são resumidos na Tabela 4-1. O erro é calculado em relação ao valor do sinal, segundo a Equação (4-5).

$$\text{Erro (\%)} = 100 \cdot \frac{(\text{Sinal}) - (\text{Valor identificado})}{(\text{Sinal})} \quad (4-5)$$

Tabela 4-1: Resultados da validação do algoritmo de identificação modal.

Frequência							Coeficiente de amortecimento				
Sinal	PP-FFT		PP-PSD		IFT		Sinal	HB		IFT	
	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Erro		Valor	Erro	Valor	Erro
10	10,000	0,00%	9,998	-0,02%	9,990	-0,10%	0,50	0,3872	-22,56%	0,5023	0,46%
30	30,000	0,00%	29,993	-0,02%	29,994	-0,02%	0,10	0,1197	19,68%	0,1054	5,44%
50	50,000	0,00%	49,988	-0,02%	49,999	0,00%	0,05	0,0781	56,23%	0,0537	7,45%

Pode-se observar que os resultados obtidos na identificação da frequência possuem baixos desvios em relação à referência para todos os métodos utilizados. Sendo os erros da ordem de décimos de porcentagem (0,1%), os algoritmos implementados foram considerados validados. Além disso, tal magnitude sugere que os erros advindos exclusivamente dos métodos de identificação modal utilizados são insignificantes perante àqueles introduzidos por outras fontes de erro, como ruídos no sinal amostrado, provocados por diversos fatores, e outras imprecisões típicas da execução do ensaio EMM-ARM.

Os desvios observados na estimativa da frequência, e as diferenças entre cada método, são, em grande parte, relacionados ao fato de que os métodos de identificação modal não-

paramétricos sofrem influência do caráter discreto das representações do sinal analisado no domínio da frequência. Tanto a DFT quando o PSD utilizados nestes métodos representam o domínio na frequência em uma quantidade discreta de valores de frequência, denominados *bins* ou pontos de frequência, cuja quantidade define a resolução de frequência da representação.

Na computação de uma DFT, por exemplo, a quantidade de pontos em que o domínio da frequência é discretizado é igual à metade da quantidade de pontos amostrados no sinal, sendo, portanto, função da duração e frequência de amostragem. Na validação realizada, como a duração de amostragem foi 90 segundos e a frequência de amostragem foi 700 Hz, o domínio da frequência é dividido em 31500 pontos. A partir do sinal amostrado a 700 Hz, de acordo com o Teorema de Nyquist pode-se representar frequências de 0 Hz a $0,5f_s$ Hertz, sendo f_s a frequência de amostragem, dada em Hertz. Na validação realizada, isso equivale a uma resolução de aproximadamente $1,11 \times 10^{-2} \text{ Hz}$, isto é, $350 \text{ Hz} \div 31500$. Essa resolução permite que os 900-, 2700- e 4500-ésimos pontos de frequência representem, respectivamente, considerando três casas decimais, os valores 10,000, 30,000 e 50,000 Hz, que são exatamente as frequências do sinal.

Já na computação do PSD pelo procedimento de Welch, há uma troca entre resolução e redução da variância da estimativa da representação no domínio da frequência, o que é particularmente útil ao se trabalhar com sinais com ruídos. Neste procedimento, o sinal é dividido em segmentos com um número igual de pontos, a partir dos quais são computadas DFTs utilizadas posteriormente para estimativa, por meio de uma média, do PSD. A resolução do método é, portanto, reduzida em comparação ao cálculo direto da DFT utilizando o sinal completo, pois o número de pontos utilizado para a computação de cada DFT é reduzido na proporção da quantidade de segmentos nos quais o sinal original é dividido. Na validação realizada, o procedimento de Welch dividiu o sinal original em segmentos com 16384 pontos, com sobreposição de 50%, adicionando zeros (*zero-padding*) quando necessário, caso o número de amostras no sinal não fosse múltiplo de 16384. Seguindo a mesma lógica apresentada no parágrafo anterior, observa-se que tal computação leva a uma resolução de frequência de $4,27246 \times 10^{-2} \text{ Hz}$, isto é, $350 \text{ Hz} \div 8192$. Assim, considerando três casas decimais, o ponto de frequência com valor mais próximo de, por exemplo, 10 Hz é o 234-ésimo, que contém o valor de 9,998 Hz e é apenas 0,02% menor que 10 Hz, já que o ponto imediatamente seguinte seria 10,040 Hz, que é 0,4% maior que 10 Hz. O raciocínio é análogo para as demais frequências identificadas por esse método na Tabela 4-1.

O método IFT, por sua vez, apresentou os piores resultados pois envolve manipulações adicionais no sinal, como a aplicação de uma janela para seleção da região da DFT utilizada para computação da transformada inversa de Fourier, que leva o sinal novamente ao domínio do tempo no qual é analisado. Essa manipulação provavelmente introduziu um viés em suas estimativas.

Já os algoritmos de estimativa do coeficiente de amortecimento apresentaram desvios relativamente altos quando comparados com os valores de referência. O método da Meia-Potência, por ser realizado no PSD, foi influenciado negativamente pela perda de resolução desse método. A resolução influencia tanto na estimativa da frequência de pico quando nas frequências de meia potência, sendo necessário, quando a resolução é muito baixa, obter as frequências de meia potência a partir da interpolação linear entre os dois pontos de frequência com potências mais próximas à meia potência do ponto de pico. Todas essas características contribuem para a imprecisão observada neste método. O método IFT, que utiliza o decremento logarítmico para cálculo do coeficiente de amortecimento, apresentou resultados melhores, uma vez que se baseia na DFT e não no PSD, mas ainda com erros consideravelmente maiores que os obtidos na estimativa da frequência.

Para avaliar o grau de influência que a duração e a frequência de amostragem possuem no desempenho da implementação feita de ambos métodos de identificação do coeficiente de amortecimento, foram executados testes adicionais com o mesmo sinal utilizado anteriormente, mas variando-se a duração e a frequência. Os resultados são apresentados na Tabela 4-2, que também apresenta a quantidade de amostras em cada sinal testado (pontos de amostra, dada pela multiplicação da duração pela frequência), o que fornece uma base de comparação para se comparar a influência dos dois fatores testados.

Tabela 4-2: Influência da duração e frequência de amostragem no desempenho da implementação dos métodos de Meia-Potência e IFT para identificação do coeficiente de amortecimento.

Duração (s)	Frequência (Hz)	Pontos de amostra	Meia-Potência			IFT		
			1º modo	2º modo	3º modo	1º modo	2º modo	3º modo
90	700	63000	0,3873	0,1197	0,0781	0,5024	0,1043	0,0568
90	7000	630000	0,4206	0,1240	0,0727	0,5024	0,1045	0,0563
900	700	630000	0,4488	0,0772	0,0360	0,5018	0,1054	0,0562
90	70000	6300000	0,4225	0,1222	0,0696	0,5023	0,1044	0,0564
9000	700	6300000	0,4994	0,0997	0,0498	0,5017	0,1055	0,0565
90000	700	63000000	0,5000	0,1000	0,0500	-	-	-

Observou-se que, considerando uma mesma quantidade de pontos de amostra, uma maior duração leva a um desempenho melhor no algoritmo de Meia-Potência que uma maior frequência de amostragem. A Tabela 4-3, que apresenta os erros relativos calculados utilizando a Equação (4-5), favorece a visualização deste fenômeno, na qual o sinal com duração de 900 segundos e frequência de 700 Hz, que equivale a 630000 pontos, apresentou um desempenho melhor que um sinal de duração de 90 segundos e frequência de 70000 Hz, que equivale a 10 vezes mais pontos.

Já o desempenho do método IFT não aparenta ser influenciado significativamente por nenhum dos fatores, o que pode indicar que as manipulações feitas no sinal durante o método podem impor um piso ao erro obtido pelo método, não permitindo que melhores desempenhos sejam alcançados, com a presente implementação, realizada a partir de melhores condições de amostragem. Além disso, os testes sugerem que a implementação realizada do método apresenta um viés positivo, de superestimar o coeficiente de amortecimento, conforme pode ser observado nas Tabela 4-1 e Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Erros relativos do teste da influência da duração e frequência de amostragem na implementação dos métodos de Meia-Potência e IFT para identificação do coeficiente de amortecimento.

Duração (s)	Frequência (Hz)	Pontos	Meia-Potência			IFT		
			1º modo	2º modo	3º modo	1º modo	2º modo	3º modo
90	700	63000	-22,54%	19,70%	56,24%	0,47%	4,34%	13,66%
90	7000	630000	-15,89%	23,99%	45,36%	0,48%	4,48%	12,66%
900	700	630000	-10,24%	-22,77%	-28,05%	0,35%	5,42%	12,31%
90	70000	6300000	-15,49%	22,23%	39,19%	0,47%	4,35%	12,70%
9000	700	6300000	-0,12%	-0,32%	-0,45%	0,34%	5,46%	13,00%
90000	700	63000000	0,00%	0,00%	0,00%	-	-	-

Exemplos dos resultados gráficos gerados por cada um dos métodos são apresentados graficamente no APÊNDICE D. No *software* de processamento de dados, foi implementada a opção de visualização dessas representações para amostras indicadas pelo usuário. Dessa forma, é possível o ajuste fino da identificação modal, seja pela aplicação de filtros a determinadas amostras ou indicação manual da frequência do sinal, caso a identificação automática não consiga lidar com particularidades do sinal, como presença de ruídos.

4.2 PROJETO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

No projeto do sistema de aquisição de dados, definiu-se que o sistema deveria conter: (i) um *slot* para um cartão SD, onde deveriam ser salvos os dados experimentais de cada amostragem realizada durante o ensaio; (ii) entrada para, pelo menos, um acelerômetro, que é o mínimo necessário para execução do ensaio EMM-ARM; (iii) uma entrada para sensor de temperatura e umidade, para se monitorar as condições ambientais ao redor do ensaio; (iv) relógio externo para registro do tempo; (v) três LEDs, em cores diferentes, para interface com o usuário e indicação do estado do sistema; (vi) um botão, para controle do usuário de eventos previstos (interrupção e reinício do ensaio, no caso de retirada do cartão SD para obtenção de resultados parciais).

Com base nessas definições, o protocolo de funcionamento do sistema foi definido como sendo: (i) inicialização de todos os módulos eletrônicos do sistema (cartão SD, sensor de temperatura e umidade, relógio externo), sinalizando quaisquer eventuais erros de inicialização por meio de uma sequência de acionamento dos LEDs específica; (ii) início da primeira amostragem; (iii) após a amostragem, o sistema permanece em repouso até que se complete o tempo necessário para a próxima amostragem. Cada processo de amostragem exige, antes, a criação de um novo arquivo no cartão SD, sucedido da checagem se o arquivo foi corretamente aberto, sendo indicados eventuais erros por meio de uma sequência de acionamento dos LEDs específica. Durante o repouso, o sistema permite a retirada do cartão SD para a obtenção de dados parciais do ensaio, mediante o pressionamento de um botão de pressão. Ao se pressionar tal botão, o sistema entra em um novo estado de espera até que o botão seja novamente pressionado, evento que indica ao sistema que o cartão SD foi novamente inserido. Antes de retornar ao estado normal, o sistema reinicializa o cartão SD, também indicando quaisquer erros por meio do acionamento dos LEDs.

Para simplificação do sistema inicialmente proposto, a definição de informações como o funcionamento como frequência e duração de amostragem, e tempo de espera entre dois ciclos de amostragem no ensaio EMM-ARM, foi incorporada ao código fonte do sistema. Sendo assim, sua modificação, na versão desenvolvida nesse trabalho, requer a reprogramação do microcontrolador. No entanto, não há limitações técnicas quanto à criação de uma interface mais elaborada para o sistema, que permita a configuração dessas informações pelo usuário sem a necessidade de reprogramar o microcontrolador.

A Figura 4-2 ilustra o sistema em dois estágios de desenvolvimento: na Figura 4-2a, em versão protótipo; na Figura 4-2b, em versão soldada em uma placa perfurada. A versão protótipo foi utilizada para testes de implementação do código fonte do microcontrolador e para caracterização dos acelerômetros e do sistema de aquisição de dados. Como essa versão utiliza fios não soldados, é um sistema propenso a erros de montagem e falhas durante a execução de ensaios EMM-ARM. Assim que o desenvolvimento do sistema permitiu a definição de todos os componentes para execução do ensaio EMM-ARM, construiu-se a versão soldada em uma placa perfurada, que é mais robusta para o manuseio e contém apenas os componentes eletrônicos essenciais para o sistema, levando à economia de energia e possível redução de ruídos nas linhas de dados dos acelerômetros.

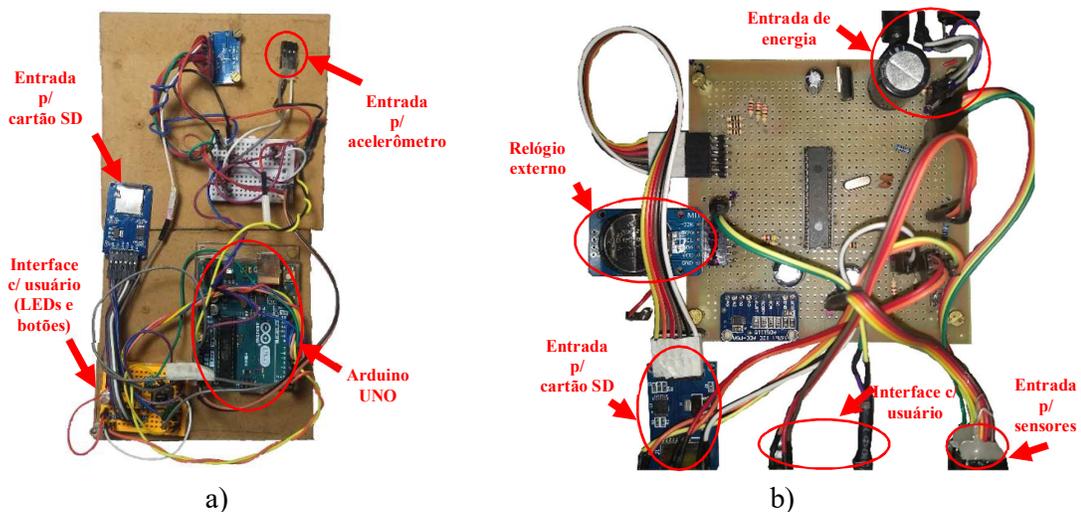


Figura 4-2: Sistema de aquisição de dados na versão protótipo (a) e soldada em uma placa perfurada (b).

A versão montada sobre a placa perfurada soldada teve um custo total de R\$90,00, com todos os componentes comprados em lojas físicas locais. O custo poderia ser reduzido para cerca de R\$ 50,00, caso parte dos componentes fossem adquiridos em lojas online ou importados. Sua única restrição para usos industrial/comercial está na demora de sua fabricação (em torno de 5 horas de trabalho para posicionar e soldar todas as conexões). A transição para uma solução em circuito impresso, ideal para produção em largas escalas, é direta, uma vez que as conexões utilizadas no circuito seriam idênticas, requerendo-se apenas o projeto da placa impressa. Além disso, a incorporação de tecnologias de comunicação como conectividade *wi-fi* ou *bluetooth*, potencializando suas funcionalidades, também não apresenta dificuldades ou incompatibilidades, sendo alvo de futuras atualizações do sistema proposto.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ACELERÔMETROS E DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

4.3.1 Avaliação da estabilidade da frequência de amostragem do sistema

A Figura 4-3, Figura 4-4, Figura 4-5 e Figura 4-6 apresentam os histogramas de frequência dos intervalos de tempo entre amostragens consecutivas das quatro amostragens realizadas para avaliação da estabilidade da frequência de amostragem do sistema.

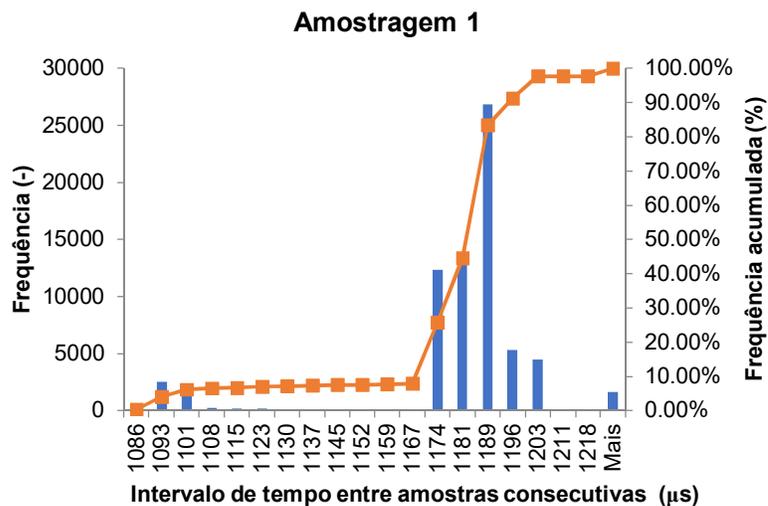


Figura 4-3: Histograma de frequência do intervalo entre amostras consecutivas do sistema de aquisição de dados, para a série de dados obtida na Amostragem 1.

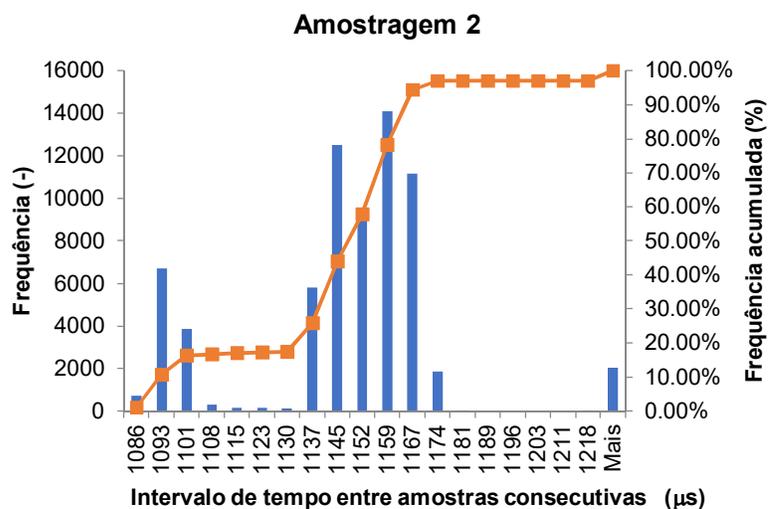


Figura 4-4: Histograma de frequência do intervalo entre amostras consecutivas do sistema de aquisição de dados, para a série de dados obtida na Amostragem 2.

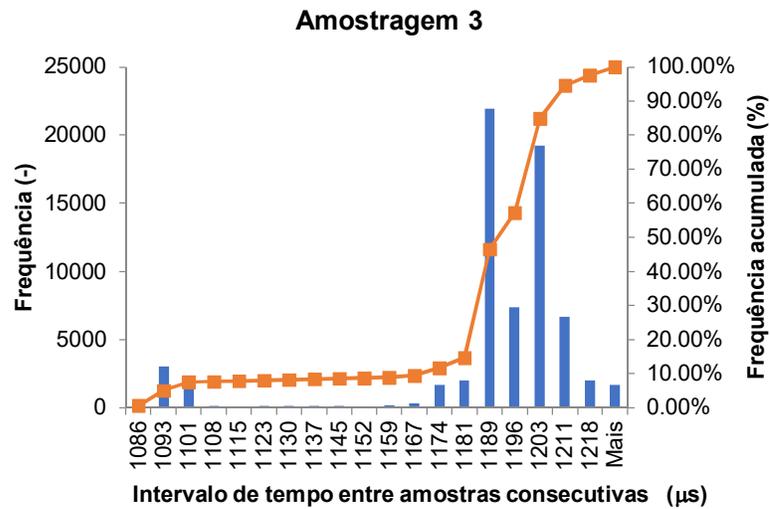


Figura 4-5: Histograma de frequência do intervalo entre amostras consecutivas do sistema de aquisição de dados, para a série de dados obtida na Amostragem 3.

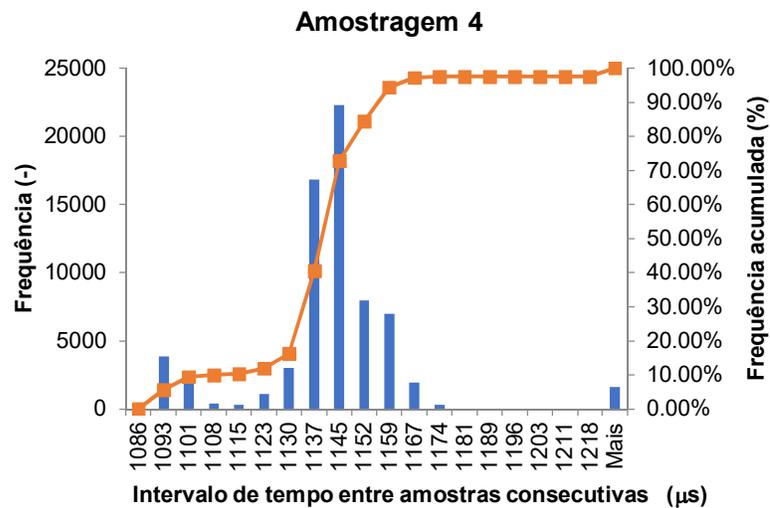


Figura 4-6: Histograma de frequência do intervalo entre amostras consecutivas do sistema de aquisição de dados, para a série de dados obtida na Amostragem 4.

Uma análise visual dos histogramas permite observar que, de fato, as amostras realizadas pelo sistema de aquisição de dados não são realizadas com uma frequência de amostragem constante, isto é, com intervalos de tempo sempre com mesmo valor entre amostras. No entanto, embora ocorra uma dispersão considerável ao se considerar todos os dados em conjunto, os resultados tendem a se agrupar em torno de valores que são, em todas as amostragens, relativamente próximos ao valor teórico de 1163 μs . Desconsiderando dados extremos (menores que 1101 μs e maiores que 1218 μs), as amostras tendem a se espalhar em

um intervalo de 29 μ s a 45 μ s em torno do pico de maior frequência, o que equivale a uma dispersão de, aproximadamente, $\pm 2,5\%$ a $\pm 3,8\%$ do valor teórico.

Nenhum indício de viés em relação ao valor esperado de intervalo de tempo (1163 μ s) pode ser observado no processo de amostragem. Enquanto as Amostragens 2 e 4 apresentam um viés levemente negativo, isto é, boa parte das amostras foram feitas com intervalos de tempo menores que o esperado, as Amostragens 1 e 3 apresentam um viés positivo. Assim, não há evidência a respeito se o sistema possui limitações sistemáticas, relacionadas a, por exemplo, excesso de instruções a serem executadas entre duas amostras consecutivas para realizar amostragens a uma frequência de 860 Hz, ou se o comportamento observado é apenas uma variabilidade intrínseca do sistema, que ocorreria em qualquer outra frequência de amostragem. Recomenda-se que estudos adicionais envolvendo outras frequências de amostragem sejam executadas, de forma a caracterizar completamente o sistema quanto a esta característica.

A Tabela 4-4 apresenta os resultados tabulados utilizados para produzir os histogramas, com as frequências e frequências acumuladas de cada categoria de tempo.

Tabela 4-4: Resultados tabulados do histograma de frequência do intervalo entre amostras consecutivas do sistema de aquisição de dados.

Tempo (μ s)	Amostragem 1		Amostragem 2		Amostragem 3		Amostragem 4	
	Frequência	Acumulada	Frequência	Acumulada	Frequência	Acumulada	Frequência	Acumulada
1086	265	0,38%	747	1,08%	461	0,67%	48	0,07%
1093	2515	4,02%	6690	10,76%	3044	5,07%	3854	5,64%
1101	1495	6,18%	3866	16,35%	1697	7,52%	2582	9,38%
1108	209	6,48%	304	16,79%	152	7,74%	373	9,92%
1115	177	6,74%	166	17,03%	66	7,84%	284	10,33%
1123	156	6,97%	171	17,27%	115	8,00%	1071	11,88%
1130	131	7,16%	152	17,49%	125	8,19%	3026	16,25%
1137	124	7,33%	5827	25,92%	152	8,41%	16831	40,59%
1145	89	7,46%	12511	44,01%	143	8,61%	22305	72,85%
1152	43	7,53%	9565	57,85%	79	8,73%	7957	84,36%
1159	97	7,67%	14079	78,21%	180	8,99%	6985	94,46%
1167	121	7,84%	11153	94,34%	288	9,40%	1907	97,22%
1174	12350	25,70%	1862	97,03%	1672	11,82%	302	97,65%
1181	13093	44,64%	2	97,03%	2017	14,74%	0	97,65%
1189	26854	83,47%	0	97,03%	21957	46,49%	0	97,65%
1196	5321	91,17%	0	97,03%	7392	57,18%	0	97,65%
1203	4477	97,64%	0	97,03%	19226	84,99%	0	97,65%
1211	0	97,64%	0	97,03%	6671	94,63%	0	97,65%
1218	0	97,64%	1	97,03%	2039	97,58%	0	97,65%
Mais	1631	100,00%	2052	100,00%	1672	100,00%	1623	100,00%

As observações feitas anteriormente podem ser constatadas em termos numéricos. Dados aberrantes, incluídos na categoria “Mais”, formam um pequeno grupo, menor que 3% dos dados da população, embora incluam valores muito maiores que os demais. A Tabela 4-5 apresenta as estatísticas descritivas de cada uma das séries de dados, juntamente com os valores máximos e mínimos de cada série.

Tabela 4-5: Estatísticas descritivas das séries de dados obtidas em cada amostragem.

Estatística	Amostragem 1	Amostragem 2	Amostragem 3	Amostragem 4
Média	1298,01	1247,137	1280,396	1255,334
Desvio-padrão da amostra	829,1725	1295,206	639,2961	798,8324
Mediana	1184	1148	1192	1140
Valor máximo	40404	256256	12980	17576
Valor mínimo	1080	1076	1080	1080

Apesar dos histogramas evidenciarem que os valores aberrantes formam um pequeno grupo dentro da série, eles ainda provocam um valor bastante alto de desvio-padrão, uma vez que são muito maiores que os demais valores, como evidenciado pelos valores máximos apresentados na Tabela 4-5. Tal situação chega a ser extrema na Amostragem 2, na qual o valor do desvio-padrão é numericamente maior que a própria média. Por causa dessa influência, a estatística mais representativa da série talvez seja a mediana.

Os resultados da identificação modal da frequência do sinal definido pela Eq. (3-1) e Tabela 3-1, e amostrado com os intervalos de tempo entre amostras das Amostragens 1 a 4, são apresentados na Tabela 4-6.

Tabela 4-6: Resultados da análise de influência da heterogeneidade de intervalos de tempo entre amostras na identificação modal de um sinal conhecido.

Série	Sinal		Método de identificação			Série	Sinal		Método de identificação		
			PP-FFT	PP-PSD	IFT				PP-FFT	PP-PSD	IFT
Amostragem 1	1ª freq.	Valor	10,005	10,016	9,955	Amostragem 3	1ª freq.	Valor	9,668	9,677	10,033
		Erro	0,05%	0,16%	-0,45%			Erro	-3,32%	-3,23%	0,33%
	2ª freq.	Valor	29,848	30,000	29,934		2ª freq.	Valor	29,039	29,030	29,729
		Erro	-0,51%	0,00%	-0,22%			Erro	-3,20%	-3,23%	-0,90%
	3ª freq.	Valor	49,847	49,937	49,973		3ª freq.	Valor	48,409	48,384	49,784
		Erro	-0,31%	-0,13%	-0,05%			Erro	-3,18%	-3,23%	-0,43%
Amostragem 2	1ª freq.	Valor	9,938	9,935	10,140	Amostragem 4	1ª freq.	Valor	10,000	9,870	10,018
		Erro	-0,62%	-0,65%	1,40%			Erro	0,00%	-1,30%	0,18%
	2ª freq.	Valor	29,813	29,805	31,278		2ª freq.	Valor	29,987	29,999	29,792
		Erro	-0,62%	-0,65%	4,26%			Erro	-0,04%	0,00%	-0,69%
	3ª freq.	Valor	51,880	49,381	49,884		3ª freq.	Valor	49,975	49,982	49,978
		Erro	3,76%	-1,24%	-0,23%			Erro	-0,05%	-0,04%	-0,04%

Observa-se que a heterogeneidade nos intervalos de tempo entre amostras pode implicar em erros consideráveis na identificação modal de frequências, sendo constatados erros de até 3,76% em relação aos valores verdadeiros. Estes erros aparecem nos gráficos de espectro de frequência de forma similar a ruídos eletrônicos. O APÊNDICE F apresenta as plotagens dos espectros de frequência obtidos em cada amostragem. Não foi possível identificar relações entre as estatísticas descritivas calculadas e o grau de erro observado na identificação modal, visto que os métodos de identificação modal apresentam erros de magnitude muito variável entre si, considerando uma mesma amostragem.

Considera-se não haver evidências que sugiram que algum dos três métodos de identificação modal apresente desempenho superior aos demais para tratar o caso de amostras com heterogeneidade no intervalo de tempo entre amostras. Como todos os três métodos utilizam o algoritmo FFT, todos incorporam erros advindos da suposição, utilizada por este algoritmo, de que as amostras são igualmente espaçadas no tempo. Há algoritmos denominados FFT não-uniformes (NUFFT) que tentam solucionar o problema de se trabalhar com dados amostrados não-uniformemente, porém sua implementação e utilização está fora do escopo do presente trabalho (DUTT; ROKHLIN, 1993; GREENGARD; LEE, 2011).

4.3.2 Levantamento das especificações dos acelerômetros

O levantamento de especificações dos acelerômetros candidatos à incorporação ao sistema de monitoramento do ensaio EMM-ARM é apresentado na Tabela 4-7. Somente foram levantadas especificações equivalentes às referências apresentadas na Tabela 3-4.

Tabela 4-7: Especificações dos acelerômetros candidatos à incorporação ao sistema de monitoramento do ensaio EMM-ARM.

Sensor	Escala	Banda (Hz)	Sensibilidade	NSD (ruído RMS) ¹	Resolução	Frequência ressonante (Hz)
MPU6050	$\pm 2g^2$	500 ³	16384 LSB/g ⁴	400 $\mu g/\sqrt{Hz}$ ⁵	16-bit	-
BMI160	$\pm 2g^2$	5.06-684	16384 LSB/g ⁴	180 $\mu g/\sqrt{Hz}$ ⁶ (1.5 mg) ⁷	16-bit	-
MMA8452	$\pm 2g^2$	0.78-400	1024 LSB/g ⁴	126 $\mu g/\sqrt{Hz}$ ⁷	12-bit	-
MMA7455	$\pm 2g^2$	125	54 LSB/g ⁴	-	8-bit	6000 Hz ⁹
MMA7361	$\pm 1.5g$	400 ¹¹	800 mV/g ⁸	300 $\mu g/\sqrt{Hz}$	15-bit ¹⁰	6000 Hz ⁹
ADXL335	$\pm 3g$	1600 ¹¹	300 mV/g ⁸	150 $\mu g/\sqrt{Hz}$ ⁹ (1.897 mg) ⁹	15-bit ¹⁰	5500 Hz

Notas

1. Ruído RMS, quando informado pelo fabricante, é indicado entre parênteses.

2. Menor escala programável.

3. Banda limitada pela máxima taxa de saída de dados (ODR). Valor de referência é 1000 Hz.

4. Sensibilidade já convertida para unidades digitais (LSB) por força da gravidade (g).

5. Valor do fabricante referente a uma banda de 10 Hz.

Notas

6. Valor referente a uma escala de $\pm 8g$ e modo de energia normal (chip em pleno funcionamento).

7. Valor referente a uma taxa de saída de dados (ODR) de 200 Hz.

8. Como são acelerômetros analógicos, a sensibilidade digital (em LSB/g) depende do sistema de conversão analógico-digital (ADC) utilizado.

9. Valor para eixos X e Y do acelerômetro.

10. Valor da resolução para acelerômetros analógicos depende do ADC utilizado, sendo, neste caso, o ADS1115.

11. Valor para eixos X e Y do acelerômetro, sem filtros. A banda é controlada aplicando-se filtros RC (resistor-capacitor) na linha de dados.

A principal constatação obtida pela análise da Tabela 4-7 é de que o levantamento de dados a partir de documentações não é suficiente para uma comparação direta entre acelerômetros de diferentes fabricantes. Diferentes fabricantes adotam diferentes referências para expressão das especificações, já que, naturalmente, cada fabricante tenta dar o melhor ângulo do seu produto. No entanto, isso muitas vezes pode dificultar uma decisão quanto ao acelerômetro mais adequado para uma determinada aplicação, o que requer avaliações experimentais com os diferentes acelerômetros.

Apesar disso, considera-se possível realizar a comparação direta com os valores de referência apresentados na Tabela 3-4, à exceção da sensibilidade. A sensibilidade dos acelerômetros digitais é dada em termos digitais, isto é, em LSB (*least-significant byte*) por aceleração da gravidade (g), ou o número de unidades digitais, ou níveis lógicos, que representam uma aceleração de valor igual à gravidade. Para permitir comparações com os acelerômetros analógicos, é preciso proceder com conversões para levar as sensibilidades a mesmas unidades.

Optou-se por converter as sensibilidades dos sensores analógicos, tanto das referências quanto dos acelerômetros MEMS analógicos, para valores digitais, o que permite comparar, de fato, o valor de sensibilidade obtido com os equipamentos empregados em cada caso, pois tal valor já engloba tanto a sensibilidade do sensor quanto a resolução do ADC utilizado. Para tanto, foi preciso levar em conta a resolução e o ganho do ADC utilizado, dados ou na Tabela 3-3, para os acelerômetros MEMS investigados no presente trabalho, ou na Tabela 3-4, para os valores de referência para realização do ensaio EMM-ARM.

Como as referências consultadas não apresentam explicitamente a configuração de ganho do ADC utilizado, supôs-se que o ganho configurado no ADC foi igual à escala de voltagem produzida pelo sensor utilizado, o que concilia máxima resolução com a segurança de não danificação do equipamento. Já para os acelerômetros testados, considerou-se uma única configuração para ambos acelerômetros, com ADS1115 sendo programado com um ganho de 4,096 V.

Sendo assim, a conversão da sensibilidade foi feita pela equação (4-6):

$$\text{Sensibilidade}_{(LSB/g)} = \frac{\text{Sensibilidade}_{(V/g)}}{\left(\frac{\text{Ganho}_{(V)}}{2^{\text{Resolução}(bits)}} \right)} \quad (4-6)$$

Em que o ganho para os valores de referência, conforme as considerações feitas nos parágrafos anteriores, é calculado por:

$$\text{Ganho}_{(V)} = 2 \cdot \left(\text{Escala de medição}_{(g)} \right) \cdot \text{Sensibilidade}_{(V/g)} \quad (4-7)$$

Os dados considerados nesta conversão e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4-8.

Tabela 4-8: Conversão entre sensibilidade em V/g para LSB/g.

Valor	Resolução	Escala	Sensibilidade (V/g)	Ganho	Sensibilidade (LSB/g)
Referência-Concreto	24	0,5	10	10	16777216,00
Referência -Pasta de cimento	24	10	0,5	10	838860,80
Referência -Epóxi	24	50	0,1	10	167772,16
Referência -Solo-cimento	24	0,5	10	10	16777216,00
MMA7561	16	1,5	0,8	8,192	6400,00
ADXL335	16	3	0,3	8,192	2400,00

Por fim, a comparação das especificações levantadas nas documentações com os valores de referência é apresentada na Tabela 4-9. Adotou-se uma legenda de cores, em que a cor verde

significa atendimento à referência, e a cor vermelha significa não atendimento. A cor cinza foi utilizada nas especificações que não foram encontradas nas documentações dos sensores investigados. Os diferentes materiais são codificados pelas suas iniciais: C – concreto; P – pasta de cimento; E – epóxi; S – solo-cimento.

Tabela 4-9: Comparação das especificações documentadas com valores de referência para ensaio EMM-ARM.

Sensor	Escala				Banda				Sensibilidade				NSD				Frequência ressonante			
	C	P	E	S	C	P	E	S	C	P	E	S	C	P	E	S	C	P	E	S
MPU6050																				
BMI160																				
MMA8452																				
MMA7455																				
MMA7361																				
ADXL335																				

A comparação das especificações com os valores de referência mostrou que todos os acelerômetros possuem os mesmos potenciais e limitações para incorporação ao ensaio EMM-ARM. Assim, todos os acelerômetros foram utilizados nas avaliações posteriores.

O atendimento à especificação referente da escala de medição pode ser considerado como não essencial para a execução do ensaio EMM-ARM. A escala de medição de um acelerômetro determina apenas o maior valor de aceleração medido pelo sensor. Como o princípio do ensaio EMM-ARM é a introdução de baixos valores de deformações, isso implica também em baixos valores de acelerações durante o ensaio. Assim, valores de escala altos que estejam fora da faixa de valores tomada como referência, como observado nas referências para o ensaio em concreto e solo-cimento, não implicam, necessariamente, em não adequação do sensor para o ensaio.

Apesar disso, a escala de medição se relaciona indiretamente com a menor aceleração detectável pelo sensor, esta que, por sua vez, é uma das características mais importantes para o ensaio EMM-ARM. O uso de acelerômetros com escalas muito elevadas pode tornar o sistema de monitoramento incapaz de detectar as pequenas acelerações provocadas durante o ensaio EMM-ARM, pois o sistema possui um número fixo de unidades digitais, ou níveis lógicos, para discretizar o sinal. Por exemplo, caso o sistema de aquisição disponha de um ADC capaz de discretizar um dado sinal em 16 bits, isto é, em 2^{16} níveis lógicos ou 65536 intervalos, uma escala de $\pm 1g$ será discretizada em intervalos de $3,0518 \cdot 10^{-5}g$, enquanto uma escala de $\pm 50g$ será discretizada em intervalos de $1,5 \cdot 10^{-3}g$, o que é, obviamente, um intervalo 50 vezes maior que a escala de $\pm 1g$. Assim, desprezando-se outros fatores, pode-se dizer que um

acelerômetro com escala de $\pm 1g$ consegue detectar acelerações até 50 vezes menores que um acelerômetro de escala $\pm 50g$, se mantido o mesmo ADC. No entanto, na determinação da real menor aceleração detectável por um acelerômetro devem ser considerados também fatores relacionados a ruídos, tanto do sensor quanto do sistema de aquisição, que podem provocar oscilações no sinal maiores que o intervalo de discretização imposto pelo ADC. Além disso, a sensibilidade de um acelerômetro também é dependente da frequência à qual ele é submetido, sendo que, por exemplo, frequências próximas à ressonância própria do sensor implicam em redução de sua sensibilidade. É por isso que tal informação, geralmente, não está disponível em documentações oficiais, pois o fabricante do sensor não sabe, a priori, o nível de ruído total do sistema com o qual o sensor será utilizado.

O não atendimento dos acelerômetros a nenhum valor de referência quanto à sensibilidade e a densidade espectral de ruído (NSD) pode ser explicado, e até mesmo esperado, ao se considerar o caráter de baixo custo dos acelerômetros analisados. Sendo produzidos para o mercado de eletrônicos portáteis (*e.g.* celulares *smartphones*, controles de *videogame*, e brinquedos), tais acelerômetros não possuem o compromisso com a sensibilidade e precisão que acelerômetros para fins de monitoramento estrutural possuem, que, para tanto, requerem arquiteturas, circuitos e materiais que elevam seu preço. Aplicações de monitoramento estrutural em estruturas civis, por exemplo, podem envolver acelerações na ordem de micro-g, isto é, $10^{-6}g$ (KAVITHA; DANIEL; SUMANGALA, 2016b), o que, de fato, está além da capacidade dos acelerômetros analisados. No entanto, há margem para dúvidas quanto à necessidade, no ensaio EMM-ARM, de tal nível de sensibilidade e precisão, e se é possível utilizar níveis de aceleração que estejam dentro da capacidade de medição dos acelerômetros testados. Alguns resultados experimentais reportados por Granja (2016) indicam ser seguro aplicar acelerações cujo valor RMS esteja na casa dos milésimos de g, isto é, $10^{-3}g$, o que se aproxima da sensibilidade esperada para os sensores estudados.

O não atendimento à referência para frequência ressonante também não é um fator de elevada importância no ensaio EMM-ARM. A frequência ressonante de um acelerômetro se relaciona à faixa de frequências a que ele pode ser submetido e dentro da qual ele continua a apresentar sua maior sensibilidade. Isso ocorre pois, ao submeter um acelerômetro à uma excitação de frequência próxima de sua frequência natural de vibração, o acelerômetro pode entrar em ressonância, amplificar a presença dessa frequência no sinal e gerar distorções ou até mesmo perda de dados (ENDEVCO, 2009). Assim, a frequência ressonante estabelece a máxima frequência que pode ser mensurada de forma segura pelo acelerômetro. Como no

ensaio EMM-ARM as frequências mensuradas estão, tipicamente, abaixo de 300 Hz, mesmo nos corpos de prova mais rígidos de concreto sugeridos por Granja (2016), pode não ser necessária uma frequência ressonante na ordem de 10 kHz, como apontado nos valores de referência.

4.3.3 Avaliação do desempenho dos acelerômetros

A Tabela 4-10 e a Tabela 4-11 apresentam os resultados obtidos na monitorização do pórtico *shear-building*. É relevante a natureza da excitação utilizada em cada monitorização, conforme indicado nas notas da tabela, pois os resultados obtidos sugerem que este fator influencia na precisão dos resultados. O acelerômetro de referência, pela impossibilidade de se utilizar o ventilador no ambiente em que se encontrava, foi ensaiado com um impacto aplicado no seu nó superior, assim como o acelerômetro MMA 7455, que apresentou baixa sensibilidade e requereu o uso do impacto para provocar um maior nível de excitação compatível com sua sensibilidade. Todos os demais acelerômetros testados foram ensaiados sob condições OMA.

Tabela 4-10: Resultados da monitorização do pórtico *shear-building* de três andares.

Frequência identificada	752A13 Endeveco ¹	MPU 6050	BMI 160	MMA 8452	MMA 7455 ¹	MMA 7361	ADXL 335
1 ^a	8,069	8,151	8,146	8,107	8,077	8,127	8,136
2 ^a	25,226	25,374	25,320	25,265	25,301	25,237	25,355
3 ^a	38,287	38,352	38,392	38,229	38,297	38,336	38,394

Notas:

1. Excitação do pórtico feita com um impacto na barra horizontal superior.

Ao se comparar as diferenças relativas à referência apresentadas na Tabela 4-11, nota-se que o acelerômetro com melhor desempenho foi o MMA 7455. No entanto, tal situação se deveu ao fato de que foi utilizado um maior nível de excitação durante seu uso, em comparação aos demais. Na verdade, este acelerômetro é o que apresentou pior desempenho sob a condição OMA, que é característica do ensaio EMM-ARM. Todos os demais acelerômetros apresentaram resultados próximos ao acelerômetro de referência, com erros menores que 1,016%. O acelerômetro com menores erros em todos os modos de vibração foi o MMA 7361.

Tabela 4-11: Diferenças relativas à referência da monitorização do pórtico *shear-building* de três andares.

Frequência identificada	MPU 6050	BMI 160	MMA 8452	MMA 7455 ¹	MMA 7361	ADXL 335
1 ^a	1,016%	0,954%	0,471%	0,099%	0,719%	0,830%
2 ^a	0,587%	0,373%	0,155%	0,297%	0,044%	0,511%
3 ^a	0,170%	0,274%	-0,151%	0,026%	0,128%	0,279%

A Tabela 4-12 e a Tabela 4-13 apresentam os resultados obtidos na monitorização da laje de ensaios dinâmicos. Neste ensaio, todas os acelerômetros foram utilizados com excitações de mesma natureza.

Tabela 4-12: Resultados da monitorização da laje de ensaios dinâmicos.

Frequência identificada	Referência ¹	MPU 6050	BMI 160	MMA 8452	MMA 7455 ¹	MMA 7361	ADXL 335
1 ^a	3,320	3,545	3,541	3,553	3,578	3,551	3,552
2 ^a	15,332	15,473	15,4565	15,453	15,523	15,485	15,474
3 ^a	23,047	23,554	23,581	23,506	23,706	23,568	23,576

Notas:

1. Valores de referência obtidos em Carmona, Avila e Doz (2017).

Ao se comparar as diferenças relativas à referência apresentadas na Tabela 4-13, nota-se que os acelerômetros apresentaram maiores desvios quando comparados aos resultados do monitoramento do pórtico, mas ainda razoavelmente próximos à referência, com desvios inferiores a 7,76%. As maiores diferenças em relação à referência estão no primeiro modo, que, apesar de ser o mais facilmente excitado, uma vez que o impacto utilizado foi aplicado no centro da laje, pode ter apresentado desvios devido a mudanças nas condições estruturais da laje entre o instante em que as medições de referência e do presente trabalho foram feitas. De fato, todas as medições, de todos os acelerômetros, apresentaram um viés positivo em relação à referência, isto é, foram maiores, o que pode indicar um ganho de longo prazo nas propriedades mecânicas da laje, ou outra mudança não identificada nos parâmetros dinâmicos da laje. Nesta monitorização, os acelerômetros com menores desvios foram o MPU 6050 e MMA 8452, embora os desempenhos tenham permanecido constantes. O MMA 7361 que havia apresentado o melhor desempenho, no monitoramento do pórtico *shear-building*, apresentou os maiores desvios.

Tabela 4-13: Diferenças relativas à referência da monitorização da laje de ensaios dinâmicos.

Frequência identificada	MPU 6050	BMI 160	MMA 8452	MMA 7455	MMA 7361	ADX L335
1 ^a	6,82%	6,77%	6,66%	7,03%	7,76%	6,96%
2 ^a	0,80%	0,92%	0,81%	0,79%	1,25%	1,00%
3 ^a	2,13%	2,20%	2,32%	1,99%	2,86%	2,26%

4.3.4 Avaliação experimental do ruído

A Tabela 4-14 apresenta os resultados da avaliação experimental do ruído, que estimou os valores da densidade espectral de ruído e o ruído RMS de cada acelerômetro. Na tabela

também são apresentados os valores disponíveis na documentação de referência dos sensores, quando disponíveis.

Tabela 4-14: Resultados da avaliação experimental da densidade espectral de ruído, em $g/\sqrt{\text{Hz}}$ (valores fora dos parênteses) e do ruído RMS, em g_{RMS} (valores entre parênteses).

Acelerômetro	Eixo			Referência na documentação
	X	Y	Z	
MPU 6050	355 (0,0035)	337 (0,0034)	449 (0,0045)	400
BMI 160	508 (0,0051)	396 (0,0040)	496 (0,0049)	180 (0,0015)
MMA 8452	224 (0,0022)	249 (0,0025)	316 (0,0031)	126
MMA 7455	1404 (0,0140)	1373 (0,0137)	1544 (0,0154)	Informação não disponível
MMA 7361	286 (,0036)	292 (0,0034)	321 (0,0051)	300
ADXL 335	111 (0,0013)	108 (0,0013)	187 (0,0024)	150 (0,0018)

É interessante notar que para os acelerômetros MPU 6050, MMA 7361, e ADXL 335, os parâmetros de ruído determinados experimentalmente são menores que os indicados na documentação. Como o ruído determinado também inclui uma parcela de ruído do próprio sistema de aquisição de dados, isso sugere que estes acelerômetros apresentam ruídos intrínsecos ainda menores. Já os acelerômetros BMI 160 e MMA 8452 apresentaram valores razoavelmente maiores que a referência, o que pode ser causado por algum comprometimento nas unidades testadas, uma vez que não parece provável que o elevado nível de ruído observado nestes acelerômetros seja advindo do sistema de aquisição de dados, já que o mesmo fenômeno não foi observado nos demais sensores. Já o acelerômetro MMA 7455 apresentou os maiores níveis de ruído, como era esperado já que o mesmo não foi capaz de realizar a monitorização do pórtico sob condições OMA. Segundo suas especificações, este sensor é otimizado para aplicações de detecção de choque, cujos sinais são picos tipicamente várias vezes maiores que o nível de ruído do sensor, o que pode explicar tal comportamento.

O ruído também parece ser dependente dos eixos considerados, com os eixos x e y apresentando valores semelhantes, e o eixo z apresentando valores maiores. Isso pode ser causado pela diferença de geometria ou arquitetura nos mecanismos de sensoriamento da aceleração em cada direção. O eixo z , em todos os acelerômetros testados, se encontra perpendicular em relação ao *wafér* da *breakout board*, isto é, em relação ao plano em que são posicionados todos os eletrônicos. Em contrapartida, os eixos x e y se encontram neste plano.

De todos os sensores, o ADXL 335 foi aquele que apresentou os menores parâmetros de ruído, com seu ruído RMS estando na ordem de 0,001 g para os eixos x e y . Este nível de ruído é compatível com os níveis de acelerações esperados no ensaio EMM-ARM, que podem alcançar, com segurança, a ordem de dezenas de mili-g, isto é, 0,01 g (GRANJA, 2016).

4.3.5 Escolha do acelerômetro

Como os acelerômetros apresentaram desempenhos praticamente idênticos na comparação entre as especificações pelo fabricante com requisitos mínimos do EMM-ARM, e desempenhos muito parecidos nos ensaios de monitorização do pórtico e da laje de ensaios dinâmicos, o principal fator para escolha se baseou na avaliação experimental do ruído e na facilidade de aquisição do sensor no mercado.

No EMM-ARM, grande precaução deve ser empregada para que as amostras não sejam excitadas demasiadamente, pois isso pode levar à danificação do material durante o ensaio e interferência no valor do módulo de elasticidade mensurado. Acelerômetros com nível de ruído menor são mais adequados para monitoramento de acelerações em condições de baixa excitação.

Como o acelerômetro ADXL 335 foi o que apresentou parâmetros de ruído mais baixos, escolheu-se pela sua incorporação ao sistema de aquisição de dados utilizado no sistema de ensaio desenvolvido neste trabalho. Além disso, em comparação com outros possíveis candidatos, como o MMA 8452 e MMA 7361, o ADXL 335 custa, em média, pelo menos 50% a menos e é facilmente encontrado em lojas nacionais. Todas as avaliações apresentadas subsequentemente neste trabalho utilizam o ADXL 335 juntamente ao sistema de aquisição de dados apresentado no item 4.2, na versão soldada sob uma placa perfurada.

4.4 VALIDAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO SOB VIBRAÇÃO AMBIENTE

4.4.1 Versão para pasta de cimento

Os resultados obtidos no ensaio de validação do ensaio EMM-ARM em pastas de cimento sob vibração ambiente são apresentados na Figura 4-7. No gráfico também são mostrados os ensaios obtidos no sistema Sonelastic, já convertidos para valores de módulo estático conforme a equação (3-4). A barra de erro associada aos resultados do Sonelastic representa o valor de um desvio padrão da amostra abaixo e acima do valor médio, plotado como um asterisco. Os resultados do Sonelastic envolvem amostras diferentes, de diferentes bateladas, executadas anteriormente à batelada utilizada no ensaio EMM-ARM, o que explica a dispersão da tendência entre resultados de diferentes idades. Apenas as idades de 49 horas e 169 horas (segundo grupo e último grupo de amostras do gráfico) foram executadas com amostras extraídas da mesma batelada das amostras utilizadas no EMM-ARM, e mantidas no mesmo ambiente do ensaio durante toda a cura, sendo retiradas apenas para execução momentânea do Sonelastic. As demais amostras, embora sejam produzidas com o mesmo cimento e protocolo de mistura, foram, provavelmente, submetidas a históricos de temperatura diferentes durante sua cura, o que pode justificar a variação entre medições observadas. Mesmo assim, considerou-se que, para fins de validação e visualização do desenvolvimento do módulo de elasticidade da pasta de cimento estudada, a apresentação destes resultados é válida e útil.

O ensaio EMM-ARM foi iniciado após 1h e 1 minuto do instante t_0 , isto é, do contato do cimento com a água. Intervalos de tempo com ausência de valores experimentais nas curvas de resultado do EMM-ARM, conforme pode ser observado entre aproximadamente 2,8 e 2,9 dias e em torno de 5 dias, foram causadas por interrupções na alimentação de energia do sistema. Uma vez normalizada a alimentação, o sistema retomou o ensaio autônoma e automaticamente.

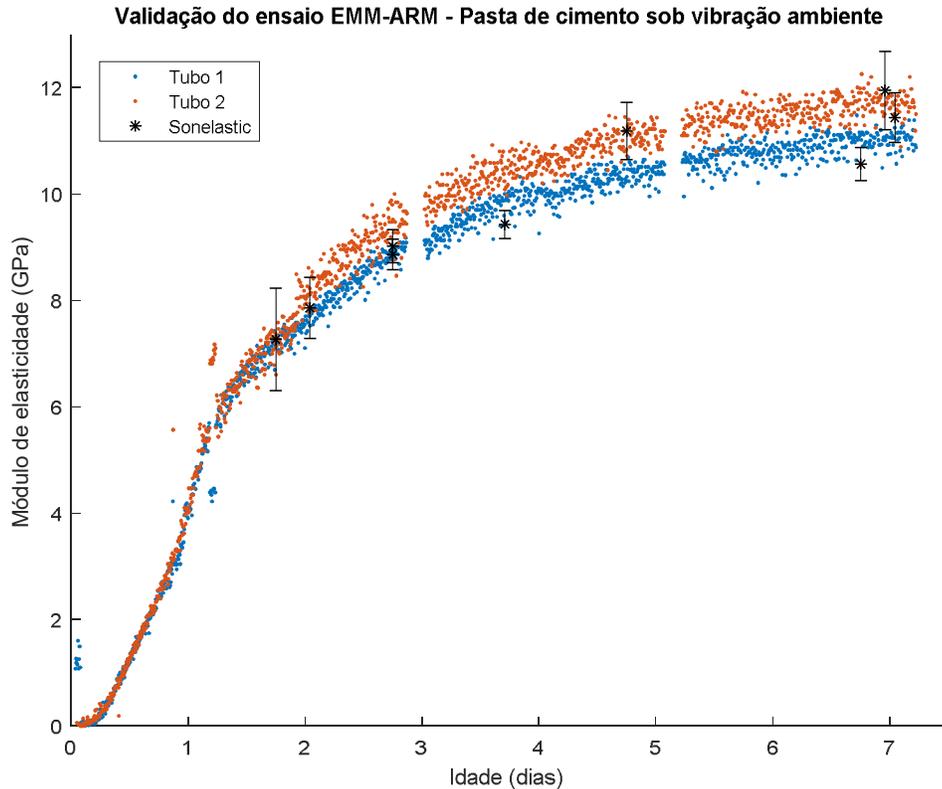


Figura 4-7: Resultados do EMM-ARM com vibração ambiente e Sonelastic executados em pastas de cimento.

A análise visual da Figura 4-7 demonstra que as duplicatas realizadas apresentaram boa concordância entre si, durante todo o período de realização do EMM-ARM. Os resultados sugerem que a dispersão dos valores do EMM-ARM é menor nas primeiras idades, indicando a boa adequação desse ensaio para determinação do módulo de elasticidade desde as primeiras idades. Além disso, os resultados obtidos no EMM-ARM seguem a mesma tendência observada no ensaio Sonelastic. Essa tendência de desenvolvimento é similar à curva típica de desenvolvimento do módulo de elasticidade de materiais cimentícios, conforme pode ser constatado pela comparação da Figura 4-7 com a Figura 2-12.

A Tabela 4-15 apresenta a comparação dos resultados do Sonelastic e do EMM-ARM para as idades nas quais o ensaio Sonelastic foi executado. Para reduzir a influência da dispersão, e evitar que as comparações sejam feitas com valores extremos que não representam a tendência do ensaio, um filtro de média móvel de cinco pontos foi aplicado aos dados experimentais. Os valores tabulados sob as colunas “Média” dos ensaios EMM-ARM se referem à média entre os dois valores mais próximos da idade considerada em questão para a comparação.

Tabela 4-15: Comparação entre os resultados do Sonelastic e EMM-ARM em pastas de cimento sob vibração ambiente.

Idade		Sonelastic			EMM-ARM - Tubo 1		EMM-ARM - Tubo 2		EMM-ARM		
Horas	Dias	Média (GPa)	D-P ¹	CV ²	Média (GPa)	DRR ³	Média (GPa)	DRR ³	Média (GPa)	D-P ¹	CV ²
45	1,875	7,727	0,966	12,498%	7,331	-5,121%	7,406	-4,152%	7,369	0,053	0,718%
49 ⁴	2,042	7,860	0,572	7,277%	7,729	-1,668%	8,097	3,015%	7,913	0,260	3,289%
66	2,750	8,920	0,298	3,342%	8,901	-0,205%	9,429	5,713%	9,165	0,373	4,073%
89	3,708	9,433	0,262	2,778%	9,807	3,973%	10,338	9,599%	10,073	0,375	3,725%
114	4,750	11,190	0,540	4,826%	10,355	-7,460%	11,005	-1,652%	10,680	0,460	4,303%
162	6,750	10,567	0,311	2,943%	11,104	5,078%	11,942	13,010%	11,523	0,593	5,143%
167	6,958	11,950	0,732	6,126%	11,054	-7,499%	11,612	-2,826%	11,333	0,395	3,484%
169 ⁴	7,042	11,440	0,465	4,065%	10,972	-4,094%	11,616	1,535%	11,294	0,455	4,032%

Notas:

1 – D-P: Desvio-padrão;

2 – CV: Coeficiente de variação, dado por: (Desvio-Padrão)/(Média);

3 – DRR: Desvio em relação à referência, dado por: [(Média do EMM-ARM)-(Média do Sonelastic)]/(Média do Sonelastic);

4 – Idades nas quais o resultado do Sonelastic foi obtido com amostras da mesma batelada do EMM-ARM, e mantidas sob mesmo histórico de temperatura;

Os resultados da Tabela 4-15 indicam que os resultados do ensaio EMM-ARM individuais, de cada tubo, oscilaram, em relação à referência, de 0,205% a 13%, embora os maiores valores de desvio tenham ocorrido em relação aos resultados do Sonelastic obtidos com amostras sob provável histórico de temperatura diferentes. Ao se considerar apenas os resultados de 49 horas e 169 horas, realizados com amostras mantidas em condições similares às do EMM-ARM, os desvios são menores, entre 1,535% e 4,094%. Estes valores se aproximam do coeficiente de variação do próprio Sonelastic, indicando que há a possibilidade de que tais variações não sejam significativas entre si, embora um teste estatístico seja necessário para se traçar tal conclusão. Os coeficientes de variação dos resultados dos ensaios EMM-ARM também apresentam valores de magnitude similar à do Sonelastic, o que sugere que a dispersão do ensaio realizado com o sistema desenvolvido neste trabalho é comparável ao do método consolidado da frequência ressonante. Todas essas evidências sugerem que o sistema de ensaio desenvolvido pode ser considerado validado para execução do ensaio EMM-ARM sob condição de vibração ambiente em amostras produzidas com pasta de cimento.

A plotagem dos resultados do EMM-ARM em uma escala semi-logarítmica, como apresentado na Figura 4-8, favorece a visualização dos resultados nas primeiras idades. Este gráfico evidencia que os resultados do EMM-ARM apresentam maior concordância e menor dispersão nas primeiras idades (até o primeiro dia de idade). No gráfico, a ausência de valores

experimentais nas primeiras horas se explica pelo fato de que a aplicação da equação (2-12), que calcula o módulo de elasticidade a partir do módulo de elasticidade da seção compósita, pode fornecer, nas primeiras idades, um valor negativo para o módulo de elasticidade do material ensaiado. Tal valor negativo não possui sentido físico, e é advindo de erros numéricos da avaliação da frequência ou da estimativa do módulo de elasticidade da seção compósita pelos métodos aproximados de solução da equação transcendental do sistema. Assim, estes valores são desprezados na apresentação do gráfico.

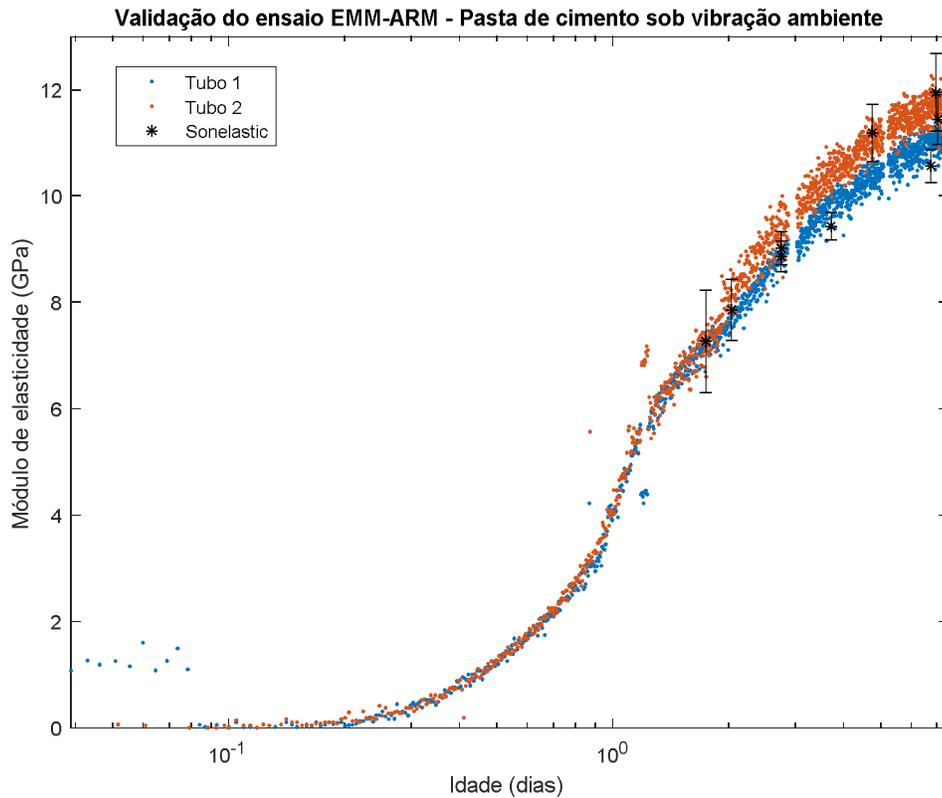


Figura 4-8: Resultados em escala semi-logarítmica do EMM-ARM com vibração ambiente e Sonelastic executados em pastas de cimento.

4.5 VALIDAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO SOB VIBRAÇÃO FORÇADA

4.5.1 Versão para pasta de cimento

Os resultados obtidos no ensaio de validação do ensaio EMM-ARM em pastas de cimento sob vibração forçada são apresentados na Figura 4-9. Nesta avaliação, foram ensaiadas pastas de cimento produzidas com dois cimentos diferentes: o cimento referência (REF) e LC³ (LC3), descritos no item 3.3.2.1. Os Tubos 1 e 2, preenchidos com pastas de, respectivamente, cimento referência e LC³, foram submetidos ao ensaio EMM-ARM tão logo possível após sua moldagem. Já os Tubos 3 e 4, preenchidos com pastas de, respectivamente, cimento LC3 e REF, foram mantidos inicialmente em repouso, e submetidos ao ensaio EMM-ARM após três dias de idade. Os resultados do Sonelastic envolvem amostras diferentes, de diferentes bateladas. Para o cimento LC3, apenas os resultados das idades de 66 h, 114 h e 167 h (respectivamente o segundo, quarto e sexto grupo de amostras do gráfico) foram executadas com amostras extraídas da mesma batelada das amostras utilizadas no EMM-ARM, e mantidas no mesmo ambiente do ensaio durante toda a cura, sendo retiradas apenas para execução momentânea do Sonelastic. Para o cimento REF, todas os resultados do Sonelastic foram obtidos de uma mesma batelada, porém diferente da utilizada para produzir as amostras do EMM-ARM.

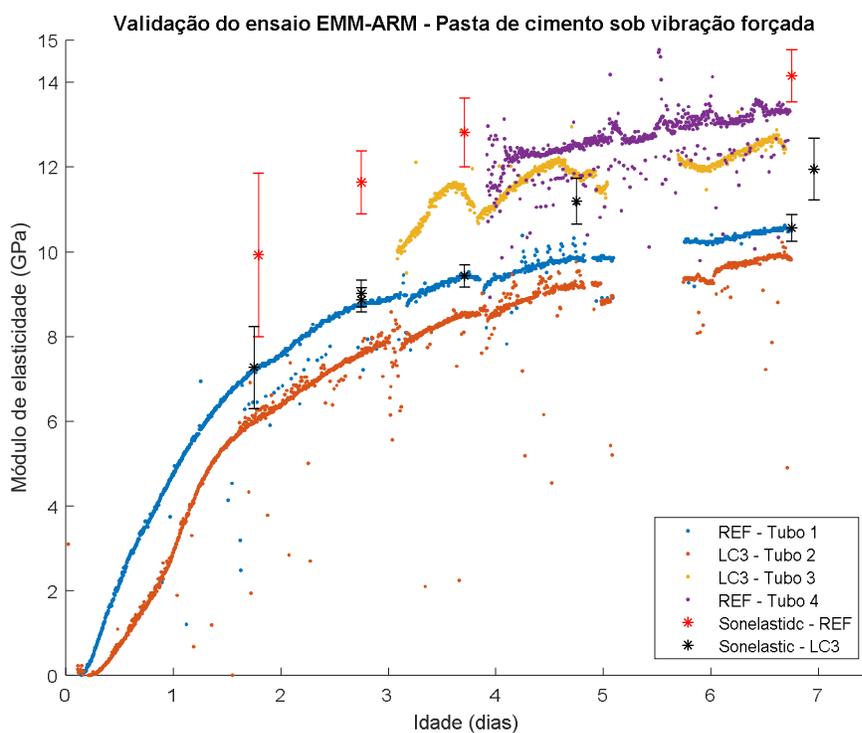


Figura 4-9: Resultados do EMM-ARM com vibração forçada e Sonelastic executados em pastas de cimento.

O ensaio EMM-ARM foi iniciado após 2h e 30 minutos do instante t_0 , o que explica a ausência de dados nas primeiras horas de idade das pastas, para os Tubos 1 e 2. Assim como nos ensaios anteriores, intervalos de tempo com ausência de valores experimentais nas curvas de resultado do EMM-ARM para os Tubos 1, 2 e 3 entre as idades de aproximadamente 5,1 e 5,7 dias foram causadas por interrupções na alimentação de energia do sistema.

A análise visual da Figura 4-9 permite a formulação de algumas observações. Nota-se que a vibração forçada diminui consideravelmente a dispersão dos resultados se comparados aos resultados obtidos sob vibração ambiente, especialmente nas idades mais altas, a partir do primeiro dia, o que é um efeito desejado. Nota-se também que a tendência de evolução do módulo de elasticidade obtida pelo EMM-ARM, para todos os tubos, se assemelha à tendência formada pelos resultados obtidos no Sonelastic. Ainda, como indicativo da confiabilidade dos métodos de ensaio utilizados e dos resultados obtidos, nota-se que os resultados do Tubo 3, inicialmente em repouso e que é preenchido com cimento LC³, se assemelham aos obtidos na validação sob vibração ambiente, que também foi realizada com cimento LC³. Às 160 horas de idade, o Tubo 3 apresentou módulo de elasticidade de 12,43 GPa, enquanto a média dos resultados de vibração ambiente foi em torno de 11,50 GPa, o que representa uma diferença de 8,09%, que é de magnitude compatível com o coeficiente de variação do ensaio sob vibração ambiente.

Por fim, nota-se que houve clara diferença entre os valores de módulo de elasticidade dos tubos inicialmente em repouso e dos tubos submetidos ao EMM-ARM desde a moldagem. A Tabela 4-16 apresenta a comparação dos resultados entre estes tubos, em idades finais de ensaio, sendo os resultados previamente filtrados por um filtro de média móvel com cinco pontos para reduzir a influência de dados dispersos na comparação. O valor em cada idade foi calculado como a média dos valores das duas idades mais próximas.

Tabela 4-16: Comparação entre os resultados das amostras de EMM-ARM em pastas de cimento sob vibração forçada.

Idade (dias)	Módulo de elasticidade (GPa)					
	Cimento LC3			Cimento REF		
	Tubo 3 (repouso)	Tubo 2	Desvio	Tubo 4 (repouso)	Tubo 1	Desvio
6	11,99437	9,289149	29,12%	13,35837	10,26818644	30,09%
6,25	12,53377	9,691838	29,32%	12,81143	10,36343619	23,62%
6,5	12,67278	9,318173	36,00%	13,31618	10,48715675	26,98%

O fato dos tubos submetidos à vibração forçada desde as primeiras idades terem apresentado módulos menores sugere que a vibração imposta foi capaz de ou danificar as amostras, reduzindo a frequência de vibração devido à perda de rigidez do material e, portanto, levando a módulos de elasticidade menores, ou alguma outra interferência no desenvolvimento microestrutural. A observação de que a diferença da ordem de 23-36% entre os tubos inicialmente em repouso e os utilizados diretamente no ensaio permanece razoavelmente constante entre as idades, e entre os tubos de diferentes amostras, é outro indício que sustenta a hipótese de danificação das amostras. Ainda, a observação de que os resultados dos Tubos 1 e 2 foram sistematicamente menores que os valores obtidos no ensaio Sonelastic é outro indício de que a vibração aplicada interferiu na medição do módulo de elasticidade.

Assim, pode-se considerar que o sistema de ensaio com vibração controlada em pastas de cimento foi parcialmente validado, sendo capaz de monitorar o desenvolvimento do módulo de elasticidade das amostras desde as primeiras idades. Mantém-se a ressalva de que, na presente implementação, observa-se a limitação de que a vibração imposta é capaz de produzir danos nas amostras caso o ensaio seja iniciado muito cedo.

Como a principal vantagem do EMM-ARM em relação a outros métodos de ensaio é a monitorização do módulo de elasticidade desde imediatamente após a produção do material, considera-se que esta limitação compromete completamente o propósito do ensaio. No entanto, esta limitação é passível de remoção ao se calibrar apropriadamente o nível de excitação imposto, controlando-se, na implementação da fonte de vibração controlada proposta neste trabalho, o tempo de ativação do motor e o peso do excêntrico inserido. A calibração destes parâmetros, no entanto, está fora do escopo deste trabalho.

A Figura 4-10 apresenta os resultados obtidos nesta etapa, mas em uma escala logarítmica, que dá ênfase às primeiras idades. Nesta apresentação, é possível visualizar que possíveis curvas a serem ajustadas aos resultados dos Tubos 3 e 4 visivelmente se assemelham aos seus respectivos resultados do Sonelastic. Além disso, apesar de não ter sido objetivo desta etapa, percebe-se que o sistema de ensaio foi capaz de captar diferenças entre as cinéticas de hidratação dos dois cimentos utilizados. Como esperado, o cimento REF, por possuir maior teor de clínquer, inicia o desenvolvimento do módulo de elasticidade antes do cimento LC3, cujo processo se inicia mais tardiamente e de forma mais lenta. Similarmente à Figura 4-8, após o primeiro dia de idade, o cimento LC3 apresenta um elevado ganho de módulo de elasticidade.

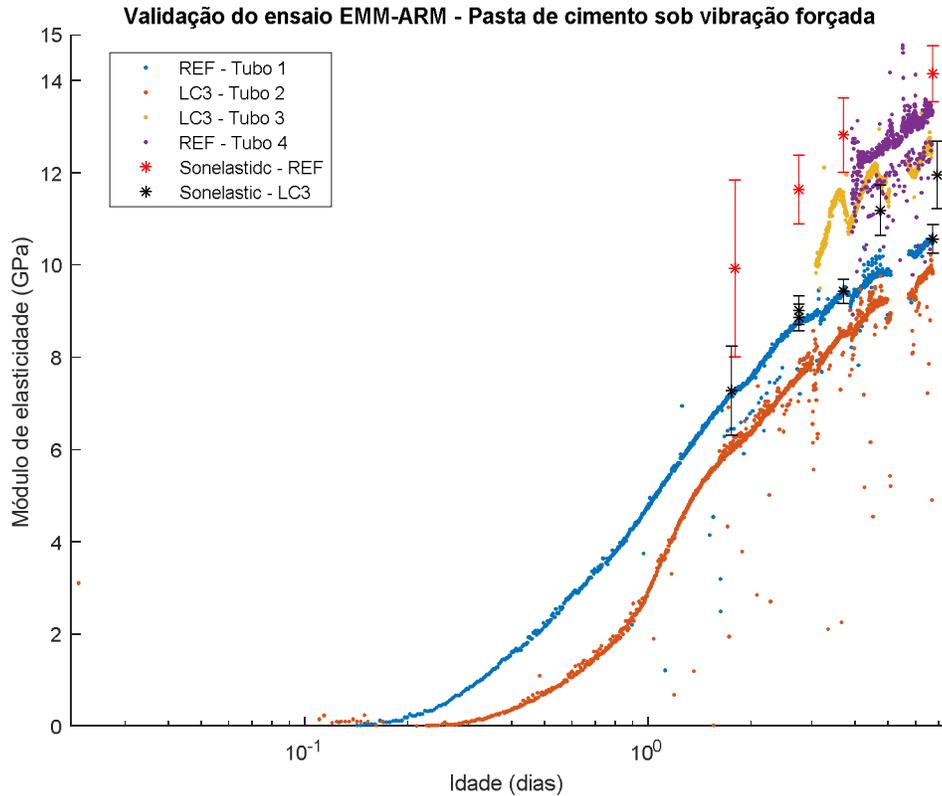


Figura 4-10: Resultados em escala semi-logarítmica do EMM-ARM com vibração forçada e Sonelastidc executados em pastas de cimento.

4.5.2 Versão para concreto

Os resultados obtidos no ensaio de validação do ensaio EMM-ARM em concreto sob vibração forçada são apresentados na Figura 4-12. Como já discutido nos itens 3.1.2 e 3.3.1, o sistema de ensaio desenvolvido no presente trabalho não possui sensibilidade suficiente para execução do EMM-ARM em concretos sob condição de vibração ambiente, o que justifica a validação somente para a condição de vibração forçada. Devido a restrições quanto à disponibilidade de material e laboratório, os resultados de referência para validação consistiram em um ensaio Sonelastidc realizado aos seis dias de idade, e dois ensaios de compressão clássica realizados aos 14 e 57 dias de idade, sendo este último não apresentado na Figura 4-12.

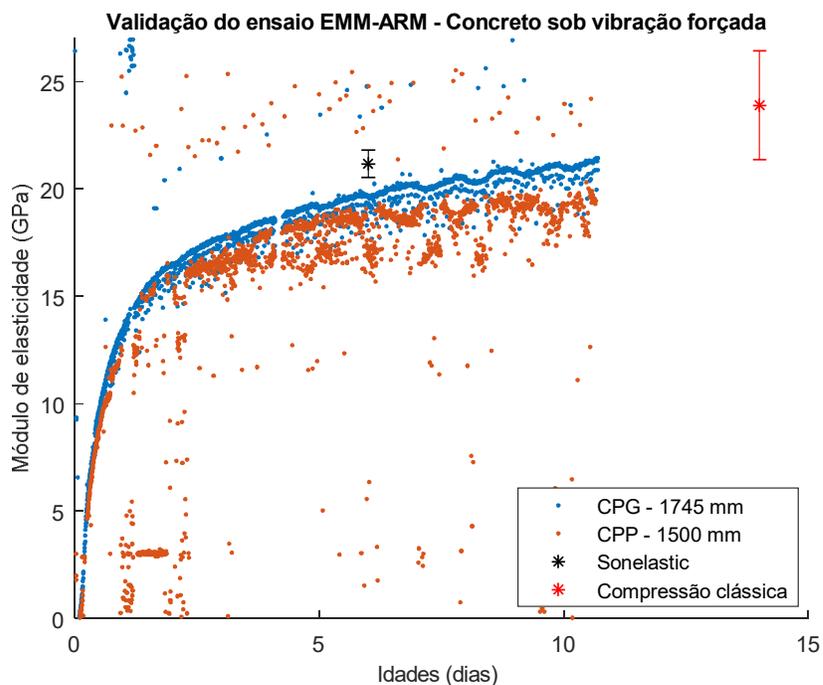


Figura 4-11: Resultados do EMM-ARM com vibração forçada, Sonelastic e compressão clássica executados em concreto.

Neste ensaio, o CPP apresentou problemas de excitabilidade, pois possui um vão menor e é mais rígido, o que explica a dispersão consideravelmente maior que o CPG. Isto demandou que o nível de excitação fosse continuamente aumentado ao longo do ensaio, ajustando o tempo de giro do motor. No entanto, a partir do quinto dia de ensaio, o dispositivo empregado para produzir a vibração forçada não conseguiu produzir vibrações no tubo que conseguissem se distinguir do ruído do ensaio, que possui uma frequência bem definida e que coincide com a frequência natural do tubo alcançada nesta idade. Mesmo com a utilização dos filtros digitais do *software* de processamento de dados, não se conseguiu eliminar a influência do ruído, que introduziu um viés de redução nos resultados de módulo a partir dos cinco dias de idade.

Apesar disso, a Figura 4-12 mostra que os corpos de prova apresentaram resultados similares entre si, sugerindo uma boa reprodutibilidade do sistema de ensaio nas condições testadas. Em comparação com o resultado do Sonelastic, o ensaio EMM-ARM produziu valores consideravelmente mais baixos, conforme apresentado na Tabela 4-17. Tal tendência, em ensaios com concreto, é observada em outros trabalhos, que utilizam tanto vibração ambiente quanto forçada (AZENHA *et al.*, 2010, 2012b; GRANJA, 2016). Os dados apresentados na Tabela 4-17 foram obtidos após aplicação de um filtro de média móvel de cinco pontos para

diminuir a influência da dispersão nas comparações feitas. Para se obter o valor de módulo exatamente aos seis dias, utilizou-se a média entre os dois valores mais próximos desse instante.

Tabela 4-17: Comparações dos resultados do Sonelastic e EMM-ARM em concretos sob vibração forçada.

Idade (dias)	Sonelastic			EMM-ARM - CPG		EMM-ARM - CPP		EMM-ARM - Média			
	Média	D-P ¹	CV ²	Média	DRR ³	Média	DRR ³	Média	DRR ³	D-P ¹	CV ²
6,000	21,17	0,64	3,02%	19,82	-6,37%	17,56	-17,05%	18,69	-11,71%	1,60	8,55%

Notas:

1 – D-P: Desvio-padrão;

2 – CV: Coeficiente de variação, dada por: (Desvio-Padrão)/(Média);

3 – DRR: Desvio em relação à referência, dada por: [(Média do EMM-ARM)-(Média do Sonelastic)]/(Média do Sonelastic).

Ao se traçar uma continuidade dos resultados do EMM-ARM, percebe-se uma tendência de que estes se aproximem ao intervalo de variação representado pela barra de erro do resultado de compressão clássica, embora em um valor menor que o médio, o que reproduz o comportamento anterior observado em relação aos resultados do Sonelastic. Para melhor visualização da concordância dos ensaios EMM-ARM com os resultados de compressão clássica, realizados após o término do EMM-ARM por questões de logística, ajustou-se a equação (3-5) aos resultados de cada corpo de prova. Para se obter um ajuste mais preciso, as amostras claramente aberrantes foram removidas manualmente das séries de ambas amostras. O resultado é apresentado na Figura 4-11, que inclui também o ensaio de compressão clássica realizado em corpos de prova com 57 dias de idade, e uma curva média, obtida pelo ajuste da equação (3-5) à média dos valores das outras duas curvas. Os parâmetros de ajuste das curvas são apresentados na Tabela 4-18, que inclui também o parâmetro R^2 que representa o grau de ajuste da curva aos dados experimentais. O valor relativamente menor do R^2 apresentado pela amostra CPP pode ser explicado pela influência do ruído de ensaio, conforme comentado anteriormente.

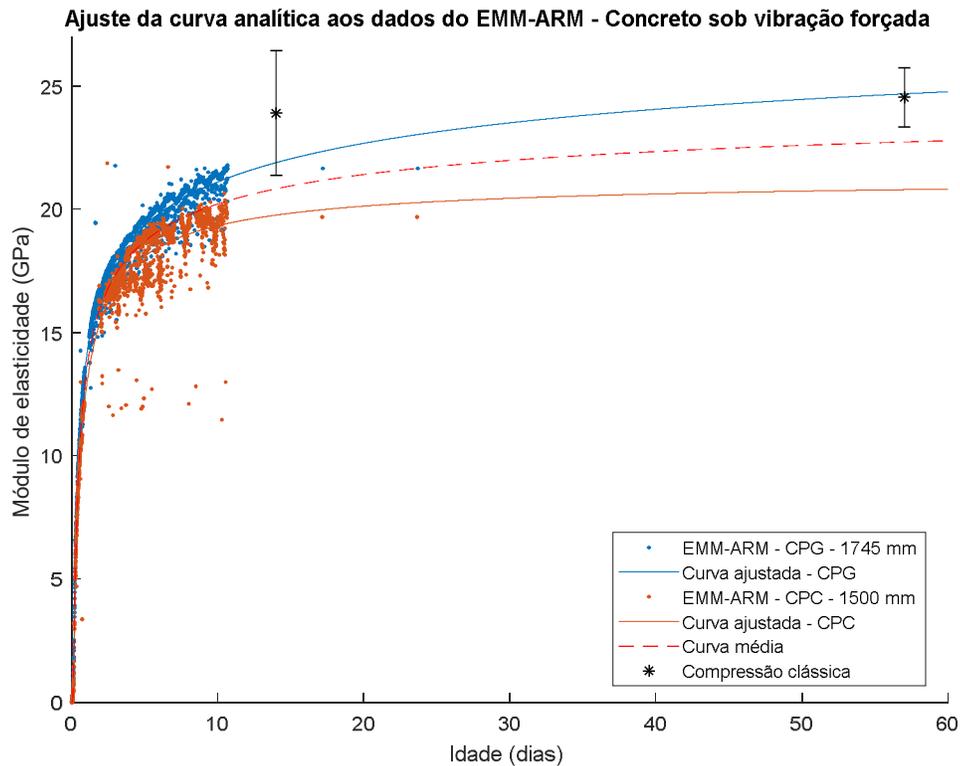


Figura 4-12: Resultados do EMM-ARM com vibração forçada, Sonelastic e compressão clássica executados em concreto, e equações ajustadas de evolução do módulo de elasticidade.

Tabela 4-18: Parâmetros de ajuste das curvas de evolução do módulo de elasticidade aos resultados de validação do EMM-ARM com concreto.

Curva	R ²	α_1	τ_1	β_1	α_2	τ_2	β_2
CPG	0,9860	14,1675	7,8955	0,4123	15,6143	0,2784	1,1817
CPC	0,9480	17,2975	0,6107	0,7393	4,09581	0,2174	3,1580
Curva média	-	12,7990	1,9980	0,4828	12,2484	0,2704	1,2902

Observa-se que, de fato, a curva ajustada da amostra CPG se encontra dentro dos intervalos de variação dos ensaios de compressão clássica. A curva da amostra CPC apresenta valores discrepantes, mas seu ajuste pode ter sido influenciado pela alta dispersão de seus resultados e pelo forte viés introduzido pelo ruído de ensaio a partir dos cinco dias de idade. A Tabela 4-19 apresenta a comparação numérica destes resultados, a partir da qual nota-se que a amostra CPG apresentou resultados dentro da dispersão dos ensaios de compressão clássica. Os dados apresentados na Tabela 4-19 foram obtidos após aplicação de um filtro de média móvel de cinco pontos para diminuir a influência da dispersão nas comparações feitas. Para se obter o

valor de módulo exatamente aos 14 e 57 dias de idade, utilizou-se a média entre os dois valores mais próximos desse instante.

Tabela 4-19: Comparação dos resultados de compressão clássica com as curvas ajustadas ao ensaio EMM-ARM em concretos sob vibração forçada

Idade (dias)	Compressão clássica			EMM-ARM - CPG		EMM-ARM - CPP		EMM-ARM - Média			
	Média	D-P	CV	Média	DRR	Média	DRR	Média	DRR	D-P	CV
14	23,90	2,53	10,59%	21,89	-8,39%	19,77	-17,29%	20,83	-12,84%	1,50	7,22%
57	24,547	1,205	4,91%	24,69	0,57%	20,80	-15,27%	22,74	-7,35%	2,75	12,09%

A Figura 4-13 apresenta os resultados experimentais do EMM-ARM, as curvas ajustadas e os resultados de compressão clássica em uma escala semi-logarítmica, na qual se favorece a visualização das primeiras idades. Nota-se a boa concordância dos resultados do EMM-ARM e das curvas ajustadas em idades próximas de até um dia.

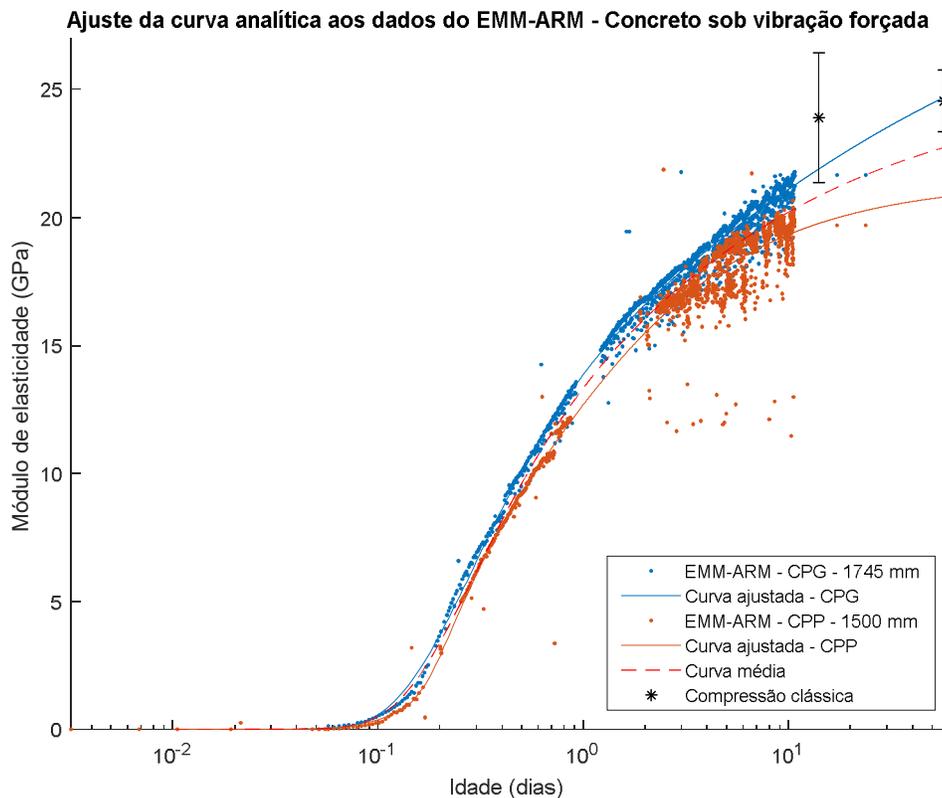


Figura 4-13: Resultados do EMM-ARM em escala logarítmica com vibração forçada, Sonelastic e compressão clássica executados em concreto, e equações ajustadas de evolução do módulo de elasticidade.

Considera-se que as observações feitas entre os resultados EMM-ARM realizados em concreto e os resultados de referência obtidos pelos métodos padrões de frequência ressonante

e compressão clássica permitem considerar o sistema de ensaio como validado para uso em concretos. Os valores de módulo de elasticidade obtidos nos EMM-ARM foram sistematicamente menores que aqueles obtidos nos ensaios padrões, mas tal comportamento é observado na literatura em EMM-ARMS que utilizam tanto vibração ambiente quanto forçada. A amostra de vão menor, CPP, de vão igual a 1500 mm, apresentou limitações quanto à sua excitabilidade com o dispositivo de vibração forçada proposto neste trabalho, embora tal limitação possa ser contornada por meio da calibração dos parâmetros de duração da rotação e peso do excêntrico do motor de excitação utilizado.

4.6 ANÁLISE METROLÓGICA DO SISTEMA PROPOSTO

4.6.1 Estimação da precisão do sistema de aquisição de dados sob condição de vibração ambiente

Os histogramas de frequência dos resultados de identificação modal nas séries de amostragens dos quatro sistemas construídos são apresentados na Figura 4-14. Os parâmetros estatísticos descritivos de cada distribuição (média, mediana, desvio-padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose) são apresentados na Tabela 4-20. Estes resultados se referem a ensaios realizados com um tubo vazio monitorado simultaneamente por todos os sistemas de aquisição de dados.

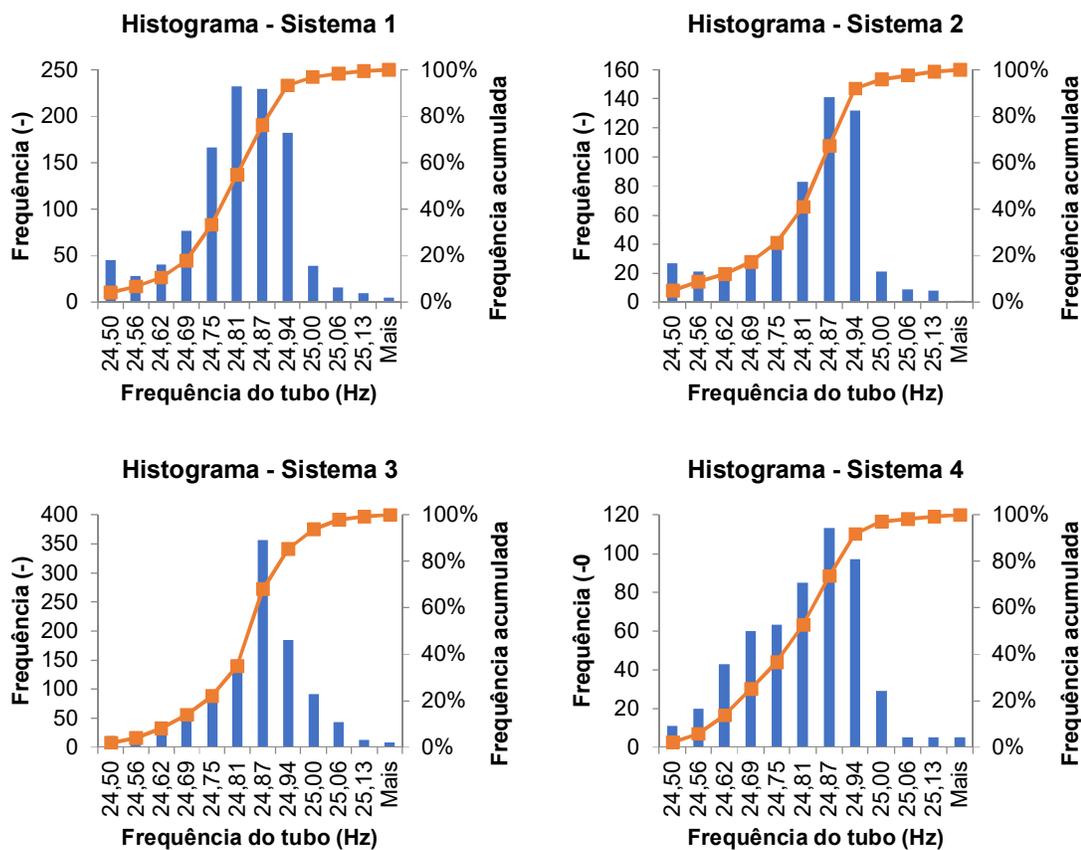


Figura 4-14: Histogramas de frequência dos quatro sistemas construídos, para uma série de 536 amostragens.

Tabela 4-20: Parâmetros metrológicos do sistema de ensaio, baseados em uma série de 536 amostragens.

Parâmetro	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Média	24,762	24,812	24,868	24,787
Mediana	24,770	24,835	24,868	24,793
Desvio-padrão	0,254	0,315	0,196	0,240
Coefficiente de variação	1,025%	1,268%	0,787%	0,970%
Assimetria	5,717	7,815	0,156	5,658
Curtose	112,820	96,662	55,680	81,282

Os dados da Tabela 4-20 permitem identificar que todos os sistemas apresentam uma distribuição com caudas mais largas se comparada com a normal, implicando em um alto valor de curtose e em maior probabilidade de se obter valores distantes da média central em comparação à uma distribuição normal. Todos os sistemas apresentam uma assimetria positiva, isto é, a concentração de dados está à esquerda da distribuição (mais valores baixos que valores altos), embora a mediana de todos os sistemas ainda seja maior que a média, indicando que há valores de pequena magnitude que possuem grande influência no cálculo da média. Os valores de desvio padrão para todos os sistemas foram relativamente próximos, com os coeficientes de variação estando entre 0,8% e 1,3% da média, o que, considera-se, é uma ordem de grandeza de dispersão aceitável para a determinação experimental do módulo de elasticidade a ser realizada com o sistema. No entanto, como o módulo de elasticidade é estimado a partir da frequência por meio de uma expressão que envolve outros fatores, afirmações acerca da magnitude de influência que a variação na determinação da frequência fundamental exerce na determinação do módulo de elasticidade requer análises ancoradas na teoria de propagação de erros

A Tabela 4-21 apresenta os resultados da investigação metrológica da precisão do sistema de aquisição de dados. Nenhum dado foi descartado durante a análise estatística de aberrantes, e apenas dois desvios-padrão (o sistema 4 no nível 1 e o sistema 3 no nível 3) foram detectados como suspeitos pela estatística k de Mandel, mas se julgou tal fato não ser suficiente para descartá-los, conforme orientação da NBR ISO 5725. Os resultados detalhados das análises estatísticas realizadas são apresentados no APÊNDICE G.

Tabela 4-21: Resultados da análise metrológica de precisão do sistema de aquisição de dados.

Nível	Quantidade de replicatas realizada	Média geral (Hz)	Desvio-padrão de repetibilidade (Hz)	Desvio-padrão de reprodutibilidade (Hz ²)	Coefficiente de variação considerando o desvio-padrão de reprodutibilidade
1	11	19,78257	0,44445	0,44445	2,25%
2	32	23,84864	0,53282	0,54806	2,30%
3	137	30,69566	0,77115	0,77203	2,52%

A dependência da precisão (desvios-padrão de repetibilidade e reprodutibilidade) com a média geral foi investigada, a partir do ajuste de uma equação de primeiro grau e uma equação logarítmica, conforme NBR ISO 5725. Os resultados são apresentados na Tabela 4-22.

Tabela 4-22: Equação de correlação de precisão com a média para o sistema de aquisição de dados.

Tipo de equação	Coeficiente de determinação (R ²)		Equação ajustada	
	Repetibilidade	Reprodutibilidade	Repetibilidade	Reprodutibilidade
Linear	0,9873	0,996	σ_r = 0,0304 · m - 0,1715	σ_R = 0,0303 · m - 0,1625
Logarítmica	0,9882	0,9973	$\log(\sigma_r)$ = 1,2662 · $\log(m)$ - 2,0023	$\log(\sigma_R)$ = 1,2626 · $\log(m)$ - 1,9931

Notas:

- σ_r representa o desvio-padrão de repetibilidade típico, dado um conjunto de valores com média m
- σ_R representa o desvio-padrão de reprodutibilidade típico, dado um conjunto de valores com média m
- m representa a média do conjunto de valores mensurados

Nota-se que os desvios-padrão dos sistemas apresentam uma alta correlação ($R^2 > 0.98$) com o nível, isto é, a média do valor mensurado. Essa relação é positiva: quanto maior a média, maior o desvio-padrão esperado para o conjunto de amostras. Esta correlação foi observada nos resultados dos ensaios EMM-ARM apresentados nos capítulos 4.4 e 4.5, nos quais se realizou ensaios de validação do sistema. Tanto o ajuste de uma equação linear quanto de uma equação logarítmica apresenta boa concordância. Sugere-se, conforme sugerido pela NBR ISO 5725, a utilização da equação linear como referência à precisão do sistema, pois ela permite obter de modo mais fácil uma estimativa para o máximo coeficiente de variação (σ/m) típico do sistema. Os valores obtidos para o desvios-padrão de repetibilidade e reprodutibilidade, apresentados na Tabela 4-21, foram maiores que os obtidos a partir das amostras realizadas para caracterização do histograma de frequência das amostragens do sistemas, apresentados na Tabela 4-20. A princípio, a diferença entre a quantidade de amostras utilizada em cada avaliação (536 para o experimento de caracterização do histograma e 179 na avaliação metrológica) pode ser uma explicação para tal observação.

Considerando os resultados do coeficiente de variação apresentados da Tabela 4-21, observa-se que os sistemas desenvolvidos possuem um desvio-padrão da ordem de menos que 3% do valor médio da propriedade mensurada. Embora estes resultados não permitam concluir quanto à adequabilidade dos sistemas para realização do ensaio EMM-ARM, pois apenas caracterizam sua precisão para detecção da frequência natural de estruturas, considera-se uma precisão razoável ao se considerar que coeficientes de variação típicos de métodos normatizados de determinação do módulo de elasticidade de materiais cimentícios são da magnitude de 5% a 10%. Para afirmações mais assertivas a este respeito, pode-se utilizar métodos de propagação de incertezas, que permitem estimar qual é a contribuição do desvio-padrão da estimativa da frequência natural na variabilidade da determinação do módulo de elasticidade no ensaio EMM-ARM, apesar de tal análise estar fora do escopo do presente estudo.

4.6.2 Resultados dos ensaio EMM-ARM de cada batelada

A Figura 4-15, Figura 4-16, Figura 4-17 e Figura 4-18 apresentam os resultados do EMM-ARM obtidos com as amostras das quatro bateladas produzidas para análise metrológica. Nos gráficos, também são apresentados os resultados dos ensaios de compressão clássica realizados com amostras obtidas das mesmas bateladas. De forma geral, observa-se um aumento da dispersão, em termos de valores absolutos, à medida que o tempo passa, o que está de acordo com as observações feitas nos ensaios de validação e na determinação da precisão do sistema de ensaio. Também se nota que, nas idades avançadas, uma oscilação aparentemente periódica nos resultados de módulo. Esta oscilação coincide com a oscilação de temperatura durante o ensaio, cujas medições são apresentadas na Figura 4-19, o que sugere que estão relacionadas. Este relacionamento pode ser explicado tanto pela mudança do módulo de elasticidade do PVC, do qual o tubo é formado, quanto pela mudança do módulo da amostra ensaiada, de acordo com a variação da temperatura ambiente. Ainda na Figura 4-19, nota-se variações mínimas entre os históricos de temperatura de EMM-ARMs de bateladas diferentes, o que fortalece a hipótese de repetibilidade feita no desenho metodológico do presente ensaio metrológico, que assume que amostras de diferentes bateladas podem ser consideradas ensaios sob condições de repetibilidade.

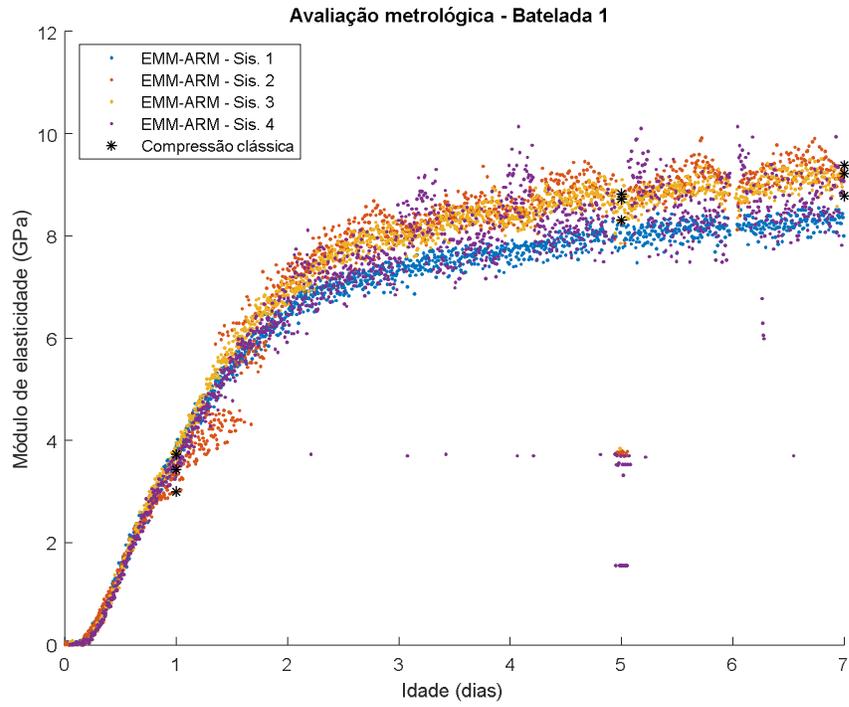


Figura 4-15: Resultados do EMM-ARM para amostras da batelada 1 da análise metrológica.

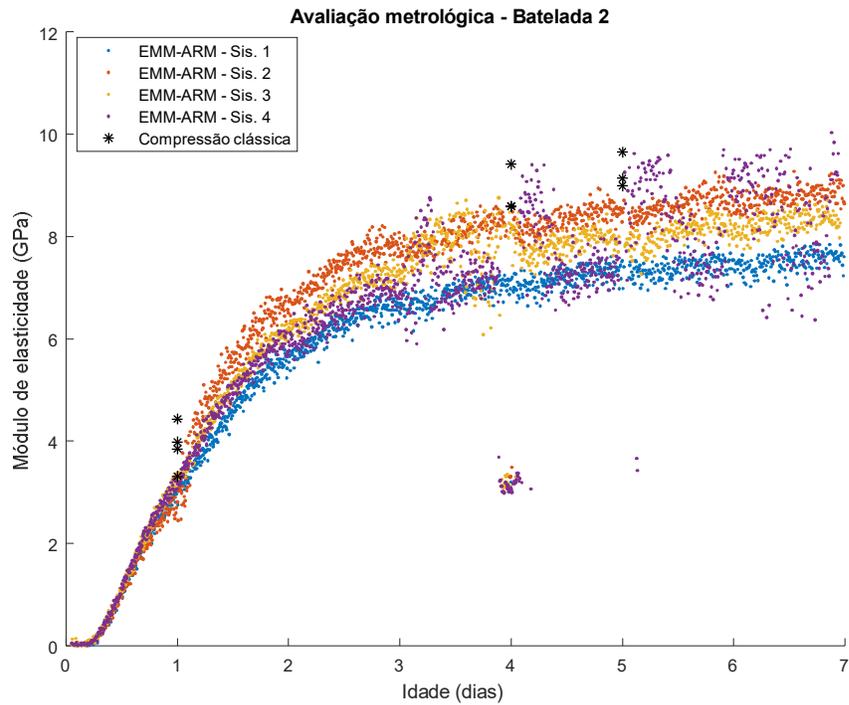


Figura 4-16: Resultados do EMM-ARM para amostras da batelada 2 da análise metrológica.

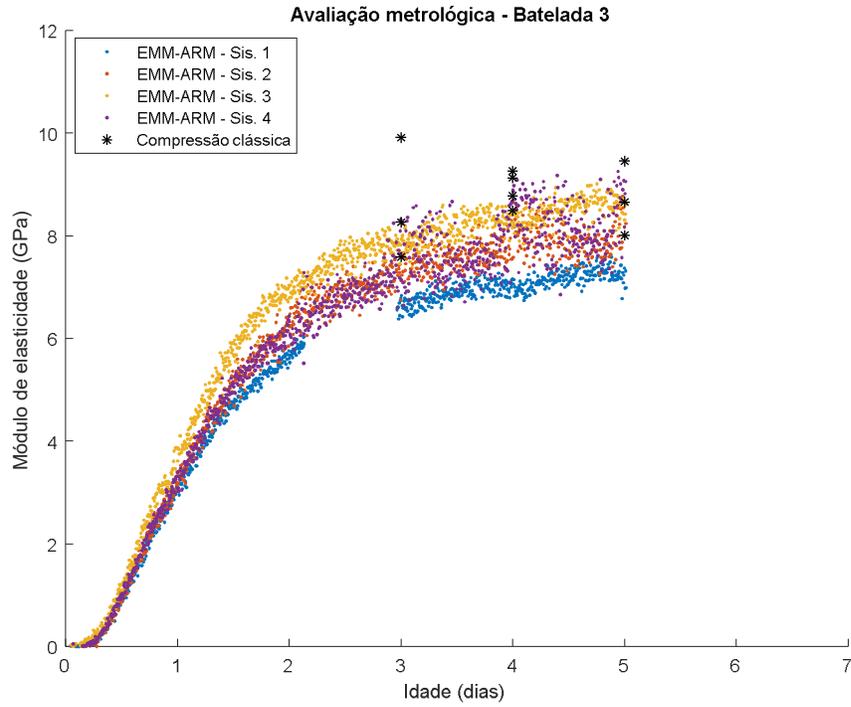


Figura 4-17: Resultados do EMM-ARM para amostras da batelada 3 da análise metrológica.

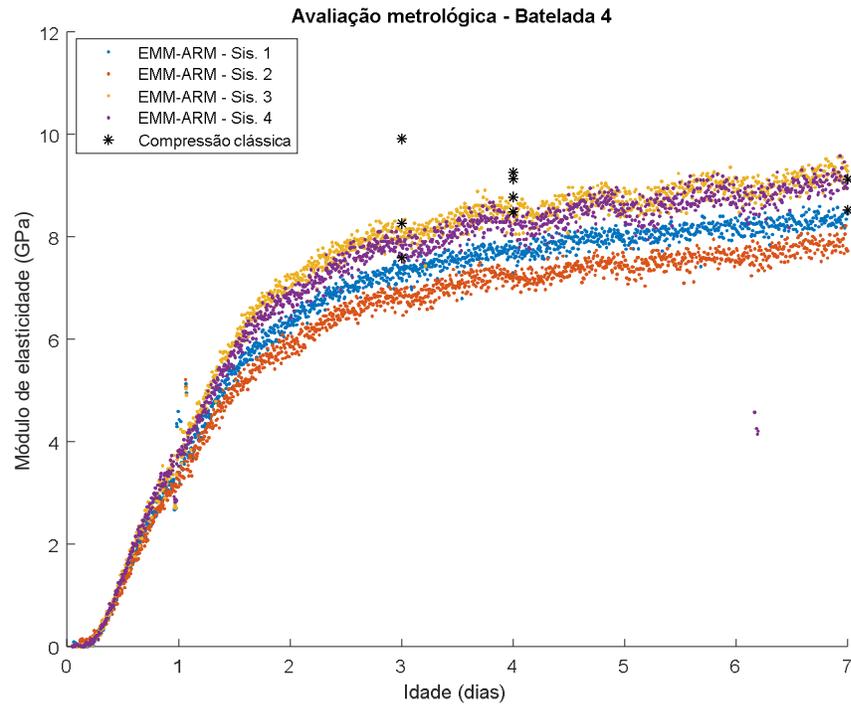


Figura 4-18: Resultados do EMM-ARM para amostras da batelada 4 da análise metrológica.

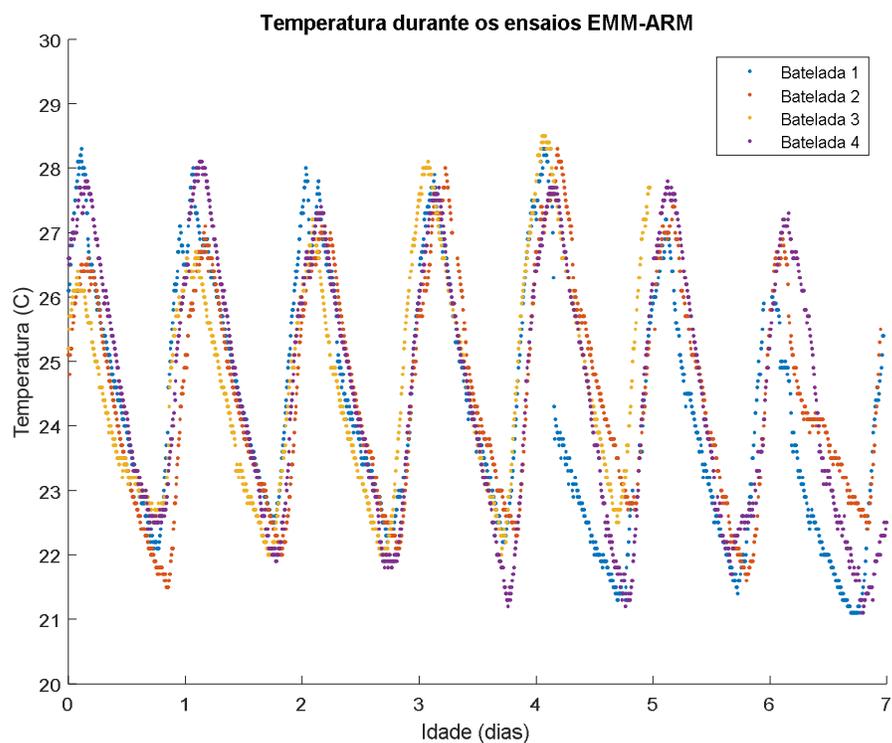


Figura 4-19: Resultados do EMM-ARM para amostras da batelada 4 da análise metroológica.

A Tabela 4-23 apresenta os coeficientes obtidos pelo ajuste da equação (3-5) aos dados experimentais obtidos, bem como o coeficiente R^2 de cada ajuste.

Tabela 4-23: Coeficientes das equações ajustadas.

Sistema	Batelada	R^2	α_1	τ_1	β_1	α_2	τ_2	β_2
Sistema 1	1	0,996	1,389	1,235	3,542	7,531	0,768	1,096
	2	0,994	7,715	0,864	1,180	1,298	1,480	4,095
	3	0,998	3,604	0,642	1,518	3,535	1,339	1,827
	4	0,996	1,117	1,293	4,319	7,862	0,843	1,145
Sistema 2	1	0,949	2,311	1,557	6,990	7,591	0,799	1,013
	2	0,971	2,418	1,175	5,857	8,420	0,984	1,021
	3	0,959	3,764	1,476	2,561	4,345	0,625	1,952
	4	0,996	0,976	1,300	4,193	7,451	0,843	1,129
Sistema 3	1	0,993	1,366	1,353	4,170	8,417	0,825	1,141
	2	0,959	8,144	0,848	1,196	1,634	1,435	3,929
	3	0,995	1,327	1,274	4,749	8,176	0,862	1,243
	4	0,996	1,537	1,276	5,463	8,290	0,833	1,126
Sistema 4	1	0,874	6,520	0,692	1,363	2,138	1,482	3,594
	2	0,863	5,126	0,985	1,086	5,126	1,007	1,076
	3	0,983	9,400	1,070	1,084	0,534	1,270	5,172
	4	0,970	4,779	0,896	1,303	4,779	0,898	1,304

À exceção do sistema 4 nas bateladas 1 e 2, o coeficiente R^2 apresentou sempre valores maiores que 0,94, indicando um bom ajuste geral de todas as equações. Nas bateladas 1 e 2, o sistema 4 apresentou uma alta variabilidade nas idades avançadas, que coincidem com a variação de temperatura ao longo dos dias de ensaio, conforme comentado anteriormente. Não foi possível identificar uma causa específica para a maior sensibilidade desse sistema à variação de temperatura.

A única diferença identificada entre esse sistema e os demais é a posição em relação ao ventilador utilizado para potencializar a vibração ambiente. Como esse sistema estava mais próximo ao ventilador, conforme a Figura 3-20, o seus corpos de prova eram mantidos em uma direção ligeiramente mais paralela ao fluxo de ar que os demais. Isso pode ter levado a um nível de excitação menor desse tubo, e, portanto, maior variabilidade nas amostras devido ao baixo SNR. De fato, ao se analisar a aceleração RMS média ao longo dos ensaios das bateladas 1 e 2 de cada sistema, o sistema 4 aparece com a menor aceleração, com 0,0037 g_{RMS} e 0,0049 g_{RMS} , respectivamente, sendo que os demais sistemas apresentam acelerações de 0,0053 g_{RMS} a 0,0102 g_{RMS} .

4.6.3 Estimação da precisão do sistema de ensaio na execução do EMM-ARM

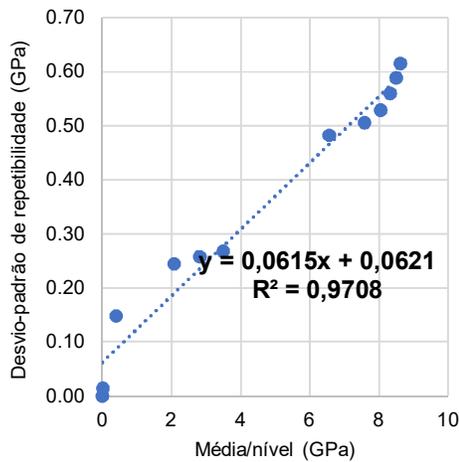
A Tabela 4-24 apresenta os resultados obtidos na estimação da precisão (desvios-padrão de repetibilidade e reprodutibilidade) do ensaio EMM-ARM em pastas de cimento sob vibração ambiente, executado com o sistema de ensaio proposto neste trabalho. Os desvios-padrão são informados por nível, pois podem depender da magnitude da propriedade medida. Nos testes estatísticos previstos pela NBR ISO 5725, nenhum dado foi considerado aberrante, não havendo, portanto, nenhum descarte.

Tabela 4-24: Resultados da estimação da precisão do ensaio EMM-ARM em pastas de cimento sob vibração ambiente, com o sistema de ensaio proposto neste trabalho.

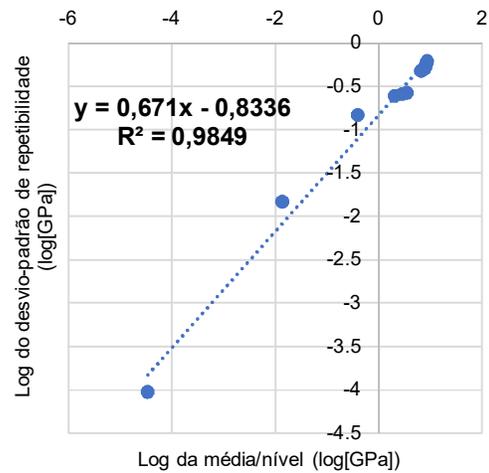
Nível	Média geral (GPa)	Desvio-padrão de repetibilidade (GPa)	Desvio-padrão de reprodutibilidade (GPa)	Coefficiente de variação, considerando o desvio-padrão de repetibilidade	Coefficiente de variação, considerando o desvio-padrão de reprodutibilidade
1	3,445E-05	9,610E-05	9,696E-05	278,96%	281,45%
2	0,0136	0,0149	0,0149	109,56%	109,56%
3	0,3982	0,1489	0,1489	37,39%	37,39%
4	2,0783	0,2453	0,2453	11,80%	11,80%
5	2,8281	0,2582	0,2790	9,13%	9,87%
6	3,4985	0,2683	0,3063	7,67%	8,76%
7	6,5646	0,4827	0,5658	7,35%	8,62%
8	7,5808	0,5062	0,6033	6,68%	7,96%
9	8,0476	0,5297	0,6298	6,58%	7,83%
10	8,3186	0,5598	0,6591	6,73%	7,92%
11	8,4955	0,5891	0,6861	6,93%	8,08%
12	8,6198	0,6151	0,7096	7,14%	8,23%

Observando-se os coeficientes de variação apresentados na Tabela 4-24, nota-se que após o período inicial de hidratação, no qual dispersões mínimas, em termos de valores absolutos, causam coeficientes grandes, o coeficiente de variação calculado com o desvio-padrão de repetibilidade e de reprodutibilidade se estabilizaram em torno de, respectivamente, 7,01% e 8,20 %. Estes coeficientes são de magnitude semelhante ao obtido na análise do sistema de aquisição de dados, embora sejam numericamente maiores, o que pode ser explicado pelo fato de que os presentes coeficientes incorporam outras fontes de erro adicionais não presentes na análise da precisão do sistema de aquisição de dados. Considerando que a NBR 8522 sugere coeficientes de variação entre duas amostras em condições de repetibilidade, ou entre uma amostra de uma série e o valor médio desta série, de 5 %, e entre duas amostras sob condição de reprodutibilidade de 10%, tal magnitude de dispersão pode ser considerada como aceitável.

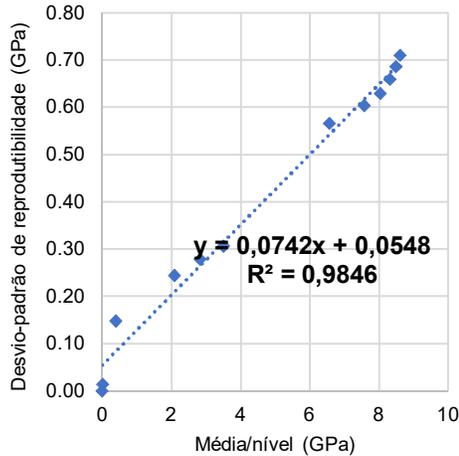
A Figura 4-20 apresenta os resultados de regressão entre os desvios-padrão e a média.



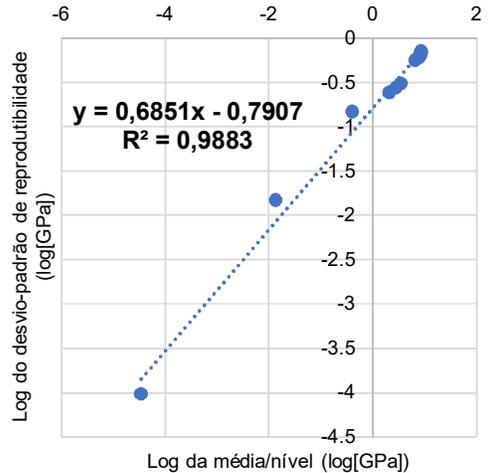
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4-20: Gráficos de correlação entre desvios-padrão e média, para o ensaio EMM-ARM realizado com o sistema proposto neste trabalho: (a) desvio-padrão de repetibilidade e média, com equação linear; (b) desvio-padrão de repetibilidade e média, com equação logarítmica; (c) desvio-padrão de reprodutibilidade e média, com equação linear; (d) desvio-padrão de reprodutibilidade e média, com equação logarítmica

Observa-se que os desvios-padrão apresentam uma dependência clara com a média do nível. Tanto as equações lineares quanto as logarítmicas apresentaram boa concordância, de acordo com o coeficiente R^2 . Seguindo o proposto na NBR ISO 5725 (ABNT, 2018a, 2018b, 2018c), sugere-se a utilização das equações lineares para indicações a respeito da precisão do sistema de ensaio, pois elas permitem estimar mais facilmente um coeficiente de variação típico do método, a ser utilizado para verificar a validade de medições realizadas com o método.

Por fim, é importante notar que as condições de repetibilidade e reprodutibilidade admitidas no desenho experimental deste estudo metrológico diferem das previstas na NBR ISO 5725 e normalmente associadas a estas nomenclaturas. Neste estudo, a condição de

repetibilidade admite a possibilidade de a temperatura variar entre as replicatas sob condição de repetibilidade, o que incorpora uma fonte de erro a mais que em norma, levando a um desvio-padrão de repetibilidade provavelmente maior que aquele obtido sob condições ideais de repetibilidade. Já na condição de reprodutibilidade, o desenho experimental deste estudo utilizou operador e parte dos equipamentos de ensaio (aqueles voltados para a produção das amostras, como a misturadora e espátulas) iguais em todas as replicatas sob condição de reprodutibilidade, o que exclui dessa condição fontes de erro previstas em norma, levando a um desvio-padrão de reprodutibilidade provavelmente menor que aquele obtido sob condições ideais de reprodutibilidade. Assim, é possível que os coeficientes de variação de repetibilidade e reprodutibilidade estimados neste trabalho, iguais a 7,01% e 8,20%, se aproximem do coeficientes utilizados pela NBR 8522 (ABNT, 2017), iguais a 5% e 10%, caso condições ideais de repetibilidade e reprodutibilidade sejam empregadas. Tal constatação é mais um indício da boa robustez do método EMM-ARM e do sistema de ensaio proposto no presente estudo.

4.6.4 Estimação da tendência do sistema de ensaio na execução do EMM-ARM

A Tabela 4-25 apresenta a comparação dos resultados de compressão clássica, adotado como referência, e os resultados médios obtidos do EMM-ARM, obtidos por meio das curvas ajustadas aos dados experimentais. A Tabela 4-26 apresenta os resultados do EMM-ARM de cada sistema, utilizados para calcular os parâmetros médios da Tabela 4-25.

Tabela 4-25: Comparação entre os resultados do método de referência (compressão clássica) e os valores médios das equações ajustadas aos resultados do ensaio EMM-ARM, realizado com o sistema de ensaio proposto.

Compressão clássica				EMM-ARM com o sistema proposto		
Idade	Replicatas	Média (GPa)	Desvio-padrão (GPa)	Todos os sistemas		Análise metrológica
				Média (GPa)	Desvio-padrão (GPa)	Desvio-padrão de reprodutibilidade (GPa)
1	7	3,68	0,47	3,50	0,30	0,33
3	6	8,63	1,02	7,58	0,59	0,70
4	11	8,90	0,34	8,05	0,61	0,72
5	9	8,86	0,52	8,32	0,64	0,71
7	5	9,01	0,35	8,62	0,69	0,72

Tabela 4-26: Resultados obtidos nas equações ajustadas aos resultados do ensaio EMM-ARM, realizado com o sistema de ensaio proposto, nas idades de referência.

Idade	Sistema 1		Sistema 2		Sistema 3		Sistema 4	
	Média (GPa)	Desvio-padrão (GPa)						
1	3,34	0,39	3,31	0,11	3,69	0,09	3,65	0,34
3	7,02	0,63	7,70	0,77	8,02	0,07	7,58	0,20
4	7,45	0,65	8,14	0,81	8,49	0,09	8,11	0,16
5	7,70	0,68	8,39	0,86	8,76	0,09	8,43	0,20
7	7,96	0,73	8,66	0,94	9,06	0,10	8,79	0,30

É possível observar que o sistema 1 apresentou resultados sistematicamente menores a partir do terceiro dia de idade, que contribuíram para o desvio entre a média do EMM-ARM e a média dos resultados de compressão clássica. Enquanto os desvios das médias dos ensaios EMM-ARM em relação às médias do ensaio de compressão clássica, quando incluídos os resultados do sistema 1, variaram entre 4,36% e 12,17%, quando excluído este sistema a variação se reduziu ao intervalo de 1,82% e 10,00%. No entanto, os testes estatísticos não indicaram que os dados deste sistema fossem suspeitos ou aberrantes.

Os desvios-padrão de reprodutibilidade do EMM-ARM, até o terceiro dia de idade, são menores que na compressão clássica, sendo aproximadamente o dobro nas idades de quatro e sete dias, e aproximadamente 37% maior na idade de cinco dias. Isto reforça a vocação do ensaio para estudo do módulo de elasticidade nas primeiras idades.

A Tabela 4-27 apresenta os resultados de estimação da tendência do ensaio EMM-ARM em relação ao método de compressão clássica. Foi detectada uma tendência negativa em todas as idades, o que significa que os resultados obtidos no ensaio EMM-ARM realizado com o sistema de ensaio proposto neste trabalho foram sistematicamente menores que aqueles observados em ensaios de compressão clássica. Este fenômeno já havia sido observado em trabalhos que utilizaram os ensaios EMM-ARM e compressão clássica em conjunto (AGUILAR *et al.*, 2016; DELSAUTE *et al.*, 2016).

Tabela 4-27: Resultados da estimação da tendência do ensaio EMM-ARM em pastas de cimento sob vibração ambiente, com o sistema de ensaio proposto neste trabalho.

Idade (dias)	Média referência (GPa)	Média EMM-ARM (GPa)	Tendência $\hat{\delta}$ (GPa)	Intervalo de confiança (95%)	
				$\hat{\delta} - \sigma_R$	$\hat{\delta} + \sigma_R$
1	3,6759	3,4985	-0,1773	-0,3762	0,0216
3	8,6317	7,5808	-1,0509	-1,4570	-0,6448
4	8,8987	8,0476	-0,8511	-1,2809	-0,4213
5	8,8606	8,3186	-0,5420	-0,9854	-0,0985
7	9,0062	8,6198	-0,3864	-0,8451	0,0724

Na tendência estimada, apresentada na Tabela 4-27, como o intervalo de confiança calculado inclui o valor zero nas idades de 1 e 7 dias, a tendência do método não é significativa no nível de significância de 5%, conforme a NBR ISO 5725. Isso não implica que, nessas idades, o ensaio EMM-ARM realizado com o sistema de ensaio proposto neste trabalho não apresente um viés em relação ao ensaio de compressão clássica. A interpretação deve ser de que, considerando o desenho experimental feito para a estimação da tendência (número de laboratórios e replicatas), e a precisão do método de ensaio investigado (desvios-padrão de repetibilidade e reprodutibilidade), não foi possível identificar um viés estatisticamente significativo. O viés, no entanto, pode existir, sendo apenas menor do que aquele estatisticamente detectável no estudo realizado no presente trabalho.

A Tabela 4-28 apresenta os resultados da estimação da magnitude de tendência mínima $\delta m_{(\min)}$ a ser detectada no estudo de tendência, de acordo com o desenho experimental utilizado e o método de ensaio investigado no presente trabalho. Nota-se que, de fato, para as idades de 1 e 7 dias, a magnitude mínima a ser detectada, $\delta m_{(\min)}$, é 0,3660 e 0,8441, respectivamente. Estes valores são bastante maiores que a tendência $\hat{\delta}$ encontrada nestas idades, de acordo com a Tabela 4-27. Já na idade de 5 dias, embora a tendência encontrada seja de -0,5420, sendo, portanto, menor que a magnitude de tendência mínima estimada para tal idade (0,8160), pode-se argumentar que o limite superior de seu intervalo de confiança, -0,0985, é razoavelmente próximo de zero, o que pode indicar não-significância.

Tabela 4-28: Estimativa da magnitude de tendência mínima a ser detectada no estudo de tendência do método.

Idade (dias)	Média (GPa)	Desvio-padrão de repetibilidade (GPa) [σ_r]	Desvio-padrão de reprodutibilidade (GPa) [σ_R]	$\frac{\sigma_R}{\sigma_r}$	Replicatas	Laboratórios	A_w	$\delta m_{(\min)}$
1	3,4985	0,2773	0,3144	1,134	4	4	0,633	0,366
3	7,5808	0,5283	0,6173	1,168	4	4	0,658	0,747
4	8,0476	0,5570	0,6519	1,170	4	4	0,659	0,791
5	8,3186	0,5737	0,6720	1,171	4	4	0,660	0,816
7	8,6198	0,5922	0,6944	1,173	4	4	0,661	0,844

4.6.5 Verificação da moldagem dos corpos de prova do ensaio EMM-ARM

A Tabela 4-29 apresenta os resultados obtidos do cálculo da variação da densidade ao longo de cada amostra utilizada na análise metrológica. A variação da densidade foi calculada tomando-se como referência a densidade média obtida dos três trechos que permaneceram livres durante o ensaio (trechos “Livre”, “2” e “3”). A equação utilizada foi:

$$\Delta\rho(\%) = \frac{\rho_{\text{trecho}}}{\rho_{\text{trecho livre}} + \rho_{\text{trecho 2}} + \rho_{\text{trecho 3}}} \quad (4-8)$$

O trecho “Engaste” não foi incluído na equação (4-8) pois, devido à presença da tampa para expulsão de ar, cuja utilização envolve, necessariamente, a remoção de uma quantidade de material do interior do tubo para promover a expulsão de ar e a garantia de preenchimento de todo o volume interior, sua densidade era muito menor que os demais trechos. Mesmo assim, a variação da densidade no trecho “Engaste” também é apresentada na Tabela 4-29, de forma a ilustrar esse fenômeno. Na Tabela 4-29, os trechos que apresentaram uma variação maior que 0,5%, limite recomendado por Azenha *et al.* (2012a), são realçados na cor laranja.

Tabela 4-29: Variação da densidade das amostras utilizadas, de acordo com o trecho.

Batelada	Sistema	Variação da densidade por trecho da amostra			
		Livre	2	3	Engaste
1	1	0,09%	-0,54%	0,45%	-13,41%
	2	-2,21%	0,59%	1,62%	-23,06%
	3	3,16%	0,37%	-3,52%	-17,42%
	4	0,33%	0,30%	-0,63%	-11,05%
2	1	0,19%	0,25%	-0,44%	-17,68%
	2	0,80%	-0,23%	-0,57%	-12,69%
	3	-0,66%	1,57%	-0,92%	-9,43%
	4	-0,35%	0,22%	0,13%	-6,90%
3	1	-5,00%	1,37%	3,63%	-1,93%
	2	-0,86%	-2,96%	3,82%	-14,35%
	3	3,56%	-5,74%	2,18%	-16,08%
	4	-0,16%	0,78%	-0,62%	-6,45%
4	5	0,46%	1,02%	-1,48%	-18,06%
	6	-0,93%	0,86%	0,07%	-22,09%
	7	1,25%	0,12%	-1,38%	-5,75%
	8	0,33%	0,13%	-0,46%	-8,02%

As variações de densidade permaneceram em valores próximos. No entanto, levando em consideração o limite de 0,5% recomendado por Azenha *et al.* (2012a), nota-se que a maior parte das amostras não satisfaz a essa recomendação. Este resultado é relevante, pois neste trabalho adotou-se um tubo para molde de diâmetro maior que Azenha *et al.* (2012a), que utilizaram um tubo de diâmetro interno igual a 16 mm, e utilizou-se a mesma tampa de expulsão de ar e procedimento de moldagem, inclusive com utilização de vibração durante a moldagem. Esperava-se, portanto, que o limite sugerido de 0,5% fosse atendido, ao menos, na maioria das amostras produzidas. Como não foi possível encontrar a origem desse limite proposto, levanta-

se a possibilidade de que seu valor imponha ao processo de moldagem das amostras do EMM-ARM dificuldades excessivas, tornando-o um ensaio de difícil execução.

Apesar dessa não conformidade, ressalta-se que tais observações não invalidam a análise metrológica realizada neste trabalho, pois a variabilidade observada está incorporada às fontes de erro consideradas nos parâmetros de precisão calculados. Fatores de erro relacionados ao processo de moldagem das amostras estão vinculados ao operador. Como o desenho experimental utilizado neste trabalho utilizou somente um operador, os parâmetros metrológicos estimados são todos influenciados por essa relativa alta variabilidade, se levado em conta o limite de 0,5%, de densidade ao longo das amostras.

Considerando verdadeira a hipótese de que a técnica de moldagem utilizada neste trabalho está aquém do ideal, pode-se concluir que os parâmetros de exatidão (precisão e tendência) estimados incorporam imprecisões não esperadas naqueles a serem obtidos por meio de uma técnica de moldagem ideal, que atenda ao limite de 0,5% de variação da densidade ao longo das amostras. Assim, pode-se argumentar que o ensaio EMM-ARM, realizado com o sistema de ensaio proposto neste trabalho, possui, possivelmente, melhor exatidão, e, principalmente, maior precisão, que a sugerida nos parâmetros estimados na análise metrológica realizada no presente trabalho.

Em todo o caso, os parâmetros metrológicos obtidos neste trabalho permanecem válidos ao se considerar que se referem às condições empregadas na análise metrológica (moldagem, controle de temperatura, etc). Mesmo que possivelmente superestimem a variabilidade típica do método, as variações observadas são compatíveis com as admitidas na norma NBR 8522 do método de compressão clássica, adotado como referência.

4.7 ESTUDO DE CIMENTOS COM DISTINTAS CINÉTICAS DE HIDRATAÇÃO

4.7.1 Resistência à compressão

Os resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão dos cimentos testados são apresentados na Figura 4-21.

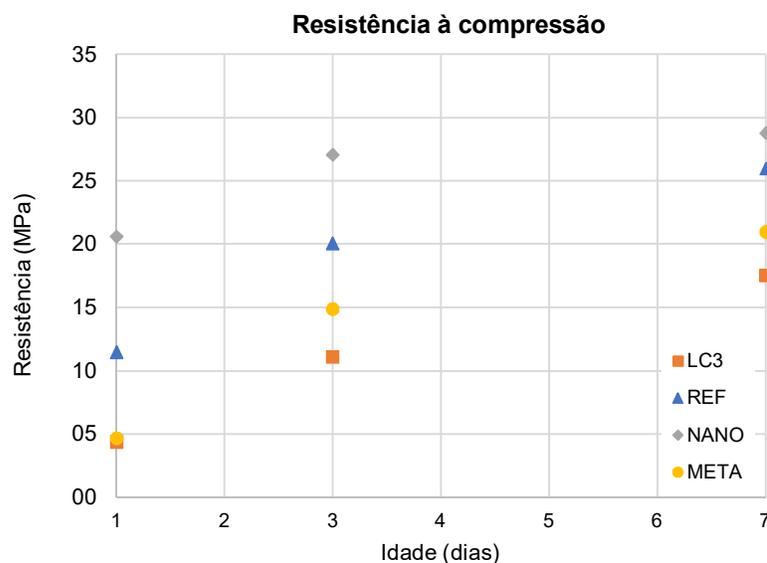


Figura 4-21: Resistência à compressão dos cimentos testados.

Estes ensaios permitem visualizar a tendência geral de desenvolvimento de propriedades mecânicas dos cimentos testados, e orientar a expectativa em relação aos resultados dos ensaios EMM-ARM. Embora não haja uma relação universal entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, não sendo possível afirmar que um alto valor de uma leva a um alto valor da outra, ambas propriedades usualmente mantêm uma relação direta e podem fornecer inferências uma sobre a outra. Assim, é possível perceber a tendência de elevado ganho de resistência do cimento NANO nas primeiras idades, embora haja uma tendência de estabilização rápida após o terceiro dia de idade (ISFAHANI et al., 2017; STEFANIDOU; PAPAYIANNI, 2012). Em contraposição, os demais cimentos ainda aparentam manter um razoável ganho de resistência após os sete dias de idade. O cimento REF inclusive aparenta ultrapassar a resistência do cimento NANO em idades mais avançadas. O cimento LC3 e META, como possuem substituição de 45% de clínquer por 30% de argila/metacaulim e 15% de filer carbonático, apresentaram menores resistências, como era de se esperar para idades inferiores a 7 dias, já que 45% de clínquer, um componente com elevado potencial aglomerante, foi substituído por um componentes relativamente menos aglomerantes.

4.7.2 Evolução do módulo de elasticidade

As Figura 4-22, Figura 4-23, Figura 4-24 e Figura 4-25 apresentam os resultados dos ensaios EMM-ARM realizados com os cimentos estudados a temperatura ambiente e alta. Também são apresentados os resultados do ensaio Sonelastic, na forma do valor médio junto a uma barra de erro que representa o valor de um desvio-padrão abaixo e acima do valor médio, que servem como referência para validação dos resultados obtidos no EMM-ARM. O histórico de temperatura de cada ensaio é apresentado nas Figura 4-26 e Figura 4-27, nas quais as siglas TCI e TCE se referem, respectivamente, a termopares interno e externo, conforme Figura 3-20.

Em geral, os resultados do ensaio EMM-ARM apresentaram boa concordância com os resultados de referência do Sonelastic, e as duplicatas realizadas apresentaram boa concordância entre si. Os ensaios dos cimentos REF e NANO a temperatura alta são apresentados apenas com uma das duplicatas, uma vez que os resultados de uma das amostras ficaram inutilizados por ruídos advindos do fluxo forçado do ventilador. Isto também aconteceu nos resultados do cimento META na amostra 1 à temperatura ambiente, entre as idades de 0,5 e 3 dias, podendo ser visualmente constatado pelo claro viés introduzido nos resultados dessa amostra entre tais idades. Isto se deveu à configuração de ensaio adotada, que exigiu que o ventilador ficasse mais próximo, a uma distância de 55 cm, dos corpos de prova que nos ensaios realizados anteriormente neste trabalho, que ficaram a uma distância de aproximadamente 1,5 m. Mesmo tendo-se aferido a aceleração em um eixo perpendicular ao fluxo de ar do ventilador, visando reduzir tal efeito nos sinais amostrados, pequenas imprecisões e desalinhamentos no momento de posicionamento do sensor podem ter provocado a contaminação do sinal com a frequência de funcionamento do ventilador. A vibração forçada causada pelo ventilador provocou um sinal muito mais forte que a vibração livre do corpo de prova devido ao fluxo turbulento de ar nas outras direções, o que inutilizou os sinais mesmo após tentativa de tratamento dos dados com os filtros implementados no *software* de processamento de dados. Tal resultado sugere que a utilização de vibração ambiente potencializada com um ventilador deve levar em conta a possibilidade de as amostras estarem vibrando predominantemente na frequência do fluxo de ar, e não só na sua própria frequência natural, o que dificulta a análise dos dados experimentais. Em aplicações cujo espaço de ensaio é restrito, como ensaios executados dentro de câmeras térmicas, essa forma de vibração das amostras pode se revelar inadequada ou mesmo impossibilitar o ensaio. Reforça-se, assim, a necessidade de se desenvolver soluções de vibração forçada, como a explorada no item 4.5.

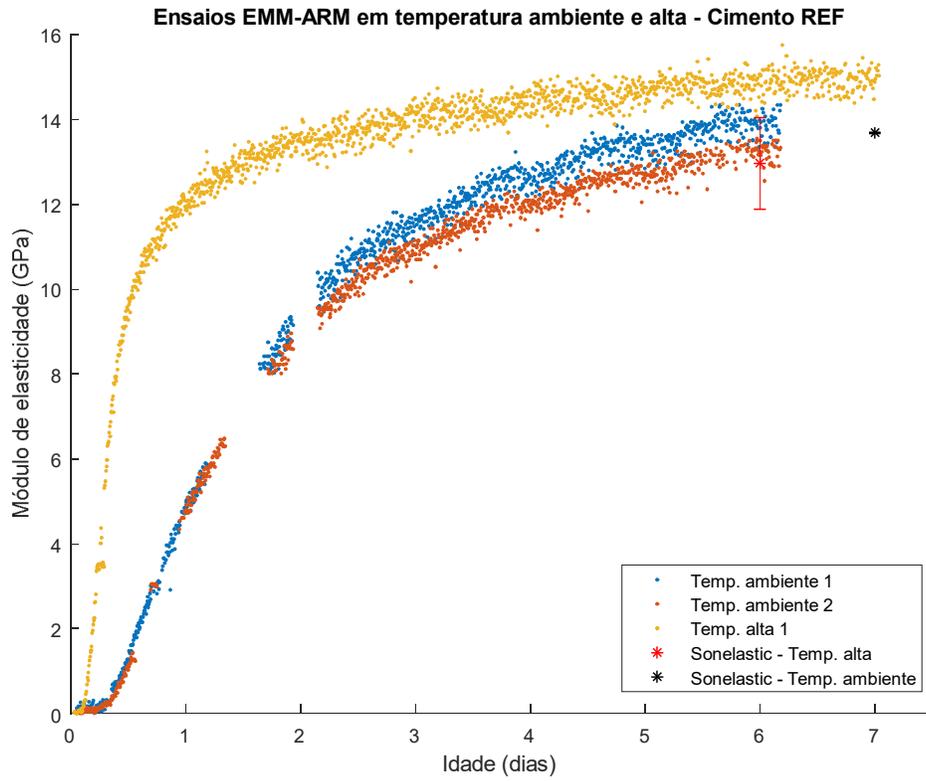


Figura 4-22: Resultados dos ensaios EMM-ARM a temperatura ambiente e alta com cimento REF.

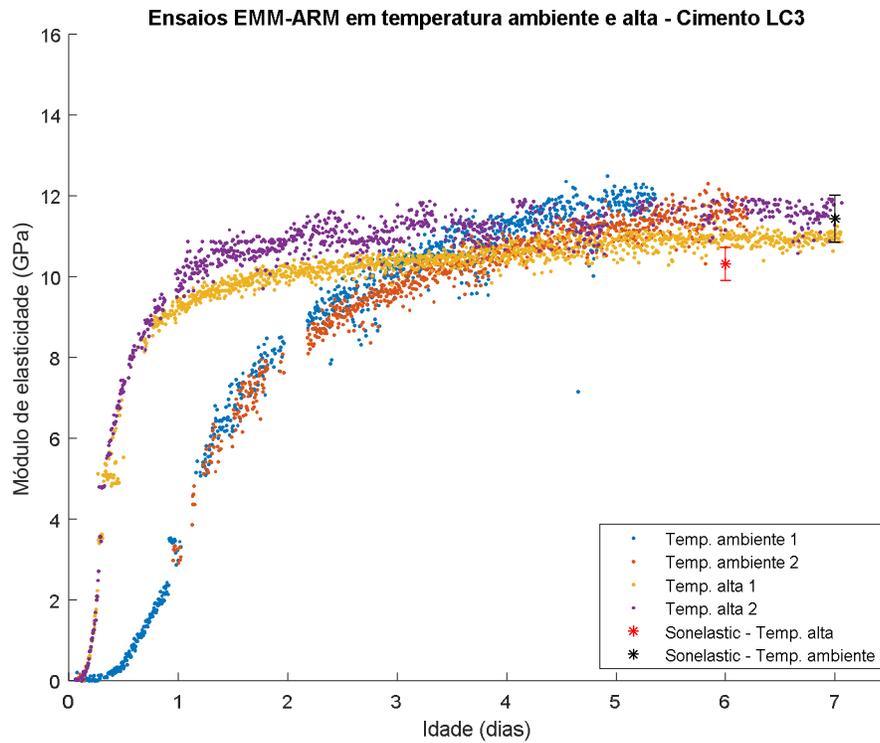


Figura 4-23: Resultados dos ensaios EMM-ARM a temperatura ambiente e alta com cimento LC3.

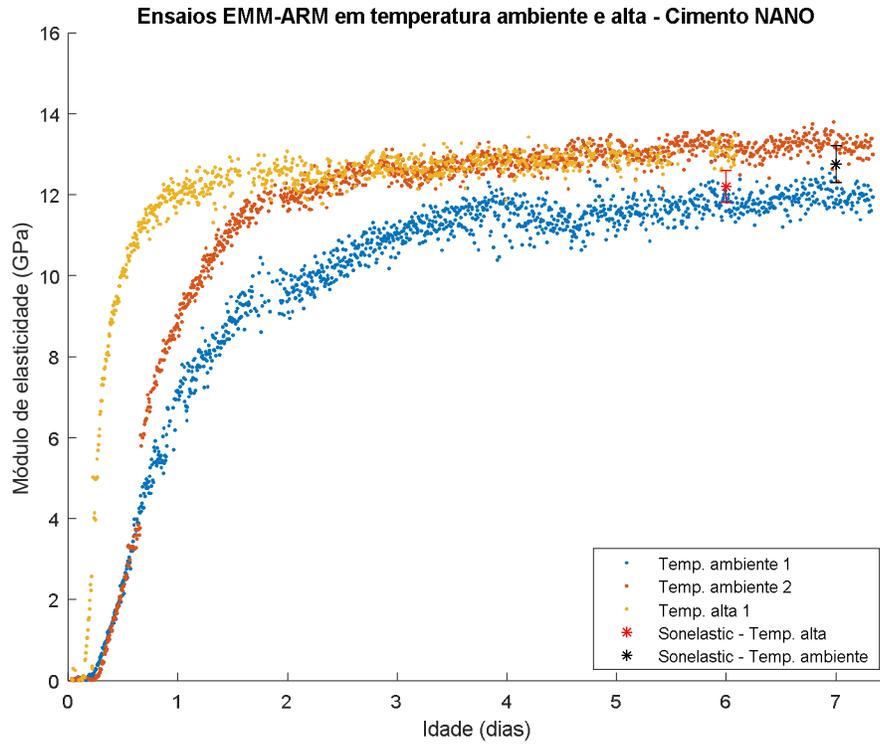


Figura 4-24: Resultados dos ensaios EMM-ARM a temperatura ambiente e alta com cimento NANO.

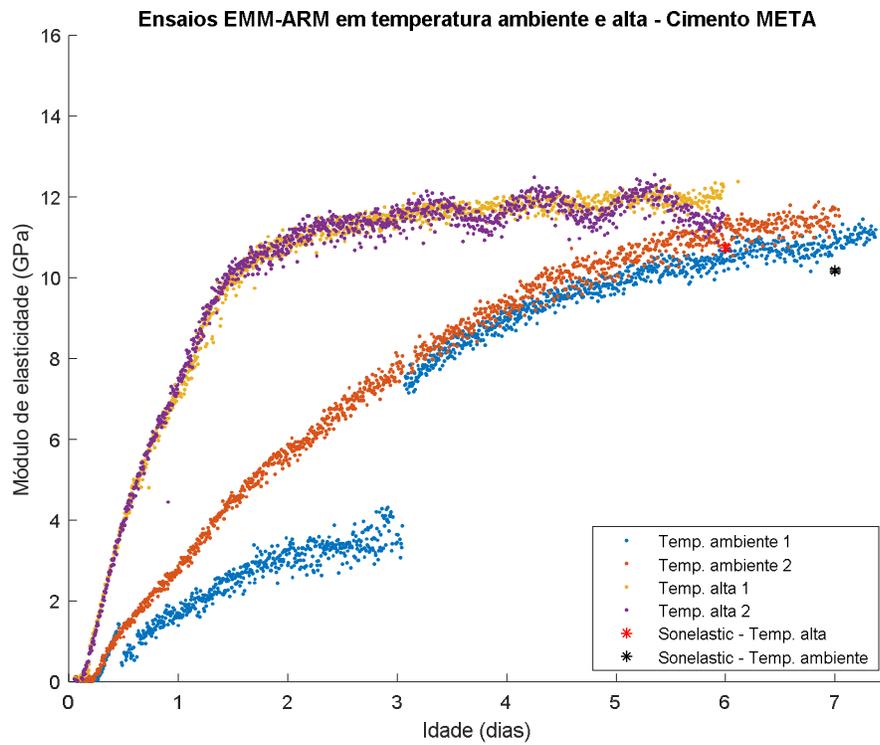


Figura 4-25: Resultados dos ensaios EMM-ARM a temperatura ambiente e alta com cimento META.

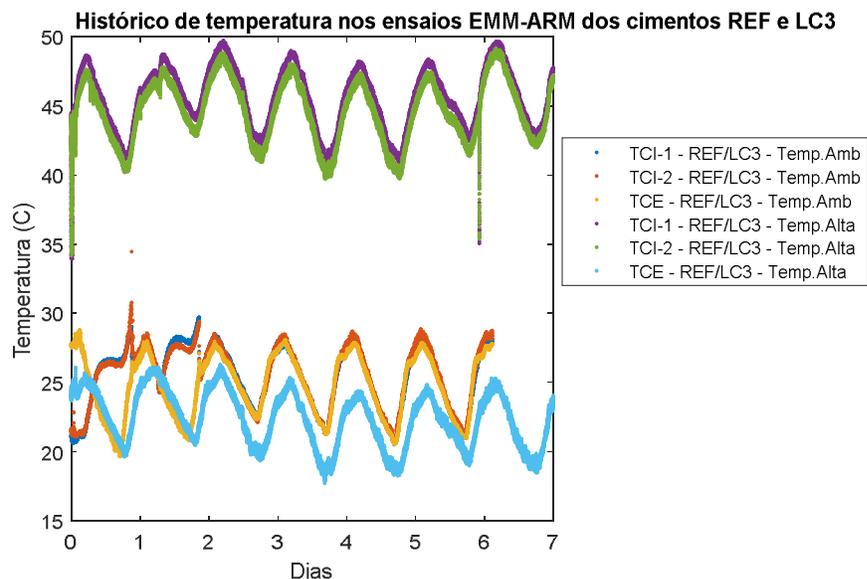


Figura 4-26: Histórico de temperatura nos ensaios EMM-ARM dos cimentos REF e LC3 a temperatura ambiente e alta.

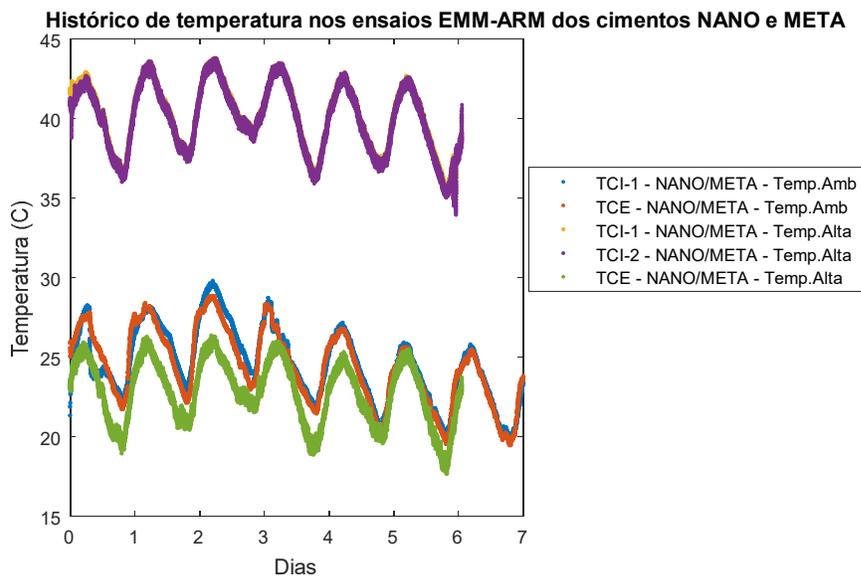


Figura 4-27: Histórico de temperatura nos ensaios EMM-ARM dos cimentos NANO e META a temperatura ambiente e alta.

A análise visual dos gráficos de desenvolvimento do módulo de elasticidade permite constatar que, conforme esperado, os ensaios realizados sob temperatura mais alta apresentaram um desenvolvimento mais acentuado do módulo de elasticidade. Este efeito, no entanto, foi consideravelmente menor no cimento NANO que nos outros, uma vez que este, naturalmente, já possui a característica de um desenvolvimento rápido da microestrutura desde as primeiras idades. Em idades avançadas, no entanto, o valor do módulo de elasticidade tende a se

estabilizar em um mesmo valor para ambos os ensaios, em todos os cimentos, com alguns resultados, como os dos cimentos LC3, NANO e META, sugerindo inclusive que curas em alta temperatura podem resultar em um valor de módulo de elasticidade menor.

Esta observação está de acordo com resultados obtidos por Kjelssen e Detwiler (1992), que sugerem que este fenômeno pode estar relacionado à formação de zonas densas de materiais hidratados, que revestem grãos ainda em hidratação ou não hidratados. Essa camada hidratada densa agiria como uma barreira que dificultaria a difusão de íons necessários para a completa hidratação do cimento, reduzindo o potencial grau de hidratação final da amostra e, portanto, o valor final da propriedade mecânica medida. No entanto, outra explicação pode ser apenas a redução do módulo de elasticidade devido à temperatura elevada do ambiente e, conseqüentemente, do material, uma vez que estudos sobre a influência da temperatura no módulo de elasticidade de pastas de cimento identificaram reduções de 2% até 22% ao se passar de uma temperatura de 20 °C para 40 °C (ODELSON; KERR; VICHIT-VADAKAN, 2007; VALENZA II; THOMAS, 2012).

Apesar de os históricos de temperatura dos ensaios de cimentos distintos não serem idênticos tanto entre os ensaios à temperatura ambiente quanto entre os ensaios à temperatura alta, é possível traçar comparações iniciais entre os valores absolutos do módulo de elasticidade de cada cimento. Com base nos resultados à temperatura ambiente, os cimentos LC3 e META apresentaram os menores módulos de elasticidade ao final do ensaio à temperatura ambiente, apesar de que, enquanto o cimento LC3 apresentou uma tendência de estabilidade a partir dos 5 dias de idade, a curva de desenvolvimento do módulo de elasticidade do cimento META ainda apresenta uma inclinação positiva, sugerindo continuidade de aumento desta propriedade. Ambas constatações estão de acordo com o esperado para estes cimentos: a redução do módulo de elasticidade inicial se deve à substituição de parte do clínquer por uma mistura de aglomerante e filer que possui, comparativamente, menor reatividade inicial (ANTONI *et al.*, 2012); o maior ganho progressivo de propriedades mecânicas do cimento produzido com metacaulim em comparação à argila calcinada comum é esperado devido ao seu maior teor de caulinita, que possui maior reatividade (AVET; SCRIVENER, 2018a).

O cimento NANO apresentou o esperado aumento de reatividade nas idades iniciais e valores finais um pouco maiores que os cimentos LC3 e META, embora mais baixos que o cimento REF. O fato de o cimento NANO apresentar um módulo de elasticidade final menor que o cimento REF foi inesperado, tanto pela tendência indicada pelos resultados de resistência

à compressão, nos quais a nanossílica levou a resistências maiores em todas as idades analisadas, quanto por resultados de determinação de módulo de elasticidade em pastas de cimento e concreto descritos na literatura (ABREU *et al.*, 2017; MONDAL *et al.*, 2010). No entanto, em seus estudos em pastas de cimento, Mondal *et al.* (2010) não utilizaram superplastificante para produção de suas amostras, o que talvez seja um fator capaz de explicar a diferença observada, além do fato de estes autores terem concentrado suas análises na determinação do módulo de elasticidade das fases constituintes da pasta de cimento, utilizando a técnica de nanoindentação, e não propriamente o módulo de elasticidade global da amostra.

Estudos sobre a porosidade de pastas de cimento com nanossílica também podem fornecer indícios a respeito de sua influência no desenvolvimento do módulo de elasticidade. Os resultados disponíveis na literatura, no entanto, são divergentes. Enquanto Stefanidou e Papayianni (2012) indicaram que a adição progressiva de nanossílica levou a pastas de cimento com microestruturas mais densas, embora com cristais de grãos maiores, o que também é sustentado por Singh *et al.* (2013), Isfahani *et al.* (2017) indicaram que a adição de até 2,5% de nanossílica sobre o peso do cimento não provocou mudanças significativas na porosidade total das amostras, apesar de se observar um aumento do volume de poros de tamanho entre 30-120 nm acompanhado de uma diminuição nos poros de 350-1610 nm, indicando, de certa forma, um refinamento na estrutura porosa. É necessário que se façam ressalvas às diferenças entre estes estudos aparentemente divergentes, especialmente quanto às características dos materiais utilizados. No entanto, os resultados divergentes, tanto na literatura quanto os obtidos neste trabalho, indicam a necessidade de se realizar estudos aprofundados a este respeito.

A Tabela 4-30 apresenta os coeficientes obtidos a partir do ajuste da equação (3-5) aos resultados do ensaio EMM-ARM. Observa-se que os índices R^2 de todos os ajustes foram superiores a 0,98, indicando um bom ajuste. As análises dos próximos itens se baseiam na equação (3-5) utilizada em conjunto com estes coeficientes, para evitar que a variabilidade dos resultados experimentais influencie nas conclusões obtidas. A amostra 1 do ensaio sob temperatura ambiente do cimento META não foi utilizada nas análises posteriores, já que o viés presente entre as idades de 0,5 dias e 3 dias não permitiu o ajuste de uma curva razoável. Para os cimentos que contém duplicatas, computou-se a curva média entre as amostras.

Tabela 4-30: Coeficientes das equações ajustadas aos resultados experimentais de cada cimento.

Sistema	Temp.	R ²	α_1	τ_1	β_1	α_2	τ_2	β_2
REF	Amb. 1	0,997	15,786	1,19	1,047	0,765	1,742	9,059
	Amb. 2	0,998	10,116	0,857	1,444	4,528	2,247	1,540
	Alta 1	0,993	8,126	0,630	0,621	8,486	0,279	2,656
LC3	Amb. 1	0,991	12,049	1,305	1,276	1,647	0,993	7,520
	Amb. 2	0,982	6,353	1,152	1,399	6,353	1,151	1,398
	Alta 1	0,988	10,429	0,312	1,812	0,748	4,008	2,657
	Alta 2	0,985	5,736	0,316	1,671	5,736	0,317	1,669
NANO	Amb. 1	0,991	1,121	0,493	1,050	11,285	0,724	1,449
	Amb. 2	0,996	11,658	0,656	1,808	1,681	0,659	433,792
	Alta 1	0,989	6,387	0,255	2,136	6,387	0,255	2,136
META	Amb. 2	0,997	9,664	1,243	0,805	5,429	3,100	1,561
	Alta 1	0,997	9,838	0,452	1,260	2,532	1,161	5,906
	Alta 2	0,993	3,271	1,083	4,410	8,703	0,411	1,437

4.7.3 Estimativa do tempo de fim de pega

A Figura 4-28 apresenta um exemplo da estimativa do tempo de fim de pega pelo método sugerido por Granja (2016), realizado no resultado de ensaio do cimento REF a temperatura ambiente. O método consiste em identificar o primeiro ponto da curva da primeira derivada do desenvolvimento do módulo de elasticidade no tempo que possui o valor de sua ordenada igual à metade do valor da ordenada do ponto de pico da curva, isto é, $(dE/dt)_{\text{máx}}$. A abscissa relacionada a esse ponto define a estimativa do tempo de fim de pega.

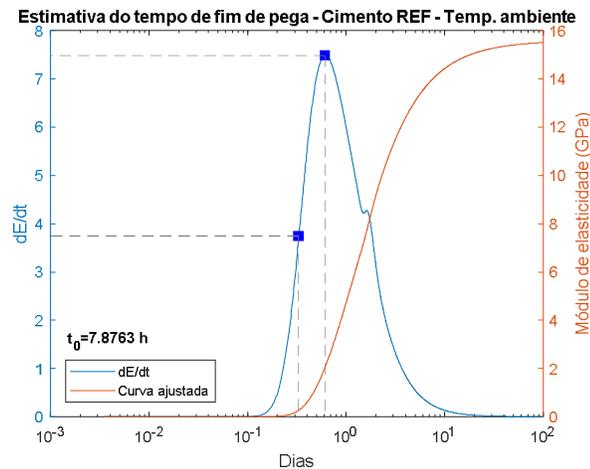


Figura 4-28: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento REF à temperatura ambiente.

Granja (2016) apresenta a validação desse método comparando-o com resultados de estimativa do tempo de fim de pega por ensaios de ultrassom. De fato, o método proposto para o EMM-ARM se assemelha ao utilizado nos resultados deste ensaio, que estima o tempo de fim

de pega pelo valor da abscissa do segundo ponto da curva da derivada da velocidade de propagação da onda cujo valor da ordena seja igual a 80% do valor de pico. Granja (2016) comenta que a aplicação do método proposto ao ensaio EMM-ARM se beneficiaria de validações adicionais, já que na comparação de resultados de estimativa do tempo de fim de pega pelo EMM-ARM e pela agulha de Vicat observou-se boa concordância para algumas amostras e relevante discrepância (cerca de 1,4 horas) para outras. Já Granja *et al.* (2014a) apresentam boa concordância entre estimativas dos tempos de fim de pega por ensaios EMM-ARM e por ensaios *bender-extender*. Feitas estas ressalvas, as estimativas do tempo de fim de pega para os ensaios a temperatura ambiente e alta, de todos os cimentos, são apresentadas na Tabela 4-31.

Tabela 4-31: Estimativas do tempo de fim de pega, pelo ensaio EMM-ARM, para os cimentos estudados.

Cimento	Temperatura		Diferença (%)
	Ambiente	Alta	
REF	7,8763 h	4,0432 h	-48,67%
LC3	12,0985 h	3,6007 h	-70,24%
META	4,5721 h	3,7973 h	-16,95%
NANO	7,3246 h	3,4128 h	-53,41%

Dois fatores podem ser identificados como importantes influentes no tempo de fim de pega no âmbito do presente trabalho, além da composição do cimento: a quantidade de superplastificante utilizada e o histórico de temperatura. A quantidade de superplastificante não é, de certa forma, independente da composição do cimento, pois, optando-se por fixar a consistência das pastas como feito no presente trabalho, composições de cimento diferentes (*e.g.* cimentos com mais finos e, portanto, maior demanda de água) levam a quantidades diferentes de superplastificante. Sendo, portanto, com uma característica vinculada à composição do cimento, a variação da quantidade de superplastificante entre os cimentos não impede que sejam feitas comparações entre estes. Em relação aos históricos de temperatura observados, considerando que os ensaios realizados apresentaram históricos distintos entre si para um mesmo nível de temperatura (ambiente ou alta), torna-se necessário levar sua influência em consideração nas interpretações dos resultados da Tabela 4-31. Temperaturas diferentes não só influenciam nas reações de hidratação do cimento, como também no efeito de superplastificantes nos tempos de pega, reduzindo o efeito de retardamento tipicamente causado por esses aditivos (BROOKS; JOHARI; MAZLOOM, 2000; RAMACHANDRAN, 1997).

Como esperado, o aumento da temperatura implicou em uma acentuada redução no tempo de fim de pega, levando a uma redução de até 70,24% no tempo de pega, observada no cimento LC3. Além disso, enquanto os tempos de fins de pega à temperatura ambiente se apresentaram relativamente diferentes entre os cimentos considerados, com os cimentos LC3, META e NANO possuindo tempos iguais a, respectivamente, 53,60%, -41,95% e -7,01% do tempo do cimento REF, o aumento de temperatura provocou uma aparente uniformização desses valores. Os cimentos LC3, META e NANO, à temperatura alta, apresentaram tempos de fins de pega iguais a, respectivamente, -10,94%, -6,08% e -15,59% do tempo do cimento REF. Estes resultados são semelhantes aos observados por Siddqui e Riding (2012).

Tal aceleração e uniformização podem ser tanto devido ao efeito da alta temperatura sob as reações químicas de hidratação, acelerando-as, quanto à redução do efeito retardante do aditivo superplastificante, ou mesmo a ambas simultaneamente. Assim, estes comportamentos podem, indiretamente, indicar aqueles cimentos mais suscetíveis ao efeito retardante do superplastificante utilizado. Por exemplo, o LC3 apresentou a maior sensibilidade ao aumento de temperatura com relação ao tempo de fim de pega, indicada pelo maior valor da diferença apresentada na Tabela 4-31, enquanto o cimento META, a menor. Além disso, o cimento META também apresentou o menor tempo de fim de pega à temperatura ambiente, enquanto o LC3 apresentou o maior. Isto pode indicar que o cimento LC3 é mais sensível ao efeito retardante do superplastificante que o cimento META, apesar de tal afirmação demandar estudos específicos.

O resultado obtido a temperatura ambiente para o cimento META encontra relatos divergentes na literatura. Brooks, Johari e Mazloom (2000) indicam que a inclusão de metacaulim puro como substituição em concretos de alto desempenho leva a um atraso no tempo de fim de pega em relação a concretos sem metacaulim. Em contrapartida, Wang *et al.* (2013) encontraram que a adição progressiva de metacaulim provocou redução progressiva do tempo de início e fim de pega em também concretos de alto desempenho. Ambos os trabalhos utilizam mesmas dosagens de superplastificante nas amostras com e sem metacaulim, embora em porcentagens diferentes, o que fez com que Brooks, Johari e Mazloom (2000) chegassem a slumps consideravelmente menores que Wang *et al.* (2013), o que pode explicar a divergência entre os resultados. Tongbo *et al.* (2015) e Zaribaf, Uzal e Kurtis (2015) apresentam resultado em concordância com Wang *et al.* (2013). Em especial, Zaribaf, Uzal e Kurtis (2015) identificaram que a adição de metacaulim em argamassas corrigidas com aditivo superplastificante podem levar a redução dos tempos de pega, embora aumento no tempo de

fim de pega tenha sido observado com aditivos poli carboxílicos, que é o tipo utilizado no presente trabalho. Assim, o reduzido tempo de fim de pega observado no cimento META pode envolver mecanismos com explicação ainda em aberto na literatura.

O valor observado para o tempo de pega do cimento LC3 a temperatura ambiente, consideravelmente maior que o cimento REF também encontra divergências na literatura. Em geral, trabalhos apontam tempos de fim de pega similares, ou menores, para cimentos LC3 quando comparados a cimentos compostos apenas por clínquer e gipsita (DHANDAPANI *et al.*, 2018; DHANDAPANI; SANTHANAM, 2017; SCRIVENER *et al.*, 2018). No entanto, Bishnoi e Maity (2018) apontam que estudos e experiências práticas com LC³ sugerem que seus tempos de pega são muito sensíveis aos aditivos utilizados, como o superplastificante utilizado neste trabalho. Além disso, a própria composição da argila calcinada, que pode ser mais ou menos reativa devido ao seu teor de caulinita (AVET; SCRIVENER, 2018a), também pode influenciar nos tempos de início e fim de pega.

O resultado do cimento NANO para temperatura ambiente, em torno de 7% menor que o cimento REF, concorda com observações de outros trabalhos na literatura. Kawashima *et al.* (2013) indicaram que a adição de nanossílica levou a tempos de fim de pega semelhantes aos de cimentos sem nanossílica. Senff *et al.* (2009) e Singh *et al.* (2013) indicam que a adição de nanossílica pode levar a uma redução no tempo de fim de pega. Essa redução, no entanto, pode ter sido contrabalanceada pelo efeito retardante do superplastificante, utilizado em maior quantidade neste cimento devido à elevada finura da nanossílica.

4.7.4 Estimativa da energia de ativação

A Figura 4-29 apresenta os valores da energia de ativação aparente de acordo com o grau de hidratação dos cimentos estudados, obtidos por meio do método “*speed method*” descrito por D’Aloia (2003). Nas discussões e resultados apresentados no presente trabalho, os termos “energia de ativação” e “energia de ativação aparente” são intercambiáveis, ambos se referindo à energia de ativação global da reação de hidratação do cimento. Apesar do método “*speed method*” usualmente ser aplicado a resultados de calorimetria, não há, teoricamente, restrições para sua aplicação a valores de propriedades mecânicas. Estes não são comumente utilizados para essa finalidade porque o “*speed method*” exige uma quantidade relativamente alta de determinações da propriedade mecânica estudada, o que se torna dispendioso se utilizadas técnicas destrutivas tradicionais, como a compressão clássica para determinação do módulo de elasticidade (D’ALOIA, 2003). O EMM-ARM não apresenta essas restrições e

permite o mensuração do módulo de elasticidade em intervalos suficientemente pequenos para aplicação do método, recomendados entre 5 e 15 minutos por D'Aloia (2003).

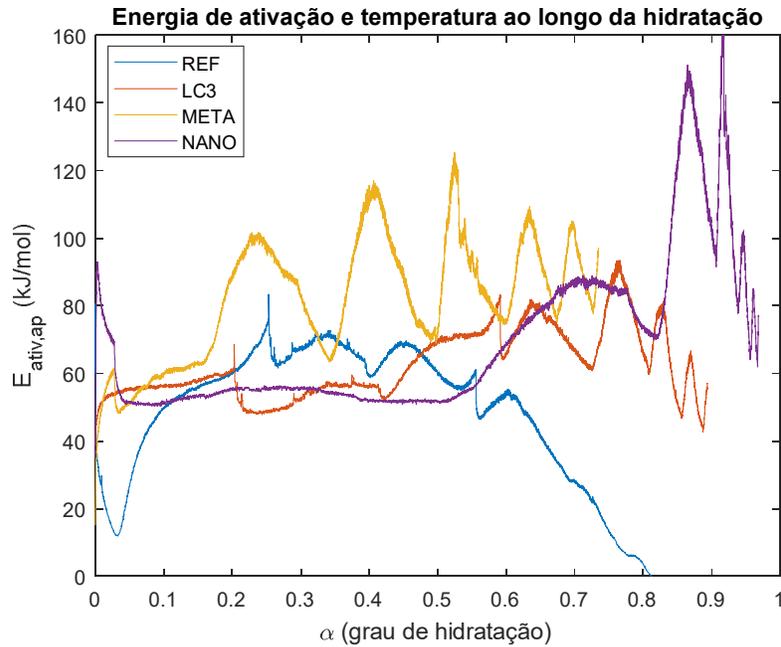


Figura 4-29: Energia de ativação *versus* grau de hidratação para os cimentos estudados.

Os resultados obtidos para energia de ativação revelaram uma grande dispersão entre si, em uma magnitude não observada em resultados de energia de ativação reportados na literatura. Apenas o cimento NANO apresentou um platô visível no seu valor de energia de ativação, enquanto os demais apresentaram variações aparentemente periódicas. A Figura 4-30 apresenta exemplos de resultados de energia de ativação obtidos em ensaios de calorimetria isotérmica (Figura 4-30a) e EMM-ARM (Figura 4-30b), nos quais a dispersão dos resultados ocorre somente nos primeiros graus de hidratação ou nos mais elevados.

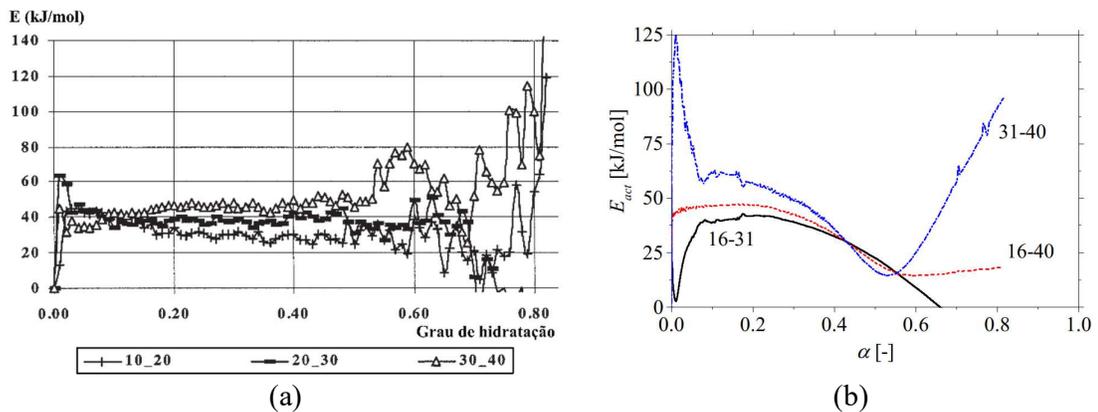


Figura 4-30: Energia de ativação obtida por ensaios de: (a) calorimetria isotérmica (KADA-BENAMEUR; WIRQUIN; DUTHOIT, 2000); (b) EMM-ARM (GRANJA, 2016). As diferentes curvas representam energias de ativação calculadas com pares de históricos de temperatura distintos (e.g. 10 °C e 20 °C; 16 °C e 31 °C).

Com relação à elevada dispersão observada nos resultados deste trabalho em comparação a demais resultados da literatura, Kada-Benameur, Wirquin e Duthoit (2000) indicam que a energia de ativação se mantém razoavelmente constante para graus de hidratação entre 0,05 e 0,50, observando altas variações fora desse intervalo. Já D'Aloia e Chanvillard (2002) afirmam que o intervalo no qual a energia de ativação é normalmente constante deve ser considerado como 30-50% do grau de hidratação, enquanto Kjellsen e Detwiler (1992) encontra valores estáveis para a energia de ativação entre 20% e 30% do grau de hidratação. Nos resultados apresentados na Figura 4-29, a energia de ativação se apresenta constante em todos os cimentos somente em um curto intervalo entre 10% e 20% do grau de hidratação, embora este platô permaneça constante no cimento NANO até 50% do grau de hidratação.

No intervalo de 10% a 20% do grau de hidratação, o cimento NANO apresenta uma energia de ativação aparente de, aproximadamente, 52 kJ/mol, os cimentos REF e LC3 uma energia de aproximadamente 57 kJ/mol, e o cimento META uma energia de 60 kJ/mol. Considerando que valores maiores de energia de ativação indicam que mais energia é necessária para realização da reação de hidratação, sendo um indicador da facilidade com que a reação ocorre em um meio, estes resultados estão de acordo com os observados no desenvolvimento do módulo de elasticidade. O cimento NANO, que apresentou a menor energia de ativação, é aquele no qual observou-se o ganho mais acelerado de módulo de elasticidade, e, portanto, a reação de hidratação mais acelerada, enquanto, no cimento META, ocorreu o oposto.

Além disso, Kjellsen e Detwiler (1992) indicam que em graus de hidratação maiores, há uma tendência de redução da energia de ativação. De fato, desprezando-se as oscilações nos resultados, tal redução foi observada nos cimentos REF, LC3 e NANO, a partir, respectivamente, de graus de hidratação de 60%, 80% e 90%. Apesar do cimento META não apresentar esse decaimento, isto pode ser explicado pelo fato de que os experimentos realizados chegaram apenas a um grau de hidratação igual a 70%, havendo a possibilidade de que em graus de hidratação maiores tal decréscimo ocorra.

Estas mudanças no comportamento da energia de ativação podem estar relacionadas à hipótese utilizada para cálculo da energia de ativação pelo “*speed method*”, que modela a reação de hidratação simplificadamente através da Lei de Arrhenius, que supõe apenas um mecanismo de controle da reação (KJELLSSEN; DETWILER, 1992). No entanto, há uma mudança nos mecanismos predominantes nas reações de hidratação, à medida que a hidratação se desenvolve. Tanto em graus de hidratação baixos como altos, a reação de hidratação é mais controlada por

modos de difusão de íons ou água do que reações químicas em si, o que faz com que a Lei de Arrhenius não seja adequada para representar as reações de hidratação nestas fases (KADA-BENAMEUR; WIRQUIN; DUTHOIT, 2000). A região em que a energia de ativação pode ser considerada constante corresponde à fase em que a hidratação do C_3S e C_4AF é sincronizada (D'ALOIA; CHANVILLARD, 2002). A predominância de mecanismos de difusão, típica de meios com um elevado grau de hidratação, que exigem uma menor energia de ativação para acontecerem, pode ser uma explicação para a redução da energia de ativação em idades posteriores (KJELLEN; DETWILER, 1992), apesar de nem sempre este comportamento ser observado nos resultados, devido à sensibilidade distinta do mecanismo de difusão à variação da temperatura (KADA-BENAMEUR; WIRQUIN; DUTHOIT, 2000).

Uma possível explicação para as oscilações observadas nos resultados da energia de ativação pode ser a não utilização de condições isotérmicas durante os ensaios EMM-ARM. Em todos os resultados encontrados na literatura, condições isotérmicas são utilizadas. Para avaliar a validade dessa hipótese, os resultados de energia de ativação de cada cimento foram plotados juntamente ao histórico de temperatura em ambos os ensaios realizados, conforme Figura 4-31, Figura 4-32, Figura 4-33 e Figura 4-34.

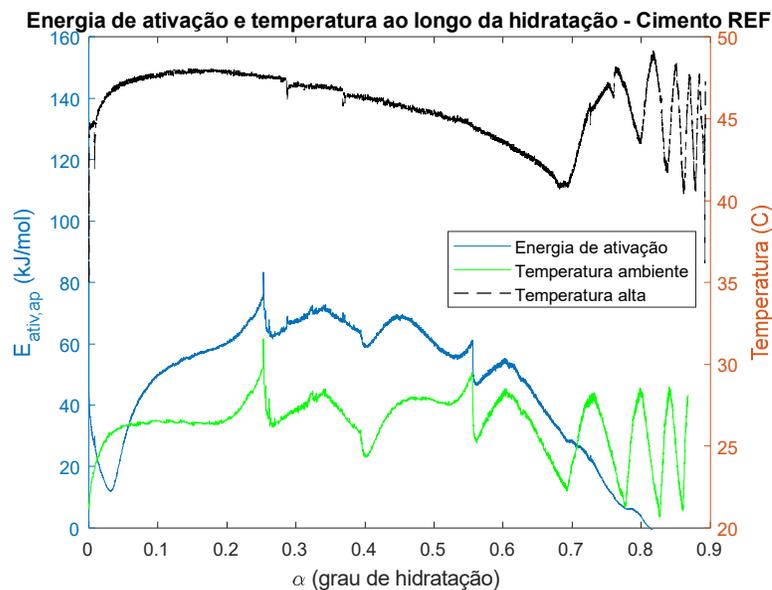


Figura 4-31: Energia de ativação e históricos de temperatura do cimento REF.

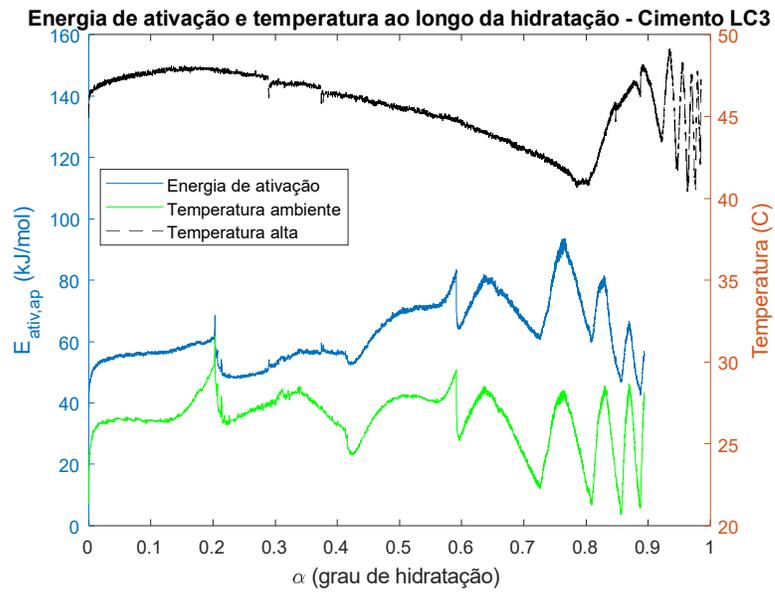


Figura 4-32: Energia de ativação e históricos de temperatura do cimento LC3.

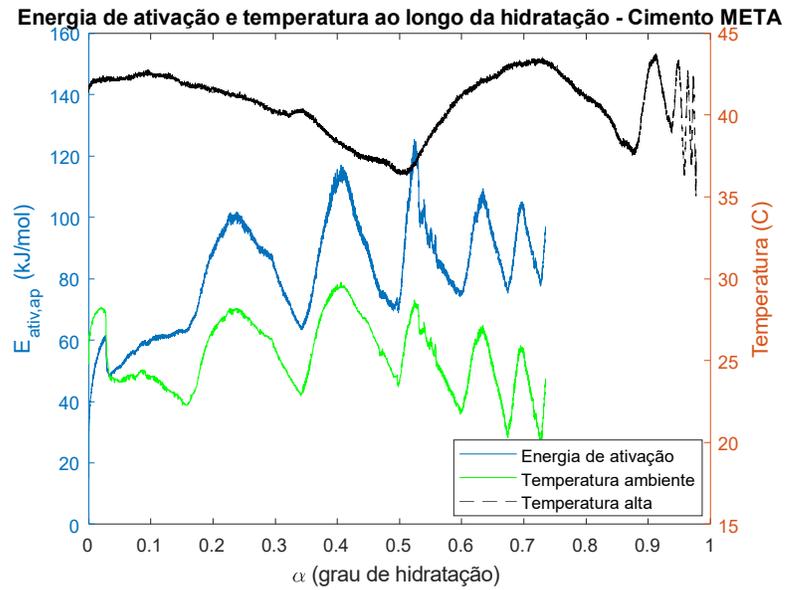


Figura 4-33: Energia de ativação e históricos de temperatura do cimento META.

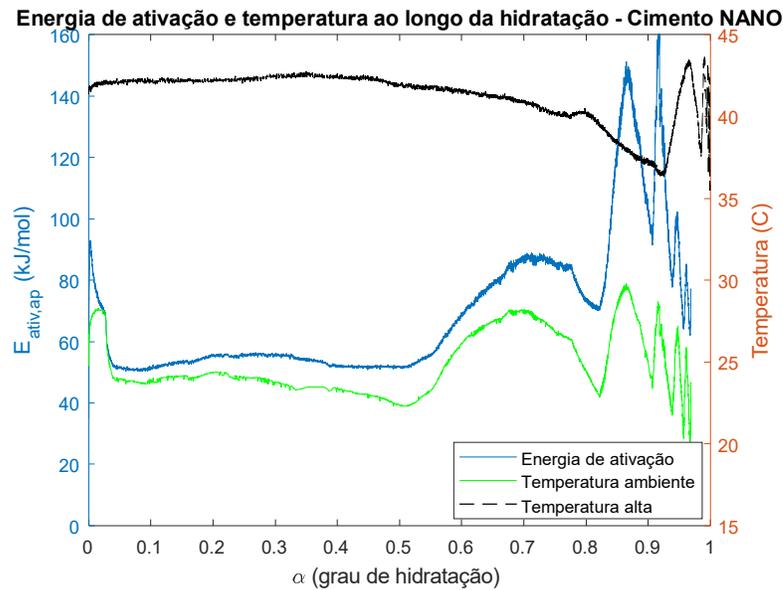


Figura 4-34: Energia de ativação e históricos de temperatura do cimento NANO.

Observa-se que, de fato, as oscilações presentes na energia de ativação correspondem às oscilações do histórico de temperatura ambiente. O platô observado nos resultados do cimento NANO coincidiu com uma constância na curva temperatura ambiente *versus* grau de hidratação, uma vez que este cimento apresenta um elevado ganho de hidratação logo nas primeiras idades o que aconteceu em um período em que não houve uma mudança de temperatura significativa. A presença de uma oscilação de temperatura de fato implicaria em oscilações na energia de ativação por meio da utilização da (3-6). Ressalta-se, assim, a necessidade de se garantir condições isotérmicas para o estudo da energia de ativação. Oscilações no histórico de temperatura alta, no entanto, aparentemente não influenciaram nos resultados de energia de ativação, embora elas sejam menos evidentes já que, nestes ensaios, o grau de hidratação evolui mais rapidamente e não há tanta variação na temperatura durante o desenvolvimento dos primeiros graus de hidratação.

A Figura 4-35 apresenta o grau de hidratação dos cimentos estudados em função da idade equivalente, calculada com os valores de energia de ativação apresentados na Figura 4-29 e pela equação (3-7), utilizando os coeficientes da Tabela 4-30 e a equação (3-5). A temperatura de referência foi arbitrariamente adotada como 30 °C. A Figura 4-35 contém os resultados dos ensaios realizados em ambas temperaturas (ambiente e alta), embora a sobreposição perfeita dessas curvas não permita a visualização dos resultados de um mesmo cimento em temperaturas distintas. Como a equação de determinação da energia de ativação é deduzida diretamente da equação de idade equivalente (D'ALOIA, 2003), tal sobreposição é naturalmente esperada nos

resultados deste trabalho. Esta sobreposição só não ocorre quando se tenta compatibilizar dados obtidos sob históricos de temperatura diferentes daqueles utilizados na determinação da energia de ativação, como nos casos apresentados na Figura 4-30.

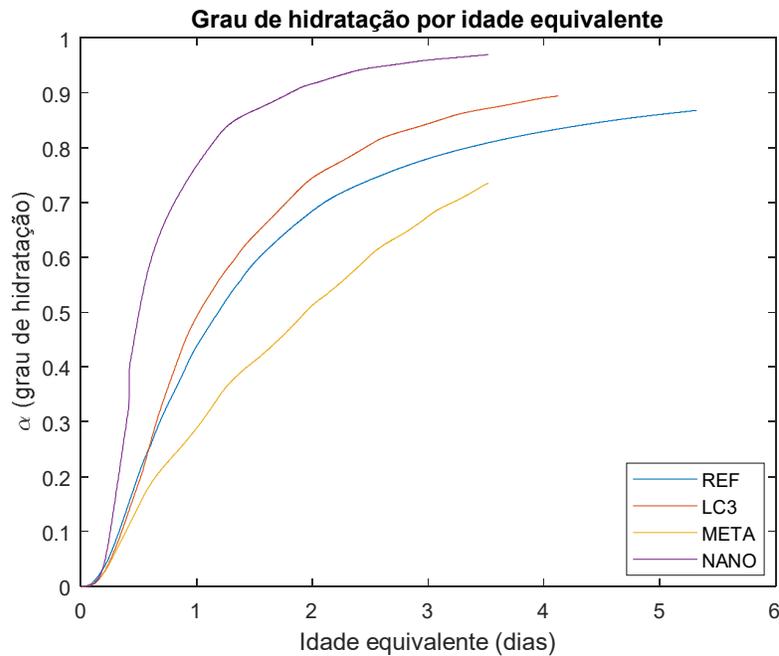


Figura 4-35: Grau de hidratação por idade equivalente dos cimentos estudados.

Nota-se que, conforme esperado, o cimento NANO apresentou o maior grau de hidratação entre os cimentos estudados, atingindo 80% de hidratação no primeiro de idade e indicando haver pouco ganho em propriedades mecânicas em idades superiores a 4 dias, o que encontra correspondência no trabalho de Isfahani *et al.* (2017) e nos resultados de resistência à compressão. Os cimentos REF e LC3 apresentaram desenvolvimento da hidratação semelhante entre si, atingindo 80% e 85% de hidratação, respectivamente, aos quatro dias de idade, indicando haver certa continuação de hidratação nas idades posteriores. Já o cimento META apresentou um desenvolvimento de hidratação mais lento, embora com maior potencial de hidratação a ocorrer em idades avançadas, o que também é observado em resultados de outros trabalhos (ANTONI *et al.*, 2012; MAIA *et al.*, 2011).

A Figura 4-36 apresenta os resultados do módulo de elasticidade dos ensaios realizados em ambas as temperaturas para todos os cimentos estudados. Nestes resultados, é possível observar que a perfeita sobreposição dos gráficos de grau de hidratação não é mais observada, uma vez que seus resultados são influenciados, agora, pelo máximo valor do módulo de elasticidade obtido em cada ensaio (GRANJA, 2016). Como nestes resultados é incorporado,

de certa forma, a influência do histórico de temperatura, é possível comparar diretamente o comportamento de cada cimento de forma mais acertada que nos resultados apresentados da Figura 4-22 a Figura 4-25.

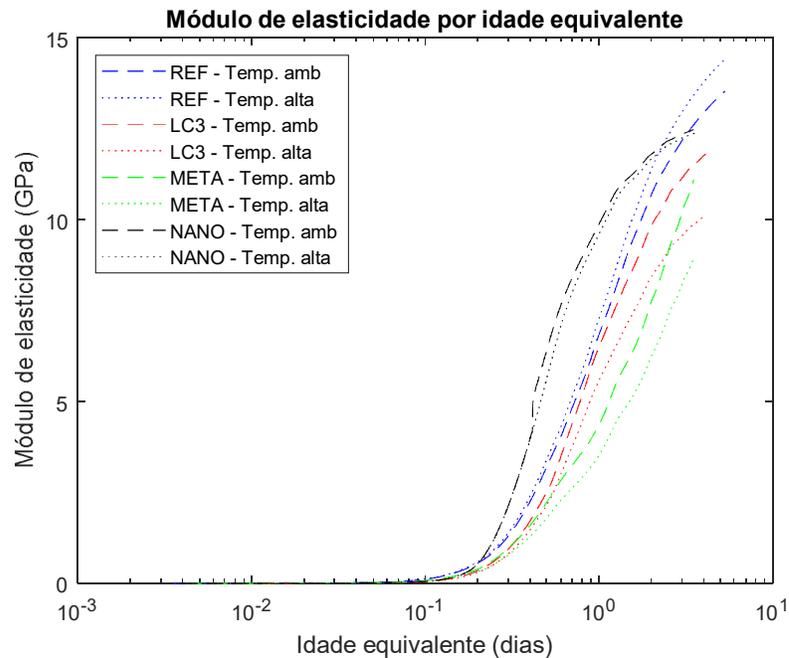


Figura 4-36: Módulo de elasticidade por idade equivalente dos cimentos estudados, considerando uma temperatura de referência de 30 °C.

Nota-se que o cimento REF e o cimento LC3 apresentam desenvolvimentos do módulo de elasticidade entre algumas horas após o instante de pega e até o primeiro dia de idade muito similares, embora o cimento LC3 apresente um desenvolvimento inicial um pouco mais lento. Após o primeiro dia de idade, o cimento LC3 reduziu seu ganho progressivamente, apesar dos resultados da Figura 4-35 indicarem que o cimento só atingiu aproximadamente 55% de sua hidratação nessa idade. O cimento META apresentou os menores módulos de elasticidade nas idades estudadas, com um desenvolvimento mais lento, mas indicando um alto potencial para desenvolvimento nas idades posteriores, o que é um indício de seu potencial pozolânico. Já o cimento NANO apresentou elevado ganho de módulo de elasticidade nas primeiras idades mas valores inferiores em idades posteriores, com indicação de apresentar valores de módulo de elasticidade semelhantes ao cimento LC3 em idades avançadas. O aumento de temperatura durante a cura aparenta ter afetado negativamente a hidratação dos cimentos LC3 e META, não ter influenciado a hidratação do cimento NANO, e favorecido a do cimento REF

A partir dos resultados obtidos, observou-se que o cimento LC3 utilizado neste trabalho não apresentou módulos de elasticidade superiores ao cimento de referência. Como outros

trabalhos sugerem que cimentos LC³ são capazes de apresentar desempenho mecânico equivalente ou mesmo superior a cimentos tradicionais compostos por clínquer e gipsita e um refinamento na poro estrutura, apesar de detectarem tal comportamento em idades avançadas (> 28 dias) (AVET; SCRIVENER, 2018b; DHANDAPANI *et al.*, 2018; DHANDAPANI; SANTHANAM, 2017; NGUYEN; KHAN; CASTEL, 2018), os resultados obtidos neste trabalho podem ter sido influenciados pelas características da argila calcinada utilizada, que pode possuir baixa reatividade. Estudos de caracterização da argila podem ajudar a esclarecer essa questão. O cimento META revela a importância da reatividade do material utilizado na substituição: embora sua única diferença em relação ao cimento LC3 seja a substituição da argila calcinada pelo metacaulim, mantendo-se as mesmas proporções, comportamentos notavelmente distintos foram observados.

O cimento NANO indicou que apesar da adição de nanossílica acelerar o processo de hidratação nas primeiras idades, isto pode custar o desenvolvimento pleno das propriedades mecânicas do cimento. Uma possível explicação pode ser a formação de revestimentos densos de grãos hidratados em torno de grãos ainda por hidratar (KJELLEN; DETWILER, 1992). Essa hipótese é apresentada também por Isfahani *et al.* (2017), que sugerem que a nanossílica desacelera a taxa de hidratação na fase de hidratação governada por processos de difusão, justamente pela formação de produtos de hidratação compactos em torno de grãos de cimento.

A Tabela 4-32 apresenta a estimativa do tempo de fim de pega dos cimentos estudados, a partir das curvas de módulo de elasticidade por idade equivalente apresentadas na Figura 4-36. Observa-se que os tempos de fim de pega para os ensaios à temperatura ambiente e alta apresentam boa concordância entre si, evidenciando que o método de maturidade das idades equivalentes, quando aplicado aos resultados de desenvolvimento do módulo de elasticidade do EMM-ARM, apresentam boa concordância nas primeiras idades, conforme também observado por Granja (2016).

Tabela 4-32: Estimativas do tempo de fim de pega obtidas pelos resultados do EMM-ARM corrigidos para idades equivalentes, considerando uma temperatura de referência de 30 °C.

Cimento	Temperatura	
	Ambiente	Alta
REF	3,4961 h	3,4701 h
LC3	4,8285 h	4,8274 h
META	2,0989 h	2,0929 h
NANO	4,8528 h	4,8518 h

Todos os tempos de fim de pega apresentados na Tabela 4-32 são menores que seus respectivos resultados apresentados na Tabela 4-31, a exceção dos cimentos LC3 e NANO à temperatura alta. Relativamente, os tempos de fim de pega à temperatura ambiente apresentaram os maiores decrescimentos, sendo mais o notável a redução do tempo de fim de pega à temperatura ambiente do cimento LC3, que passou de 12,0985 h para 4,8285 h, o que equivale a uma redução de 60,09%.

Isto pode indicar que algum efeito de retardo apresentado no ensaio à temperatura ambiente não foi causado por algum fator relacionado cinética de hidratação do cimento, pois este supostamente foi removido após a transformação da curva de desenvolvimento do módulo de elasticidade de idades reais para idades equivalente. Tal efeito pode estar vinculado ao superplastificante, cujo efeito retardante é reduzido com o aumento de temperatura (JOHN; GETTU, 2014), o que faz com que a aplicação do método de maturidade reduza seu efeito na estimativa do tempo de fim de pega obtido em idades equivalentes, uma vez que dados a respeito da hidratação em temperaturas maiores são utilizados nas computações. O fato dos tempos de fim de pega dos cimentos REF e META à temperatura alta, corrigidos para uma temperatura de referência de 30 °C, terem sido menores que os valores obtidos experimentalmente, sob temperatura de valores maiores (com médias de 40 °C e 45 °C), é, de certa forma, inesperado. Este resultado pode indicar um viés introduzido pelo método de maturidade ou pelo método de estimação destes tempos a partir dos resultados do EMM-ARM, sendo necessários estudos adicionais para investigação desta questão.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento, validação, análise metrológica e utilização para o estudo de cimentos com diferentes cinéticas de hidratação de uma versão de baixo custo de um sistema de ensaio para o método EMM-ARM. Em relação ao sistema de ensaio, que englobou o *software* de processamento de dados e o sistema de aquisição de dados, observou-se que:

- A utilização de algoritmos não-paramétricos de identificação modal, baseados no algoritmo FFT, produzem erros pequenos na estimação da frequência natural dos sinais obtidos durante o ensaio EMM-ARM se comparados à variações totais observadas nos resultados experimentais. É essencial que o *software* disponha de filtros digitais para tratamento dos dados processados, pois o ensaio EMM-ARM, principalmente se realizado sob condição de vibração ambiente, é suscetível à contaminação de ruídos. Identificou-se a necessidade de se explorar a implementação de algoritmos NUFFT, que lidem com amostragens espaçadas de forma não-uniforme no tempo, caso tipicamente encontrado nas amostras obtidas com o sistema de ensaio desenvolvido;
- O sistema de aquisição de dados desenvolvido teve um valor total de R\$90,00, que pode ser considerável significativamente pequeno ao se considerar que, em outros trabalhos que fazem uso do EMM-ARM, utilizam-se soluções comerciais na forma de sistemas de aquisição de dados e acelerômetros voltados ao monitoramento de vibrações estruturais, cujo preço pode facilmente ultrapassar R\$ 15.000,00. Considera-se, assim, que o objetivo de se desenvolver um sistema de ensaio EMM-ARM de baixo custo foi atingido;
- O sistema de aquisição de dados, quando amostrando a uma frequência teórica de 860 Hz, não consegue executar as amostras espaçadas uniformemente no tempo. Essa não-uniformidade provocou erros de até 3,76% na identificação de sinais, livres de qualquer ruído, pelo *software* de processamento de dados desenvolvido. Identifica-se a necessidade de estudos adicionais, envolvendo outras frequências de amostragem, de modo a identificar se há limitações sistemáticas, relacionadas a implementações ineficientes no código-fonte do sistema, ou se tal desempenho é uma variabilidade intrínseca do sistema, e que ocorre em qualquer outra frequência de amostragem.

Em relação às validações do sistema de ensaio para execução de ensaios EMM-ARM em pastas de cimento e concreto, sob condições de vibração ambiente e forçada, observou-se que:

- Nos ensaios de pasta de cimento sob vibração ambiente, os resultados obtidos no ensaio EMM-ARM executado com o sistema de ensaio desenvolvido apresentaram desvios em relação ao método padrão de frequência ressonante, realizado com o sistema Sonelastic, de apenas 1,535% e 4,094%. Os coeficientes de variação dos resultados dos ensaios EMM-ARM também apresentam valores de magnitude similares aos obtidos no Sonelastic. Considera-se, assim, que o sistema de ensaio desenvolvido neste trabalho foi validado quanto à execução do EMM-ARM sob condição de vibração ambiente em pastas de cimento;
- O uso do sistema de ensaio para execução do ensaio EMM-ARM com vibração forçada em pastas de cimento foi parcialmente validado. Embora se tenha verificado sua capacidade de monitorar o desenvolvimento do módulo de elasticidade das amostras desde as primeiras idades, observou-se que o nível de excitação aplicado provavelmente causou danos no material ensaiado. No entanto, esta limitação é passível de remoção ao se calibrar apropriadamente o nível de excitação imposto, controlando-se, na implementação da fonte de vibração controlada proposta neste trabalho, o tempo de ativação do motor e o peso do excêntrico inserido. Recomenda-se trabalhos adicionais visando esta calibração, ou mesmo o desenvolvimento de dispositivos de excitação mais adequados;
- Testes preliminares sugeriram que o sistema de ensaio desenvolvido não possui sensibilidade suficiente para execução do ensaio EMM-ARM em amostras de concreto sob condição de vibração ambiente;
- Ensaios EMM-ARM em amostras de concreto sob condição de vibração forçada, realizadas com o sistema de ensaio desenvolvido, apresentaram resultados dentro da dispersão dos ensaios de compressão clássica. Os valores de módulo de elasticidade obtidos nos EMM-ARM foram sistematicamente menores que aqueles obtidos nos ensaios padrões, mas tal comportamento também foi observado em outros trabalho. Considera-se, assim, que o sistema de ensaio desenvolvido neste trabalho foi validado quanto à execução do EMM-ARM sob condição de vibração forçada em amostras de concretos.

Em relação à análise metrológica do sistema de ensaio para execução do ensaio EMM-ARM em amostras de pastas de cimento sob condição de vibração ambiente, observou-se que:

- De forma geral, ocorre um aumento da dispersão, em termos de valores absolutos, à medida que os valores de módulo de elasticidade, e, conseqüentemente, da frequência aferida pelo sistema de ensaio, aumentam;
- Os sistemas de aquisição de dados desenvolvidos possuem um desvio-padrão da ordem de menos que 3% do valor médio da frequência de vibração mensurada;
- Os desvios-padrão de repetibilidade e reprodutibilidade para o ensaio EMM-ARM executado com o sistema de ensaio desenvolvido neste trabalho, em amostras de pastas de cimento sob condição de vibração ambiente, foram de 7,01% e 8,20%. Estes valores podem ser considerados satisfatórios se comparados com os limites utilizados pela NBR 8522, que define os coeficientes de variação máximos de repetibilidade e reprodutibilidade como 5% e 10%;
- Devido ao desenho experimental utilizado na análise metrológica deste trabalho, há a possibilidade dos desvios-padrão de repetibilidade e reprodutibilidade encontrados sejam, respectivamente, uma superestimação e uma subestimação dos valores realmente a serem obtidos sob condições ideais de repetibilidade e reprodutibilidade;
- Foi detectada uma tendência negativa em todas as idades, o que significa que os resultados obtidos no ensaio EMM-ARM realizado com o sistema de ensaio proposto neste trabalho foram sistematicamente menores que aqueles observados em ensaios de compressão clássica.
- As variações de densidade ao longo das amostras utilizadas nas análises metrológicas apresentaram valores de até 5,74% em relação à densidade média da amostra considerada. Levando-se em consideração o limite de 0,5% recomendado por Azenha *et al.* (2012a), foram traçadas duas possíveis conclusões: o limite de 0,5% pode ser demasiadamente restritivo e levar a um processo de moldagem de difícil execução; a técnica de moldagem utilizada neste trabalho está aquém do ideal, o que implica que os parâmetros de exatidão (precisão e tendência) estimados podem ter incorporado erros superestimados e, sob condições corretas de moldagem, a exatidão, e principalmente a precisão, podem ser melhores que as encontradas neste trabalho.

Em relação ao estudo da cinética de hidratação dos cimentos referência (REF), LC³ com argila calcinada comum (LC3), LC³ com metacaulim (META), e referência com adição de 1% de nanossílica (NANO), observou-se que:

- O cimento NANO apresentou o desenvolvimento de módulo de elasticidade mais rápido entre os cimentos estudados, como era esperado. No entanto, observou-se valores de módulo de elasticidade final menores que o cimento REF, e comparáveis aos dos cimentos LC3 e META. Assim, a adição de nanossílica, embora acelere notadamente o desenvolvimento do módulo de elasticidade, pode levar a valor final menor que aquele obtido em amostras sem nanossílica, encontrando-se resultados na literatura que corroboram com essa observação. No entanto, ainda há relatos divergentes na literatura sobre este assunto, e recomenda-se novos estudos focados nessa questão;
- O cimento META apresentou o desenvolvimento de módulo de elasticidade mais lento, embora sua curva, ao final do ensaio, sugira um elevado ganho de propriedades mecânicas em idades avançadas;
- O cimento META apresentou o menor tempo de fim de pega, seguido pelo cimento NANO, REF e, por último, cimento LC3;
- O tempo de pega do cimento NANO pode ter sido estendido graças à quantidade maior de superplastificante adicionada, necessária para se atingir a consistência alvo, e causadora de retardamento no processo de pega;
- O cimento LC3 produzido com argila calcinada comum apresentou a maior sensibilidade em relação à redução do tempo de fim de pega devido ao aumento de temperatura com relação ao tempo de fim de pega, enquanto o cimento META, a menor. Estas diferenças podem estar relacionadas à diferentes interações dos materiais com o superplastificante utilizados;
- Os ensaios realizados para determinação da energia de ativação não contaram com condições isotérmicas, o que implicou na presença de variações na estimativa da energia de ativação aparente de acordo com o grau de hidratação, introduzidas pela oscilação de temperatura durante os ensaios realizados;
- No intervalo de 10% a 20% do grau de hidratação, nos quais as energias de ativação obtidas no presente trabalho apresentaram uma relativa constância, o cimento NANO apresentou uma energia de ativação aparente de,

aproximadamente, 52 kJ/mol, os cimentos REF e LC4 uma energia de aproximadamente 57 kJ/mol, e o cimento META uma energia de 60 kJ/mol.

- Ao se analisar os dados corrigidos para uma idade equivalente, utilizando a formulação de maturidade, observou-se que o aumento de temperatura durante a cura aparenta ter afetado negativamente a hidratação dos cimentos LC3 e META, não ter influenciado a hidratação do cimento NANO, e favorecido a do cimento REF;

Por fim, conclui-se que o objetivo geral de desenvolvimento de uma versão de baixo custo de um sistema de ensaio para o método EMM-ARM, voltado para ensaios em pastas de cimento e concretos, foi alcançado. O sistema desenvolvido é capaz de realizar ensaios EMM-ARM em pastas de cimento sob condição de vibração ambiente e, potencialmente, vibração forçada, e em concretos sob condição de vibração forçada. Os parâmetros de exatidão estimados são de magnitudes compatíveis com aqueles utilizados em normas de métodos de ensaio consagrados, como a compressão clássica e a frequência ressonante. Além disso, o sistema é capaz de realizar o ensaio EMM-ARM com vistas para a estimativa do tempo de fim de pega e a energia de ativação aparente de cimentos com diversas cinéticas de hidratação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ABNT NBR NM 51:2001 - Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro.

ABNT. ABNT NBR ISO 3534-1:2010 - Estatística - Vocabulário e símbolos Parte 1: Termos estatísticos gerais e termos usados em probabilidade. Rio de Janeiro.

ABNT. ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro.

ABNT. NBR 8522:2017 - Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro.

ABNT. ABNT NBR ISO 5725-1:2018 - Exatidão (veracidade e precisão) dos métodos e dos resultados de medição - Parte 1: Princípios gerais e definições. Rio de Janeiro.

ABNT. ABNT NBR ISO 5725-2:2018 - Exatidão (veracidade e precisão) dos métodos e dos resultados de medição - Parte 2: Método básico para a determinação da repetibilidade e da reprodutibilidade de um método-padrão de medição. Rio de Janeiro.

ABNT. ABNT NBR ISO 5725-4:2018 - Exatidão (veracidade e precisão) dos métodos e dos resultados de medição - Parte 4: Métodos básicos para determinação da veracidade de um método-padrão de medição. Rio de Janeiro.

ABNT. ABNT NBR 16606:2018 - Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro.

ABNT. ABNT NBR 7215:2019 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

ABREU, Gustavo Braz et al. Mechanical properties and microstructure of high performance concrete containing stabilized nano-silica. *Revista Materia*, [s. l.], v. 22, n. 2, 2017.

ACAR, C.; SHKEL, A. M. Experimental evaluation and comparative analysis of commercial variable-capacitance {MEMS} accelerometers. *J Micromech Microengineering*, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 634–645, 2003.

AGILENT TECHNOLOGIES. **The Fundamentals of Modal Testing Application Note 243-3**. [s.l.: s.n.].

AGUILAR, Rafael et al. Vibration-based nondestructive testing as a practical tool for rapid concrete quality control. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 104, p. 181–190, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.053>>

ALIEXPRESS. **JF-0826B**. 2019a. Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/item/32778584537.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.4336b90aS6cNwD>>. Acesso em: 28 jul. 2019.

ALIEXPRESS. **Gangbei-1564B**. 2019b. Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/item/32781497336.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.4336b90aS6cNwD>>. Acesso em: 28 jul. 2019.

ANALOG DEVICES. **ADXL335**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/adxl335.pdf>>.

ANDÒ, B.; BAGLIO, S.; PISTORIO, A. A low cost multi-sensor strategy for early warning in structural monitoring exploiting a wavelet multiresolution paradigm. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 87, p. 1282–1285, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.681>>

ANDÒ, Bruno; BAGLIO, Salvatore; PISTORIO, Antonio. A low cost multi-sensor system for investigating the structural response of buildings. **Annals of Geophysics**, [s. l.], v. 61, n. 2, p. 1–14, 2018. Disponível em: <<https://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/7702>>

ANDREJAŠIČ, Matej; POBERAJ, Igor. **MEMS accelerometers**. 2008. University of Ljubljana, [s. l.], 2008.

ANTONI, M. et al. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 42, n. 12, p. 1579–1589, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>>

ARAÚJO, Iván Darío Gómez. **Análise Modal Operacional: Métodos de identificação baseados em transmissibilidade**. 2015. Universidade de São Paulo, [s. l.], 2015.

ARDUINO. **What is Arduino**. 2018a. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 23 maio. 2018.

ARDUINO. **Arduino UNO Rev3**. 2018b. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>>. Acesso em: 23 maio. 2018.

ARDUINO. **Compare board specs**. 2018c. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/products.compare>>. Acesso em: 24 set. 2018.

ARDUINO. **Arduino/Genuino Uno Board Anatomy**. 2019. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/guide/BoardAnatomy>>. Acesso em: 6 ago. 2019.

ASTM. **E1875-13 - Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus , Shear Modulus , and Poisson's Ratio by Sonic Resonance**. West Conshohocken.

ASTM. **ASTM C469/C469M - Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression** ASTM International. [s.l: s.n.].

ASTM. **C215-14 - Standard Test Method for Fundamental Transverse , Longitudinal , and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens**. West Conshohocken.

ASTM. **E1876-15 - Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. West Conshohocken.

ATCP. **Sonelastic - Advanced Impulse Excitation Technique**. 2018. Disponível em: <<https://www.sonelastic.com/pt/%0D>>. Acesso em: 3 out. 2018.

AVET, F.; SCRIVENER, K. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 107, n. January, p. 124–135, 2018. a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.016>>

AVET, F.; SCRIVENER, K. Hydration Study of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Using Various Grades of Calcined Kaolinitic Clays. In: SCRIVENER, K.; FAVIER, A. (Eds.). **Calcined Clays for Sustainable Concrete**. RILEM Book ed. [s.l.] : Springer, Dordrecht, 2018. b.

AZENHA, Miguel. **Numerical simulation of the structural behaviour of concrete since its early ages**. 2009. Universidade do Porto, [s. l.], 2009. Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/57587>>

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: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.014>>

AZENHA, Miguel et al. Continuous stiffness monitoring of cemented sand through resonant frequency. **Geotechnical Special Publications**, [s. l.], n. 218, p. 174–183, 2011.

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, p. 81–92, 2012. a.

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, p. 881–890, 2012. b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.004>>

AZENHA, Miguel et al. Application of air cooled pipes for reduction of early age cracking risk in a massive RC wall. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 62–63, p. 148–163, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.018>>

AZENHA, Miguel et al. A Retrospective View of EMM-ARM: Application to Quality Control in Soil-improvement and Complementary Developments. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 143, n. 1ctg, p. 339–346, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.043>>

BAKER, W. E. Vibration Frequencies for Uniform Beams With Central Masses. **Journal of Applied Mechanics**, [s. l.], n. 31, p. 35–37, 1967.

BASTGEN, K. ...; HERMANN, V. Experience made in determining the static modulus of elasticity of concrete. **Matériaux et Constructions**, [s. l.], v. 10, n. 60, p. 357–364, 1977.

BAŽANT, Z. P. Theory of Creep and Shrinkage in Concrete Structures: A Précis of Recent Developments. **Mechanics Today**, [s. l.], v. 2, p. 1–93, 1975.

BEDON, Chiara et al. Prototyping and Validation of MEMS Accelerometers for Structural Health Monitoring—The Case Study of the Pietratagliata Cable-Stayed Bridge. **Journal of Sensor and Actuator Networks**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 30, 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2224-2708/7/3/30>>

BENDAT, Julius S.; PIERSOL, Allan G. **Random data**. 4th ed. ed. New Jersey.

BENEDETTI, Andrea et al. Effects of curing temperature on pull-out behavior and stiffness evolution of epoxy adhesives for NSM-FRP applications. In: SMAR 2015 - THIRD

CONFERENCE ON SMART MONITORING, ASSESSMENT AND REHABILITATION OF CIVIL STRUCTURES 2015, Antalya, Turkey. **Anais...** Antalya, Turkey

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**, [s. l.], 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.034>>

BISCHOFF, P. H.; PERRY, S. H. Compressive behaviour of concrete at high strain rates. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 24, n. 6, p. 425–450, 1991.

BISHNOI, Shashank; MAITY, Soumen. Limestone Calcined Clay Cement: The Experience in India This Far. In: (Fernando Martirena, A. Favier, K. Scrivener, Eds.)PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCINED CLAYS FOR SUSTAINABLE CONCRETE 2018, **Anais...** : Springer, 2018.

BLEVINS, Robert D. **Formulas for natural frequency and mode shape**. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold, 1979.

BOSCH SENSORTECH. **BMI160 DatasheetBosch**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BMI160-DS000-07.pdf>.

BOULAY, C. et al. How to monitor the modulus of elasticity of concrete, automatically since the earliest age? **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, [s. l.], v. 47, n. 1–2, p. 141–155, 2013. a.

BOULAY, C. et al. Monitoring elastic properties of concrete since very early age by means of cyclic loadings, ultrasonic measurements, natural resonant frequency of composite beam (EMM-ARM) and with smart aggregates. **Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS 2013**, [s. l.], p. 12p, 2013. b. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00851383/>>

BRINCKER, Rune; ZHANG, Lingmi; ANDERSEN, Palle. Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. **Smart Materials and Structures**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 441–445, 2001.

BRINCKNER, Rune; VENTURA, Carlos E.; ANDERSEN, P. Damping Estimation by Frequency Domain Decomposition. In: PROCEEDINGS OF IMAC 19: A CONFERENCE ON STRUCTURAL DYNAMICS 2001, Hyatt Orland, Kissimmee, Florida. **Anais...** Hyatt Orland, Kissimmee, Florida: Society for Experimental Mechanics, 2001.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1881 Part 121: Method for determination of static modulus of elasticity in compression.** Londres.

BROOKS, J. ..; JOHARI, M. A.; MAZLOOM, M. Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 293–301, 2000.

CAETANO, Elsa de Sá. **Identificação experimental de parâmetros dinâmicos em sistemas estruturais.** 1992. Universidade do Porto, [s. l.], 1992.

CARETTE, Jérôme. **Towards Early Age Characterisation of Eco-Concrete Containing Blast-Furnace Slag and Limestone Filler.** 2015. Université Libre de Bruxelles, [s. l.], 2015.

CARETTE, Jérôme; STAQUET, Stéphanie. Monitoring the setting process of mortars by ultrasonic P and S-wave transmission velocity measurement. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 94, p. 196–208, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.054>>

CARETTE, Jérôme; STAQUET, Stéphanie. Monitoring the setting process of eco-binders by ultrasonic P-wave and S-wave transmission velocity measurement: Mortar vs concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 110, p. 32–41, 2016.

CARMONA, J. E. C.; AVILA, S. M.; DOZ, G. N. Dynamic Tests on a Concrete Slab with a Tuned Mass Damper. **MATEC Web of Conferences**, [s. l.], v. 24, n. October, 2015.

CARMONA, Jorge Eliecer Campuzano; AVILA, Suzana Moreira; DOZ, Graciela. Proposal of a tuned mass damper with friction damping to control excessive floor vibrations. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 148, p. 81–100, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.022>>

CHACON, Rolando; OLLER, Sergio. Designing Experiments Using Digital Fabrication in Structural Dynamics. **Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice**, [s. l.], v. 143, n. 3, p. 05016011, 2017.

CHOLLET, Franck; LIU, Haobing. **A (not so) short introduction to Micro Electromechanical Systems.** 5.3 ed. [s.l: s.n.].

CHOPRA, Anil K. **Dynamics of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering.** 4th. ed. London: Prentice Hall, 2012.

CLOUGH, Ray W.; PENZIEN, Joseph. **Dynamics of structures**. Berkeley: Computers & Structures, Inc, 2003.

CONSTANTINIDES, G. Nanoscience and nanoengineering of cement-based materials. **Nanotechnology in Eco-Efficient Construction**, [s. l.], p. 9- 37a, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857095442500026>>. Acesso em: 28 fev. 2019.

COSSOLINO, Leiliane Cristina et al. Avaliação da coerência entre três métodos de determinação do módulo de elasticidade da madeira de Pinnus Oocarpa. **Madeira Arquitetura e Engenharia**, [s. l.], v. 10, n. 25, p. 33–42, 2009.

D'ALOIA, L. Early age kinetics: Activation energy, maturity and equivalent age. In: BENTUR, A. (Ed.). **Early Age Cracking in Cementitious Systems - Report of RILEM Technical Committee 181-EAS - Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems**. [s.l.] : RILEM Publications SARL., 2003. p. 127–148.

D'ALOIA, L.; CHANVILLARD, G. Determining the “apparent” activation energy of concrete: Ea - Numerical simulations of the heat of hydration of cement. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 32, n. 8, p. 1277–1289, 2002.

DAS, Swagato; SAHA, Purnachandra. A review of some advanced sensors used for health diagnosis of civil engineering structures. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, [s. l.], v. 129, n. July, p. 68–90, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.008>>

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.

DHANDAPANI, Yuvaraj et al. Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 107, n. February, p. 136–151, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005>>

DHANDAPANI, Yuvaraj; SANTHANAM, Manu. Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 84, p. 36–47, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.012>>

DUC, Tuan Ta; ANH, Tuan Le; DINH, Huong Vu. Estimating Modal Parameters of

Structures Using Arduino Platform. In: (H. Nguyen-Xuan, P. Phung-Van, T. Rabczuk, Eds.)PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COMPUTATIONAL MECHANICS 2017, Singapore. **Anais...** Singapore: Springer, 2017.

DUMOULIN, C. et al. Online monitoring of cracking in concrete structures using embedded piezoelectric transducers. **Smart Materials and Structures**, [s. l.], v. 23, n. 11, p. 115016, 2014. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0964-1726/23/i=11/a=115016?key=crossref.9e1b790448f912d006b8f6c5f19e9601>>

DUTT, A.; ROKHLIN, V. Fast Fourier Transforms for Nonequispaced Data. **SIAM Journal of Scientific Computing**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 1368–1393, 1993.

ELETROBRÁS. **PROCEL INFO - Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp?DocumentID=%7BA4E6BE83-9C63-44E0-9FD0-5C660812F0FD%7D&ServiceInstUID=%7B46764F02-4164-4748-9A41-C8E7309F80E1>>.

ENDEVCO. Practical understanding of key accelerometer specifications One of the most difficult aspects of selecting an accelerometer for a particular application is gaining an understanding and interpreting the accelerometer ' s specifications themselves . Often t. [s. l.], 2009. Disponível em: <https://www.endevco.com/news/archivednews/2009/2009_09/TP328.pdf>

FARIA, R. et al. A structural experimental technique to characterize the viscoelastic behavior of concrete under restrained deformations. **Strain**, [s. l.], v. 53, n. 1, p. 1–15, 2017.

FERNANDES, P. et al. **A new methodology for assisting quality control of NSM-CFRP systems since very early ages**Proceedings of the 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2014. [s.l: s.n.].

FERNANDES, Pedro et al. Quality control and monitoring of NSM CFRP systems: E-modulus evolution of epoxy adhesive and its relation to the pull-out force. **Composites Part B**, [s. l.], 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.01.021>>

GRANJA, José; AZENHA, Miguel. Continuous Monitoring of Concrete Mechanical Properties since an Early Age to Support Construction Phasing. In: (Pietro Lura, Mateusz Wyrzykowski, Eds.)CONCREEP - MECHANICS AND PHYSICS OF CREEP, SHRINKAGE, AND DURABILITY OF CONCRETE AND CONCRETE STRUCTURES

2015, Vienna, Austria. **Anais...** Vienna, Austria: American Society of Civil Engineers, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1061/9780784479346>>

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, p. 77–85, 2015.

GRANJA, José Luís Duarte et al. Comparison between different experimental techniques for stiffness monitoring of cement pastes. **Journal of Advanced Concrete Technology Journal of Advanced Concrete Technology**, [s. l.], v. 12, n. 7, p. 261–271, 2014. a.

GRANJA, José Luís Duarte et al. Nova metodologia para o controlo de qualidade de sistemas NSM CFRP durante a cura do adesivo. In: 5AS JORNADAS PORTUGUESAS DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS 2014b, Lisboa. **Anais...** Lisboa

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

GRANJA, José Luís Duarte; AZENHA, Miguel. Towards a robust and versatile method for monitoring E-modulus of concrete since casting: Enhancements and extensions of EMM-ARM. **Strain**, [s. l.], v. 53, n. 4, p. 1–19, 2017.

GREENGARD, Leslie; LEE, June-Yub. Accelerating the Nonuniform Fast Fourier Transform. **SIAM Review**, [s. l.], v. 46, n. 3, p. 1–14, 2011.

GU, H. et al. Concrete early-age strength monitoring using embedded piezoelectric transducers. **Smart Materials and Structures**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 1837–1845, 2006.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física - Eletromagnetismo**. 9a. ed. [s.l.] : LTC, 2012.

HE, Jimin; FU, Zhi-Fang. **Modal Analysis**. 1. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2001.

HELENE, Paulo; MEDEIROS, Marcelo Henrique F. De. **Estudo da influência do MetcaulimHP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland - Relatório Final**. São Paulo.

INVENSENSE. **MPU-6000 and MPU-6050 - Product Specification - Revision 3.4**.

Sunnyvale.

ISFAHANI, Forood Torabian et al. Effects of nanosilica on early age stages of cement hydration. **Journal of Nanomaterials**, [s. l.], v. 2017, 2017.

ISO. **ISO 5725-1 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions**, 1994.

JOHN, Elson; GETTU, Ravindra. Effect of temperature on flow properties of superplasticized cement paste. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 111, n. 1, p. 67–76, 2014.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. Vocabulaire international de métrologie. **VIM3: International Vocabulary of Metrology**, [s. l.], v. 3, n. third, p. 104, 2012. Disponível em: <http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_200_2008.pdf>

KADA-BENAMEUR, H.; WIRQUIN, E.; DUTHOIT, B. Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 301–305, 2000.

KAVITHA, S.; DANIEL, R. J.; SUMANGALA, K. High performance MEMS accelerometers for concrete SHM applications and comparison with COTS accelerometers. **Mechanical Systems and Signal Processing**, [s. l.], v. 66–67, p. 410–424, 2016. a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.06.005>>

KAVITHA, S.; DANIEL, R. J.; SUMANGALA, K. **Design and Analysis of MEMS Comb Drive Capacitive Accelerometer for SHM and Seismic Applications**. [s.l: s.n.]. v. 93 Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.029>>

KAWASHIMA, Shiho et al. Modification of cement-based materials with nanoparticles. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 8–15, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.012>>

KJELLEN, K. O.; DETWILER, R. J. Reaction Kinetics of Portland Cement Mortars Hydrated at Different Temperatures. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 22, p. 112–120, 1992.

KONG, Qingzhao et al. Very early age concrete hydration characterization monitoring using piezoceramic based smart aggregates. **Smart Materials and Structures**, [s. l.], v. 22, n. 8, 2013.

KREYSZIG, Erwin. **Advanced Engineering Mathematics**. 10th. ed. [s.l.] : John Wiley

& Sons, 2011. Disponível em:
<<http://books.google.com/books?id=7I3PPQAACAAJ&pgis=1>>

KWONG, Kei-ming. **MEMS Accelerometer Specifications and Their Impact in Inertial Applications**. 2017. University of Toronto, [s. l.], 2017.

LEVINZON, Felix. **Piezoelectric accelerometers with integral electronics**. [s.l.] : Springer, 2015.

LO IACONO, Francesco; NAVARRA, Giacomo; OLIVA, Maria. Structural monitoring of “Himera” viaduct by low-cost MEMS sensors: characterization and preliminary results. **Meccanica**, [s. l.], v. 52, n. 13, p. 3221–3236, 2017.

MAIA, Lino et al. Influence of the cementitious paste composition on the E-modulus and heat of hydration evolutions. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 41, n. 8, p. 799–807, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.008>>

MAIA, Lino et al. Identification of the percolation threshold in cementitious pastes by monitoring the E-modulus evolution. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 34, n. 6, p. 739–745, 2012. a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.03.001>>

MAIA, Lino et al. E-modulus evolution and its relation to solids formation of pastes from commercial cements. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 42, n. 7, p. 928–936, 2012. b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.03.013>>

MAIA, Lino et al. Influence of shrinkage reducing admixtures on distinct SCC mix compositions. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 35, n. 218, p. 304–312, 2012. c.

MAZAHERIPOUR, Hadi et al. Microstructure-Based Prediction of the Elastic Behaviour of Hydrating Cement Pastes. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 442, 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2076-3417/8/3/442>>

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1994.

MONDAL, Paramita et al. Comparative Study of the Effects of Microsilica and Nanosilica in Concrete. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s. l.], v. 2141, n. 1, p. 6–9, 2010.

MONTALVÃO E SILVA, J. M. An Overview of the Fundamentals of Modal Analysis.

In: SILVA, Júlio M. M.; MAIA, Nuno M. M. (Eds.). **Modal Analysis and Testing**, vol 363 ed. Sesimbra: Springer, Dordrecht, 1999. p. 1–35.

NEVILLE, Adam. **Properties of Concrete**. 5th. ed. Harlow, England: Pearson Education Limited, 2012.

NEWLAND, D. E. **An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet analysis**. 3rd ed ed. Harlow, England: Dover Publications, 2005.

NGUYEN, Quang Dieu; KHAN, Mohammad Shakhaout Hossain; CASTEL, Arnaud. Engineering Properties of Limestone Calcined Clay Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, [s. l.], v. 16, n. 8, p. 343–357, 2018. Disponível em: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/16/8/16_343/_article>

NOURYON. **Levasil CB45 A - Product Data Sheet**. 2019. Disponível em: <<https://colloidalsilica.nouryon.com/globalassets/inriver/resources/pds-levasil-cb45-a-en-201903071400.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2019.

NXP SEMICONDUCTOR. **MMA7361L Rev. 0**. Peterborough. Disponível em: <http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7361L.pdf>.

NXP SEMICONDUCTOR. **MMA7455L Rev. 10**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MMA7455L.pdf>>.

NXP SEMICONDUCTOR. **MMA8452Q Rev. 10**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MMA8452Q.pdf>>.

ODELSON, Joshua B.; KERR, Elizabeth A.; VICHIT-VADAKAN, Wilasa. Young's modulus of cement paste at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 258–263, 2007.

OTANI, L. B. et al. **Elastic Moduli characterization of composites using the Impulse Excitation Technique**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/276288705_Elastic_Moduli_characterization_of_composites_using_the_Impulse_Excitation_Technique>.

OTANI, Lucas Barcelos; PEREIRA, Antônio Henrique Alves. Influência do tipo de suporte na caracterização do módulo de elasticidade de amostras pequenas pela técnica de excitação por impulso. In: 17º CBECIMAT - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 15 A 19 DE NOVEMBRO DE 2006, FOZ

DO IGUAÇU, PR, BRASIL. 2014, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá

OTANI, Lucas Barcelos; PEREIRA, Henrique Alves. Guia de caracterização dos módulos elásticos e do amortecimento de madeiras e derivados utilizando as soluções Índice. [s. l.], v. 1, p. 1–24, 2013.

PATEL, Viral K.; PATEL, Maitri N. Development of Smart Sensing Unit for Vibration Measurement by Embedding Accelerometer with the Arduino Microcontroller. **International Journal of Instrumentation Science**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 1–7, 2017. Disponível em: <http://www.academia.edu/31445137/Development_of_Smart_Sensing_Unit_for_Vibration_Measurement_by_Embedding_Accelerometer_with_the_Arduino_Microcontroller>

PEDROSO, José Lineu. **Formulação das equações de movimento e determinação das frequências naturais para SS1GL**. Brasília.

PEDROSO, José Lineu. **Vibrações livres de vigas esbeltas contínuas: tração-compressão, flexão, cisalhamento e torção**. Brasília.

PEDROSO, Lineu José. **Sistemas contínuos com massa concentrada**. Brasília.

PEETERS, Bart; DE ROECK, Guido. Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, [s. l.], v. 123, n. 4, p. 659, 2001. Disponível em: <<http://dynamicsystems.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1409239>>

PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P.; MICHEL, M. D. Propriedades nanomecânicas de pastas de cimento. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 561–574, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952011000400003&lang=pt>

PERALTA, L. M. Rodríguez et al. Towards to a platform of monitoring based in WSN to estimate the structural health of buildings. **Proceedings of the Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (2ECEES)**, [s. l.], p. 24–29, 2014.

PETROCINO, Eduardo Abuhamad. **Monitoramento de Integridade Estrutural e de Sistemas Utilizando Dispositivos de Baixo Custo**. 2015. Universidade Estadual Paulista, [s. l.], 2015.

PRADO, D.; HAACH, V. ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE VIGAS DE EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE

BEAMS STRENGTHENING TO SHEAR WITH FRP. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, [s. l.], v. 15, n. 65, p. 57–60, 2013.

QUINAY, D. C. P.; D'ALMEIDA, J. R. M. Nondestructive Characterization of Epoxy Matrix Composites Reinforced With Luffa Lignocelulosic. **Revista Matéria**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 8, 2017.

RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete Admixtures Handbook**. 2nd. ed. New Jersey: Noyes Publications, 1997. v. 16

RAO, Singiresu. **Mechanical Vibrations**. 5th. ed. New York: Pearson Prentice Hall, 2011.

REINHARDT, H. W.; GROSSE, C. U. Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 145–154, 2004.

REYNDERS, Edwin. System Identification Methods for (Operational) Modal Analysis: Review and Comparison. **Archives of Computational Methods in Engineering**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 51–124, 2012.

RIBEIRO, Renan; LAMEIRAS, Rodrigo. Evaluation of low-cost MEMS accelerometers for SHM: frequency and damping identification of civil structures. **Latin American Journal of Solids and Structures**, [s. l.], n. Aticles in Press, p. 1–26, 2019.

RILEM. **Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques - Final draft**. [s.l.] : Springer, 2012. v. Volume 26

RODRIGUES, Jorge. **Identificação Modal Estocástica: Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil, Tese de Doutorado**. 2004. Universidade do Porto, [s. l.], 2004.

SANCHEZ, Florence; SOBOLEV, Konstantin. Nanotechnology in concrete – A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 24, n. 11, p. 2060–2071, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>>

SCRIVENER, K. Options for the future of cement. **The Indian Concrete Journal**, [s. l.], v. 88, n. July, p. 11–21, 2014. Disponível em: <http://www.lc3.ch/wp-content/uploads/2014/09/0851_ICJ_Article.pdf>

SCRIVENER, Karen et al. Calcined clay limestone cements (LC³). **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 114, p. 49–56, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>>

SENNF, Luciano et al. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 23, n. 7, p. 2487–2491, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.005>>

SIDDIQUI, Sarwar; RIDING, Kyle A. Effect of Calculation Methods on Cement Paste and Mortar Apparent Activation Energy. **Advances in Civil Engineering Materials**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 20120011, 2012.

SILVA, Andrea Brasileiro. **Identificação de Sistemas e Atualização de Modelos Numéricos com Vistas à Avaliação da Integridade Estrutural**. 2005. Universidade de Brasília, [s. l.], 2005.

SILVA, Jacinto et al. Continuous stiffness assessment of cement-stabilised soils from early age. **Géotechnique**, [s. l.], v. 63, n. 16, p. 1419–1432, 2013.

SILVA, Jacinto et al. Monitorização contínua da deformabilidade de solos estabilizados com cimento desde as primeiras idades em amostras recolhidas diretamente de uma camada piloto. In: VII CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA, IN INFRAESTRUTURA DE UM FUTURO SUSTENTÁVEL 2014a, Goiânia/GO. **Anais... Goiânia/GO**

SILVA, Jacinto et al. Continuous monitoring of sand – cement stiffness starting from layer compaction with a resonant frequency-based method : Issues on mould geometry and sampling. **Soils and Foundations**, [s. l.], v. 54, n. 1, p. 56–66, 2014. b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2013.12.006>>

SILVA, Jacinto et al. Assessment of the Small Strain Stiffness of a Sand-Cement Mixture by Cyclic and Dynamic Test Methods. **Geo-China 2016 GSP**, [s. l.], n. 265, p. 93–101, 2016.

SILVEIRA, Iarly Vanderlei Da. **Estudo da influência da crosta local no comportamento sísmico do sistema barragem gravidade-reservatório-fundação**. 2018. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, [s. l.], 2018.

SINGH, L. P. et al. Beneficial role of nanosilica in cement based materials - A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 47, p. 1069–1077, 2013. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.052>>

SONG, Gangbing; GU, Haichang; MO, Yi Lung. Smart aggregates: Multi-functional sensors for concrete structures - A tutorial and a review. **Smart Materials and Structures**, [s. l.], v. 17, n. 3, 2008.

STAQUET, S. et al. Design of a Revisited Tstm System for Testing Concrete Since Setting Time Under Free and Restraint Conditions. In: CONCRACK 3 – RILEM-JCI INTERNATIONAL WORKSHOP ON CRACK CONTROL OF MASS CONCRETE AND RELATED ISSUES CONCERNING EARLY-AGE OF CONCRETE STRUCTURES, 15-16 MARCH 2012, PARIS, FRANCE 2012, **Anais...** [s.l: s.n.]

STEFANIDOU, M.; PAPAYIANNI, I. Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 43, n. 6, p. 2706–2710, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.12.015>>

SUN, Zhuoxiong et al. Development of Arduino based wireless control system. In: PROCEEDINGS OF SMART STRUCTURES AND MATERIALS + NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND HEALTH MONITORING 2015, San Diego. **Anais...** San Diego Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2083707>>

TEXAS INSTRUMENTS. **ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator**. Dallas, Texas. Disponível em: <www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>.

TONGBO, Sui et al. Meta-Kaolin for High Performance Concrete. In: (K. Scrivener, A. Favier, Eds.) PROCEEDINGS OF THE 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCINED CLAYS FOR SUSTAINABLE CONCRETE2 2015, Dordrecht. **Anais...** Dordrecht: Springer Netherlands, 2015.

VALENZA II, John J.; THOMAS, Jeffrey J. Permeability and elastic modulus of cement paste as a function of curing temperature. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 42, n. 2, p. 440–446, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.012>>

VARANIS, Marcus; SILVA, Anderson Langone; MERELES, Arthur Guilherme. On mechanical vibration analysis of a multi degree of freedom system based on arduino and MEMS accelerometers. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 1–10, 2018.

Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172018000100404&lng=en&tlng=en>

VELAY-LIZANCOS, Mirian et al. Addition of biomass ash in concrete: Effects on E-Modulus, electrical conductivity at early ages and their correlation. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 157, p. 1126–1132, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.179>>

VIEIRA, Luís Miguel Rios. **Continuous evaluation of the stiffness of stabilized soils since compaction: enhancements to the EMM-ARM methodology**. 2014. Universidade do Minho, [s. l.], 2014.

VLADIMIRO, Edgar et al. Avaliação das características mecânicas da madeira por meio de excitação por impulso Evaluation of mechanical characteristics of wood by means of impulse excitation. **Revista Matéria**, [s. l.], p. 12, 2017.

WALTER, Patrick. The history of the accelerometer: 1920s-1996-prologue and epilogue, 2006. **Sound & vibration**, [s. l.], v. 41, n. 1, p. 84–90, 2007.

WANG, Bao Min et al. Effect of Metakaolin on the Physical Properties and Setting Time of High Performance Concrete. **Key Engineering Materials**, [s. l.], v. 539, p. 195–199, 2013.

WASHA, George W. Volume Changes and Creep. In: **Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Aggregates - STP 169**. [s.l.] : American Society for Testing Materials, 1956. p. 115–128.

WELCH, Peter D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. **IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 70–73, 1967.

WIEDERHORN, Sheldon et al. Mechanical Properties. In: CZICHOS, Horst; SAITO, Tetsuya; SMITH, Leslie (Eds.). **Springer Handbook of Metrology and Testing**. 2nd. ed. New York: Springer, 2011. p. 1262.

WILRICH, Peter T. Critical values of Mandel's h and k, the Grubbs and the Cochran test statistic. **ASta Advances in Statistical Analysis**, [s. l.], v. 97, n. 1, p. 1–10, 2013.

ZARIBAF, Behnaz H.; UZAL, Burak; KURTIS, Kimberley. Compatibility of Superplasticizers with Limestone-Metakaolin Blended Cementitious System. In: (K. Scrivener,

A. Favier, Eds.)PROCEEDINGS OF THE 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON
CALCINED CLAYS FOR SUSTAINABLE CONCRETE 2015, Dordrecht. **Anais...**
Dordrecht: Springer Netherlands, 2015.

APÊNDICE A - PROJETO DA FONTE DE VIBRAÇÃO FORÇADA

Inicialmente, testou-se a utilização de uma bobina eletromagnética para aplicação de vibração forçada dos corpos de prova no ensaio EMM-ARM, seguindo a proposta de Granja (2016). O projeto original do dispositivo de é apresentado na Figura A-1. O dispositivo seria capaz de aplicar uma excitação harmônica no corpo de prova, por meio de um sinal modulado enviado pelo módulo de controle apresentado no item 3.1.3. Previu-se um fecho ótico para monitorar a frequência de excitação aplicada no corpo de prova, para permitir a execução de uma análise modal experimental (PETROCINO, 2015).

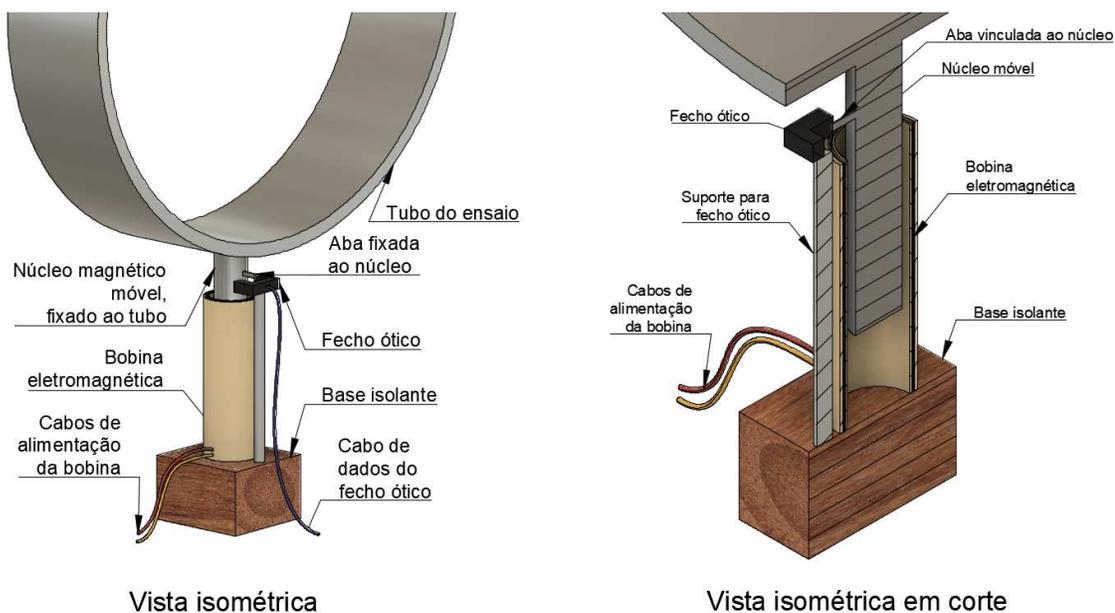


Figura A-1: Projeto do dispositivo de vibração forçada para ensaio EMM-ARM.

A Figura A-2 apresenta as soluções de solenóides testadas neste trabalho, que incluíram dois solenóides comerciais, com cargas máximas nominais de 20 N e 55 N, e dois solenóides fabricados artesanalmente, com fio de cobre e núcleo ferromagnético de neodímio, todos alimentados com corrente contínua. Os resultados obtidos de testes iniciais com estes dispositivos revelaram que a intenção de se executar um ensaio de análise modal experimental (EMA), aplicando-se uma carga periódica ao corpo de prova, com a qual se executaria uma varredura de frequências, não seria possível. Os solenóides utilizados se revelaram incapazes de produzir excitações com frequências maiores que 5 Hz. Ao se aumentar a frequência da corrente de alimentação para além dos 5 Hz, os solenóides apenas travavam em uma posição. Constatadas estas impossibilidades, decidiu-se pela utilização de um motor com excêntrico, que

é uma solução comum para aplicações de baixo custo visando indução de vibrações, como apresentado por Petrocino (2015).

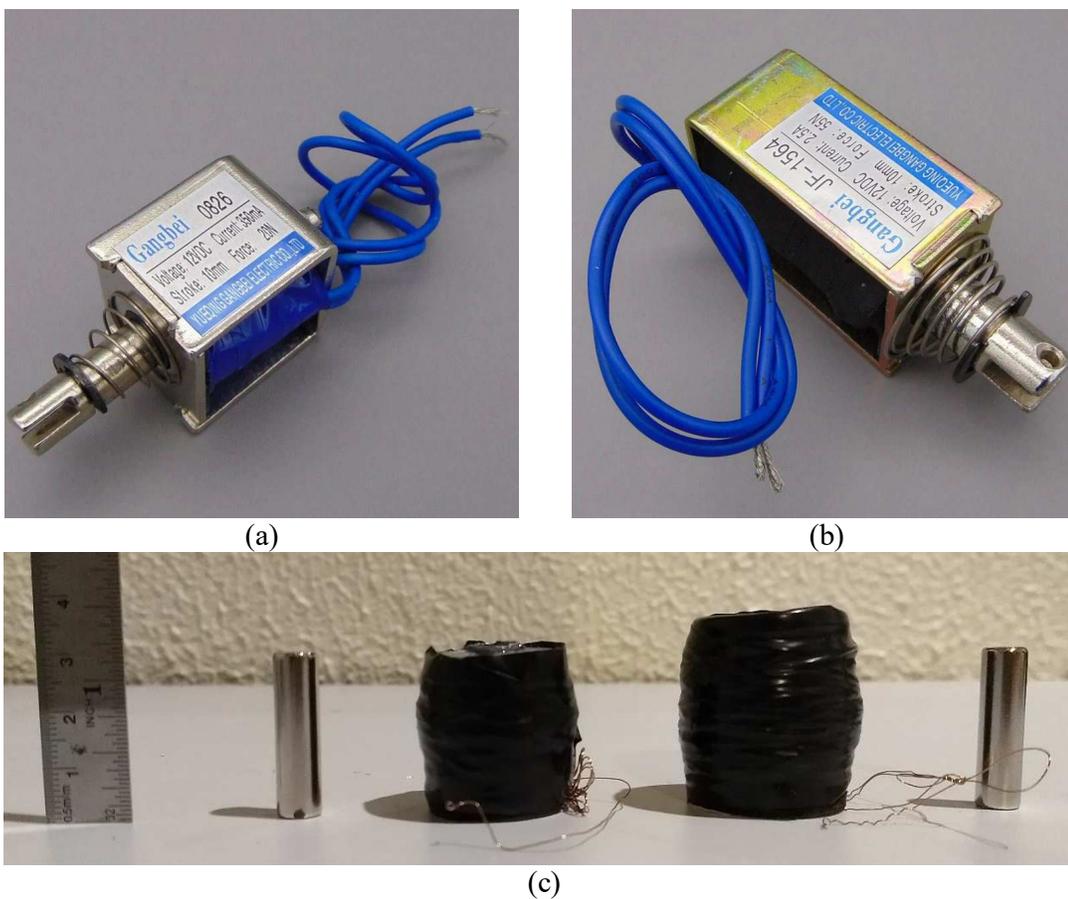


Figura A-2: Solenóides testados: (a) comercial de carga máxima de 20 N (ALIEXPRESS, 2019a) (b) comercial de carga máxima de 55 N (ALIEXPRESS, 2019b); (c) artesanal com núcleo ferromagnético de neodímio.

APÊNDICE B - RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO

A Figura B-1 apresenta os resultados de granulometria a laser das matérias-primas utilizadas para produzir os cimentos estudados na Etapa 4 deste trabalho, bem como os próprios cimentos estudados.

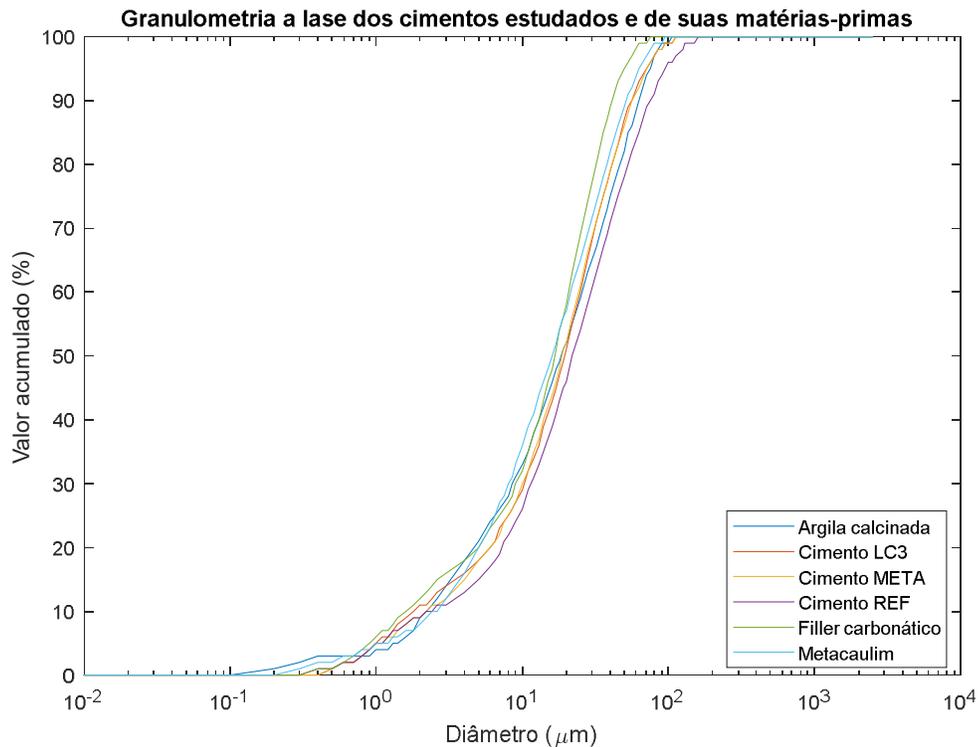


Figura B-1: Resultados de granulometria a laser.

As Figuras Figura B-2 a Figura B-18 apresentam os resultados obtidos pelos métodos BET, FRX e DRX em amostras de argila calcinada, metacaulim, filler carbonático e cimentos REF, LC3 e META. Os ensaios foram realizados pelo Eng. Dagner Ajaude na Universidade Federal de Integração Latinoamericana (UNILA), à exceção dos ensaios FRX, que foram executados na Faculdade de Engenharia de Sorocaba (FACENS). O ensaio BET não foi realizado com a amostra de filler carbonático devido a restrições laboratoriais no estoque de nitrogênio.

Analysis		Report	
Operator:	quantachrome	Date:	2019/07/11
Sample ID:	Argila Calcina	Operator:	quantachrome
Sample Desc:	Dagner	Filename:	sttn_A_20190711_1.qps
Sample weight:	0.224 g	Comment:	ROD A
Outgas Time:	4.0 hrs	Sample Volume:	0.224 cc
Analysis gas:	Nitrogen	Outgas Temp:	200.0 C
Press. Tolerance:	0.100/0.100 (ads/des)	Bath Temp:	273.0 K
Analysis Time:	263.2 min	Equil time:	60/60 sec (ads/des)
Cell ID:	4	End of run:	2019/07/11 11:43:31
		Sample Density:	1 g/cc
		Equil timeout:	240/240 sec (ads/des)
		Instrument:	Nova Station A

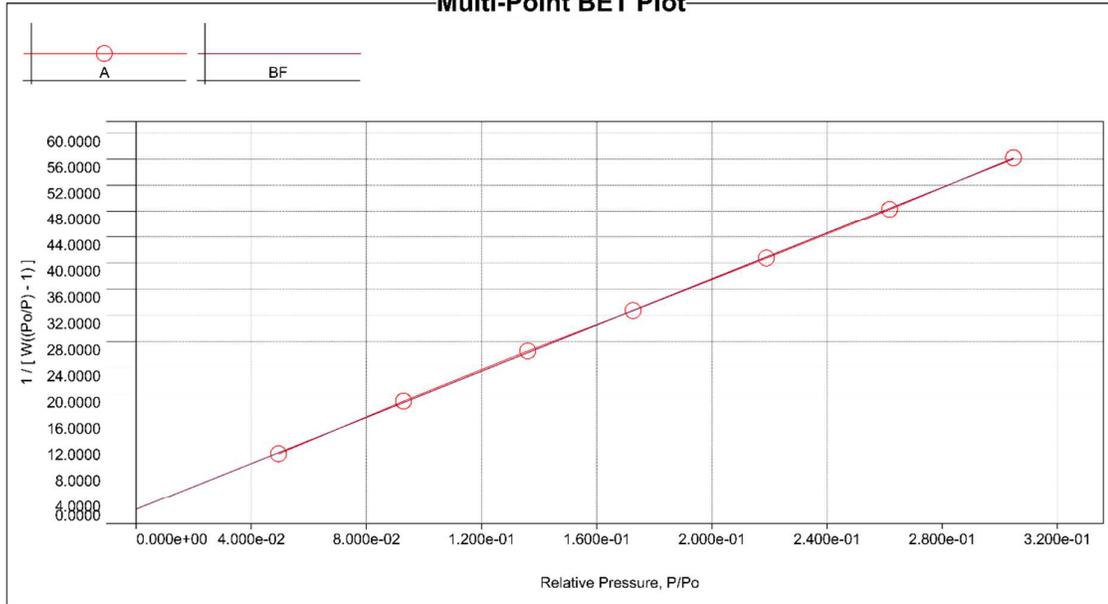
Data Reduction Parameters

Adsorbate	Nitrogen	Temperature	77.350K	Liquid Density:	0.808 g/cc
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 Å²		

MBET summary

Slope = 176.295
Intercept = 2.266e+00
Correlation coefficient, r = 0.999925
C constant = 78.809
Surface Area = 19.503 m²/g

Multi-Point BET Plot



Multi-Point BET

Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]	Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]
4.95230e-02	3.8678	1.0778e+01	2.19024e-01	5.5141	4.0694e+01
9.29250e-02	4.3481	1.8851e+01	2.61778e-01	5.8813	4.8242e+01
1.36133e-01	4.7582	2.6498e+01	3.04878e-01	6.2465	5.6180e+01
1.72688e-01	5.1098	3.2684e+01			

Figura B-2: Resultados de superficie específica pelo método BET para a argila calcinada.

Analysis		Report	
Operator:	quantachrome	Date:	2019/07/11
Sample ID:	Metacalulim	Operator:	quantachrome
Sample Desc:	Dagner	Filename:	sttn_B_20190711_1.qps
Sample weight:	0.2339 g	Comment:	ROD B
Outgas Time:	16.0 hrs	Sample Volume:	0.2339 cc
Analysis gas:	Nitrogen	OutgasTemp:	40.0 C
Press. Tolerance:	0.100/0.100 (ads/des)	Bath Temp:	273.0 K
Analysis Time:	265.4 min	Equil time:	60/60 sec (ads/des)
Cell ID:	2	End of run:	2019/07/11 11:45:38
		Sample Density:	1 g/cc
		Equil timeout:	240/240 sec (ads/des)
		Instrument:	Nova Station B

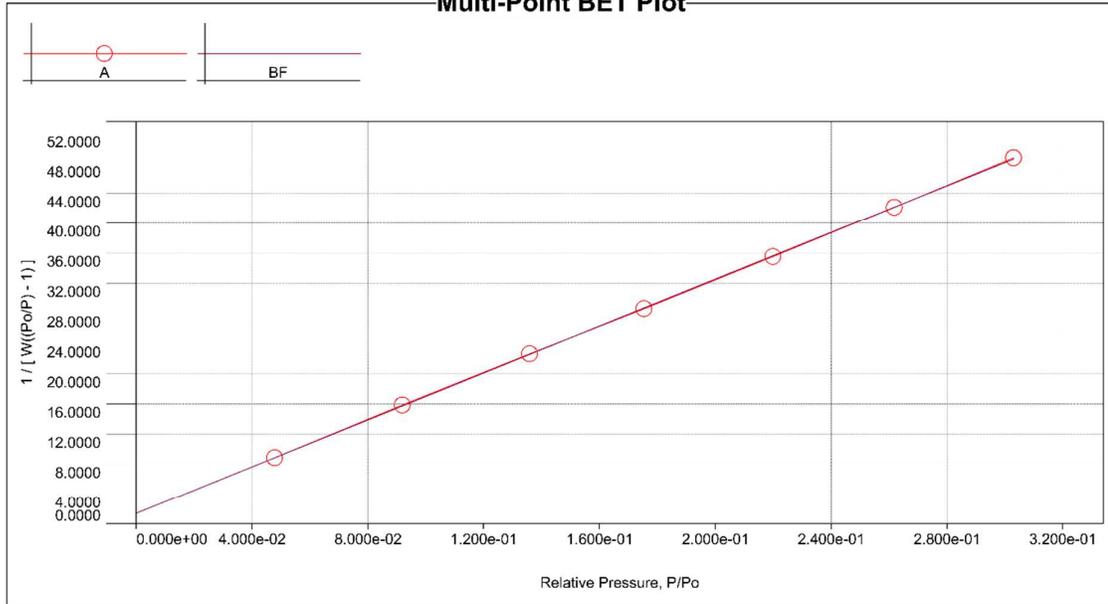
Data Reduction Parameters

Adsorbate	Nitrogen	Temperature	77.350K	Liquid Density:	0.808 g/cc
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 Å²		

MBET summary

Slope = 155.628
 Intercept = 1.410e+00
 Correlation coefficient, r = 0.999968
 C constant = 111.369
 Surface Area = 22.176 m²/g

Multi-Point BET Plot



Multi-Point BET

Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]	Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]
4.78290e-02	4.5471	8.8387e+00	2.19918e-01	6.3567	3.5485e+01
9.19230e-02	5.1153	1.5834e+01	2.61828e-01	6.7377	4.2121e+01
1.35931e-01	5.5657	2.2615e+01	3.03040e-01	7.1395	4.8727e+01
1.75449e-01	5.9539	2.8595e+01			

Figura B-3: Resultados de superfície específica pelo método BET para o metacaulim.

Analysis		Report	
Operator:	quantachrome	Operator:	quantachrome
Sample ID:	Cimento Ref	Filename:	Área Volume_Cimento Referência_Dagner.qps
Sample Desc:	Dagner	Comment:	ROD B
Sample weight:	0.2757 g	Sample Volume:	0.2757 cc
Outgas Time:	16.0 hrs	Outgas Temp:	40.0 C
Analysis gas:	Nitrogen	Bath Temp:	273.0 K
Press. Tolerance:	0.100/0.100 (ads/des)	Equil time:	60/60 sec (ads/des)
Analysis Time:	163.7 min	End of run:	2019/07/12 9:58:26
Cell ID:	5	Equil timeout:	240/240 sec (ads/des)
		Instrument:	Nova Station B

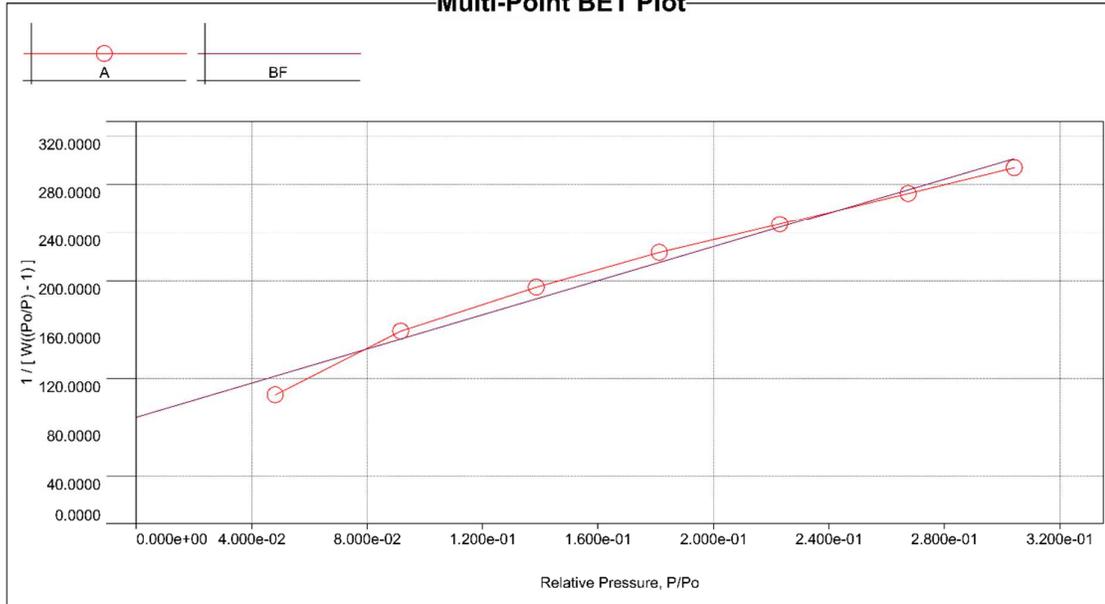
Data Reduction Parameters

Adsorbate	Nitrogen	Temperature	77.350K	Liquid Density:	0.808 g/cc
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 Å²		

MBET summary

Slope = 700.536
Intercept = 8.813e+01
Correlation coefficient, r = 0.990099
C constant = 8.949
Surface Area = 4.416 m²/g

Multi-Point BET Plot



Multi-Point BET

Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]	Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]
4.82580e-02	0.3815	1.0635e+02	2.23061e-01	0.9305	2.4687e+02
9.16970e-02	0.5089	1.5871e+02	2.67495e-01	1.0730	2.7230e+02
1.38678e-01	0.6617	1.9468e+02	3.04269e-01	1.1913	2.9372e+02
1.81259e-01	0.7936	2.2322e+02			

Figura B-4: Resultados de superfície específica pelo método BET para o cimento REF.

Analysis		Report	
Operator:	quantachrome	Date:	2019/07/09
Sample ID:	Cimento LC3	Operator:	quantachrome
Sample Desc:	Dagner	Filename:	sttn_B_20190709_2.qps
Sample weight:	0.2362 g	Comment:	ROD B
Outgas Time:	16.0 hrs	Sample Volume:	0.2362 cc
Analysis gas:	Nitrogen	Outgas Temp:	40.0 C
Press. Tolerance:	0.100/0.100 (ads/des)	Bath Temp:	273.0 K
Analysis Time:	171.4 min	Equil time:	60/60 sec (ads/des)
Cell ID:	2	End of run:	2019/07/09 12:14:09
		Sample Density:	1 g/cc
		Equil timeout:	240/240 sec (ads/des)
		Instrument:	Nova Station B

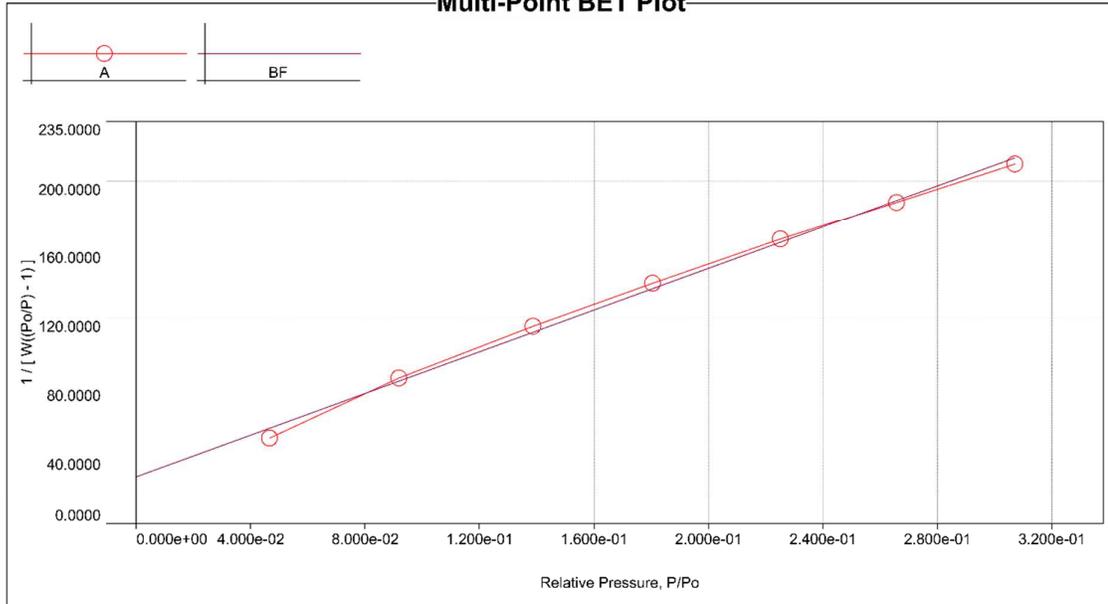
Data Reduction Parameters

Adsorbate	Nitrogen	Temperature	77.350K	Liquid Density:	0.808 g/cc
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 Å ²		

MBET summary

Slope = 605.373
 Intercept = 2.767e+01
 Correlation coefficient, r = 0.998096
 C constant = 22.881
 Surface Area = 5.501 m²/g

Multi-Point BET Plot



Multi-Point BET

Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]	Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]
4.66590e-02	0.7790	5.0268e+01	2.25164e-01	1.4009	1.6597e+02
9.18440e-02	0.9513	8.5062e+01	2.65761e-01	1.5450	1.8745e+02
1.38761e-01	1.1198	1.1512e+02	3.07122e-01	1.6884	2.1005e+02
1.80553e-01	1.2592	1.4000e+02			

Figura B-5: Resultados de superfície específica pelo método BET para o cimento LC3.

Analysis		Report	
Operator:	quantachrome	Date:	2019/07/10
Sample ID:	Cimento Metac	Operator:	quantachrome
Sample Desc:	Dagner	Filename:	sttn_B_20190710_1.qps
Sample weight:	0.2651 g	Comment:	ROD B
Outgas Time:	16.0 hrs	Sample Volume:	0.2651 cc
Analysis gas:	Nitrogen	Outgas Temp:	40.0 C
Press. Tolerance:	0.100/0.100 (ads/des)	Bath Temp:	273.0 K
Analysis Time:	172.6 min	Equil time:	60/60 sec (ads/des)
Cell ID:	5	End of run:	2019/07/10 11:39:36
		Sample Density:	1 g/cc
		Equil timeout:	240/240 sec (ads/des)
		Instrument:	Nova Station B

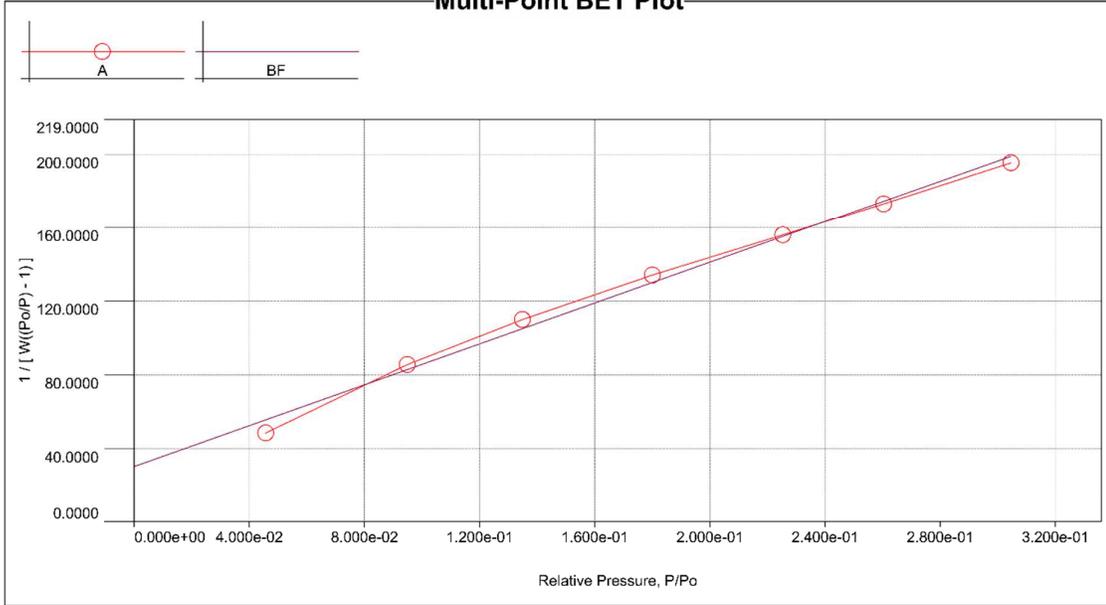
Data Reduction Parameters

Adsorbate	Nitrogen	Temperature	77.350K
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 Å²
		Liquid Density:	0.808 g/cc

MBET summary

Slope =	552.774
Intercept =	3.040e+01
Correlation coefficient, r =	0.996407
C constant =	19.183
Surface Area =	5.972 m²/g

Multi-Point BET Plot



Multi-Point BET

Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]	Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]
4.57740e-02	0.7911	4.8515e+01	2.25399e-01	1.4947	1.5577e+02
9.49780e-02	0.9824	8.5472e+01	2.60428e-01	1.6296	1.7289e+02
1.34905e-01	1.1352	1.0991e+02	3.04653e-01	1.7953	1.9526e+02
1.80106e-01	1.3128	1.3388e+02			

Figura B-6: Resultados de superfície específica pelo método BET para o cimento META.

SQX Calculation Result							
Sample : argila calcinada		Date analyzed : 2019- 7-25 17:58					
Application : F-U_Solid_F_879		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
		Sample film corr. :		Matching library :			
		File : argila calcinada		Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Na2O	0.572	mass%	0.05017	Na-KA	0.0190	0.1712
2	MgO	0.616	mass%	0.04083	Mg-KA	0.0553	0.1845
3	Al2O3	32.6	mass%	0.03010	Al-KA	16.2158	9.7675
4	SiO2	55.6	mass%	0.05336	Si-KA	15.0250	16.6572
5	SO3	0.608	mass%	0.01465	S -KA	0.2233	0.1820
6	Cl	0.261	mass%	0.00465	Cl-KA	0.3384	0.0780
7	K2O	0.642	mass%	0.01932	K -KA	0.1057	0.1923
8	CaO	3.67	mass%	0.01577	Ca-KA	2.9169	1.0993
9	TiO2	2.31	mass%	0.02856	Ti-KA	0.4992	0.6926
10	Fe2O3	2.88	mass%	0.01115	Fe-KA	4.4327	0.8613
11	SrO	0.0349	mass%	0.00520	Sr-KA	0.6026	0.0105
12	ZrO2	0.128	mass%	0.00565	Zr-KA	2.7803	0.0383

Rigaku

Figura B-7: Resultados de FRX para a argila calcinada.

SQX Calculation Result							
Sample : METACAULIM		Date analyzed : 2019- 7- 1 17:58					
Application : F-U_Solid_N_862		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
		Sample film corr. :		Matching library :			
		File : METACAULIM001		Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Na2O	0.138	mass%	0.04129	Na-KA	0.0085	0.0741
2	MgO	1.02	mass%	0.03669	Mg-KA	0.1697	0.5485
3	Al2O3	39.4	mass%	0.03057	Al-KA	35.8518	21.2163
4	SiO2	52.2	mass%	0.05377	Si-KA	24.0998	28.0916
5	P2O5	0.0597	mass%	0.01275	P -KA	0.0248	0.0321
6	SO3	0.178	mass%	0.00831	S -KA	0.1160	0.0955
7	Cl	0.0511	mass%	0.00315	Cl-KA	0.1183	0.0275
8	K2O	2.18	mass%	0.01317	K -KA	0.6365	1.1722
9	CaO	0.593	mass%	0.00995	Ca-KA	0.8194	0.3190
10	TiO2	1.55	mass%	0.01873	Ti-KA	0.6262	0.8329
11	Fe2O3	2.40	mass%	0.00686	Fe-KA	7.0885	1.2922
12	Rb2O	0.0163	mass%	0.00305	Rb-KA	0.5301	0.0088
13	SrO	0.0095	mass%	0.00319	Sr-KA	0.3210	0.0051
14	Y2O3	0.0609	mass%	0.01751	Y -KB1	0.4723	0.0328
15	ZrO2	0.0664	mass%	0.00344	Zr-KA	2.5782	0.0357

Rigaku

Figura B-8: Resultados de FRX para metacaulim.

SQX Calculation Result							
Sample : catalisador		Date analyzed : 2019- 7-25 18:30					
Application : F-U_Solid_F_882		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
		Sample film corr. :		Matching library :			
		File : catalisador		Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Na2O	1.50	mass%	0.05451	Na-KA	0.0350	0.3711
2	MgO	5.88	mass%	0.03691	Mg-KA	0.3700	1.4503
3	Al2O3	9.11	mass%	0.01620	Al-KA	3.0868	2.2475
4	SiO2	29.4	mass%	0.03909	Si-KA	7.3853	7.2622
5	SO3	3.30	mass%	0.01141	S -KA	1.3182	0.8138
6	Cl	0.109	mass%	0.00448	Cl-KA	0.1505	0.0268
7	K2O	0.323	mass%	0.01737	K -KA	0.0598	0.0797
8	CaO	40.7	mass%	0.01805	Ca-KA	28.3242	10.0356
9	TiO2	7.24	mass%	0.06009	Ti-KA	0.7287	1.7856
10	MnO	0.493	mass%	0.01799	Mn-KA	0.2302	0.1215
11	Fe2O3	1.66	mass%	0.01894	Fe-KA	1.1277	0.4091
12	SrO	0.240	mass%	0.00854	Sr-KA	1.8485	0.0593
13	ZrO2	0.0000	mass%	0.04158	Zr-KA	1.1441	0.0000

Rigaku

Figura B-9: Resultados de FRX para filer carbonático.

SQX Calculation Result							
Sample : cemento ref		Date analyzed : 2019- 7-25 18:20					
Application : F-U_Solid_F_881		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
		Sample film corr. :		Matching library :			
File : cemento ref				Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Na2O	0.886	mass%	0.07586	Na-KA	0.0280	0.3178
2	MgO	6.33	mass%	0.04148	Mg-KA	0.5484	2.2720
3	Al2O3	3.99	mass%	0.01668	Al-KA	1.8717	1.4303
4	SiO2	17.2	mass%	0.03881	Si-KA	6.4167	6.1686
5	P2O5	0.241	mass%	0.01082	P -KA	0.0939	0.0863
6	SO3	5.17	mass%	0.01083	S -KA	3.3735	1.8555
7	Cl	0.0879	mass%	0.00355	Cl-KA	0.1943	0.0315
8	K2O	1.15	mass%	0.02160	K -KA	0.3498	0.4141
9	CaO	59.2	mass%	0.02515	Ca-KA	58.3386	21.2317
10	Fe2O3	5.13	mass%	0.01966	Fe-KA	4.4096	1.8413
11	SrO	0.623	mass%	0.00780	Sr-KA	5.7179	0.2236

Rigaku

Figura B-10: Resultados de FRX para cemento REF.

SQX Calculation Result							
Sample : LC3		Date analyzed : 2019- 7- 1 17:19					
Application : F-U_Solid_N_860		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
		Sample film corr. :		Matching library :			
		File : LC3		Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Na2O	0.756	mass%	0.04395	Na-KA	0.0276	0.2889
2	MgO	10.7	mass%	0.03482	Mg-KA	1.0690	4.1051
3	Al2O3	11.4	mass%	0.01712	Al-KA	5.7432	4.3671
4	SiO2	22.5	mass%	0.02775	Si-KA	8.2502	8.5883
5	P2O5	0.145	mass%	0.00693	P -KA	0.0531	0.0552
6	SO3	4.35	mass%	0.00699	S -KA	2.7191	1.6614
7	Cl	0.0885	mass%	0.00269	Cl-KA	0.1898	0.0338
8	K2O	0.757	mass%	0.01237	K -KA	0.2180	0.2890
9	CaO	45.5	mass%	0.01649	Ca-KA	47.7809	17.3894
10	TiO2	0.504	mass%	0.03067	Ti-KA	0.0742	0.1924
11	Fe2O3	2.87	mass%	0.01206	Fe-KA	3.0754	1.0978
12	SrO	0.328	mass%	0.00516	Sr-KA	3.9218	0.1254

Rigaku

Figura B-11: Resultados de FRX para cemento LC3.

SQX Calculation Result							
Sample : L53 METACAULIM		Date analyzed : 2019- 7- 1 18:56					
Application : F-U_Solid_N_865		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
		Sample film corr. :		Matching library :			
		File : L53 METACAULIM		Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Na2O	0.557	mass%	0.04847	Na-KA	0.0314	0.3303
2	MgO	8.44	mass%	0.03977	Mg-KA	1.3006	5.0036
3	Al2O3	13.8	mass%	0.02281	Al-KA	11.0180	8.1629
4	SiO2	24.0	mass%	0.03956	Si-KA	13.6489	14.2268
5	P2O5	0.135	mass%	0.00859	P -KA	0.0772	0.0800
6	SO3	1.65	mass%	0.00690	S -KA	1.5876	0.9780
7	Cl	0.0602	mass%	0.00295	Cl-KA	0.2035	0.0357
8	K2O	1.21	mass%	0.01495	K -KA	0.5504	0.7183
9	CaO	46.1	mass%	0.01930	Ca-KA	74.8533	27.3270
10	TiO2	0.572	mass%	0.02639	Ti-KA	0.1298	0.3392
11	MnO	0.0482	mass%	0.01145	Mn-KA	0.0545	0.0286
12	Fe2O3	3.17	mass%	0.01187	Fe-KA	5.1968	1.8763
13	SrO	0.266	mass%	0.00441	Sr-KA	4.8436	0.1576

Rigaku

Figura B-12: Resultados de FRX para cemento META.

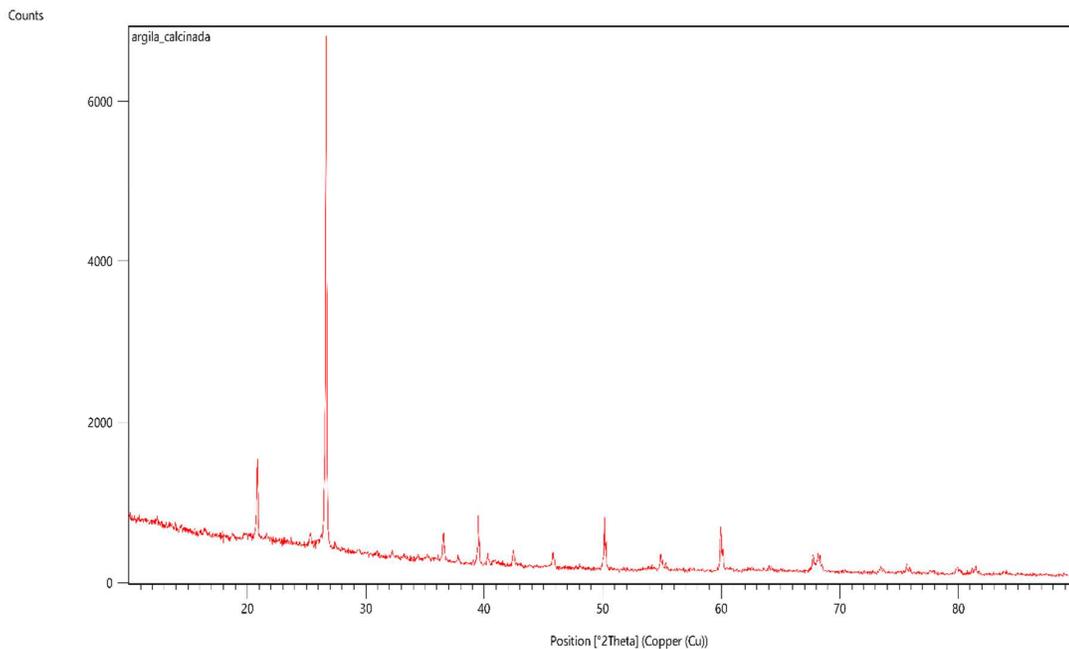


Figura B-13: Resultados de DRX para argila calcinada.

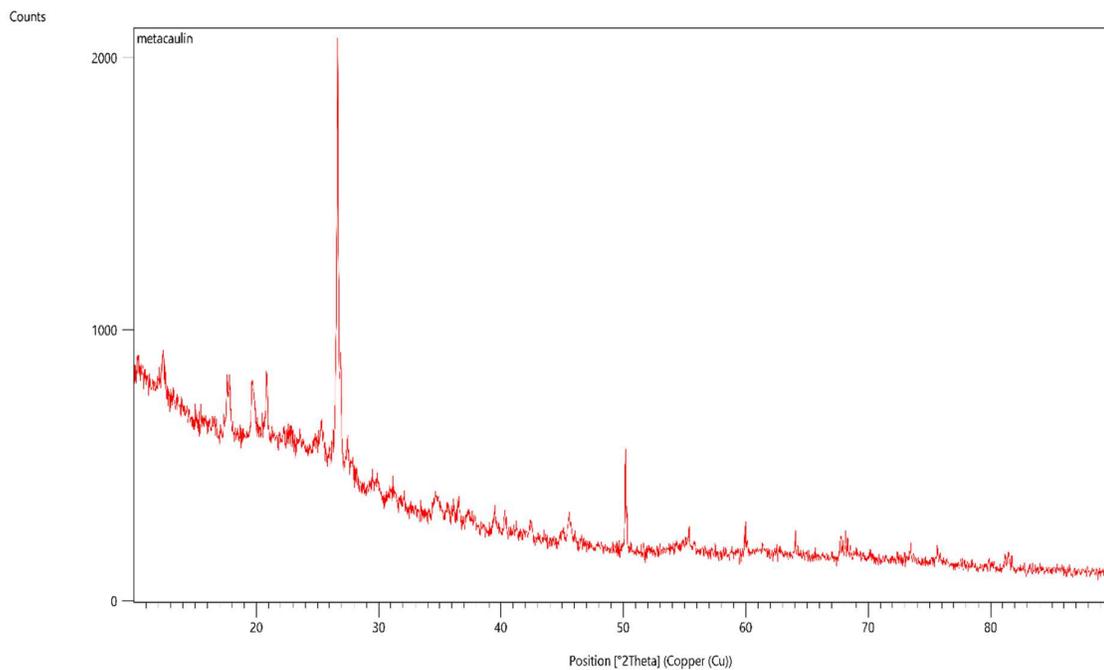


Figura B-14: Resultados de DRX para metacaulim.

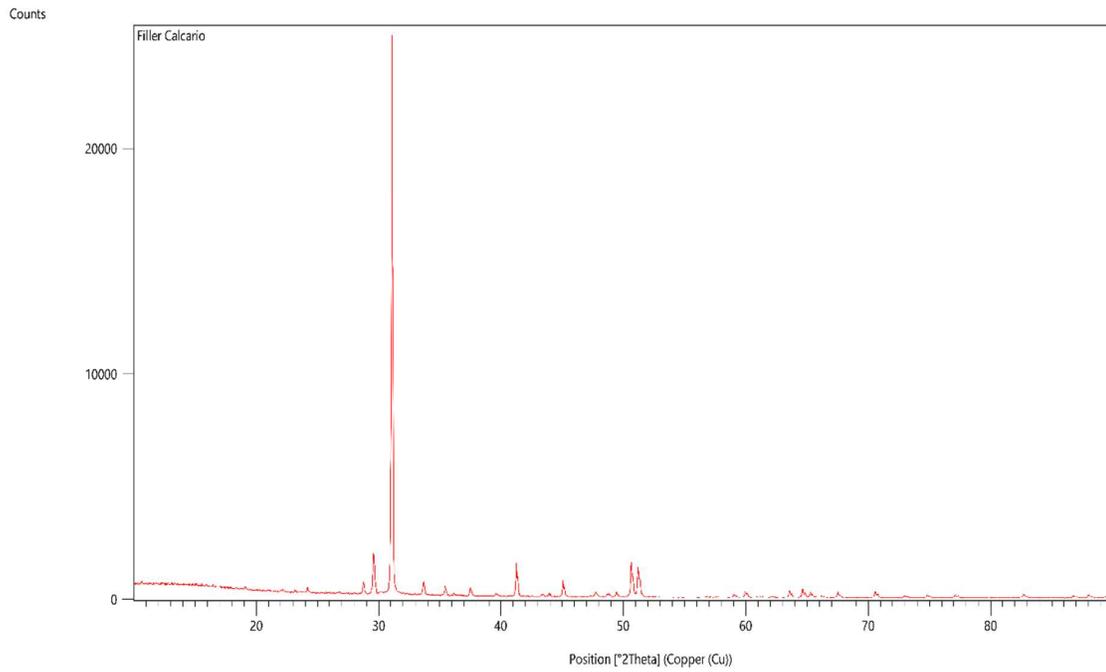


Figura B-15: Resultados de DRX para filler carbonático.

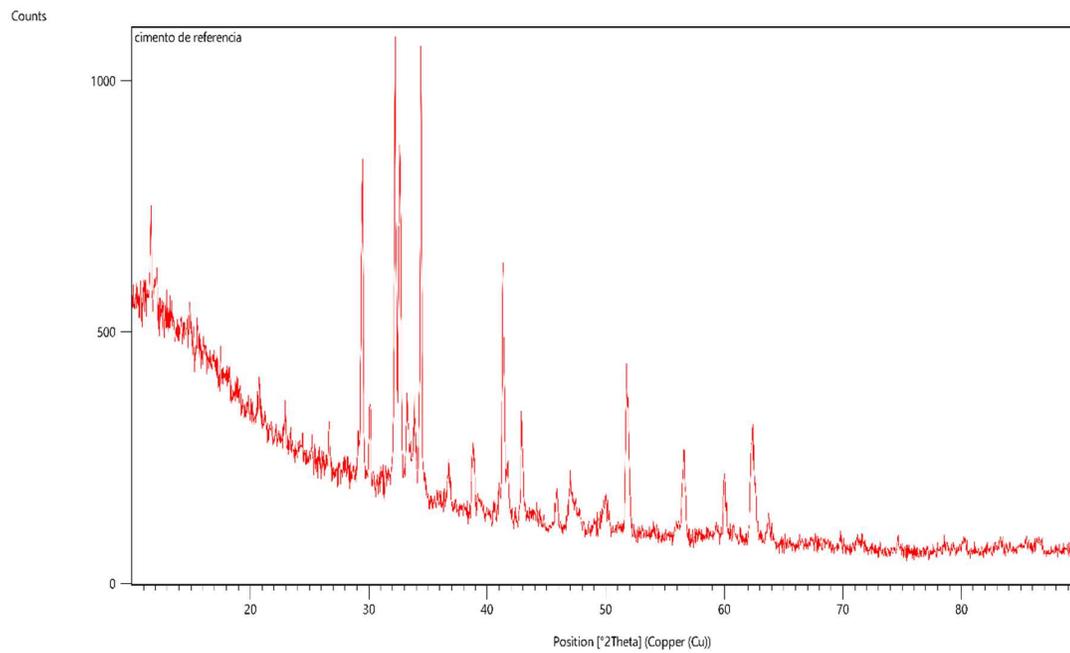


Figura B-16: Resultados de DRX para cimento REF.

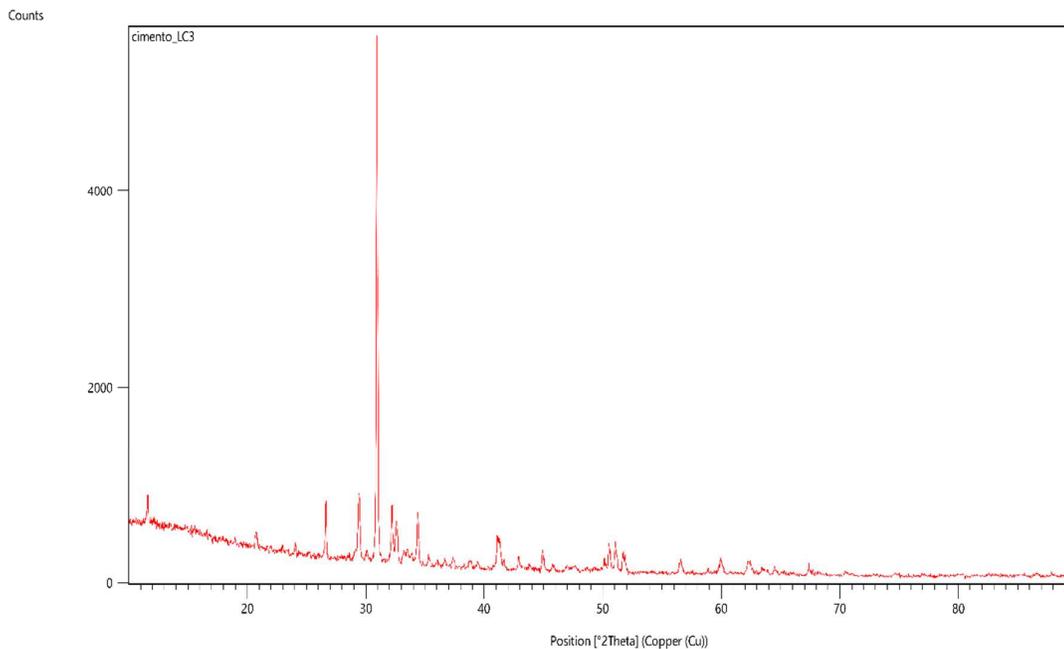


Figura B-17: Resultados de FRX para cimento LC3.

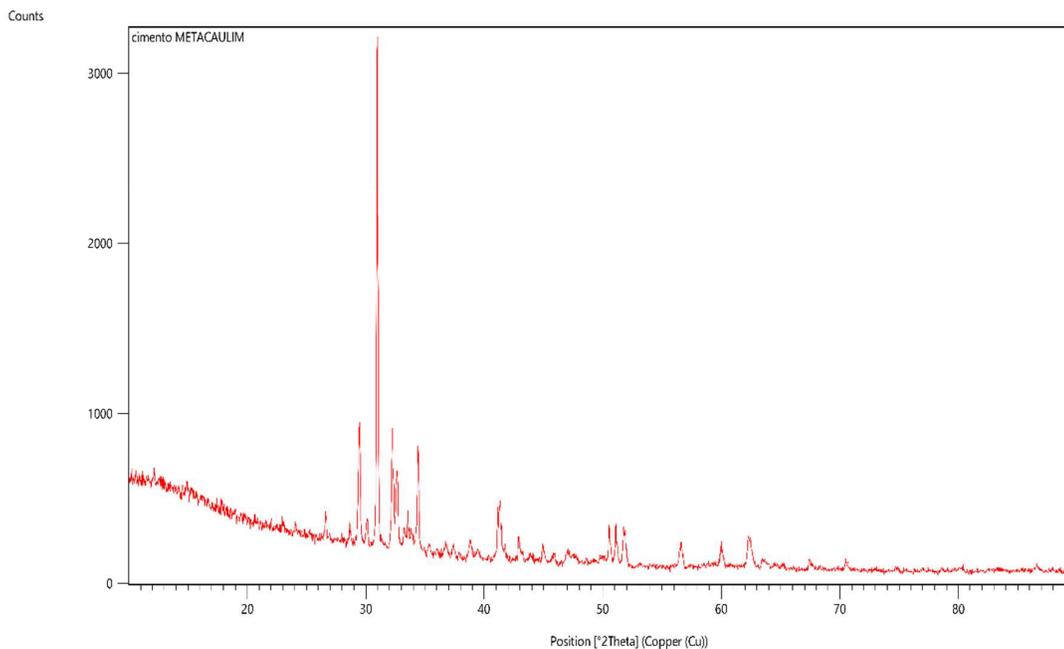


Figura B-18: Resultados de FRX para cimento META.

APÊNDICE C - DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES TRANSCENDENTAIS UTILIZADAS NO EMM-ARM

As deduções apresentadas neste apêndice são baseadas em Baker (1967), Clough e Penzien (2003) e Pedroso (2007).

EQUAÇÃO DE VIBRAÇÃO LIVRE DE UMA VIGA ESBELTA MODELADA COMO UM SISTEMA CONTÍNUO

Nas deduções apresentadas, considera-se a viga como uma viga esbelta (*i.e.* sua seção é muito menor que seu comprimento), o que permite desprezar os efeitos de rigidez ao cisalhamento e inércia à rotação que ocorrem nas chamadas vigas profundas. Utiliza-se, assim, as hipótese da teoria de vigas esbeltas de Euler-Bernouli.

O modelo analítico para este caso é apresentado na Figura C-1, no qual não são incluídas condições de contorno para maior generalidade das deduções.

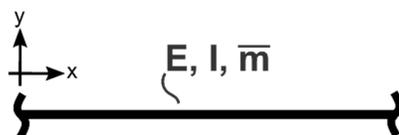


Figura C-1: Modelo analítico de vibração livre de uma viga considerada como sistema contínuo.

A equação de vibração livre de uma viga esbelta é:

$$\left(\frac{EI}{\bar{m}}\right) \cdot \frac{\partial^4 y_{(x,t)}}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 y_{(x,t)}}{\partial t^4} = 0 \quad (\text{C-1})$$

Em que: E é o módulo de elasticidade da viga; I é o momento de inércia da seção da viga; \bar{m} é a massa da viga por metro de comprimento; $y(x,t)$ é a função que define a coordenada y do ponto x da viga no instante t ; x define um ponto da seção média da viga, conforme o eixo de coordenadas da Figura C-1; e t define o instante t do movimento de vibração. Que é uma equação diferencial parcial de quarta ordem, com variáveis independentes x e t . Utilizando o método da separação de variáveis (KREYSZIG, 2011), pode-se escrever que:

$$y(x,t) = T(t) \cdot \phi(x) \quad (\text{C-2})$$

Em que $T(t)$ define a equação de vibração da viga no tempo e $\phi(x)$ define as deformadas modais da viga, isto é, a configuração geométrica de vibração na qual a viga vibrará em cada modo de vibração. Substituindo a equação (C-2) na equação (C-1), e executando manipulações algébricas, chega-se a:

$$\frac{1}{\phi_{(x)}} \cdot \frac{\partial^4 \phi_{(x)}}{\partial x^4} = -\frac{\bar{m}}{EI} \cdot \frac{1}{T_{(t)}} \cdot \frac{\partial^4 T_{(t)}}{\partial t^4} \quad (\text{C-3})$$

Como x e t são variáveis independentes, e, na equação (C-3), estas variáveis estão isoladas em lados diferentes da igualdade, a única forma de se satisfazer a igualdade de (C-3) para qualquer x e t é de que ambas as partes da equação sejam igual a uma constante, tal que:

$$\frac{1}{\phi_{(x)}} \cdot \frac{\partial^4 \phi_{(x)}}{\partial x^4} = -\frac{\bar{m}}{EI} \cdot \frac{1}{T_{(t)}} \cdot \frac{\partial^4 T_{(t)}}{\partial t^4} = a^4 \quad (\text{C-4})$$

Em que a^4 é uma constante, cujo expoente à quarta foi definido dessa forma por conveniência matemática, como há de se constatar ao longo da dedução. Sendo assim, da equação (C-4) é possível obter duas equações distintas, em função de x e t :

$$\ddot{T}(t) + \omega^2 \cdot T(t) = 0 \quad (\text{C-5})$$

$$\phi^{iv}(x) - a^4 \cdot \phi(x) = 0 \quad (\text{C-6})$$

Em que: $\ddot{T}(t)$ define a derivada de segunda ordem de $T(t)$ em relação ao tempo t , conforme convenção; $\omega^2 = a^4 EI / \bar{m}$, constante definida dessa forma por conveniência matemática, como há de se constatar ao longo da dedução; $\phi^{iv}(x)$ define a derivada de quarta ordem de $\phi(x)$ em relação à coordenada espacial x , conforme convenção.

A solução da equação (C-5), uma equação diferencial ordinária de segunda ordem a coeficientes constantes cuja solução pode ser obtida por inúmeros métodos de solução de equações diferenciais (*e.g.* método por tentativas ou transformada de Laplace), é a conhecida equação de vibração livre de um sistema de um único grau de liberdade, :

$$T(t) = A \cdot \cos(\omega t) + B \cdot \text{sen}(\omega t) = T(0) \cdot \cos(\omega t) + \frac{\dot{T}(0)}{\omega} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (\text{C-7})$$

Em que: $T(0)$ e $\dot{T}(0)$ são os valores da função $T(t)$ obtidos por meio das condições iniciais do problema, isto é, da configuração dinâmica da viga no início da vibração (amplitude inicial e aceleração inicial). Da equação (C-7), nota-se que a constante ω , definida anteriormente como $\omega^2 = a^4 EI / \bar{m}$, define as frequências naturais de vibração da viga, sendo dependente da variável a^4 que se relaciona ao modo de vibração considerado a partir da solução da equação (C-6).

A equação (C-6) é uma equação diferencial ordinária de quarta ordem a coeficientes constantes, podendo ser resolvida por substituição direta da solução geral na forma:

$$\phi(x) = G \cdot e^{s \cdot x} \quad (C-8)$$

Em que G e s sendo constantes complexas (*i.e.* $G = G_R + iG_i$ e $s = s_R + is_i$). Substituindo essa solução na equação (C-6), chega-se a:

$$\begin{aligned} s^4 \cdot G \cdot e^{s \cdot x} - a^4 \cdot G \cdot e^{s \cdot x} &= 0 \\ (s^4 - a^4) \cdot G \cdot e^{s \cdot x} &= 0 \end{aligned} \quad (C-9)$$

E, portanto:

$$\begin{aligned} s_{1,2} &= \pm i \cdot a \\ s_{3,4} &= \pm a \end{aligned} \quad (C-10)$$

Substituindo estes valores de s na equação (C-8), chega-se a:

$$\phi(x) = G_1 \cdot e^{-i \cdot a \cdot x} + G_2 \cdot e^{i \cdot a \cdot x} + G_3 \cdot e^{a \cdot x} + G_4 \cdot e^{-a \cdot x} \quad (C-11)$$

Substituindo-se as seguintes identidades na equação (C-11):

$$\begin{aligned} e^{i \cdot x} &= \cos(x) + i \cdot \text{sen}(x) \\ e^{-x} &= \cos(x) - i \cdot \text{sen}(x) \\ e^{a \cdot x} &= \text{senh}(a \cdot x) + \text{cosh}(a \cdot x) \end{aligned} \quad (C-12)$$

E considerando que $\phi(x)$ é uma função real, sendo necessário, portanto, que todas as suas partes imaginárias sejam iguais a zero, e, ainda, lembrando que G_n são variáveis complexas, chega-se à forma geral da equação de deformada modal, $\phi(x)$, para uma viga esbelta sob vibração livre:

$$\phi(x) = A_1 \cdot \cos(a \cdot x) + A_2 \cdot \text{sen}(a \cdot x) + A_3 \cdot \text{cosh}(a \cdot x) + A_4 \cdot \text{senh}(a \cdot x) \quad (C-13)$$

Em que os valores A_n são obtidos a partir das manipulações e simplificações da equação (C-11) com as partes reais das variáveis complexas G_n , e a é a mesma constante a^4 definida no início desta dedução.

Os valores de a e A_n são definidos a partir das condições de contorno do problema. No caso em questão, estas condições de contorno são definidas pelas condições de apoio da viga. Nos problemas de vigas isostáticas, obtém-se somente quatro condições de contorno, o que não permite a definição das cinco constantes a e A_n . No entanto, deve-se lembrar que a função $\phi(x)$ é adimensional, pois somente estabelece a configuração geométrica de vibração da viga para um dado modo de vibração definido pelo valor de a selecionado, sendo a função $T(t)$ a responsável por “escalar”, isto é, dar escala e dimensão ao movimento de vibração da viga.

Sendo assim, para sua completa definição basta-se definir os valores de três variáveis A_n , o que já é suficiente para definir a configuração geométrica relativa entre os pontos da viga.

EQUAÇÃO TRANSCENDENTAL DO CASO DE UMA VIGA ESGASTADA E LIVRE COM UMA MASSA CONCENTRADA NA PONTA

O modelo analítico deste problema é apresentado na Figura C-2. A análise é feita a partir da configuração inicialmente deformada devido às cargas estáticas do sistema (massa concentrada e peso próprio da viga), e, portanto, tais ações não aparecem nas análises feitas. Como, no EMM-ARM, a análise da primeira frequência natural já basta para a determinação do módulo de elasticidade, a análise engloba apenas este modo de vibração. A dedução apresentada se baseia em Pedroso (2015) e Clough e Penzien (2003).

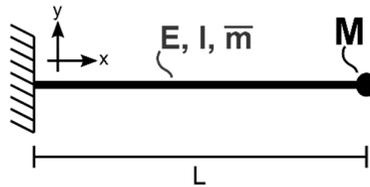


Figura C-2: Modelo analítico de uma viga esbelta engastada e livre com massa concentrada na extremidade livre.

A primeira condição de contorno pode ser obtida considerando o apoio de engaste, no qual as condições são de deslocamento vertical nulo (equação (C-23)), devido à restrição do apoio, e de rotação nula da seção transversal (equação (C-24)). Considerando o sistema de eixos indicado na Figura C-2, tem-se:

$$\phi(0) = 0 \quad (C-14)$$

$$\phi'(0) = 0 \quad (C-15)$$

Em que $\phi^i(x)$ define a derivada de primeira ordem de $\phi(x)$ em relação à coordenada espacial x , conforme convenção. As demais condições de contorno são obtidas analisando-se a extremidade livre, conforme apresentado na Figura C-5.

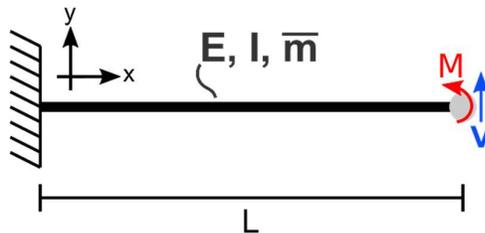


Figura C-3: Condição de contorno na seção central da viga biapoiada.

Nesta extremidade, ao contrário do caso sem massa concentrada, os esforços de momento e cortante não são mais nulos devido à inércia da massa: devido à aceleração causada durante a vibração da viga, a massa é acelerada também, havendo uma inércia à rotação e uma inércia à translação que provocam, respectivamente, uma carga momento e uma força concentrada na extremidade livre. Assim, as condições de contorno ficarão:

$$M = E \cdot I \cdot \phi''(L) = \omega^2 \cdot \phi'(L) \cdot J \quad (\text{C-16})$$

$$V = E \cdot I \cdot \phi'''(L) = \frac{M}{2} \cdot \phi(L) \cdot \omega^2 \quad (\text{C-17})$$

Em que: $\phi''(x)$ define a derivada de segunda ordem de $\phi(x)$ em relação à coordenada espacial x , conforme convenção; $\phi'''(x)$ definem, respectivamente, as derivadas de primeira e segunda ordem da deformada modal $\phi(x)$; e J é o momento de inércia de massa da massa concentrada, em relação ao seu eixo de rotação que, no caso estudado, está localizado sobre o ponto da extremidade livre da viga. Ao se modelar a massa concentrada como uma esfera sólida, de raio r e massa m , vinculada à extremidade livre da viga pelo seu centro, seu momento de inércia de massa para o caso de vibração em questão é:

$$J = \frac{2}{5} \cdot m \cdot r^2 \quad (\text{C-18})$$

Nos casos utilizados no EMM-ARM, como a massa concentrada é de pequenas dimensões geométricas, $r \ll 1$ e, portanto, $r^2 \rightarrow 0$. Assim, é razoável a hipótese de se desprezar sua inércia à rotação e, portanto, considerar o momento fletor na extremidade livre como sendo zero. As condições de contorno efetivamente utilizadas são, portanto:

$$\phi''(L) = 0 \quad (\text{C-19})$$

$$E \cdot I \cdot \phi'''(L) = -\frac{M}{2} \cdot \phi(L) \cdot \omega^2 \quad (\text{C-20})$$

A imposição, na equação (C-13), das condições de contorno descritas pelas equações (C-23), (C-24), (C-28) e (C-29), e a subsequente manipulação algébrica dos termos, procedendo com a simplificação de que $A_3 = -A_1$ e $A_4 = -A_2$, leva ao sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} \text{Exp.1} & \text{Exp.2} \\ \text{Exp.3} & \text{Exp.4} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{Exp.1: } & \cos(aL) + \cosh(aL) \\ \text{Exp.2: } & \sin(aL) + \sinh(aL) \\ \text{Exp.3: } & a^3 \cdot (-\sinh(aL) + \sin(aL)) - = + \frac{m_1 \omega^2}{EI} \cdot (\cos(aL) - \cosh(aL)) \\ \text{Exp.4: } & -a^3 \cdot (\cos(aL) + \cosh(aL)) + \frac{m_1 \omega^2}{EI} \cdot (\sin(aL) - \sinh(aL)) \end{aligned} \quad (\text{C-21})$$

Para este sistema possuir solução não-trivial, o seu determinante deve ser igual ao zero. Esta condição leva à equação transcendental, ou equação de frequência, de vibração livre de uma viga engastada e livre com massa concentrada na sua extremidade livre, desprezando-se a inércia à rotação da massa:

$$a^3 \cdot (\cosh(aL) \cdot \cos(aL) + 1) + \frac{M \cdot \omega^2}{EI} \cdot (\sinh(aL) \cdot \cos(aL) - \cosh(aL) \cdot \sin(aL)) = 0 \quad (\text{C-22})$$

EQUAÇÃO TRANSCENDENTAL DO CASO DE UMA VIGA BIAPOIADA COM UMA MASSA RÍGIDA CONCENTRADA NO SEU CENTRO

O modelo analítico deste problema é apresentado na Figura C-4. A análise é feita a partir da configuração inicialmente deformada devido às cargas estáticas do sistema (massa concentrada e peso próprio da viga), e, portanto, tais ações não aparecem nas análises feitas. Como, no EMM-ARM, a análise da primeira frequência natural já basta para a determinação do módulo de elasticidade, a análise engloba apenas os modos simétricos de vibração, nos quais está incluso o primeiro modo. A dedução apresentada se baseia em Baker (1967).

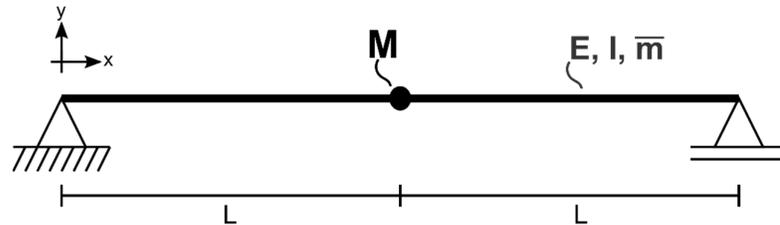


Figura C-4: Modelo analítico de uma viga esbelta biapoada com massa concentrada no centro.

Considerando a simetria do problema em relação à massa concentrada, a primeira condição de contorno, válida tanto para modos simétricos quanto assimétricos, pode ser obtida considerando qualquer um dos apoios simples, nos quais as condições são de deslocamento vertical nulo (equação (C-23)), devido à restrição do apoio, e de momento nulo (equação

(C-24)), pois os apoios são de primeiro e segundo gênero respectivamente. Observando o sistema de eixos indicado na Figura C-4, analisando o primeiro apoio à esquerda tem-se:

$$\phi(0) = 0 \quad (C-23)$$

$$\phi''(0) = 0 \quad (C-24)$$

Para se analisar as demais condições de contorno, deve-se considerar a seção de massa concentrada, que para o primeiro modo de vibração, embora a análise sirva para todos os modos simétricos, tem a configuração geral ilustrada na Figura C-5.

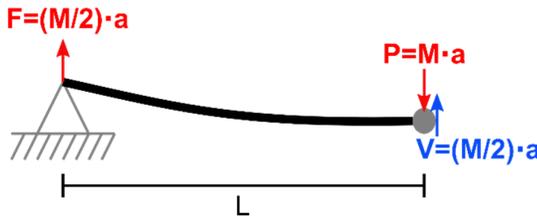


Figura C-5: Condição de contorno na seção central da viga biapoiada.

Em que: a força F representa a reação de apoio, a força P representa a força dinâmica concentrada introduzida pela massa concentrada, e a força V representa a força de cisalhamento na seção central. A força P introduzida pela massa é causada pela sua inércia ao movimento, sendo, portanto, dependente de sua aceleração que, supondo um vínculo perfeito da massa à viga, deve ser idêntica à aceleração $a(x=L, t)$ do ponto $x=L$ da viga. Assim:

$$V(x=L, t) = \frac{M}{2} \cdot \ddot{v}(x=L, t) = \frac{M}{2} \cdot \frac{d^2 T(t)}{dt^2} \cdot \phi(x=L) = \frac{M}{2} \cdot \phi(x=L) \cdot \omega^2 \cdot T(t) \quad (C-25)$$

Em que a relação $d^2 T(t)/dt^2 = \omega^2 T(t)$ pode ser constatada a partir da equação (C-7). A presença do termo $T(t)$ representa a variação da força cortante durante a vibração da viga. Como a análise em relação à deformada modal $\phi(x)$ independe da variável t , pode-se considerar este termo como unitário ao se analisar um instante t específico no qual tal hipótese seja verdadeira. Isto não impõe restrições à análise realizada pois, novamente, a função $\phi(x)$ representa a configuração geométrica de vibração da viga, cuja relação de posição entre os pontos é válida para todos os instantes de tempo, sendo, portanto, independente destes. Portanto:

$$V(x=L) = \frac{M}{2} \cdot \phi(L) \cdot \omega^2 \quad (C-26)$$

Assim, considerando a seção central da viga biapoiada, pode-se definir a condição de rotação igual a zero (equação (C-27)), devido à simetria do problema, e a condição de

cisalhamento igual ao cisalhamento indicado na Figura C-5 (equação (C-28)), obtido pelas equações de equilíbrio estático da viga:

$$\phi^i(L) = 0 \quad (\text{C-27})$$

$$V = E \cdot I \cdot \phi^{iii}(L) = \frac{M}{2} \cdot \phi(L) \cdot \omega^2 \quad (\text{C-28})$$

A imposição, na equação (C-13), das condições de contorno descritas pelas equações (C-23), (C-24), (C-27) e (C-28), e a subsequente manipulação algébrica dos termos, procedendo com a eliminação dos termos A_1 e A_3 que são identificados como nulos, leva ao sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} \cos(aL) & \cosh(aL) \\ -a^3 \cdot \cosh(aL) + \frac{m \cdot \omega^2}{2EI} \cdot \sen(aL) & a^3 \cdot \cosh(aL) + \frac{m \cdot \omega^2}{2EI} \cdot \senh(aL) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_2 \\ A_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{C-29})$$

Para este sistema possuir solução não-trivial, o seu determinante deve ser igual ao zero. Esta condição leva à equação transcendental, ou equação de frequência, dos modos simétricos de vibração livre de uma viga biapoiada com massa concentrada na sua seção central:

$$a^3 \cdot \cosh(aL) \cdot \cos(aL) + \frac{M \cdot \omega^2}{4EI} \cdot (\senh(aL) \cdot \cos(aL) - \cosh(aL) \cdot \sen(aL)) = 0 \quad (\text{C-30})$$

APÊNDICE D - REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS DOS RESULTADOS OBTIDOS NA VALIDAÇÃO DO ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO MODAL

As representações gráficas obtidas em cada método de identificação modal utilizado na validação do algoritmo de identificação modal são apresentadas da Figura D-1 a Figura D-4.

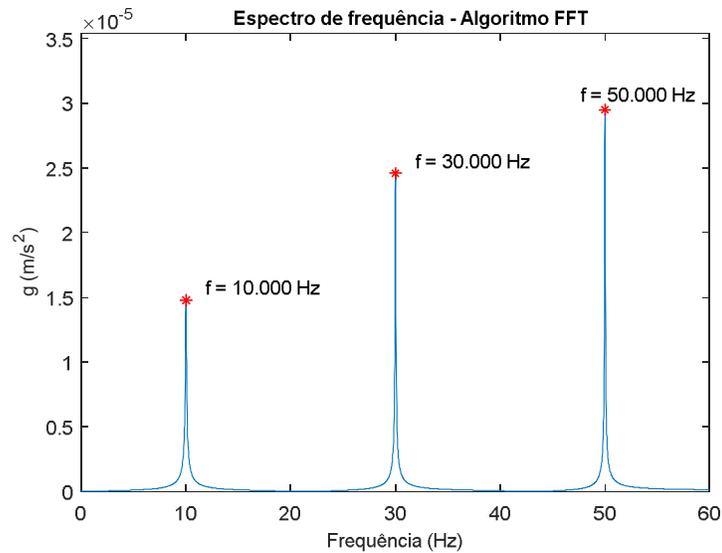


Figura D-1: Representação gráfica do resultado do método *peak-picking* no resultado da DFT obtido pelo algoritmo FFT.

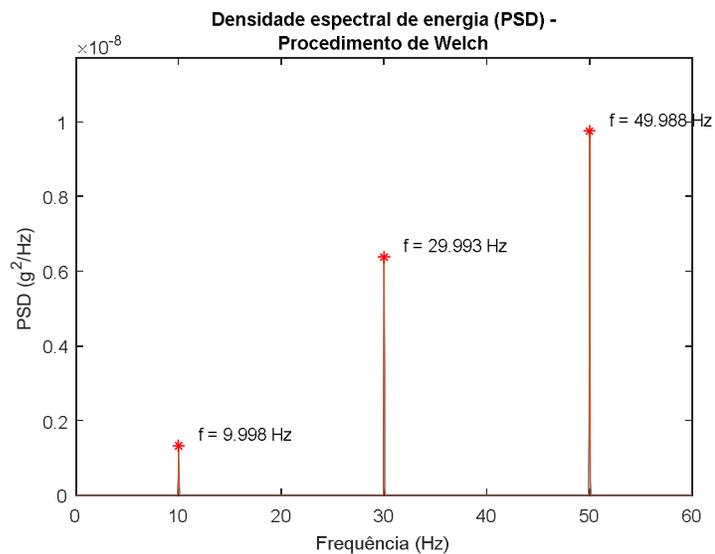


Figura D-2: Representação gráfica do resultado do método *peak-picking* no resultado do PSD obtido pelo procedimento de Welch.

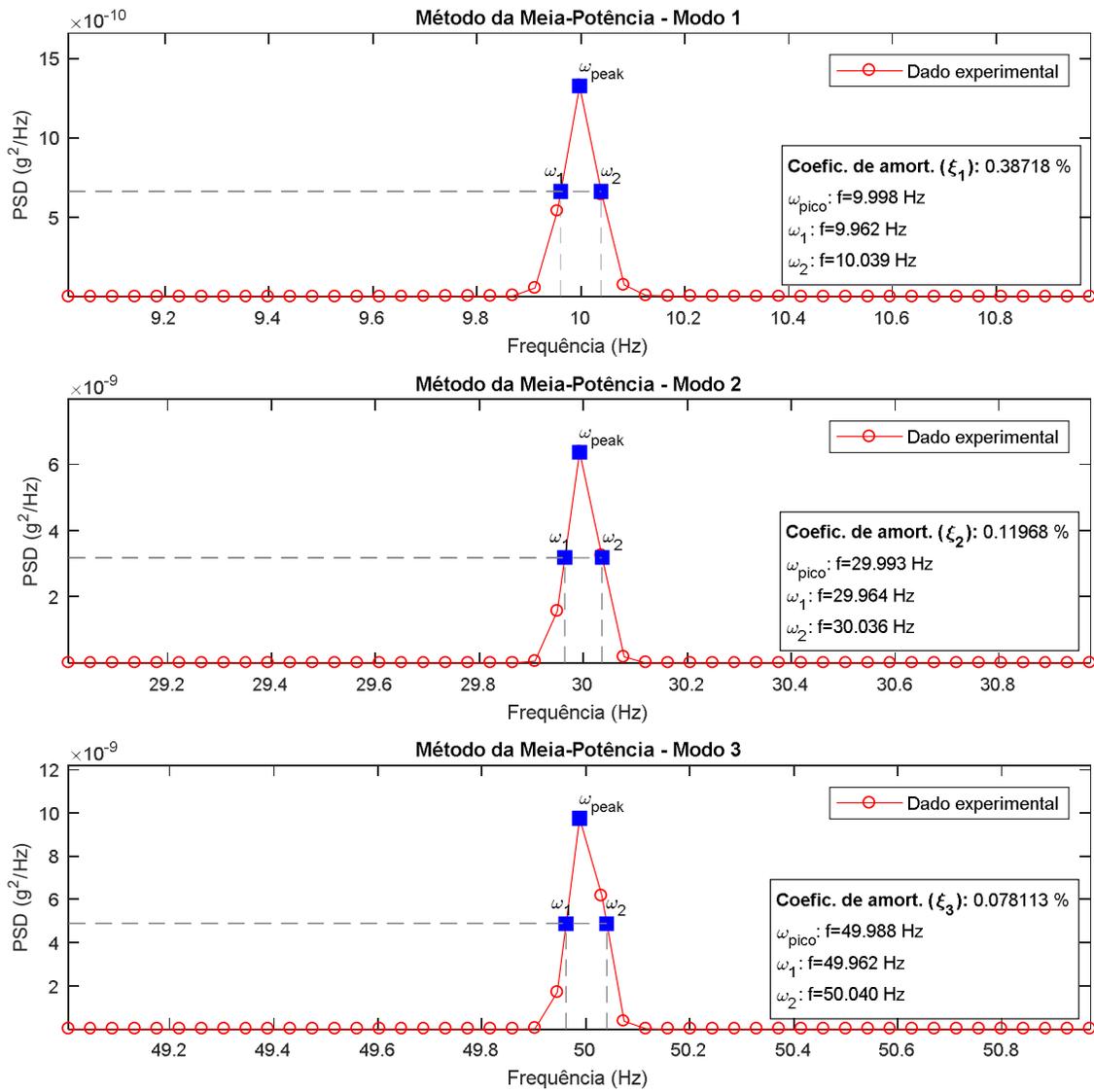


Figura D-3: Representação gráfica dos resultados do método da Meia-Potência aplicado aos três picos de frequência identificados no sinal.

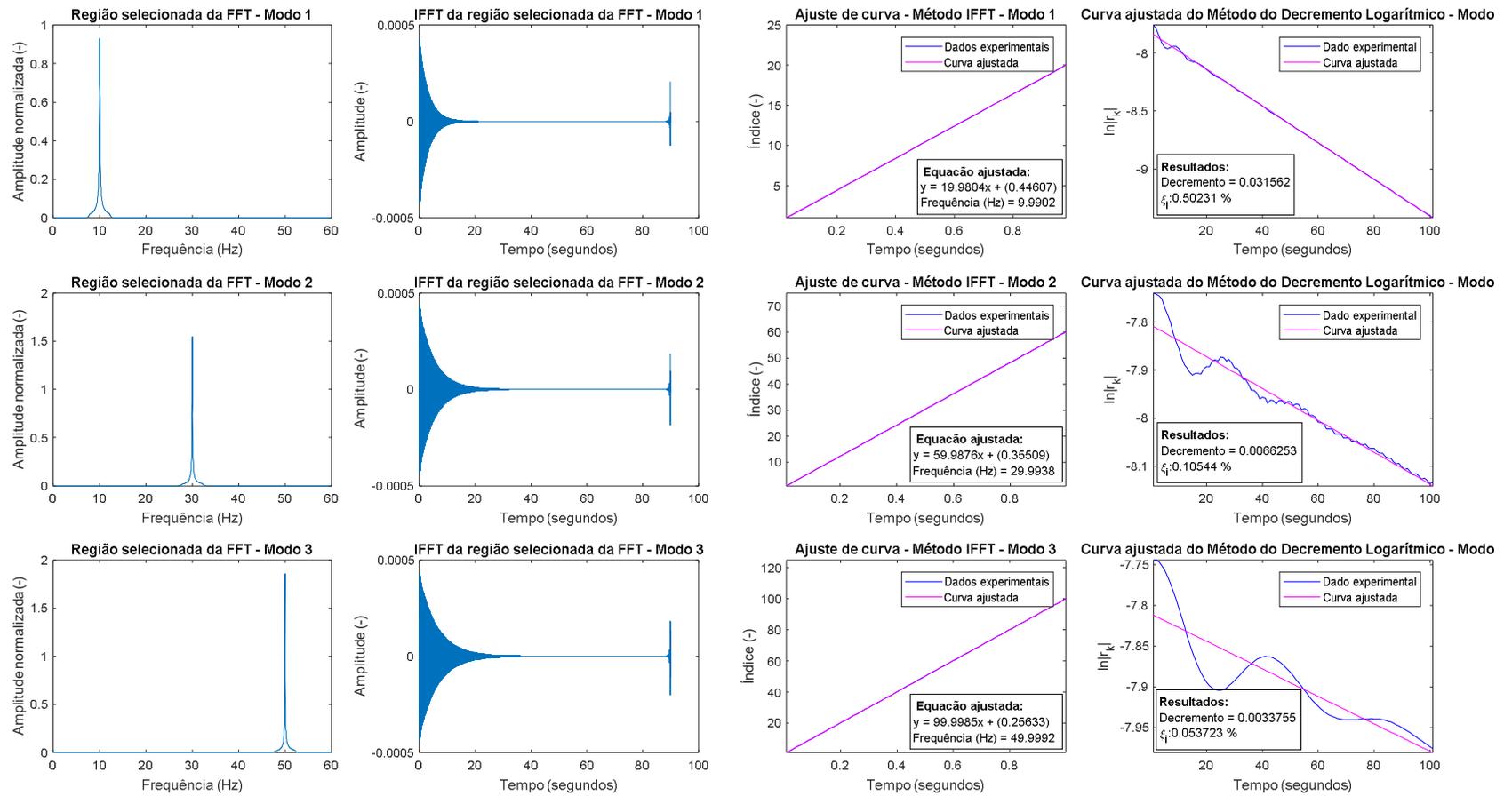


Figura D-4: Representação gráfica dos resultados do método IFT aplicado aos três picos de frequência identificados no sinal.

APÊNDICE F - ESPECTROS DE FREQUÊNCIA PRODUZIDOS NA AVALIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM DO SISTEMA

Os espectros de frequência produzidos na avaliação da estabilidade de frequência de amostragem do sistema de aquisição de dados, são apresentados da Figura F-1 a Figura F-8. A instabilidade na frequência de amostragem introduz ruídos no sinal inexistentes nas figuras do APÊNDICE D, e que causam imprecisões na identificação modal realizada.

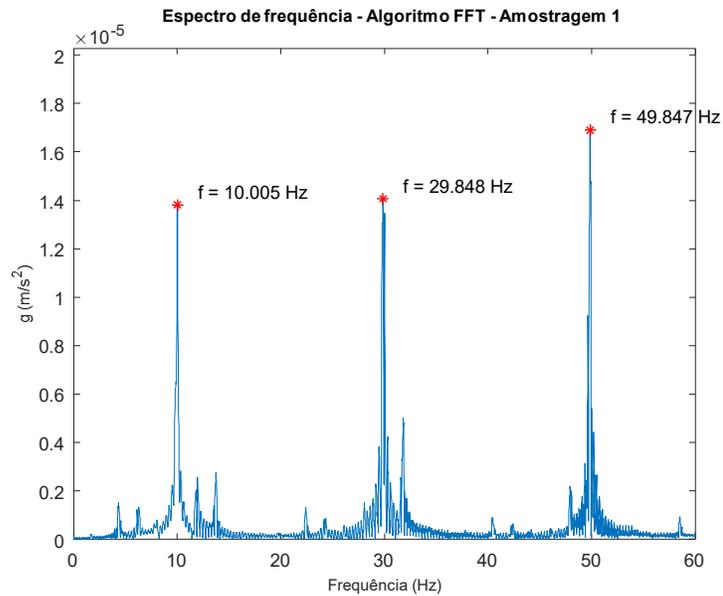


Figura F-1: Espectro de frequência obtido pelo algoritmo FFT do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 1.

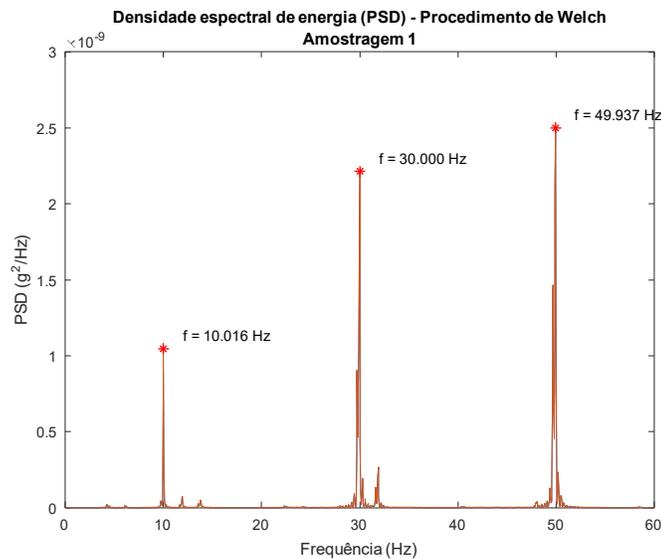


Figura F-2: PSD obtido pelo procedimento de Welch do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 1.

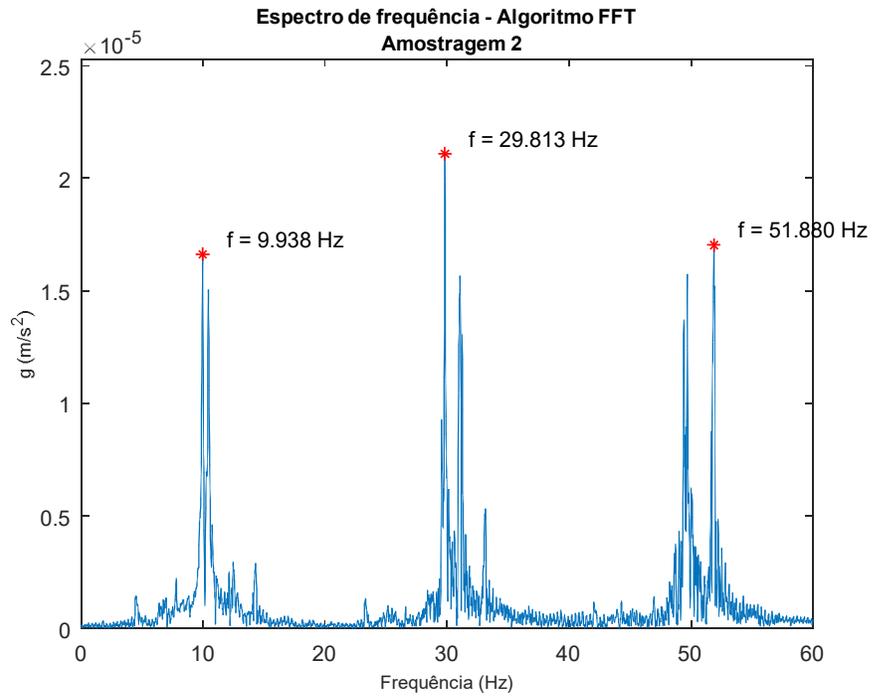


Figura F-3: Espectro de frequência obtido pelo algoritmo FFT do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 2.

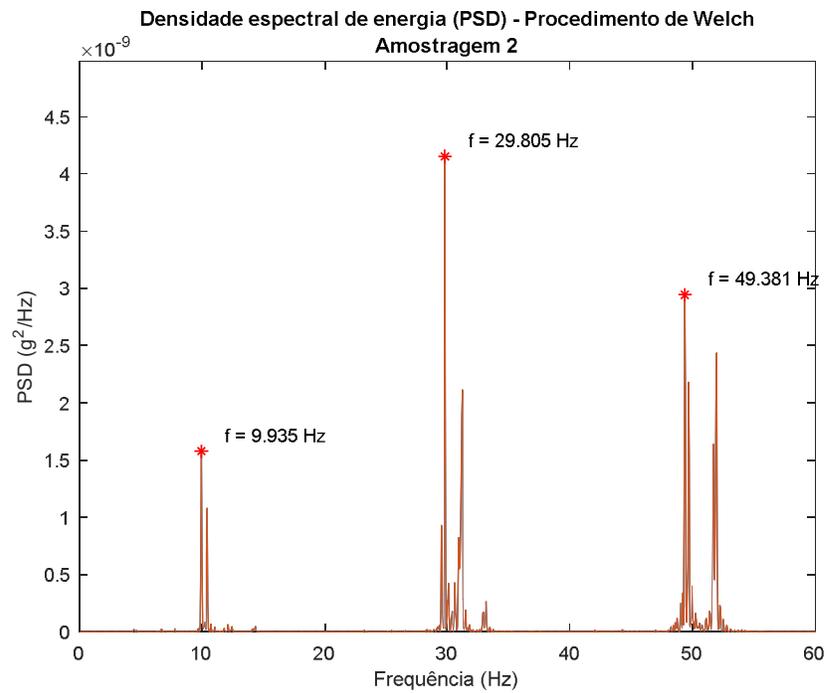


Figura F-4: PSD obtido pelo procedimento de Welch do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 2.

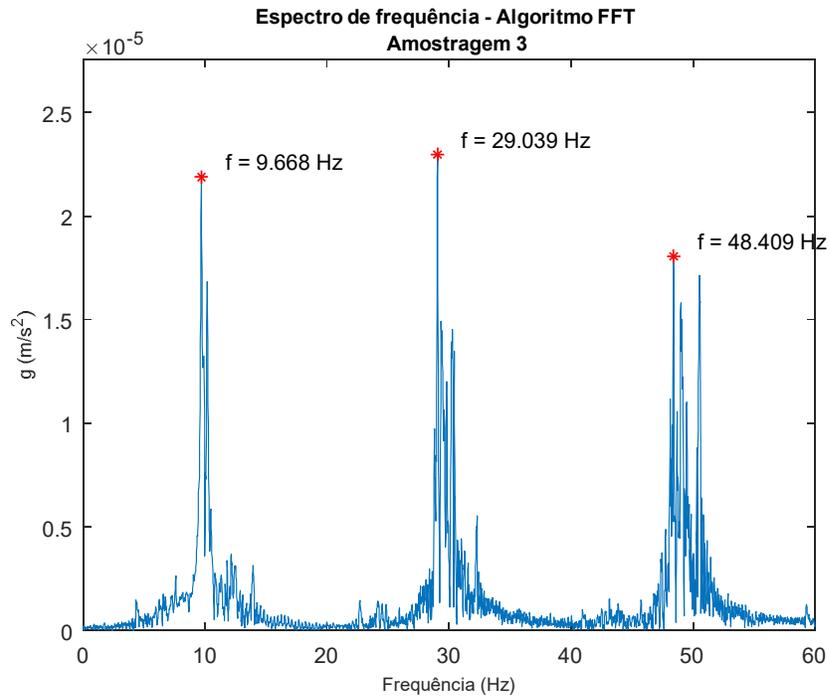


Figura F-5: Espectro de frequência obtido pelo algoritmo FFT do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 3.

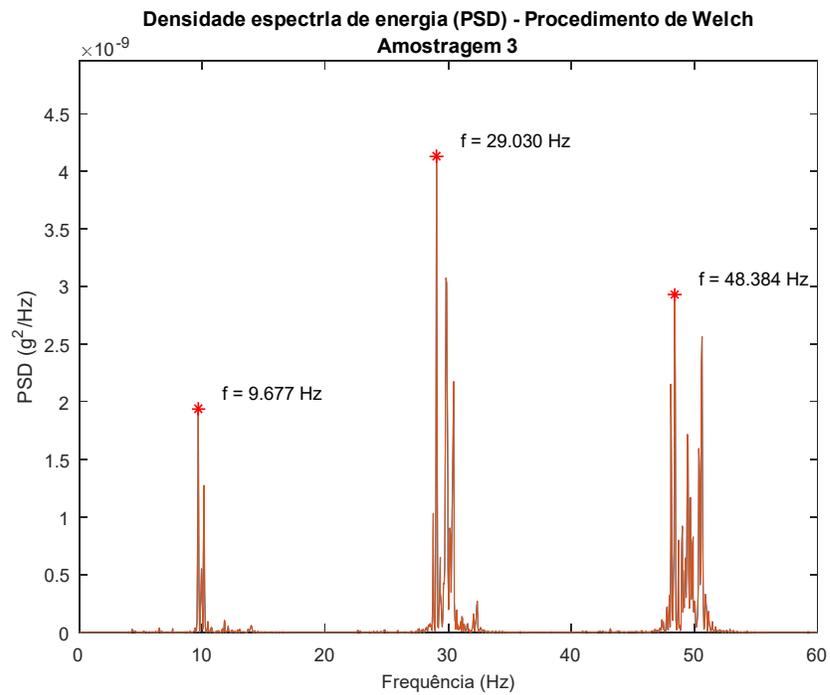


Figura F-6: PSD obtido pelo procedimento de Welch do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 3.

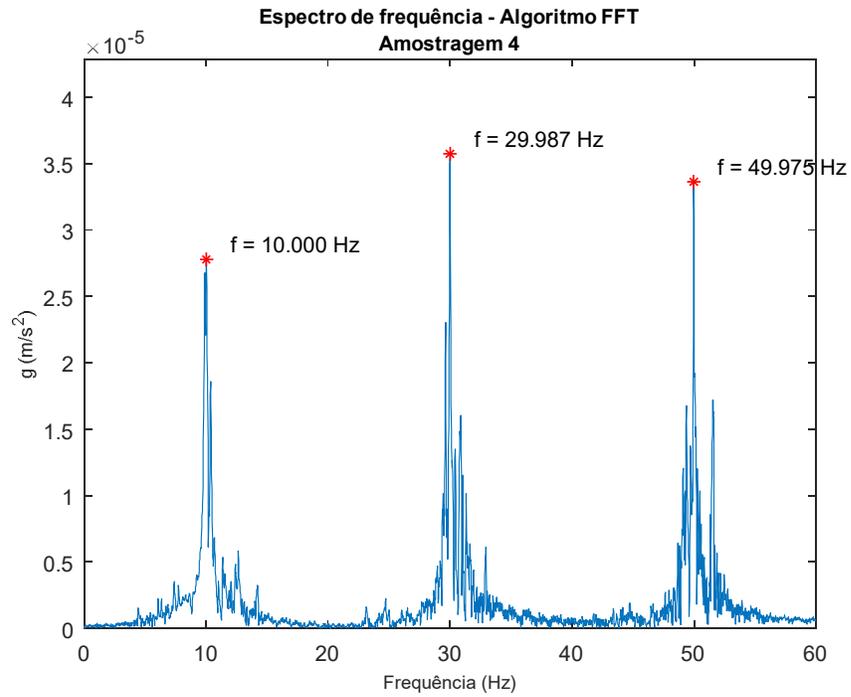


Figura F-7: Espectro de frequência obtido pelo algoritmo FFT do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 4.

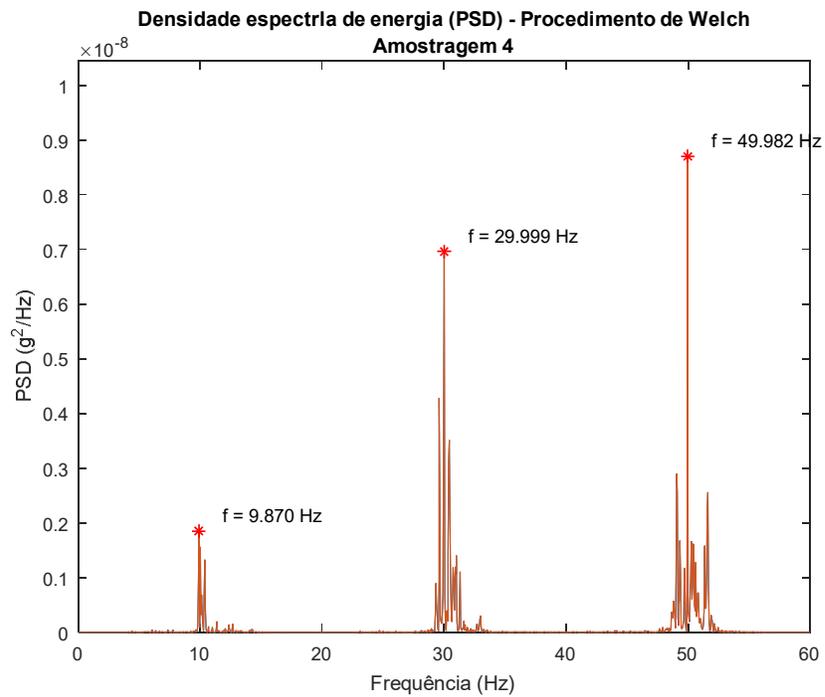


Figura F-8: PSD obtido pelo procedimento de Welch do sinal amostrado com a série de intervalos entre amostras da Amostragem 4.

APÊNDICE G - IDENTIFICAÇÃO DE DADOS ABERRANTES NA DETERMINAÇÃO DA PRECISÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A Tabela G:1 e a Figura G-1, Figura G-2 e Figura G-3 apresentam os resultados da análise de aberrantes pelos testes de consistência gráfica de Mandel. Observa-se que apenas o Sistema 4, no nível 1, e o Sistema 3, no nível 3, apresentaram dados suspeitos para a estatística k de Mandel. Apesar disso, como os valores da estatística foram razoavelmente próximos do valor crítico, e nenhuma outro teste detectou aberrantes, estes dados foram mantidos na integralidade.

Tabela G:1: Técnicas de consistência gráfica de Mandel para identificação de médias e desvios-padrão aberrantes.

	Nível 1				Nível 2				Nível 3			
	Sis.1	Sis.2	Sis. 3	Sis. 4	Sis.1	Sis.2	Sis. 3	Sis. 4	Sis.1	Sis.2	Sis. 3	Sis. 4
h de Mandel	1,014	-1,349	0,386	-0,050	0,118	-1,294	1,145	0,030	1,279	-0,230	0,093	-1,142
h - valor crítico - 1%	1,485	1,485	1,485	1,485	1,485	1,485	1,485	1,485	1,485	1,485	1,485	1,485
h - valor crítico - 5%	1,425	1,425	1,425	1,425	1,425	1,425	1,425	1,425	1,425	1,425	1,425	1,425
k de Mandel	0,920	0,868	0,798	1,328	0,992	1,041	1,004	0,960	1,041	1,014	1,189	0,689
k - valor crítico - 1%	1,412	1,412	1,412	1,412	1,120	1,120	1,120	1,120	1,245	1,245	1,245	1,245
k - valor crítico - 5%	1,295	1,295	1,295	1,295	1,085	1,085	1,085	1,085	1,173	1,173	1,173	1,173

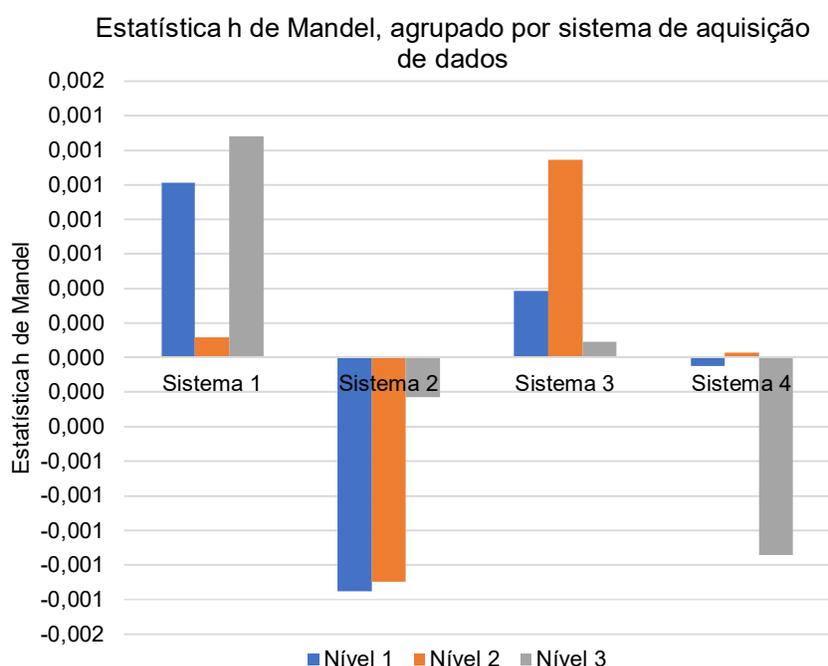


Figura G-1: Visualização gráfica da estatística h de Mandel, agrupada por sistema de aquisição de dados.

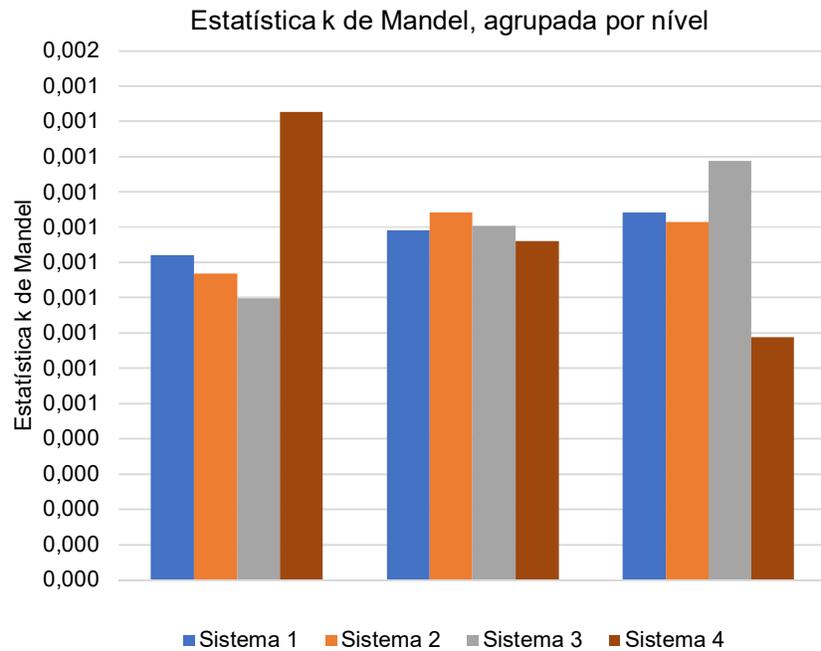


Figura G-2: Visualização gráfica da estatística k de Mandel, agrupada por nível de frequência natural do tubo.

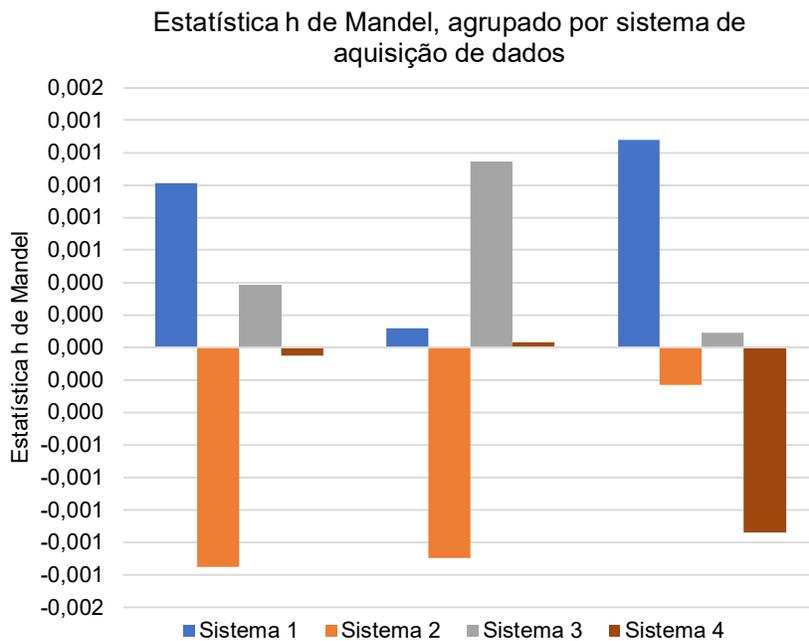


Figura G-3: Visualização gráfica da estatística k de Mandel, agrupada por sistema de aquisição de dados.

A Tabela G:2, Tabela G:3 e Tabela G:4 apresentam, respectivamente, os resultados das análises pelo teste de Cochran e Grubbs com um e dois dados extremos. Nenhum teste apontou dados aberrantes ou suspeitos.

Tabela G:2: Teste de Cochran para análise da variabilidade dentro de cada laboratório.

	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Laboratório escolhido	Sistema 4	Sistema 2	Sistema 3
C	0,4407347	0,2709622	0,3532622
p	4	4	4
n	11	137	32
Ccrit (1%)	0,5536032	0,3274377	0,4183236
Ccrit (5%)	0,4883861	0,311077	0,3818712

Tabela G:3: Teste de Grubbs para identificação de amostras extremas aberrantes, considerando um dado extremo.

	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 1	Nível 2	Nível 3
O que se testa?	Média	Média	Média	Média	Média	Média
Dois maiores ou menores?	Maior	Maior	Maior	Menor	Menor	Menor
Dado escolhido	Sistema 2	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 1	Sistema 3	Sistema 1
G	1,349382	1,2935581	1,2786601	1,013642	1,1453832	1,2786601
p	4	4	4	4	4	4
Gcrit (1%)	1,4925	1,4925	1,4925	1,4925	1,4925	1,4925
Gcrit (5%)	1,4625	1,4625	1,4625	1,4625	1,4625	1,4625

Tabela G:4: Teste de Grubbs para identificação de amostras extremas aberrantes, considerando dois dados extremos.

	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 1	Nível 2	Nível 3
O que se testa?	Média	Média	Média	Média	Média	Média
Dois maiores ou menores?	Maiores	Maiores	Maiores	Menores	Maiores	Maiores
Laboratório escolhido 1	Sistema 1	Sistema 1	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 2	Sistema 2
Laboratório escolhido 1	Sistema 3	Sistema 3	Sistema 3	Sistema 4	Sistema 4	Sistema 4
p	4	4	4	4	4	4
$\bar{x}_{p-1,p}$	19,728821	30,647943	23,739431	19,836312	30,74338	23,957849
$s_{p-1,p}^2$	0,0049742	0,0050022	0,0105195	0,0011607	0,0030134	0,0178024
G	0,281199	0,29212	0,1383624	0,0656136	0,1759777	0,2341547
f(n) - 1%	0,9691	0,9691	0,9691	0,9691	0,9691	0,9691
f(n) - 5%	1,3553	1,3553	1,3553	1,3553	1,3553	1,3553
Gcrit (1%)	2,662E-05	2,662E-05	2,662E-05	2,662E-05	2,662E-05	2,662E-05
Gcrit (5%)	0,0003425	0,0003425	0,0003425	0,0003425	0,0003425	0,0003425

APÊNDICE H - GRÁFICOS DE ESTIMATIVA DO TEMPO DE FIM DE PEGA DOS CIMENTOS ESTUDADOS

As estimativas de tempo de fim de pega baseando-se na curva da primeira derivada da evolução do módulo de elasticidade são apresentadas da Figura H-1 a Figura H-8.

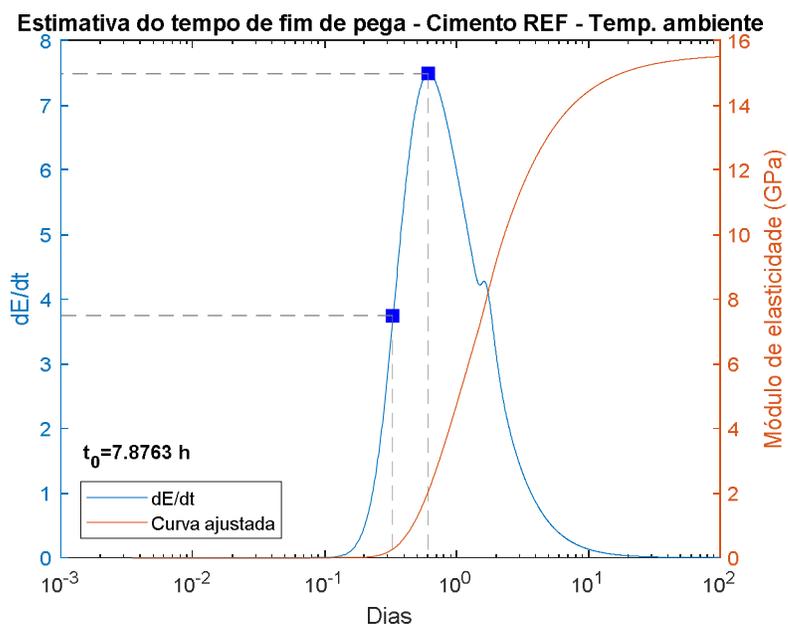


Figura H-1: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento REF à temperatura ambiente.

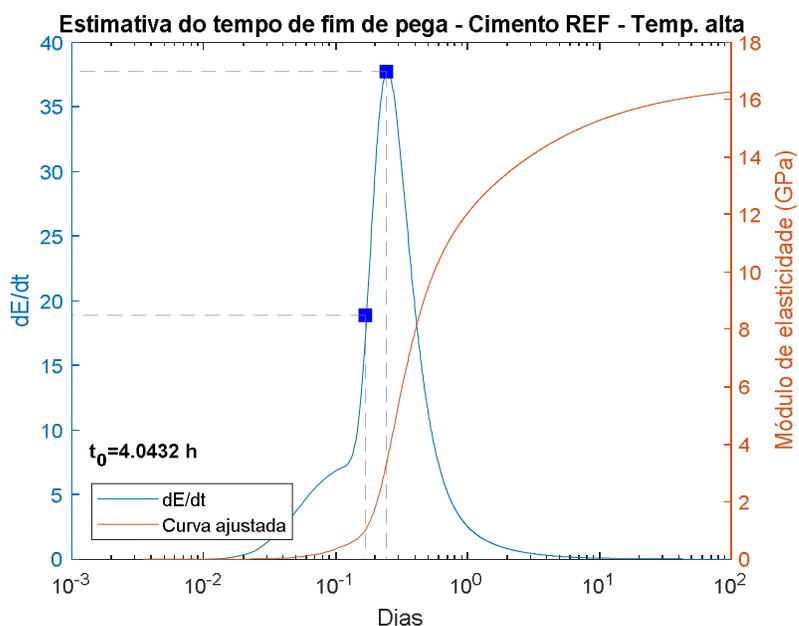


Figura H-2: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento REF à temperatura alta.

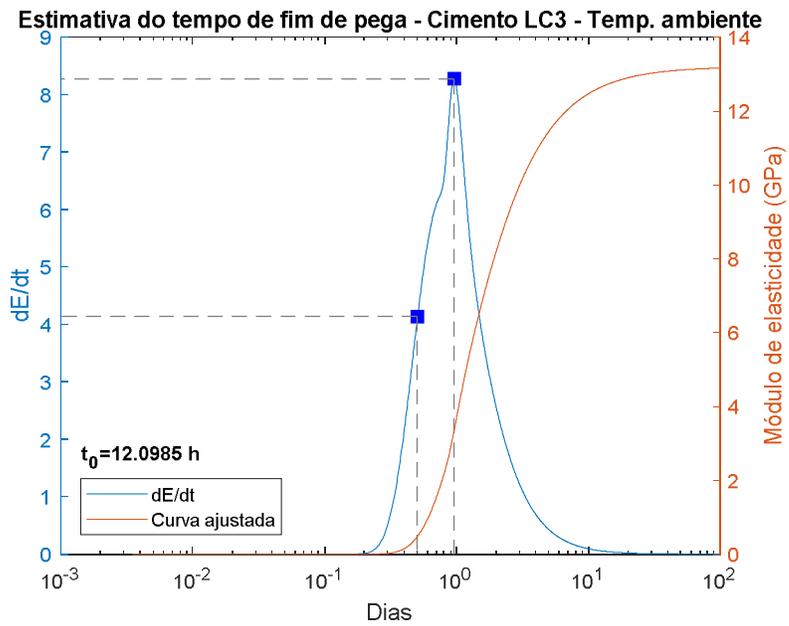


Figura H-3: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento LC3 à temperatura ambiente.

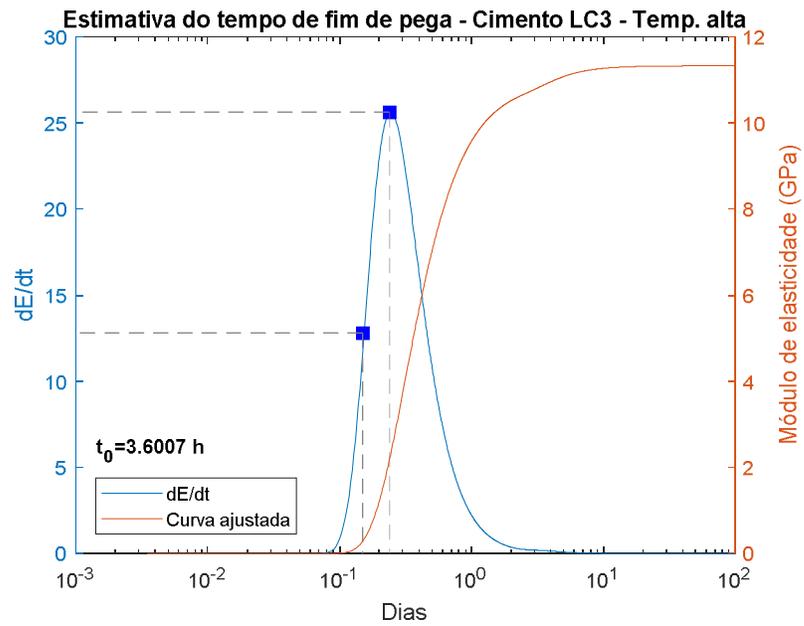


Figura H-4: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento LC3 à temperatura alta.

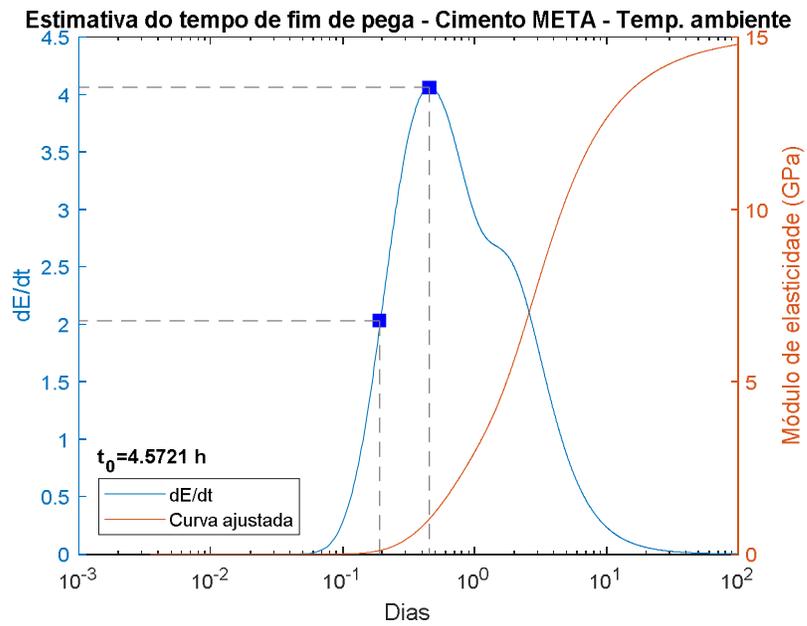


Figura H-5: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento META à temperatura ambiente.

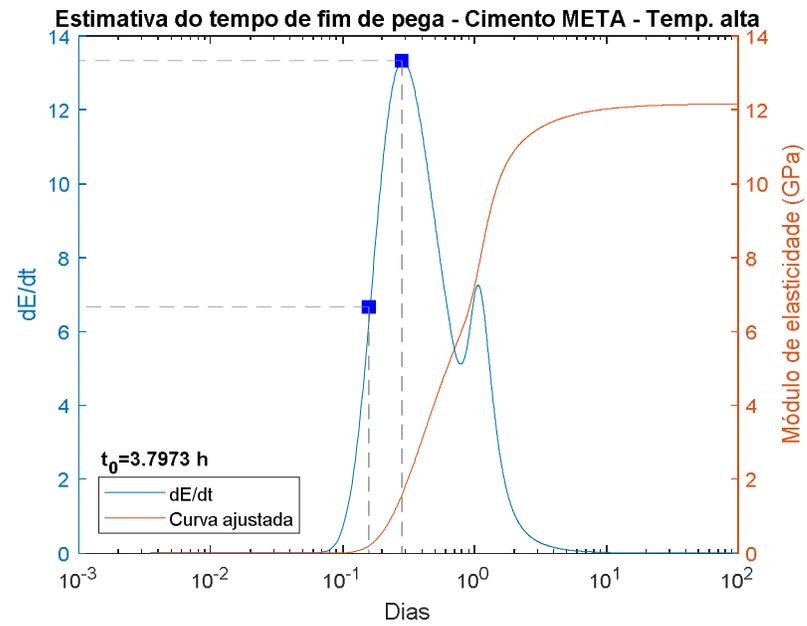


Figura H-6: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento META à temperatura alta.

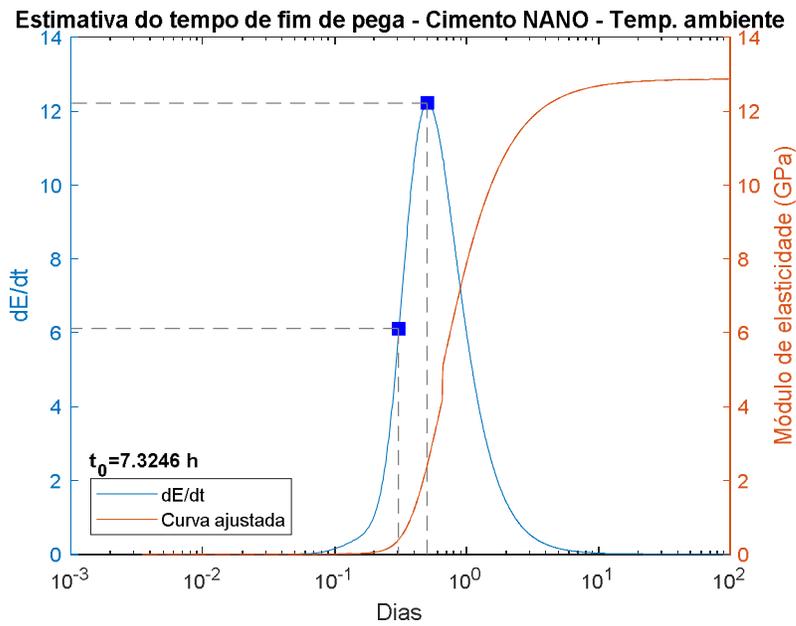


Figura H-7: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento NANO à temperatura ambiente.

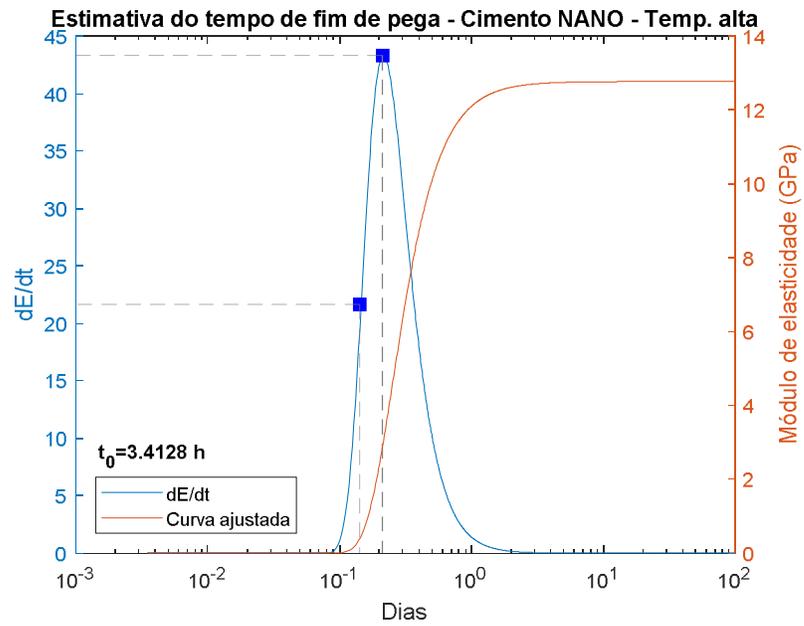


Figura H-8: Estimativa do tempo de fim de pega do cimento NANO à temperatura alta.

Página intencionalmente deixada em branco.