



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ISMARA SIMÃO CURI ARANTES

**MONITORAMENTO DA EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DO CONCRETO POR MEIO DA TÉCNICA
DE IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA**

Uberlândia, 2021

ISMARA SIMÃO CURI ARANTES

**MONITORAMENTO DA EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DO CONCRETO POR MEIO DA TÉCNICA
DE IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas e Construção Civil

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Leila Aparecida de Castro Motta

Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Raquel Naiara Fernandes Silva

Uberlândia, 2021

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A662 2021	<p>Arantes, Ismara Simão Curi, 1990- Monitoramento da evolução da resistência à compressão do concreto por meio da técnica de impedância eletromecânica [recurso eletrônico] / Ismara Simão Curi Arantes. - 2021.</p> <p>Orientadora: Leila Aparecida de Castro Motta. Coorientadora: Raquel Naiara Fernandes Silva. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.480 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia civil. I. Motta, Leila Aparecida de Castro, 1970-, (Orient.). II. Silva, Raquel Naiara Fernandes, 1986-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. IV. Título.</p> <p>CDU: 624</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 268, PPGE				
Data:	26 de agosto de 2021	Hora de início:	08h 30min	Hora de encerramento:	11h
Matrícula do Discente:	11912ECV009				
Nome do Discente:	Ismara Simão Curi Arantes				
Título do Trabalho:	Monitoramento da evolução da resistência à compressão do concreto por meio da técnica de impedância eletromecânica				
Área de concentração:	Estruturas e Construção civil				
Linha de pesquisa:	Construção civil				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Inovação em materiais de construção civil				

Reuniu-se, em sessão pública pela plataforma Conferência Web (MConf) provida pela Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Eliane Betânia Carvalho Costa – FECIV/UFU, Diogo de Souza Rabelo – FCT/UFU e Leila Aparecida de Castro Motta – FECIV/UFU orientadora da candidata.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Leila Aparecida de Castro Motta, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Leila Aparecida de Castro Motta, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/08/2021, às 10:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diogo de Souza Rabelo, Usuário Externo**, em 26/08/2021, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eliane Betânia Carvalho Costa, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/08/2021, às 11:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2974165** e o código CRC **BC5D52C0**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de concluir mais um ciclo rumo a concretização dos meus sonhos profissionais. Ao meu marido Lucas, por não me deixar desistir e insistir que eu tentasse mais uma vez a prova do mestrado. Meu companheiro em todos os momentos, desde a alegria quando passei no processo seletivo, até nos momentos em que tudo parecia fugir do controle, me ajudando a superar os obstáculos: fizemos concreto juntos, viramos a noite no laboratório acompanhando o funcionamento do equipamento, enfim, sem ele eu não teria chegado até aqui. Aos meus pais e irmãos, que sempre acreditaram em mim e me deram apoio em vários momentos. Às minhas orientadoras, Leila e Raquel, que estiveram sempre à disposição para me ajudar no que fosse necessário, com muita sabedoria me conduziram e com paciência me ensinaram bastante. À Karina que compartilhou comigo seus conhecimentos de uma área que eu ainda desconhecia, bem como ao Finzi por desenvolver e disponibilizar o analisador de impedância. Aos meus familiares em especial, minha irmã Ismênia e minha prima Mariana, que torceram por mim, me deram ânimo e sempre tinham a palavra certa quando estava desanimada ou triste. Aos meus amigos e colegas de mestrado, com os quais compartilhei desses momentos incríveis e únicos da minha vida, apoiando uns aos outros no laboratório e, principalmente, construímos boas lembranças, em especial Laís, Leonardo e Lucas. Aos técnicos do laboratório, em especial a Cristiane, que esteve à disposição para me auxiliar nos ensaios, sempre com seu jeito alegre e prestativo. A todos que fazem parte do programa de pós-graduação, em especial o Rafael, que sempre foi muito atencioso. Todo esse processo foi desafiador, doloroso em muitos momentos, além de não ter sido fácil equilibrar o emocional em plena pandemia. Apesar disso, eu venci, cheguei até aqui, aprendi muito e superei os meus limites. Mas não teria conseguido se não estivessem comigo, a todos que de alguma forma estiveram envolvidos, minha eterna gratidão!

RESUMO

Existe um distanciamento das características do material recebido e amostrado em obra em relação àquelas do material que é efetivamente aplicado à estrutura, devido ao processo executivo em que o concreto está exposto. Essa diferença acarreta em processos de hidratação distintos, influenciando diretamente na resistência mecânica final do concreto em campo. Além disso, a resistência característica à compressão costuma ser especificada para 28 dias de idade, gerando atrasos à obra caso a resistência de projeto não seja atendida. As propriedades do concreto no estado endurecido, como resistência mecânica, estão intimamente relacionadas com a formação de produtos pela reação química do cimento Portland com a água, assim o acompanhamento da hidratação da pasta de cimento, é uma relevante forma de antever o comportamento do concreto no estado endurecido. Dessa forma, técnicas que possibilitem o monitoramento do material em tempo real, vêm sendo amplamente estudadas e são excelentes opções para complementar os procedimentos já adotados para o controle tecnológico. Dentre as técnicas não-destrutivas empregadas para esse fim, está a de impedância eletromecânica, a qual visa acoplar ao concreto sensores cerâmicos piezelétricos que monitoram a variação dos sinais de impedância eletromecânica, causada pela alteração de parâmetros mecânicos da estrutura, como rigidez, resultante da formação dos produtos hidratados. Essa dissertação busca contribuir para o avanço no conhecimento relacionado à matéria, avaliando a sensibilidade da técnica de impedância eletromecânica no monitoramento do desenvolvimento da rigidez e resistência do concreto. Para isso, foram desenvolvidos dois traços: traço A com resistência à compressão aos 28 dias de 30 MPa e, traço B, de 60 MPa, sendo que cada um deles foi executado com cimento Portland de alta resistência inicial e repetido com cimento Portland de alto forno. Foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos para ensaio à compressão nas idades: 1, 3, 7, 28 e 91 dias; bem como para ensaio de índice de vazios aos 28 dias. Para cada grupo, foi aplicada a técnica de impedância eletromecânica, nas idades referidas, em um exemplar contendo dois sensores piezelétricos incorporados de zirconato - titanato de chumbo (PZT), um posicionado na vertical e, o outro, na horizontal. Por fim, os sinais de impedância receberam tratamento estatístico utilizando métricas propostas na literatura. A técnica se mostrou sensível e eficiente para os dois traços, com ambos os cimentos, representando bem o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto até 7 dias. Nesse intervalo o traço A pôde ser analisado de forma qualitativa e quantitativa, sendo possível identificar os estágios de hidratação. Por outro lado, o traço B, de alta resistência, só pôde ser analisado quantitativamente

pela métrica RMSD. Em idades avançadas, os dois traços realizados com cimento de alto forno, apresentaram confiabilidade ao correlacionar as métricas RMSD e M com resistência à compressão, na faixa de frequência de 180 a 300 kHz. Enquanto que, aqueles produzidos com o cimento Portland de alta resistência inicial, apresentaram métricas com comportamento diferente do esperado, aos 28 e 91 dias, levantando algumas hipóteses como a incompatibilidade da alta taxa de resistência inicial com a taxa de evolução das métricas, necessidade de mudança na faixa de frequência, durabilidade dos sensores e necessidade de mais ensaios para idades superiores aos 91 dias. Quanto ao posicionamento, os PZTs posicionados na horizontal apresentaram melhores resultados, isso se deve ao acoplamento eletromecânico que é comprometido com a dificuldade de adensamento do concreto ao redor do PZT posicionado na vertical.

Palavras-chave: Impedância Eletromecânica – Materiais inteligentes de concreto – Resistência à compressão

ABSTRACT

There is a difference of the characteristics of the material received and sampled in relation to those of the material that is effectively applied to the structure, due to the executive process that the concrete is exposed to. This difference results in different hydration processes, directly influencing the final mechanical strength of concrete in the construction. In addition, the characteristic compression strength is usually specified for 28 days of age, causing delays to the work if the strength in project is not reached. The properties of concrete in the hardened state, such as mechanical strength, are closely related to the formation of products by the chemical reaction of cement with water, so monitoring the hydration of the cement paste is a relevant way to predict the behavior of concrete in the hardened state. Thus, techniques that are enable to monitor of the structure in real time, have been widely studied and are excellent options to complement the procedures already adopted for technological control. Among the non-destructive techniques employed for this purpose, is the electro-mechanical impedance, which consists of coupling piezoelectric ceramic (PZT) sensors to the concrete that monitors the variation of impedance signals, caused by change of mechanical parameters of the material, such as stiffness. This dissertation seeks to complement existing studies, evaluating the sensitivity of the electro-mechanical impedance technique in monitoring the development of stiffness and strength of concrete and identification of hydration phases. For this, two concrete compositions were developed: the A with resistance to compression, at 28 days, of 30 MPa and the B, of 60 MPa, each of which was executed with high strength cement and repeated with blast furnace cement. Four cylindrical specimens were molded to compression testing at ages: 1, 3, 7, 28 and 91 days; as well as a void ratio test at 28 days. For each group, the electromechanical impedance technique was applied, at the referred ages, in a specimen containing two piezoelectric sensors incorporated, one positioned vertically and the other horizontally. Finally, the signs of impedance received statistical treatment using metrics proposed in the literature. The technique proved to be sensitive and efficient for both compositions with both cements, representing well the development of the compressive strength of concrete up to 7 days. In this interval, composition A could be analyzed qualitatively and the hydration stages identified. On the other hand, the composition B could only be analyzed quantitatively by the RMSD metric. In advanced ages, the two compositions performed with blast furnace cement showed reliability by correlating the RMSD and M metrics with compressive strength, in the frequency range of 180 to 300 kHz. While those produced

with high strength cement, presented metrics with different behavior than expected, at 28 and 91 days, raising some hypotheses such as the incompatibility of the high initial resistance rate with the rate of evolution of the metrics, need for change in frequency range, durability of sensors and need for more tests for ages over 91 days. Regarding positioning, the PZTs positioned horizontally showed better results, this is due to the electromechanical coupling that is compromised with the difficulty of compacting the concrete around the PZT positioned vertically.

Keywords: Electromechanical Impedance – Smart Concrete Materials – Compression strength

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Efeito Atuador: a) Sem campo elétrico, b) Com campo elétrico aplicado.....	7
FIGURA 2 - Efeito sensor: a) sem esforço mecânico aplicado, b) com esforço mecânico de tração, c) com esforço mecânico de compressão.....	8
FIGURA 3 - Processo de polarização de elemento piezelétrico: a) estrutura despolarizada, b) polarização em temperatura elevada e c) estrutura com polarização residual.....	9
FIGURA 4 - Modelos de PZT	9
FIGURA 5 - Modelo eletromecânico baseado em impedância eletromecânica 1D.....	15
FIGURA 6 - Modelagem de interações PZT- estrutura usando abordagem de impedância efetiva de Bhalla e Soh (2D)	17
FIGURA 7 - Assinaturas de condutância versus frequência adquiridas por um PZT colado em uma viga de concreto após 28 dias: a) 0-400 kHz; b) 20-100 kHz	19
FIGURA 8 - Assinaturas de condutância versus frequência de um PZT embutido em elemento de argamassa para as primeiras seis horas de cura	20
FIGURA 9 - Assinaturas de condutância versus frequência adquiridas de PZT colado na superfície de uma amostra de argamassa durante o primeiro dia de cura	21
FIGURA 10 - Parte da fuselagem de um avião: a) estrutura de fuselagem; b) pastilhas de PZT coladas na estrutura; c) distância de 10cm entre as pastilhas de PZT e a estrutura.....	25
FIGURA 11 - Sinais de impedância medidos na fuselagem para o PZT 1	25
FIGURA 12 - Média e desvio padrão da métrica CCD.....	26
FIGURA 13 - Pastilhas de PZT coladas no corpo de prova de fadiga	27
FIGURA 14 - Sinais de impedância (parte real) para o PZT 1 do corpo de prova 2	27
FIGURA 15 - Métrica ASD para a faixa de frequência 39 kHz a 46 kHz: a) PZT1, b) PZT 2	28
FIGURA 16 - Acoplamento de sensores: a) colagem dos sensores PZT na superfície do corpo de prova; b) posição dos sensores em milímetros	29
FIGURA 17 - Assinaturas de impedância: PZT2 e intervalo de frequência de 10 a 30 kHz	29
FIGURA 18 - PZT2 [10 kHz a 30 kHz]: Média da métrica de dano RMSD	30
FIGURA 19 - Cápsula inteligente: PZT envolto com resina epóxi.....	30
FIGURA 20 - Corpo de prova de concreto com cápsulas inteligentes embutidas: a) amostra prismática utilizada; b) esquema com a posição aproximada dos sensores	31
FIGURA 21 - Laje a ser ensaiada à punção: a) armadura posicionada na fôrma com as cápsulas inteligentes posicionadas, b) laje finalizada	31

FIGURA 22 - Assinatura de impedância do PZT1 referente à laje antes e após o dano por punção	32
FIGURA 23 - Monitoramento do concreto: a) PZT colado na superfície e embutido; b) PZT a ser embutido protegido com camada asfáltica.....	32
FIGURA 24 - Curva da parte real da admitância em diferentes idades	33
FIGURA 25 - A correlação entre a resistência à compressão e o MAPD: a) admitância real; b) admitância imaginária.....	34
FIGURA 26 - Índices determinados com a admitância real: a) MAPD; b) RMSD	34
FIGURA 27 - Acoplamento do PZT na superfície da barra: a) superfície usinada e acabada para a ligação do PZT; b) PZT ligado à superfície da barra.....	35
FIGURA 28 - Variação de assinaturas de condutância durante o STM.....	36
FIGURA 29 - Variação de assinaturas de condutância durante o LTM.....	37
FIGURA 30 - Variação RMSD em diferentes idades	38
FIGURA 31 - Várias configurações de sensor consideradas no estudo: a) PZT embutido na forma de CVS; b) PZT ligado a barra de aço e c) PZT ligado a folha de metal.....	39
FIGURA 32 - Assinatura de condutância para a configuração A - PZT embutido: a) hidratação de longo prazo; b) hidratação primeiras horas.....	40
FIGURA 33 - Assinatura de condutância para a configuração B - PZT colado à barra de aço: a) hidratação de longo prazo; b) hidratação primeiras horas	40
FIGURA 34 - Assinatura de condutância para a configuração C - MFBPS: a) hidratação de longo prazo; b) hidratação primeiras horas	41
FIGURA 35 - Variação do RMSD durante o monitoramento da hidratação: a) sensor embutido; b) sensor ligado ao vergalhão; c) sensor MFBPS.....	42
FIGURA 36 - Procedimento experimental: a) PZT revestido; b) cubo de argamassa com PZT embutido conectado ao analisador de impedância	43
FIGURA 37 - Espectros de condutância registrados a partir do sensor PZT embutido nas misturas de argamassa: a) a/c = 0,5; b) a/c = 0,4; c) a/c = 0,3.....	44
FIGURA 38 - Diagrama esquemático do sistema de medição	46
FIGURA 39 - Resultados experimentais: a) relação a/c de 0,45, boa compactação e cura à 20°C; b) relação a/c de 0,5, boa compactação e cura à 20°C; c) relação a/c - 0,45, boa compactação e cura entre 1°C e 8°C; d) relação a/c - 0,45, compactação mínima e cura à 20°C	47
FIGURA 40 - Configuração experimental da medição EMI e PZT antes e depois de encapsular	49
FIGURA 41 - Variações de temperatura das pastas cimentícias no processo de hidratação ...	50

FIGURA 42 - Tendências da profundidade de penetração do pino Vicat (VPPD) no processo de hidratação inicial: S1 e S2 denotam início e fim de pega, respectivamente.	51
FIGURA 43 - Variação das assinaturas de condutância na faixa de frequência de 100 Hz a 1000 kHz no processo de hidratação com relação a/c de 0,45: a) 1-5 h; b) 6-10 h; c) 11-72 h.	52
FIGURA 44 - Mudança de pico de ressonância de assinaturas de condutância na faixa de frequência de 100 Hz-1000 kHz (relação a/c=0,45): a) pico 1; b) pico 2	53
FIGURA 45 - Sensores piezelétricos: a) colados a 0°, 45° e 90° no molde de argamassa, b) totalmente embutidos.....	55
FIGURA 46 - Viga de concreto armado concretada com o prisma de argamassa e PZT sobre a armadura de topo central	56
FIGURA 47 - Assinatura de condutância por frequência no 3° dia de cura com PZT livre, na horizontal, inclinado a 45° e na vertical	56
FIGURA 48 - Micrografia eletrônica de varredura dos cristais de etringita e monossulfato...	64
FIGURA 49 - Microestrutura do cimento hidratado: 1- C-S-H; 2- CH; 3- vazio capilar	65
FIGURA 50 - Taxa de calor liberado ao longo dos estágios de hidratação	65
FIGURA 51 - Localização dos tempos de pega e estágios da hidratação na curva de evolução de calor	69
FIGURA 52 - Difratoograma de raios-X da amostra do cimento CP V - ARI	71
FIGURA 53 - Curvas de fluxo de calor - cimento CP V-REF x CP V ARI - Temperatura de ensaio de 23°C até 50 horas.....	73
FIGURA 54 - Caracterização do cimento Portland CP III 32 por meio de difratometria de raios X pelo método do pó em amostra total passante na peneira #200.....	74
FIGURA 55 - Curva de fluxo de calor - cimento composto com escória de alto forno - Temperatura de ensaio de 23°C até 50 horas	76
FIGURA 56 - Curvas granulométricas dos agregados: areia fina, areia média e brita 0	78
FIGURA 57 - Desenho esquemático do PZT com a direção de polarização	80
FIGURA 58 - Materiais utilizados para criação da cápsula inteligente: a) fôrma; b) PZT; c) PZT com fio soldado e isolado com fita isolante líquida; d) componentes da resina epóxi	81
FIGURA 59 - Proteção do PZT : a) execução; b) cápsula inteligente	81
FIGURA 60 - Teste de sinal das cápsulas inteligentes.....	82
FIGURA 61 - Curva do teor de argamassa por abatimento	83
FIGURA 62 - Diagrama de dosagem do concreto	84
FIGURA 63 - Esquema do posicionamento das cápsulas inteligentes no corpo de prova.....	86
FIGURA 64 - Posicionamento das cápsulas inteligentes: a) horizontal; b) vertical	87

FIGURA 65 - Monitoramento de corpo de prova antes da imersão.....	88
FIGURA 66 - Corpo de prova imerso e em monitoramento	88
FIGURA 67 - Desenho esquemático do funcionamento do SySHM	89
FIGURA 68 - Impedância resistiva pela frequência para o traço A com cimento CP V com os picos destacados	93
FIGURA 69 - Pico 2 - impedância resistiva por frequência para o traço A - CP V PZTh.....	94
FIGURA 70 - Pico 2 - Impedância resistiva por frequência para o traço A - CP III PZTv	96
FIGURA 71 - Associação das curvas de impedância a resistiva por frequência do traço A: a) cimento CP V; b) cimento CP III	96
FIGURA 72 - Taxa de variação da frequência para o traço A com CP V e CP III.....	97
FIGURA 73 - Relação das curvas de impedância por frequência do traço A CP III: a) PZTh; b) PZTv	98
FIGURA 74 - Variação de frequência com o tempo para o traço A CP III para PZTh e PZTv	98
FIGURA 75 - Gráfico de impedância por frequência do traço A CP V PZTv.....	99
FIGURA 76 - Relação das curvas para o traço A CP V: a) PZTh; b) PZTv.....	99
FIGURA 77 - RMSD para os concretos do traço A: a) CP III PZTh; b) CP III PZTv; c) CP V PZTh; d) CP V PZTv.....	100
FIGURA 78 - Curvas de impedância por frequência nas primeiras horas para o traço B: a) CP V PZTh; b) CP V PZTv.....	101
FIGURA 79 - Curvas de impedância para as primeiras horas, traço B CP III PZTh.....	102
FIGURA 80 - Curvas de impedância para as primeiras horas, traço B CP III PZTv.....	103
FIGURA 81 - Curvas RMSD dos concretos traço B: a) CP III PZTh; b) CP III PZTv; c) CP V PZTh; d) CP V PZTv.....	104
FIGURA 82 - Taxa de evolução do RMSD com o tempo para uma cápsula de cada traço...	105
FIGURA 83 - Ganho de resistência à compressão com o aumento da idade.....	106
FIGURA 84 - Índice de vazios para o traço A	107
FIGURA 85 - Índice de vazios para o traço B	107
FIGURA 86 - Gráfico de impedância por frequência de 1 até 91 dias - traço A, CP III, PZTh	108
FIGURA 87 - Métricas estatísticas para a faixa 1 de frequência - Traço A, CP III, PZTh: a) RMSD; b) CCD; c) M; d) MAPD; e) ASD	109
FIGURA 88 - Métricas estatísticas para a faixa 2 de frequência - Traço A, CP III, PZTh: a) RMSD; b) CCD; c) MAPD; d) M; e) ASD	110

FIGURA 89 - Métricas estatísticas para a faixa 3 de frequência - Traço A, CP III, PZTh: a) RMSD; b) CCD; c) MAPD; d) M; e) ASD	111
FIGURA 90 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço A, CP III, PZTh	112
FIGURA 91 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço A, CP III, PZTv	112
FIGURA 92 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço A, CP V, PZTh	113
FIGURA 93 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço A, CP V, PZTv	113
FIGURA 94 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço B, CP III, PZTh	114
FIGURA 95 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço B, CP III, PZTv	114
FIGURA 96 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço B, CP V, PZTh.....	115
FIGURA 97 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço B, CP V, PZTv.....	115
FIGURA 98 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço A, CP III, PZTh.	118
FIGURA 99 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência -Traço A, CP III, PZTv..	118
FIGURA 100 - Tendência de crescimento das métricas em relação à resistência à compressão traço A CP III PZTh: a) RMSD; b) CCD; c) ASD; d) MAPD; e) M.....	119
FIGURA 101 - Correlação confiável da resistência à compressão pelas métricas - traço A, CP III e PZTh: a) ASD; b) MAPD; c) RMSD; d) CCD; e) M.....	120
FIGURA 102 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço A, CP V, PZTh	121
FIGURA 103 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço A, CP V, PZTv	121
FIGURA 104 - Tendência de crescimento da métrica CCD em relação à resistência à compressão - traço A CP V PZTv	122
FIGURA 105 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço B, CP III, PZTh	123
FIGURA 106 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço B, CP III, PZTv	123
FIGURA 107 - Tendência de crescimento das métricas em relação à resistência à compressão traço B CP III PZTh: a) RMSD; b) M.....	124

FIGURA 108 - Métricas estatísticas - concreto de traço B, CP III e PZTh: a) RMSD; b) M	124
FIGURA 109 - Correlação confiável da resistência a compressão pela métrica RMSD - traço B, CP III e PZTh.....	125
FIGURA 110 - Correlação confiável da resistência a compressão pela métrica M - traço A, CP III e PZTh	125
FIGURA 111 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço B, CP V, PZTh	126
FIGURA 112 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço B, CP V, PZTv	126

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Principais compostos químicos do cimento Portland.....	62
TABELA 2 - Limites de composição do cimento Portland	70
TABELA 3 - Requisitos físicos e mecânicos	70
TABELA 4 - Requisitos químicos (expresso em porcentagem de massa).....	70
TABELA 5 - Amostra CP V - ARI dados quantitativos dos minerais identificados por DRX com suas respectivas fichas	72
TABELA 6 - Composição mineralógica dos cimentos determinada do DRX	74
TABELA 7 - Resultados de ensaio de calor de hidratação acumulado por calorimetria isotérmica: Temperatura de ensaio de 23°C, 44°C e 65°C.....	75
TABELA 8 - Composição química dos cimentos Portland.....	77
TABELA 9 - Propriedades físicas dos cimentos Portland	77
TABELA 10 - Dados físicos dos agregados.....	78
TABELA 11 - Especificações do aditivo superplastificante	79
TABELA 12 - Especificações elétricas do PZT	79
TABELA 13 - Dados do analisador de impedância	82
TABELA 14 - Traços do concreto	85
TABELA 15 - Dados das cápsulas inteligentes	86
TABELA 16 - Especificações do analisador de impedância SySHM.....	89
TABELA 17 - Trabalhos de referência com as taxas de frequência utilizadas.....	90
TABELA 18 - Resultados dos ensaios do concreto no estado fresco	92
TABELA 19 - Valores médios de resistência à compressão para todos os traços	106
TABELA 20 - Valores do coeficiente de correlação (R^2) excluindo os dados de 91 dias	116

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c - Relação água/cimento

B - Suseptância

C - Capacitância em Farad

C_m - Flexibilidade Mecânica ou coeficiente de amortecimento

d - Tensor das constantes piezelétricas em deformação

d_{3x}^2 - Constante de acoplamento piezelétrico

D - Vetor deslocamento elétrico

E - Vetor campo elétrico

F - Força

f_c - Resistência à compressão do concreto

f_{ck} - Resistência característica à compressão do concreto, normalmente a 28 dias

G - Condutância

h_a - Espessura do PZT

I - Corrente resultante

I_0 - Corrente de saída do PZT

j - Unidade imaginária $\sqrt{-1}$

K - Rigidez

k - Número de onda

k_1 - Constante empírica

k_2 - Constante empírica

l_a - Comprimento do PZT

L - Indutância expressa em Henries

M_m - Massa mecânica

n - Número total de pontos utilizados na medição

R_m - Amortecimento mecânico

$\text{Re}(Z_{1,i})$ - Parte real da impedância da medição sem dano em uma frequência i

$\text{Re}(Z_{2,i})$ - Parte real da impedância em uma frequência i em nova configuração da estrutura

s - Tensor de flexibilidade

S - vetor das deformações [m/m] S_{Z_1} - Desvio padrão do sinal de impedância da referência

S_{Z_2} - Desvio padrão do sinal de impedância a ser comparado

T - Vetor das tensões

V - Tensão elétrica alternada

V_i - Tensão elétrica de entrada do atuador PZT

ν - Coeficiente de Poisson

X_c - Reatância capacitiva

X_L - Reatância indutiva

$X_{(t)}$ - Velocidade

$x(t)$ - Deslocamento

$Y(\omega)$ - Admitância elétrica

ΔY - Mudança percentual na condutância de pico em um determinado momento em relação à frequência de pico inicial e amplitude

Y'_c - Condutância no pico de ressonância em um determinado momento

Y'_0 - Condutância inicial no pico de ressonância do sensor PZT

\overline{Y}_{22}^E - Módulo de Young do PZT com campo elétrico nulo

\overline{Y}^E - Módulo de elasticidade de Young do complexo (em campo elétrico constante)

w_a - Largura do PZT

Z - Impedância da estrutura

Z_a - Impedância mecânica do PZT

$Z_{a,eff}$ - Impedância efetiva do PZT

Z_m - Impedância mecânica

$Z_{s,eff}$ - Impedância efetiva da estrutura

δ - Fator de perda dielétrica do PZT

ϵ - Permissividade elétrica

$\overline{\epsilon}_{33}^T$ - Constante dielétrica do PZT com tensão mecânica nula

η - Fator de perda mecânica do PZT

\varnothing - Fase

ω - Frequência angular

Δw - Magnitude da mudança na frequência de pico

w_c - Frequência de pico em um determinado momento

w_0 - Frequência de pico inicial do sensor PZT

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASD - Diferença Média Quadrada

CC - Coeficiente de correlação

CCD - Desvio do Coeficiente de Correlação

CP V - ARI - cimento Portland de alta resistência inicial

CP III - 40 RS - cimento Portland de alto forno com resistência de 40 MPa e resistente a sulfato

C3A - Aluminato tricálcico

C4AF - Ferroaluminato de cálcio

C3S - Silicato tricálcico

C2S - Silicato dicálcico

C-S-H - Silicato de cálcio hidratado

CH - Hidróxido de cálcio

DRX - Difratoograma de raios-X

EMI - Impedância eletromecânica

E/M - Eletromecânica

NDE - *Non-Destructive Evaluation* - Ensaios não destrutivos

FECIV - Faculdade de Engenharia Civil

FEMEC - Faculdade de Engenharia Mecânica

LMEst - Laboratório de Mecânica de Estruturas

M - Métrica

MAPD - Desvio Percentual Da Média Absoluta

MEV - Microscopia Eletrônica De Varredura

NBR - Norma Brasileira de Referência

PZT - Sensores piezelétricos de zirconato - titanato de chumbo

PZTh - Sensor piezelétrico posicionado na horizontal

PZTv - Sensor piezelétrico posicionado na vertical

RMSD - Desvio Médio da Raiz Quadrada

UFU - Universidade Federal de Uberlândia

SHM - *Structural Health Monitoring* - Monitoramento de Integridade Estrutural

VUP - Vida útil de projeto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
1.2	OBJETIVOS.....	4
1.2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	4
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	5
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
2	MONITORAMENTO DE MATERIAIS POR MEIO DA TÉCNICA DE IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA.....	7
2.1	SENSORES PIEZELÉTRICOS	7
2.2	IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA	11
2.2.1	<i>Impedância Elétrica</i>	12
2.2.2	<i>Impedância Mecânica</i>	13
2.2.3	<i>Impedância Eletromecânica.....</i>	15
2.3	ANÁLISE QUALITATIVA	19
2.4	ANÁLISE QUANTITATIVA ESTATÍSTICA	21
2.5	APLICAÇÕES TÉCNICAS.....	24
2.5.1	<i>Análise das métricas estatísticas em estrutura aeronáutica e em ensaio à fadiga</i>	24
2.5.2	<i>SHM utilizando a técnica EMI aplicada em estruturas de concreto</i>	28
2.5.3	<i>Monitoramento do ganho de resistência do concreto com PZT embutido</i>	32
2.5.4	<i>Monitoramento do processo de hidratação do cimento em concreto armado.....</i>	35
2.5.5	<i>Comparação entre três diferentes configurações de ligação do PZT ao concreto</i>	38
2.5.6	<i>Monitoramento da hidratação de diferentes traços de argamassa.....</i>	43
2.5.7	<i>Hidratação de concreto armado como um indicador do desenvolvimento de aderência na interface aço-concreto.....</i>	45
2.5.8	<i>Monitoramento do processo de hidratação e pega de pasta de cimento Portland</i>	48
2.5.9	<i>Breves considerações sobre PZT a partir de diferentes estudos</i>	54
3	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO.....	58
3.1	RELAÇÃO A/C	58
3.2	ADITIVOS	60
3.3	CIMENTO PORTLAND	61
3.3.1	<i>Composição química do cimento Portland</i>	61

3.3.2	<i>Processo de hidratação do cimento Portland</i>	62
3.3.3	<i>Ensaio para monitoramento da hidratação</i>	66
3.3.4	<i>Tipo de cimento</i>	70
4	MATERIAIS E MÉTODOS	77
4.1	MATERIAIS	77
4.1.1	<i>Cimento Portland</i>	77
4.1.2	<i>Agregados</i>	78
4.1.3	<i>Aditivo</i>	79
4.1.4	<i>Sensores piezelétricos</i>	79
4.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	80
4.2.1	<i>Preparação dos sensores</i>	80
4.2.2	<i>Teste de sinal</i>	82
4.2.3	<i>Dosagem do concreto</i>	83
4.2.4	<i>Produção do concreto e moldagem dos corpos de prova</i>	85
4.2.5	<i>Cura e monitoramento dos corpos de prova</i>	87
4.2.6	<i>Ensaio compressão e determinação do índice de vazios</i>	91
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	92
5.1	PRIMEIRAS 24 HORAS APÓS A CONCRETAGEM	92
5.2	CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	106
6	CONCLUSÃO	128
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
	APÊNDICE A – CURVAS DE IMPEDÂNCIA POR FREQUÊNCIA DAS PRIMEIRAS 24 HORAS	138
	APÊNDICE B – MÉTRICAS ESTATÍSTICAS PRIMEIRAS 24 HORAS – PICO 2 ...	142
	APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS	150
	APÊNDICE D – MÉTRICAS ESTATÍSTICAS PARA DIFERENTES FAIXAS DE FREQUÊNCIA	152
	APÊNDICE E – CURVAS DE CORRELAÇÃO	173

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo traz a contextualização do tema, apresentando a justificativa do estudo. Por fim, são especificados os objetivos, as contribuições e, ao final, a organização dessa dissertação.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil, isso se deve ao custo relativamente baixo e à facilidade de moldagem. Segundo Pacheco, Ribeiro e Helene (2019) o consumo mundial de concreto é 17 bilhões de toneladas ao ano, sendo um dos produtos industrializados mais consumidos pela sociedade na atualidade.

Existe um distanciamento das características do material recebido e amostrado em obra em relação àquelas do material que é efetivamente aplicado à estrutura, devido ao processo executivo que o concreto está exposto. Essa diferença acarreta processos de hidratação distintos, influenciando diretamente na resistência mecânica final do concreto em campo (SERAFINI *et al.*, 2020).

Segundo Serafini *et al.* (2020) o controle tecnológico do concreto previsto pela ABNT NBR12655:2015, que recomenda a moldagem de dois corpos de prova para serem ensaiados à compressão, geralmente é adotado aos 28 dias de idade, período também empregado na maioria dos projetos, quando não há uma especificação especial, conforme o item 8.2.4 da norma ABNT NBR6118:2014. A verificação no estado endurecido, aos 28 dias, resulta em um controle tardio e reativo, uma vez que o tempo de execução e ensaio se diferem em quase um mês. Dessa forma, quando a resistência especificada em projeto não é atingida, há um aumento dos custos com retrabalhos.

As propriedades do concreto de cimento Portland são resultantes de complexas reações químicas entre os compostos anidros do aglomerante e água. Durante o processo de hidratação, principalmente nas primeiras 24 horas, as alterações de matéria e energia influenciam significativamente no desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto, principalmente a resistência à compressão (FUNAHASHI JÚNIOR, 2018). Dessa forma, o

acompanhamento da pasta de cimento no estado fresco, mostra-se fundamental para antever as propriedades do material no estado endurecido.

Esse monitoramento não visa apenas garantir a segurança, mas também minimizar o tempo ocioso desnecessário entre cada estágio da construção. Essas informações podem auxiliar na identificação do momento mais adequado para a retirada de fôrmas e sistemas de escoramento, para aplicação de protensão, bem como para carregamento de elementos estruturais (LIM *et al.*, 2021).

Vários métodos são utilizados para analisar a hidratação do material cimentício, como o método da agulha de Vicat, calorimetria isométrica ou semi-adiabática, difração de raios-x e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Certamente tratam-se de métodos de medição e análise precisos, entretanto demandam tempo para realização dos ensaios, equipamentos caros e volumosos e mão-de-obra especializada, limitando e onerando suas aplicações. Além disso, as condições laboratoriais, nas quais são desenvolvidos os ensaios, se distanciam das condições reais de campo, impactando nos resultados (ZHANG *et al.*, 2020).

Dessa forma, técnicas que permitam acompanhar em tempo real a evolução das propriedades mecânicas, de forma autônoma e remota, são de grande interesse do ponto de vista tecnológico, para avaliação do desempenho dos materiais cimentícios. Em adição, há uma aceitação ainda maior quando se trata de métodos não invasivos como ensaios não destrutivos (NDE), não necessitando, por exemplo, da extração de testemunhos.

Nessa linha, vem sendo estudado o método de maturidade. Sendo a reação química de hidratação do cimento exotérmica, o procedimento dessa técnica consiste na incorporação de sensores térmicos na peça estrutural obtendo o histórico de temperaturas do concreto em campo para posterior apuração da resistência mecânica, pela curva de calibração. Mesmo apresentando-se como uma ferramenta promissora, ainda está sujeito a condições laboratoriais uma vez que a curva de calibração é gerada a partir de testes em laboratório, em condições controladas. Além disso, depende de esforços para o desenvolvimento e manutenção dessas curvas, que mudam a cada dosagem e tipos de insumos empregados, necessitando de comprometimento elevado com o controle de qualidade na produção do concreto (SERAFINI *et al.*, 2020).

Logo, ainda existe uma lacuna a ser preenchida: um método não-destrutivo, de monitoramento em tempo real, que não dependa de parâmetros obtidos em laboratório nem de rígidos controles de produção, composto de material funcional cujos dados reflitam diretamente o comportamento do material. Nesse âmbito, surge a técnica de impedância eletromecânica que tem ganhado cada vez mais espaço na construção civil.

A técnica de impedância eletromecânica (EMI) consiste na incorporação de sensores piezelétricos no concreto. Altas frequências, na faixa de 30-400 kHz, são utilizadas para excitar eletricamente o sensor, associado ao material, por uma fonte de campo elétrico alternado para induzir indiretamente a resposta dinâmica na estrutura. Os sensores, que atuam simultaneamente como sensores e atuadores, capturam essa resposta na forma de impedância elétrica que serve como função da interação entre a impedância mecânica do material e a elétrica dos sensores. Uma mudança no espectro da impedância medida, indica uma mudança nas condições do material (TAWIE; LEE, 2010a).

As pastilhas de zirconato-titanato de chumbo (PZT), material piezoelétrico comumente usado na técnica EMI, são quimicamente inertes, fabricadas em pequenos tamanhos, leves, econômicas e de rápida resposta dinâmica. Assim, podem ser anexadas a elementos estruturais sem afetar o desempenho da estrutura (LIM *et al.*, 2021).

O PZT é associado a um equipamento que tanto aciona o sensor, com altas frequência de corrente elétrica, quanto recebe os sinais elétricos gerados pelo PZT para plotagem dos sinais de impedância (ZHANG *et al.*, 2020). O equipamento utilizado nessa dissertação foi o impedâncímetro *SySHM* desenvolvido pelo Laboratório de Mecânica de Estruturas da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, que possui a vantagem de ser portátil, flexibilizando seu uso em canteiros de obras.

Por fim, segundo Froufe *et al* (2020), os edifícios podem ser classificados como inteligentes quando a tecnologia melhora a capacidade de atender às expectativas e necessidades do usuário em termos de conforto, saúde, segurança e satisfação. Segundo a ABNT NBR 15575-1:2013 os requisitos do usuário relativos à segurança são expressos pelos seguintes fatores: segurança estrutural; segurança contra fogo; segurança no uso e na operação.

A norma de desempenho ABNT NBR 15575-2:2013, orienta que, a fim de que seja alcançada a vida útil de projeto (VUP) para a estrutura e seus elementos, devem ser previstas e realizadas manutenções preventivas sistemáticas e, sempre que necessário, manutenções com caráter corretivo. Estas últimas devem ser realizadas assim que o problema se manifestar, impedindo que pequenas falhas progridam às vezes rapidamente para extensas patologias.

Em concordância com a norma citada, Froufe *et al* (2020) defende que entre o conjunto de serviços de um edifício inteligente, está o de manutenção que visa a longevidade do empreendimento, utilizando de novas funcionalidades que permitam prever situações de reparo necessário, de forma precoce. O autor ressalta que edifícios inteligentes geralmente têm um custo inicial mais alto, por causa da tecnologia incorporada, porém é a mesma tecnologia que possibilita a redução de custos ao longo do ciclo de vida por, entre outros pontos, otimizar as ações de manutenção da infraestrutura.

Dessa forma, edificações com estruturas de concreto contendo sensores PZT monitorados pela técnica EMI podem ser classificadas como estruturas inteligentes, as quais emitem dados sobre a condição do elemento da edificação. Os sinais obtidos e interpretados permitem que o monitoramento da evolução da resistência mecânica seja realizado em tempo real, possibilitando prever problemas e, dessa forma, realizar manutenções preventivas, garantindo a segurança estrutural ao usuário e uma redução dos custos ao longo do ciclo de vida da estrutura.

1.2 OBJETIVOS

Nessa seção são apresentados os objetivos gerais e específicos dessa pesquisa.

1.2.1 *Objetivo Geral*

O objetivo da pesquisa é complementar os estudos sobre a aplicação da técnica da impedância eletromecânica no monitoramento de elementos (corpos de prova) produzidos com concreto de cimento Portland, verificando a sensibilidade da técnica à mudança de rigidez do composto devido à hidratação do cimento e, conseqüente, evolução da resistência mecânica.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Verificar a sensibilidade da técnica EMI para o monitoramento do concreto nas primeiras idades, principalmente nas 24 horas iniciais;
- Realizar o tratamento estatístico dos sinais de impedância;
- Determinar a métrica estatística que melhor represente quantitativamente o comportamento mecânico da estrutura;
- Analisar a evolução dos sinais de impedância e as métricas com o tempo, relacionando com a evolução da propriedade de resistência mecânica do concreto;
- Analisar o melhor intervalo de frequência para realizar o monitoramento;
- Investigar a influência do posicionamento do sensor no interior do corpo de prova;
- Associar os sinais de impedância e métricas às fases de hidratação dos cimentos de alta resistência inicial e de alto forno;
- Analisar o comportamento do sinal de impedância para concretos de resistência normal e alta.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é constituído de cinco capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: INTRODUÇÃO - apresenta a contextualização, justificativa e os objetivos da pesquisa.
- Capítulo 2: MONITORAMENTO DE MATERIAIS POR MEIO DA TÉCNICA DE IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA – revisão sobre a técnica de impedância eletromecânica, análise quantitativa e qualitativa dos dados, bem como apresentação de algumas aplicações técnicas.
- Capítulo 3: PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO – abordagem teórica sobre os fatores que afetam a resistência mecânica do concreto, como a relação a/c, aditivos, tipos de cimento e o processo de hidratação.
- Capítulo 4: MATERIAIS E MÉTODOS – descreve os materiais empregados e metodologia adotada para o desenvolvimento dos ensaios mecânicos do concreto, bem como o monitoramento pela técnica da impedância.

- Capítulo 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES – apresentação e análise dos resultados obtidos.
- Capítulo 6: CONCLUSÃO – são ressaltadas as conclusões sobre o estudo realizado e sugestões para futuros trabalhos.

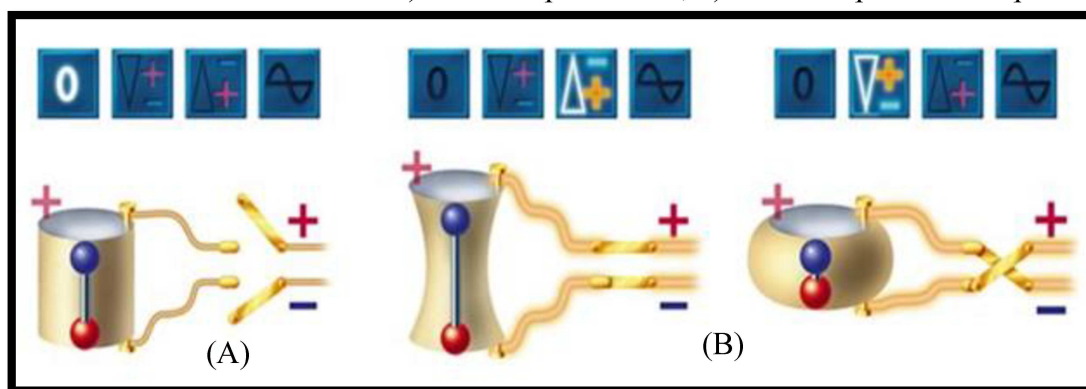
2 MONITORAMENTO DE MATERIAIS POR MEIO DA TÉCNICA DE IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

Essa sessão inicia com o modo de atuação dos sensores piezelétricos, os conceitos da técnica de impedância eletromecânica e a apresentação das métricas para análise estatística. Encerra-se com alguns trabalhos realizados aplicando essa técnica no monitoramento de materiais funcionais, que serviram como referência para a pesquisa desenvolvida.

2.1 SENSORES PIEZELÉTRICOS

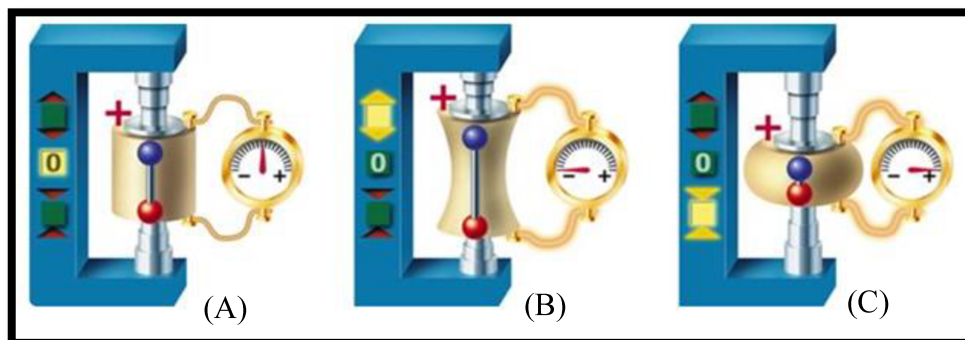
Os materiais piezelétricos apresentam propriedade de mudar suas dimensões em consequência da aplicação de uma voltagem (efeito atuador ou inverso), como ilustra a FIGURA 1, ou de sofrer mudanças em suas propriedades elétricas quando submetido a uma deformação mecânica (efeito sensor ou direto), conforme esquema da FIGURA 2. Dessa forma, esses materiais podem ser usados como sensores, atuadores ou os dois. O método de monitoramento baseado na impedância eletromecânica utiliza simultaneamente ambos os efeitos desse material para obter as medições de impedância (SILVA, 2020).

FIGURA 1 - Efeito Atuador: a) Sem campo elétrico, b) Com campo elétrico aplicado



Fonte: CeramTec, 2003.

FIGURA 2 - Efeito sensor: a) sem esforço mecânico aplicado, b) com esforço mecânico de tração, c) com esforço mecânico de compressão



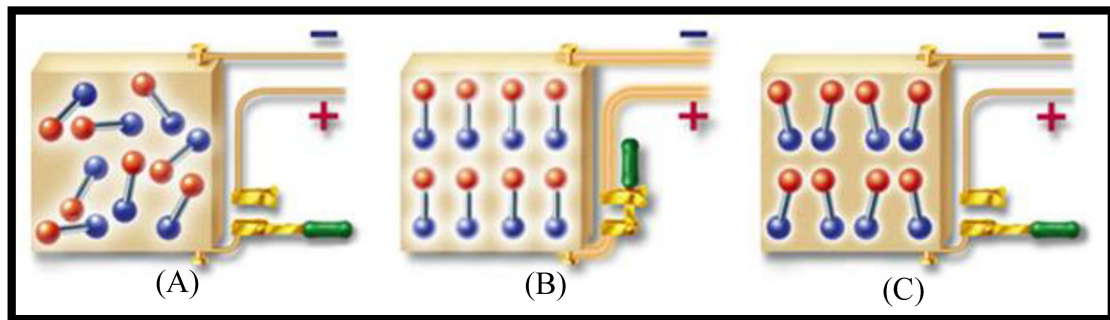
Fonte: CeramTec, 2003.

Esses elementos podem ser usados em várias situações, uma vez que apresentam relativa insensibilidade à temperatura, respostas lineares em baixos níveis de excitação, baixo peso e grande flexibilidade como sensores e atuadores, além de exibirem uma resposta em frequência de banda ampla (MOURA JUNIOR, 2008).

Como desvantagem, esses elementos podem apresentar histerese em campos elétricos elevados, dificuldade de corte para dar forma devido a suas características como cerâmica, fracos coeficientes de acoplamento eletromecânico e, por fim, o decaimento das características de polarização dos elementos piezoelétricos, reduzindo seu desempenho (MOURA JUNIOR, 2008).

Existem vários tipos de materiais piezoelétricos naturais como o quartzo e a turmalina, outros são induzidos artificialmente como alguns polímeros (Fluorido de Polivinilideno) e certas cerâmicas (Titanato-zirconato de chumbo). O material que não é naturalmente piezoelétrico, possui essencialmente estruturas despolarizadas ou mal polarizadas (FIGURA 3 - A) para polarizá-lo e, assim controlar sua direção de deformação, ele é submetido a temperaturas superiores à temperatura de Curie. Nessa elevada temperatura, o material perde espontaneamente sua polarização inicial para então ser submetido a um campo elétrico controlado, polarizando corretamente (FIGURA 3 - B). Por fim, ele é resfriado mantendo uma polarização residual (FIGURA 3 - C). O PZT pode trabalhar na faixa de temperatura em torno de 300°C, temperatura de Curie (TSURUTA, 2008).

FIGURA 3 - Processo de polarização de elemento piezelétrico: a) estrutura despolarizada, b) polarização em temperatura elevada e c) estrutura com polarização residual.



Fonte: CeramTec, 2003.

Essa polarização induzida no material piezoelétrico, conforme FIGURA 3 - C, cria um sentido preferencial na detecção de alterações mecânicas do material. Assim, o sentido de polarização deve ser levado em consideração no momento de posicionar o sensor no material a ser monitorado.

Titanato de zirconato de chumbo (PZT), cujo alguns modelos são apresentados na FIGURA 4, é um dos materiais piezoelétricos mais comumente usados, por ser quimicamente inerte, altamente sensível, possui resposta rápida e eficiente, desempenho estável a longo prazo, bem como capacidade de auto-atuação e autodetecção em faixas de alta frequência, realizando monitoramento localizado com consumo de energia relativamente baixo (LIM *et al.*, 2021). Por se tratar de um material cerâmico, a rigidez da pastilha PZT geralmente é superior à do material no qual a pastilha está inserida, resultando em uma conversão eletromecânica de grande eficiência, tornando-a ideal em aplicações como atuadores (BANKS *et al.*, 1996 *apud* MOURA JUNIOR, 2008, P.7).

FIGURA 4 - Modelos de PZT



Fonte: HTMG, 2021.

Esse tipo de material, que faz parte da classe dos dielétricos (isolantes), apresenta acoplamento eletromecânico. Dentro de um material piezelétrico, a tensão mecânica, a deformação, o campo elétrico e o deslocamento elétrico podem ser completamente descritos por um par de equações eletromecânicas. As relações que descrevem o acoplamento entre as variáveis elétricas e mecânicas são descritas pelas Equações 1 e 2 as quais representam, respectivamente, o efeito inverso e direto deste material (CRAWLEY *et al.*, 1983 *apud* SILVA, 2017, p. 52).

$$S_i = s_i^E + d_m * E_m \quad (1)$$

$$D_m = d_m * T_j + \varepsilon_{mk}^T * E \quad (2)$$

Sendo:

S: vetor das deformações [m/m];

T: vetor das tensões [N/m²];

E: vetor campo elétrico [V/m];

D: vetor deslocamento elétrico [C/m²];

s: tensor de flexibilidade [m²/N];

d: tensor das constantes piezelétricas em deformação [m/V];

ε : permissividade elétrica [F/m];

Os índices i, j e m indicam as direções da tensão e da deformação e o índice k a do campo elétrico.

Segundo Marat-Mendes *et al.* (2003), materiais funcionais ou inteligentes é o nome dado a uma classe de materiais que apresentam a capacidade de transformar a força mecânica e o movimento em outra forma de energia, e vice-versa. Nesse contexto, uma estrutura contendo PZT dá origem a estruturas chamadas de inteligentes, uma vez que permitem contínuo monitoramento de sua condição.

Existem duas formas de acoplamento das cerâmicas de PZT ao elemento ou à estrutura: coladas na superfície com adesivo de alta rigidez ou incorporadas ao material na fase de moldagem. Se tratando de elementos ou estruturas de concreto, a primeira opção apresenta maior facilidade de instalação. Entretanto, o PZT não pode ser colado após a mistura, sendo necessário aguardar

que a superfície esteja relativamente plana e dura para a operação de colagem. Dessa forma, para o monitoramento nas primeiras horas de endurecimento, é imprescindível utilizar o PZT incorporado ao concreto. Para proteger o PZT, material frágil, ele deve ser devidamente isolado e vedado com materiais poliméricos ou betuminosos, para que possa suportar o peso do concreto, a presença de água e as vibrações da compactação. Fazendo um bom encapsulamento do PZT, a configuração incorporada passa a ser mais durável que aquela colada (LIM *et al.*, 2021).

Vale ressaltar que as camadas externas ao PZT, seja a cola para acoplamento superficial ou a proteção com revestimento polimérico ou betuminoso, devido à alta sensibilidade da técnica EMI, podem ter um efeito significativo nas assinaturas adquiridas. Consequentemente, a repetitividade das assinaturas entre PZT idênticos é limitada devido à dificuldade de manter a mesma condição de revestimento, isto é, os sinais são únicos a cada situação, mas o padrão de comportamento durante o monitoramento se mantém (LIM *et al.*, 2021).

Quando o sensor piezelétrico (PZT) é colado ou incorporado no elemento ou na estrutura e é aplicada uma diferença de potencial elétrico muito baixa, geralmente de 1 volt, uma deformação é produzida na interface de sua união com o material. Usando uma frequência de excitação muito alta (do ponto de vista dos ensaios típicos de análise modal) a resposta dinâmica do material representa somente a área local do sensor. A resposta mecânica da vibração da área onde se encontra a pastilha de PZT é transmitida ao sensor na forma de uma resposta elétrica. Uma alteração mecânica que ocorra no material, como ganho ou perda de rigidez, por exemplo, causa mudanças na resposta dinâmica (dada pelo sinal de impedância) isto se manifesta na resposta elétrica do PZT (PALOMINO, 2008).

2.2 IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA

A impedância eletromecânica provém da integração da impedância mecânica com a elétrica. Na primeira, é medido o quanto o material resiste ao movimento ao aplicar uma determinada força, enquanto no segundo, entende-se como a oposição do circuito à passagem da corrente alternada.

2.2.1 Impedância Elétrica

A impedância elétrica pode ser definida como a oposição que um circuito ou componente oferece à corrente alternada, conforme descrito pela Equação 3.

$$Z = \frac{V}{I} \quad (3)$$

Sendo:

Z: impedância elétrica;

V: tensão elétrica alternada;

I: corrente resultante.

Sendo uma grandeza complexa, divide-se em duas partes: resistência e reatância. A resistência nos circuitos de corrente alternada é a mesma que a contraparte da corrente contínua e é expressa com um valor ôhmico positivo, corresponde à parte real. Para um circuito de corrente contínua, a corrente diminuiu à medida que a resistência aumenta, satisfazendo a Lei de Ohm. Nota-se o mesmo comportamento num circuito de corrente alternada. Para uma indutância ou capacitância, a situação não é tão simples quanto para a resistência elétrica (SILVA, 2017).

Reatância elétrica é a oposição oferecida à passagem da corrente alternada, apresentada tanto na forma indutiva como na capacitiva em um circuito elétrico. Constituiu-se então em uma componente da impedância de um circuito que não está relacionada a uma resistência pura. Quando a reatância é negativa, é classificada como capacitiva e obtida pela Equação 4 (PALOMINO, 2008).

$$X_c = \frac{1}{2 * \pi * \omega * C} \quad (4)$$

Sendo:

X_c : Reatância capacitiva;

ω : Frequência angular;

C: Capacitância em Farad.

Por outro lado, quando a reatância é positiva, a reatância é indutiva e seu valor em ohms é dado pela Equação 5. Por fim, quando a reatância é nula, a impedância é igual à resistência ôhmica e o circuito é dito como puramente resistivo (PALOMINO, 2008).

$$X_L = 2 * \pi * \omega * L \quad (5)$$

Sendo:

X_L : Reatância indutiva;

L: Indutância expressa em Henries.

A admitância é uma medida que representa a facilidade com que o meio conduz a corrente elétrica, sendo o inverso da impedância. Sendo também um número complexo, é composto por uma parte real e outra imaginária. Na parte real está o inverso da resistência, a condutância elétrica, medida em Siemens. Na parte imaginária encontra-se a susceptância, inverso da reatância, que também pode ser capacitiva ou indutiva (GIBILISCO, 2002).

2.2.2 *Impedância Mecânica*

A impedância mecânica, como mencionado anteriormente, expressa o quanto o material resiste ao movimento ao aplicar uma determinada força. Segundo Massoud (1985) a impedância mecânica é obtida a partir da razão entre a força aplicada em um determinado ponto e a velocidade mensurada no mesmo ponto (Equação 6).

$$Z_m = \frac{F}{X_{(t)}} \quad (6)$$

Sendo:

Z_m : Impedância mecânica;

F: Força;

$X_{(t)}$: Velocidade.

A impedância mecânica de um material varia com a frequência. Nos sistemas mecânicos serão manipuladas três grandezas básicas: o amortecimento, a massa e a flexibilidade mecânica.

Amortecimento mecânico (R_m) é o parâmetro associado à parte real da impedância mecânica, representando o agente que dissipa a energia mecânica entregue ao sistema. Um dispositivo mecânico suporta como uma resistência mecânica quando, ao ser ativado por uma força, esta é proporcional à velocidade que o dispositivo adquire, como pode ser visto na Equação 7 (PALOMINO, 2008).

$$f(t) = R_m * X_{(t)} \quad (7)$$

Sendo:

$f(t)$: Força em N;

R_m : Amortecimento mecânico em N*s/m;

$X_{(t)}$: Velocidade em m/s.

Massa mecânica (M_m) está relacionada com a parte imaginária positiva da impedância complexa. Assim, para um dispositivo mecânico ser considerado uma massa mecânica, uma força submetida a este dispositivo resultará numa aceleração diretamente proporcional à força aplicada, conforme Equação 8 (LEUCAS, 2009).

$$f(t) = M_m * \frac{dX(t)}{dt} \quad (8)$$

Por fim, a flexibilidade mecânica (C_m) está associada com a parte imaginária negativa da impedância complexa. Um dispositivo mecânico se comporta como uma flexibilidade mecânica quando, ao ser acionado por uma força, se desloca proporcionalmente à força, relação apresentada pela Equação 9. Na grande maioria, opta-se em trabalhar com seu inverso, a rigidez (K) (PALOMINO, 2008).

$$x(t) = C_m * f(t) \quad (9)$$

Sendo:

C_m : Flexibilidade Mecânica em m/N;

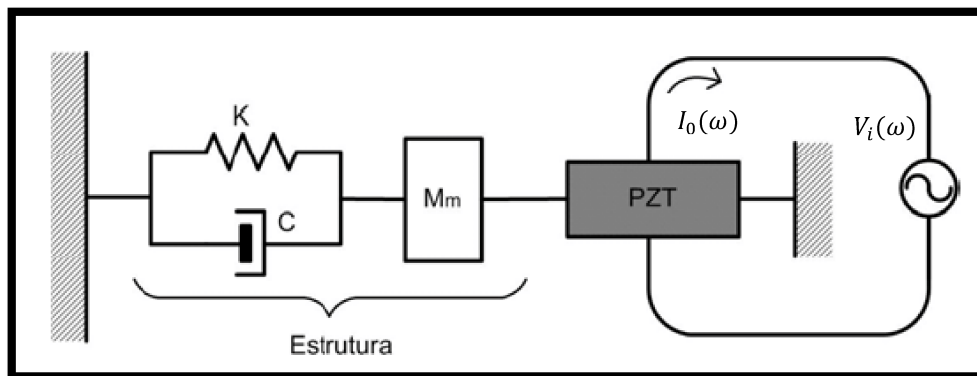
$x(t)$: Deslocamento em m.

2.2.3 Impedância Eletromecânica

O conceito básico dessa técnica é o monitoramento da variação da impedância mecânica do elemento causada por mudanças físicas do material. Como a medição direta da impedância mecânica do elemento ou estrutura é uma tarefa difícil, o método utiliza materiais piezelétricos colados ou incorporados ao material, permitindo medir a impedância elétrica. Esta se relaciona com a impedância mecânica do elemento ou da estrutura, permitindo monitorar mudanças na rigidez, amortecimento e massa do elemento ou da estrutura (PALOMINO, 2008).

O primeiro modelo eletromecânico, desenvolvido por Liang *et al.* (1994), que quantifica e descreve o processo de medição é apresentado na FIGURA 5 para um sistema com um grau de liberdade (1D) na qual as propriedades dinâmicas da estrutura monitorada são: M (massa); K (rigidez) e C (coeficiente de amortecimento).

FIGURA 5 - Modelo eletromecânico baseado em impedância eletromecânica 1D



Fonte: Leucas (2009).

Na FIGURA 5, o transdutor é excitado por uma fonte de tensão senoidal $V_i(\omega)$ com amplitude v e frequência angular ω . Pelo efeito atuador, o transdutor aplica uma força à estrutura que, em resposta, sofre uma deformação induzida. Pelo efeito do sensor, esta deformação induzida produz uma corrente de saída $I_o(\omega)$ com amplitude i e fase \emptyset . Considerando-se que as

propriedades do transdutor sejam invariáveis no tempo, qualquer mudança na estrutura irá afetar o valor da impedância do sistema. A impedância mecânica da estrutura monitorada é dada pela razão entre a força aplicada na estrutura $f(\omega)$ e a velocidade $X(\omega)$ com que a mesma se desloca. Numa analogia com um circuito elétrico, a força corresponde à tensão elétrica e a velocidade correspondente à corrente de saída, resultando assim na impedância elétrica correspondente. A impedância elétrica é então medida por um dispositivo de medição apropriado (RABELO, 2012).

Considerando que as propriedades mecânicas do PZT não variam ao longo do tempo em que ele é utilizado para o monitoramento do material ou da estrutura, Liang *et al.* (1994) demonstraram que a admitância $Y(\omega)$ do atuador PZT é dada por uma função combinada da impedância mecânica do atuador PZT, $Z_a(\omega)$ e da estrutura, $Z_s(\omega)$, conforme a Equação 10.

$$Y(\omega) = \frac{I_0(\omega)}{V_i(\omega)} = j\omega \frac{w_a l_a}{h_a} \left[\varepsilon_{33}^{-T} (1-j\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega)+Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \bar{Y}_{22}^E (1+j\eta) \right] \quad (10)$$

Sendo:

$Y(\omega)$: admitância elétrica do PZT;

$Z_s(\omega)$: impedância mecânica do material ou da estrutura monitorada;

$Z_a(\omega)$: impedância mecânica do PZT;

$V_i(\omega)$: tensão elétrica de entrada do atuador PZT;

$I_0(\omega)$: corrente de saída do PZT;

w_a, l_a e h_a : largura, comprimento e espessura da pastilha PZT;

\bar{Y}_{22}^E : módulo de Young do PZT com campo elétrico nulo;

d_{3x}^2 : constante de acoplamento piezelétrico;

ε_{33}^T : constante dielétrica do PZT com tensão mecânica nula;

δ : fator de perda dielétrica do PZT;

η : fator de perda mecânica do PZT;

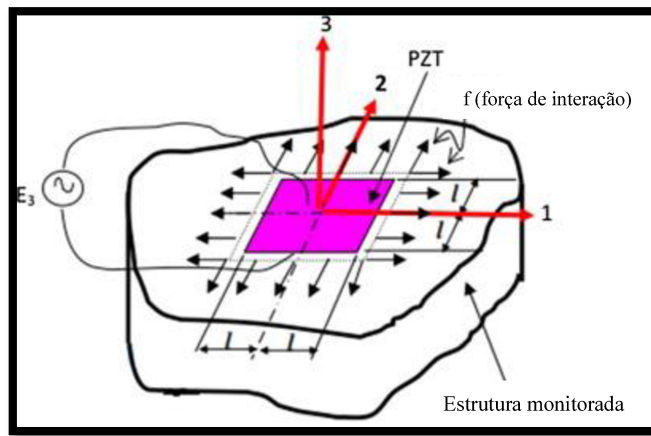
j : unidade imaginária $\sqrt{-1}$.

A Equação 10 demonstra que a impedância elétrica do PZT é diretamente relacionada com a impedância mecânica do material ou da estrutura monitorada. No caso de concreto em cura, as

propriedades mecânicas como rigidez, resistência e amortecimento, mudam ao longo do processo de hidratação. Essas propriedades podem ser inferidas indiretamente a partir das mudanças nas assinaturas de admissão. Como as assinaturas de admissão são de natureza elétrica, a interpretação dos dados é necessária para se relacionar com as mudanças físicas e alguns modelos estatísticos são utilizados para quantificar os sinais, sendo discutido no item 2.3 (LIM *et al.*, 2021).

Zhou, Liang e Rogers (1998) estenderam a formulação 1D de Liang *et al.* (1994) para a estrutura 2D. Eles definiram uma nova forma de impedância mecânica composta pelas impedâncias diretas as impedâncias cruzadas. Posteriormente, Bhalla e Soh (2004) introduziram a definição de impedância efetiva considerando a distribuição de transferência de força ao longo de todo o contorno do PZT, como mostrado na FIGURA 6, para propor uma modificação e melhoria na modelagem. A equação da admitância pela nova formulação é apresentada na Equação 11.

FIGURA 6 - Modelagem de interações PZT- estrutura usando abordagem de impedância efetiva de Bhalla e Soh (2D)



Fonte: Adaptado de Visalakshi; Bhalla; Gupta (2018).

$$Y(\omega) = G + Bj = 4j\omega \frac{l_a}{h_a} \left[\frac{\overline{\epsilon}_{33}^T}{(1-\nu)} - \frac{2d_{31}^2 \overline{Y}^E}{(1-\nu)} + \frac{2d_{31}^2 \overline{Y}^E}{(1-\nu)} \left(\frac{Z_{a,eff}}{Z_{s,eff} + Z_{a,eff}} \right) \frac{\tan kl_a}{kl_a} \right] \quad (11)$$

Sendo:

$Y(\omega)$: admitância elétrica do PZT;

G: condutância;

B : susceptância;
 j : unidade imaginária $\sqrt{-1}$;
 ω : frequência angular;
 l_a e h_a : comprimento e espessura da pastilha PZT;
 $\overline{\varepsilon_{33}^T}$: constante dielétrica do PZT com tensão mecânica nula;
 $\overline{Y^E}$: módulo de elasticidade de Young do complexo (em campo elétrico constante);
 d_{31}^2 : constante de acoplamento piezelétrico;
 ν : coeficiente de Poisson;
 $Z_{a,eff}$: impedância efetiva do PZT;
 $Z_{s,eff}$: impedância efetiva da estrutura;
 k : número de onda.

A admitância elétrica é basicamente capacitiva, mostrando que a parte imaginária é o termo dominante. Este termo imaginário é mais sensível à variação de temperatura do que a parte real. Desta forma, a parte real do sinal é geralmente utilizada na maioria das aplicações (RAJU, 1997 *apud* MOURA JUNIOR, 2008).

A sensibilidade da técnica em detectar as mudanças físicas do material está relacionada com a banda de frequência selecionada, que varia segundo a aplicação e a sensibilidade necessária. Para o monitoramento nas primeiras idades do concreto, monitorando a hidratação, faixas de frequência comumente adotadas vão de 1 a 450 kHz, enquanto os intervalos de frequência estão entre 0,1 e 0,5 kHz (LIM *et al.*, 2021).

Na técnica EMI o sensor PZT é conectado a um analisador de impedância de alta precisão (impedancímetro) que é controlado por um computador. Um software customizado é frequentemente usado para especificar a faixa de frequência de interesse e a tensão de atuação. O software então comandará o analisador de impedância para gerar uma tensão senoidal para acionar o PZT. A voltagem aplicada é frequentemente varrida na faixa de frequência estabelecida. A corrente elétrica através do PZT em cada ponto de frequência é simultaneamente medida pelo analisador de impedância e registrada pelo computador na forma de impedância elétrica (LIM *et al.*, 2021).

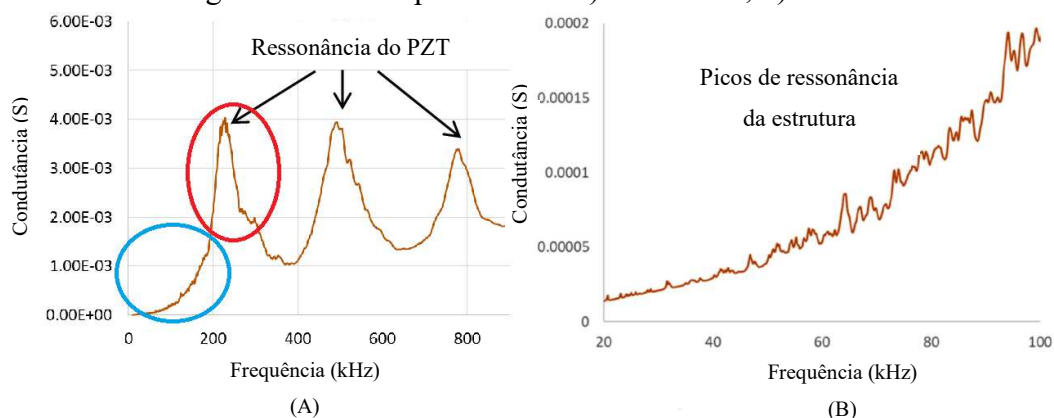
2.3 ANÁLISE QUALITATIVA

A análise qualitativa é realizada pela alteração dos picos de ressonância no espectro de impedância ou admitância, seu inverso, sendo comumente usados como indicadores de alterações das propriedades físicas do material, interpretando as mudanças dos sinais em magnitude e frequência. Nessa seção será realizada uma breve explicação do comportamento geral típico, baseada no trabalho de revisão criado por Lim *et al.* (2021), sendo aprofundada e aplicada a casos específicos na seção 2.5, com as interpretações realizadas por diferentes trabalhos de referência.

Vale ainda ressaltar que os sinais podem ser de admitância ou impedância, dependendo do dado que é coletado pelo analisador empregado, assim, o comportamento descrito para a magnitude da condutância (parte real da admitância) seria o inverso para os sinais de resistência ôhmica (parte real da impedância).

Vários picos de ressonância estão normalmente presentes em uma ampla faixa de frequência como mostra o exemplo apresentado na FIGURA 7 - A. Geralmente, existe um pico principal entre 0 e 400 kHz, que representa melhor o modo de ressonância do PZT, circulado em vermelho na FIGURA 7 - A. Na faixa de frequência mais baixa desse intervalo (normalmente menor que 100 kHz), existem picos de ressonância de tamanho menor densamente espaçados em curva que representam os modos vibracionais da estrutura, conforme exemplo apresentado na FIGURA 7 - B que é uma ampliação da área circulado em azul na FIGURA 7 - A.

FIGURA 7 - Assinaturas de condutância versus frequência adquiridas por um PZT colado em uma viga de concreto após 28 dias: a) 0-400 kHz; b) 20-100 kHz



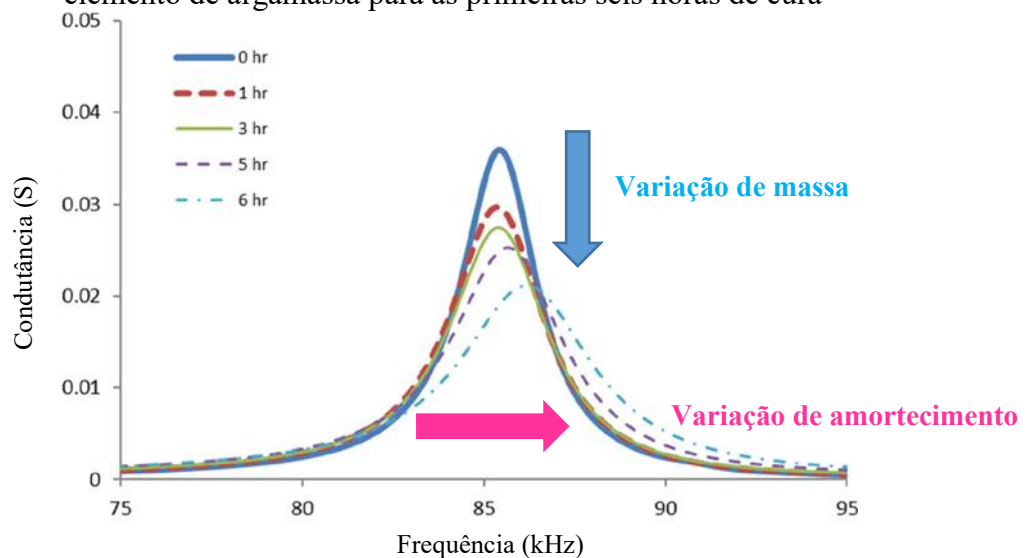
Fonte: Adaptado de Lim (2014).

Entretanto, os picos de ressonância direta da estrutura ou do material somente representam bem o comportamento mecânico após o concreto atingir o estado sólido, dessa forma o monitoramento do ganho de resistência nas primeiras idades deve ser realizado pelo pico do PZT, que consegue os sinais das primeiras horas pela interação indireta (LIM *et al.*, 2021).

Após definição da faixa de frequência de ressonância do PZT que melhor representa o comportamento do material, verificam-se as mudanças dos sinais em magnitude e a variação da frequência do pico de cada idade monitorada. As alterações percebidas nos sinais, são indicativos de que houve alguma alteração nos parâmetros mecânicos da estrutura: rigidez, massa e amortecimento (ao movimento do PZT) que refletem as mudanças das propriedades físicas do material, cabendo a interpretação de acordo com a situação e o material monitorado.

Dois exemplos de comportamentos são apresentados pelas curvas em um gráfico de condutância versus frequência. Na FIGURA 8 é possível perceber redução contínua da magnitude do pico de ressonância, que consistem no abaixamento da curva e achatamento do pico, acompanhando as setas azul e rosa, o comportamento de diminuição do valor de condutância indica que a variação nas propriedades físicas do material com variação de massa que muda o amortecimento para as variações de dimensão do PZT (LIM *et al.*, 2021).

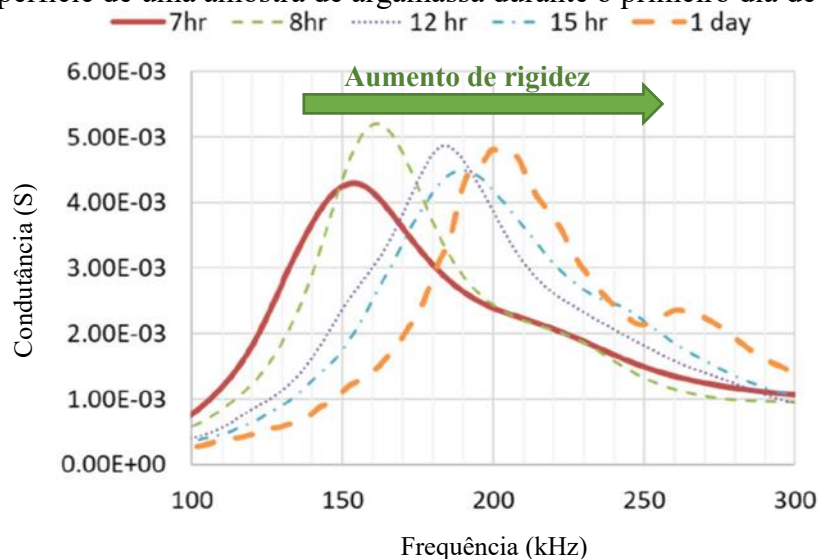
FIGURA 8 - Assinaturas de condutância versus frequência de um PZT embutido em elemento de argamassa para as primeiras seis horas de cura



Fonte: Adaptado de Lim (2014).

Na FIGURA 9, o pico de ressonância mudou progressivamente para a direita, como ilustra a seta verde, indicando um aumento na frequência de ressonância na medida que as propriedades físicas se alteravam. Esse comportamento indica que o material está aumentando sua rigidez em torno do PZT (LIM *et al.*, 2021).

FIGURA 9 - Assinaturas de condutância versus frequência adquiridas de PZT colado na superfície de uma amostra de argamassa durante o primeiro dia de cura



Fonte: Adaptado de Lim (2014).

2.4 ANÁLISE QUANTITATIVA ESTATÍSTICA

As assinaturas de admissão registradas a partir da técnica EMI são de natureza puramente elétrica. O desafio da técnica é interpretar as assinaturas elétricas para estabelecer propriedades mecânicas do material monitorado. Alguns modelos vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos, mas são modelagens complexas para a extração de parâmetros mecânicos. Por outro lado, o uso de quantificadores estatísticos, também chamados de métricas, tem se mostrado eficiente e são amplamente utilizados para análise dos dados da técnica EMI (LIM *et al.*, 2021).

Quantificadores estatísticos comumente usados são RMSD (Desvio Médio da Raiz Quadrada), CCD (Desvio do Coeficiente de Correlação), ASD (Diferença Média Quadrada) e MAPD (Desvio Percentual Absoluto da Média). Aplicam-se todas para o caso em estudo, em seguida adota-se a mais sensível. É importante ressaltar que, a fim estabelecer um parâmetro de

comparação e identificação da evolução dos índices, são definidos pontos de referência chamados de *baseline*.

O modelo estatístico mais utilizado na literatura é o RMSD e sua definição é dada pela Equação 12. Esse cálculo é realizado na faixa de frequência antecipadamente definida. A métrica RMSD mede a variação da impedância em cada ponto frequência e posteriormente realiza a soma do resultado (SILVA, 2017).

$$\text{RMSD} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i})]^2}{n} \right\}} \quad (12)$$

Sendo:

$\text{Re}(Z_{1,i})$: parte real da impedância da medição definida como *baseline* em uma frequência i ;

$\text{Re}(Z_{2,i})$: parte real da impedância em uma frequência i para uma nova configuração da estrutura;

n : número total de pontos utilizados na medição.

Outra métrica utilizada e apontada na literatura é o desvio do coeficiente de correlação (CCD). Essa métrica é utilizada para interpretar e quantificar a informação contida em dois conjuntos de dados. Sua definição matemática, envolve a diferença entre um coeficiente de correlação de uma dada medição e a referência (Equação 13).

$$\text{CCD} = 1 - \text{CC} \quad (13)$$

Sendo:

CCD: desvio do coeficiente de correlação;

CC: coeficiente de correlação dado pela Equação 14.

$$\text{CC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_1)) (\text{Re}(Z_{2,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_2))}{S_{Z_1} S_{Z_2}} \quad (14)$$

Sendo:

S_{Z_1} : desvio padrão do sinal de impedância da referência (*baseline*);

S_{Z_2} : desvio padrão do sinal de impedância a ser comparado;

\bar{Z}_1 : média dos valores da parte real da impedância da *baseline*;

\bar{Z}_2 : média dos valores da parte real da impedância da nova configuração.

Quando o coeficiente de correlação for igual a 1, os sinais possuem total correlação. A diferença entre os sinais e o valor de CC são inversamente proporcionais. (NAIDU; SOH, 2004).

Outra métrica utilizada pelo EMI para quantificar o dano é a diferença média quadrada, dada pela Equação 15, sendo a diferença das médias (δ) dado pela Equação 16.

$$ASD = \sum_{i=1}^n [\text{Re}(Z_{1,i}) - (\text{Re}(Z_{2,i}) - \delta)]^2 \quad (15)$$

$$\delta = \text{Re}(\bar{Z}_1) - \text{Re}(\bar{Z}_2) \quad (16)$$

Com o uso dessa métrica, busca-se também eliminar o efeito das variações da amplitude devidas a mudanças no ambiente (SILVA, 2017).

O desvio percentual absoluto da média (MAPD) é outra métrica utilizada no EMI, dado pela Equação 17.

$$MAPD = \sum_{i=1}^n \left| \frac{(\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i}))}{\text{Re}(Z_{1,i})} \right| \quad (17)$$

Por fim, tem-se a métrica que é dada pela simples somatória da diferença média entre os sinais, dada pela Equação 18.

$$M = \sum_{i=1}^n (\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i}))^2 \quad (18)$$

2.5 APLICAÇÕES TÉCNICAS

A técnica EMI, nas últimas décadas, foi amplamente estudada para o monitoramento de integridade estrutural (SHM) sendo aplicada na detecção de danos em projetos de engenharia aeroespacial, civil e mecânica, principalmente, buscando aumentar a vida útil da estrutura (PALOMINO, 2008). Atualmente, novos estudos estão sendo desenvolvidos com o intuito de avaliar a aplicação do método no monitoramento do processo de cura e desenvolvimento de resistência de materiais cimentícios, incluindo o concreto (LIM *et al.*, 2021).

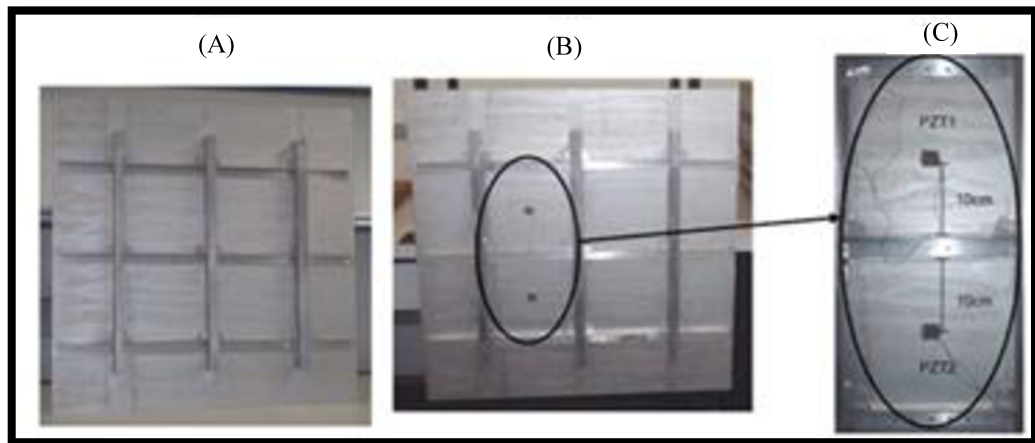
Nesse sentido, essa sessão apresenta alguns dos trabalhos que serviram de referência para o desenvolvimento dessa pesquisa, abordando as possíveis aplicações da técnica EMI em materiais cimentícios. Vale ressaltar que são apresentados trabalhos com temas além do objetivo dessa pesquisa, como SHM, pois foram importantes para fundamentar a técnica a ser aplicada, visto que os estudos voltados para o ganho de resistência do cimento com EMI começaram a ser desenvolvidos recentemente.

2.5.1 *Análise das métricas estatísticas em estrutura aeronáutica e em ensaio à fadiga*

Palomino (2008), assim como outros pesquisadores da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), desenvolveu sua pesquisa de mestrado empregando a técnica EMI para identificação de danos incipientes em estruturas aeronáuticas e em ensaio à fadiga. Seu trabalho trouxe embasamentos importantes para a avaliação das métricas estatísticas, merecendo aqui um lugar de destaque ainda que se trate de uma aplicação em materiais metálicos.

Reduzindo o modelo a condições laboratoriais, utilizou-se uma parte da fuselagem de uma aeronave, com dimensões de 810x810 mm, para simular a perda de um rebite. Na superfície, foram coladas duas pastilhas de PZT, conforme a FIGURA 10 (PALOMINO, 2008).

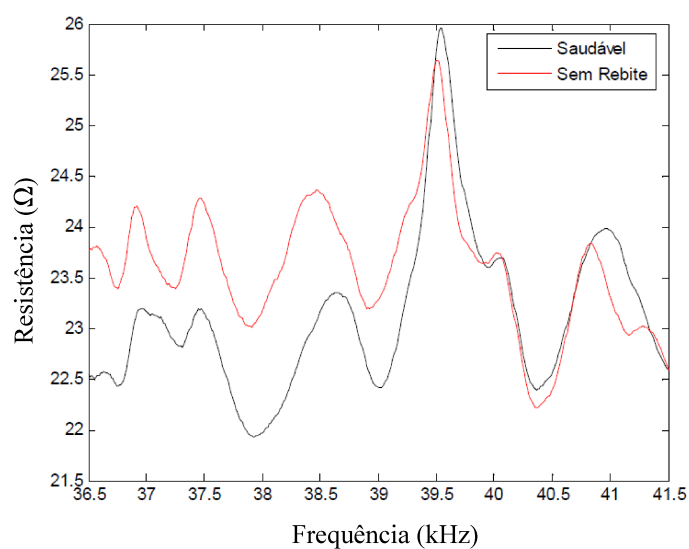
FIGURA 10 - Parte da fuselagem de um avião: a) estrutura de fuselagem; b) pastilhas de PZT coladas na estrutura; c) distância de 10cm entre as pastilhas de PZT e a estrutura



Fonte: Palomino (2008).

Com o analisador HP4194A, foi realizada a aquisição dos sinais de impedância do PZT para cada uma das condições da estrutura: saudável (sem danos) e, após retirar um dos rebites, com dano. A faixa de frequência utilizada para os ensaios foi de 36,5kHz até 41,5kHz, sendo que a cada dia foram tomadas seis medições. A FIGURA 11 apresenta os sinais médios da parte real da impedância eletromecânica em função da frequência, medidos em cada estado da placa. Pode-se perceber que a técnica detecta a perda do rebite pela variação dos sinais (PALOMINO, 2008).

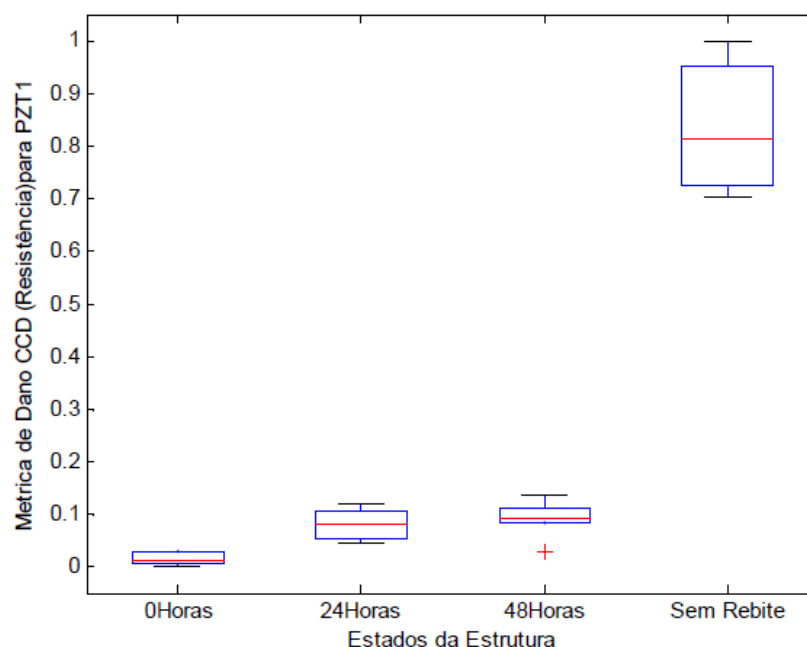
FIGURA 11 - Sinais de impedância medidos na fuselagem para o PZT 1



Fonte: Adaptado de Palomino (2008).

Em seguida, foi realizado o cálculo dos índices estatísticos, aqui nomeados como métricas de dano, RMSD, MAPD, ASD, M e CCD, este ilustrado na FIGURA 12 para exemplificar. Todos eles foram sensíveis à retirada do rebite, mostrando diferença entre os valores obtidos sem e com dano, sendo as três últimas as melhores métricas para esse estudo de caso. Em seguida, para comprovar a eficiência do CCD, ASD e M foi realizada uma análise de variância (ANOVA) testando a hipótese se as médias dos valores das métricas sem dano eram realmente diferentes daqueles com dano. O teste demonstrou estatisticamente que essas três métricas foram capazes de reconhecer adequadamente a falta do rebite no painel aeronáutico (PALOMINO, 2008).

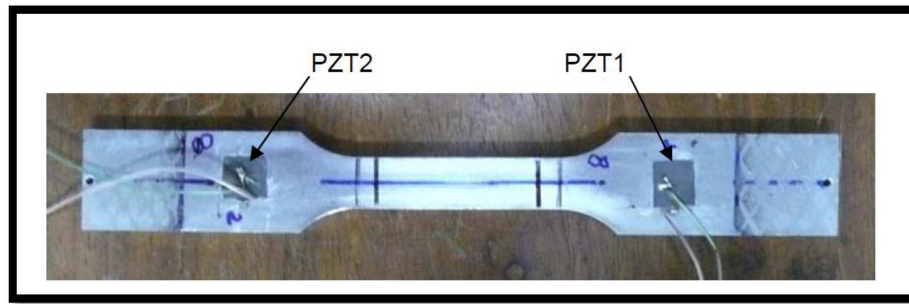
FIGURA 12 - Média e desvio padrão da métrica CCD



Fonte: Palomino (2008).

Na sequência, a autora também realizou um estudo de SHM baseado na técnica EMI aplicada em ensaios de fadiga. Foram coladas duas pastilhas de PZT de 10x10x0,1 mm, fora da área de concentração de tensões, em três corpos de prova com dimensões conforme a ABNT NBR ISO 6892-1:2018 conforme ilustra a FIGURA 13 (PALOMINO, 2008).

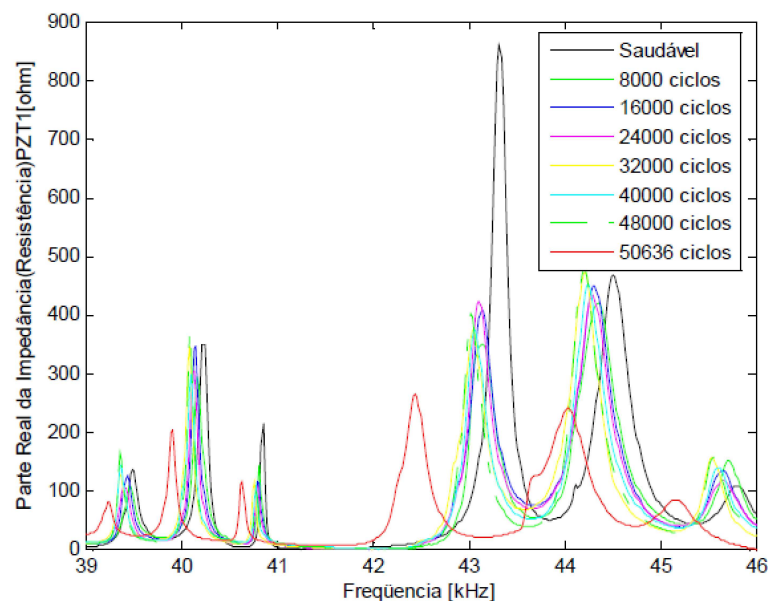
FIGURA 13 - Pastilhas de PZT coladas no corpo de prova de fadiga



Fonte: Palomino (2008).

Inicialmente os sinais de impedância foram monitorados antes do ensaio, estado saudável da estrutura. Em seguida aplicaram-se os ciclos de força, definidos para cada corpo de prova em ensaio anterior, na máquina de ensaio, retirou-se o corpo de prova e uma nova medição de impedância foi realizada e assim sucessivamente, até o aparecimento de trinca visível. A análise foi realizada em quatro faixas de frequência distintas: 39kHz a 46kHz; 103,5kHz a 112,5kHz; 148kHz a 153kHz; 178kHz a 184,2kHz, sendo a primeira faixa a que apresentou melhores resultados para o monitoramento, segundo a autora as frequências muito elevadas levaram a resultados insatisfatórios (PALOMINO, 2008). As curvas de impedância para a frequência de 39kHz a 46kHz do PZT 1, corpo de prova 2, estão ilustrados na FIGURA 14 para exemplificar.

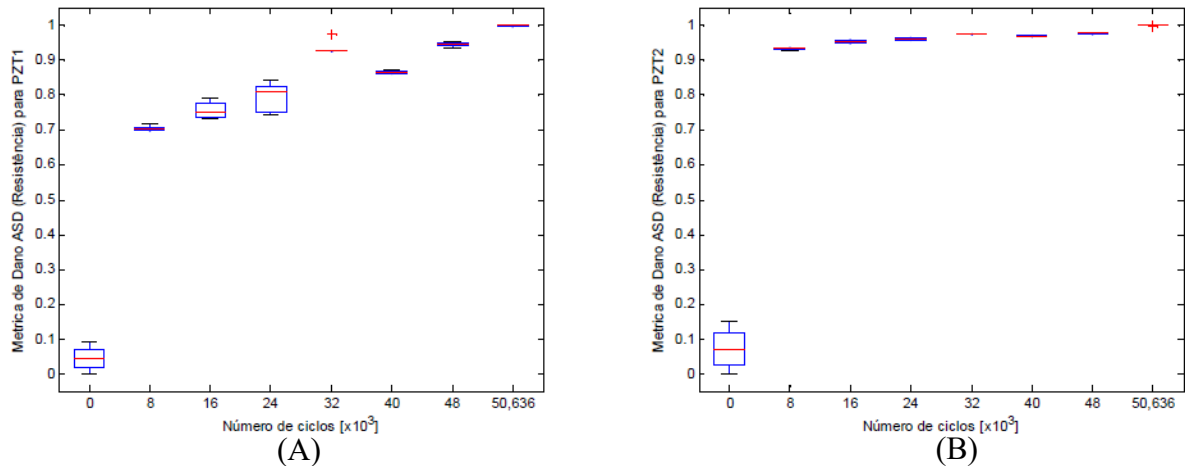
FIGURA 14 - Sinais de impedância (parte real) para o PZT 1 do corpo de prova 2



Fonte: Palomino (2008).

Por fim, foram calculadas as métricas e realizados os testes de hipótese para avaliá-las. Para o segundo corpo de prova, que demonstrou melhor desempenho, com os dados provenientes das duas pastilhas de PZT no mesmo tempo para a faixa de frequência de 39 kHz a 46 kHz, a métrica que apresentou melhor resultado para a fadiga foi a ASD (PALOMINO, 2008), apresentada na FIGURA 15.

FIGURA 15 - Métrica ASD para a faixa de frequência 39 kHz a 46 kHz: a) PZT1, b) PZT 2



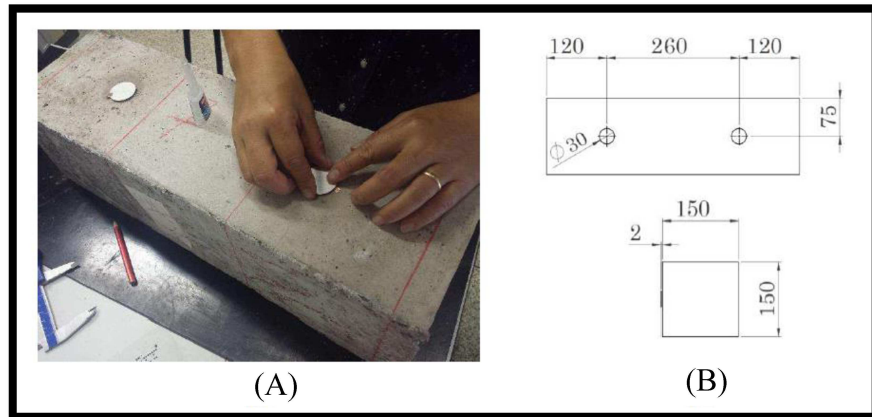
Fonte: Palomino (2008).

A autora concluiu que ficou evidenciada a necessidade de, numa aplicação específica, calcular todas as métricas para selecionar aquela que tem maior sensibilidade. Evidenciou também que existe uma correlação importante entre o número de ciclos dos ensaios e a variação da impedância, acreditando ser possível definir a proximidade da vida útil de um componente estrutural pela avaliação da técnica EMI (PALOMINO, 2008).

2.5.2 SHM utilizando a técnica EMI aplicada em estruturas de concreto

Ainda fazendo parte das pesquisas realizadas na UFU, na Faculdade de Engenharia Mecânica, Silva (2020) monitorou sinais de impedância devido a danos em concreto reforçado com fibras. Em seu procedimento experimental, inicialmente foram moldados corpos de prova prismáticos (150x150x500 mm) de concreto com resistência característica à compressão (f_{ck}) de 40 MPa aos 28 dias, para ensaio de tenacidade na flexão aos 47 dias. Após a cura, duas pastilhas de PZT foram fixadas na superfície do corpo de prova, com cianoacrilato líquido, dispostos estrategicamente como mostra a FIGURA 16.

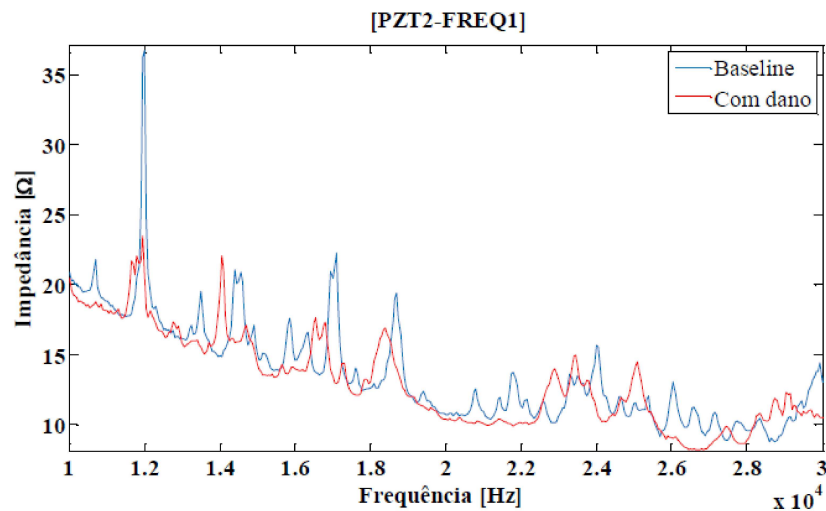
FIGURA 16 - Acoplamento de sensores: a) colagem dos sensores PZT na superfície do corpo de prova; b) posição dos sensores em milímetros



Fonte: Silva (2017).

Os sinais de impedância foram mensurados antes e após a geração do dano, utilizando o analisador de impedância *Agilent 4294A*. Foram utilizadas duas faixas de frequência de 10 kHz a 30 kHz e de 80 kHz a 120 kHz, sendo que esta última faixa se mostrou menos sensível. Na FIGURA 17, para a primeira faixa de frequência e PZT 2, pode-se perceber que a parte real do sinal de impedância medida após surgimento do dano modificou significativamente, ao ser comparado com a *baseline*, a autora concluiu que as frequências mais altas são menos sensíveis (SILVA, 2017).

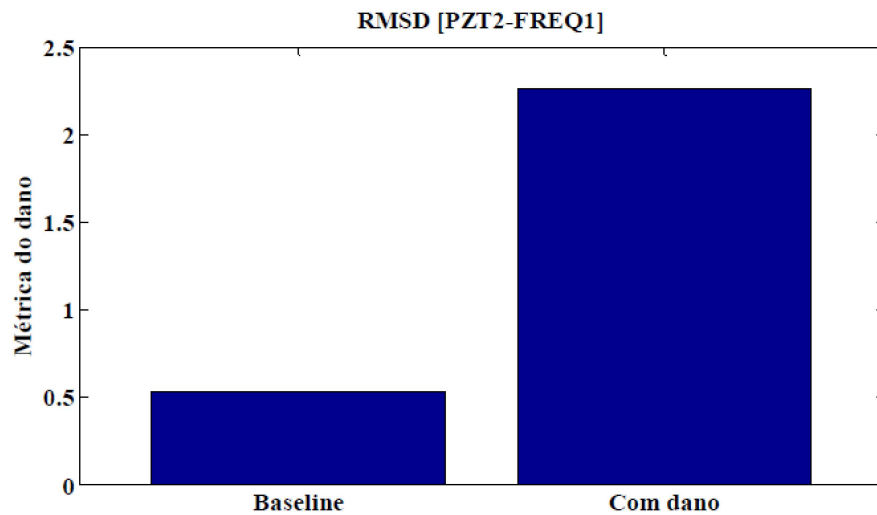
FIGURA 17 - Assinaturas de impedância: PZT2 e intervalo de frequência de 10 a 30 kHz



Fonte: Silva (2017).

Verifica-se que as assinaturas de impedância modificaram após a geração do dano e, para quantificar essa modificação, foram calculadas as métricas de dano RMSD, CCD, ASD e M, sendo que os resultados confirmaram a presença do dano (SILVA, 2017). A FIGURA 18 apresenta os resultados para o RMSD do PZT 2.

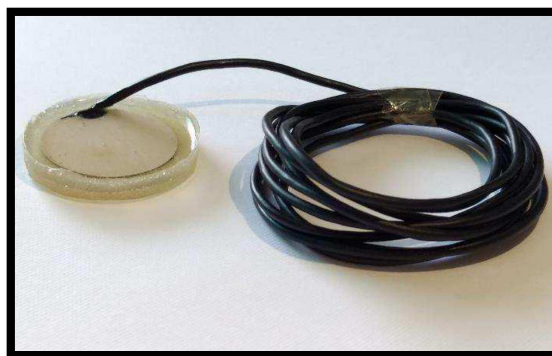
FIGURA 18 - PZT2 [10 kHz a 30 kHz]: Média da métrica de dano RMSD



Fonte: Silva (2017).

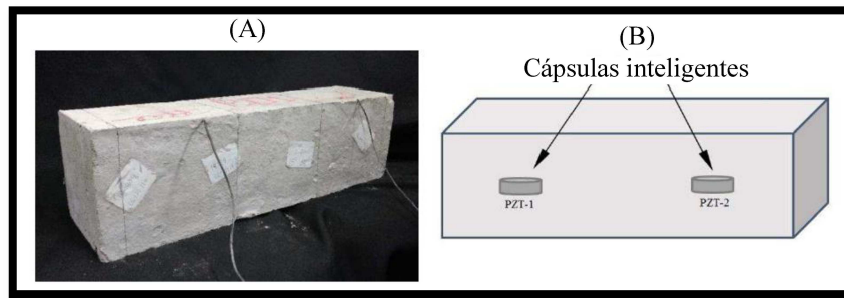
Ainda em Silva (2020) o mesmo ensaio foi realizado com o PZT encapsulado com resina epóxi e incorporado ao concreto, ao qual a autora nomeou de cápsula inteligente (FIGURA 19 e FIGURA 20).

FIGURA 19 - Cápsula inteligente: PZT envolto com resina epóxi



Fonte: Silva (2020).

FIGURA 20 - Corpo de prova de concreto com cápsulas inteligentes embutidas: a) amostra prismática utilizada; b) esquema com a posição aproximada dos sensores



Fonte: Silva (2017).

Realizou-se o monitoramento de integridade estrutural aplicando a técnica da impedância E/M, antes, durante e após a geração do dano, provocado pelo ensaio de tenacidade à flexão após 42 dias de cura do concreto. Constatou-se também que as assinaturas de impedância obtidas para as cápsulas inteligentes na amostra prismática foram modificadas consideravelmente. A partir daí tais sinais foram tratados numericamente utilizando as métricas de dano RMSD e ASD (SILVA, 2017).

Por fim, realizou-se um ensaio de punção de uma laje de 1800x1800x130 mm com dois sensores PZT encapsulados e incorporados ao concreto, conforme FIGURA 21. O monitoramento foi realizado com o analisador de impedância *Agilent 4294A*, com intervalo de frequência entre 20kHz e 80kHz, registrando o sinal durante 58 horas consecutivas antes do dano e, após o dano, repetiu-se o processo de medição do sinal com o mesmo período (SILVA, 2017).

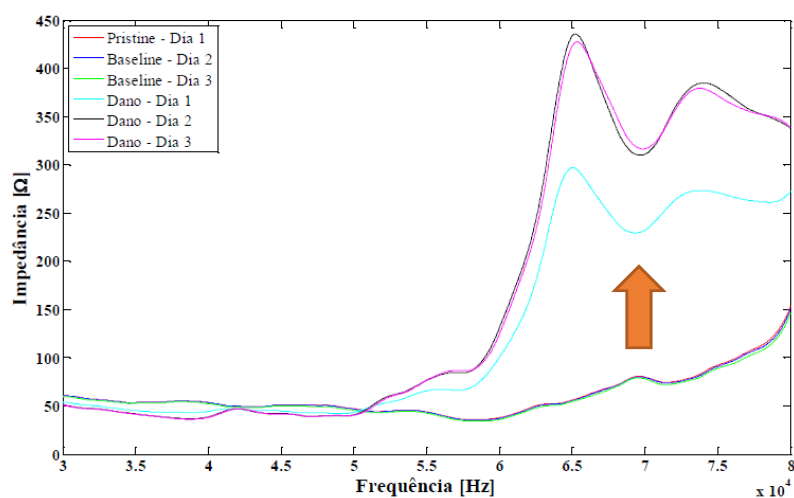
FIGURA 21 - Laje a ser ensaiada à punção: a) armadura posicionada na fôrma com as cápsulas inteligentes posicionadas, b) laje finalizada



Fonte: Silva (2017).

Ao analisar os resultados obtidos com as cápsulas inteligentes incorporadas na laje de concreto, concluiu-se que a metodologia aplicada foi adequada. Neste contexto, observou-se que as assinaturas de impedância (FIGURA 22) obtidas foram sensíveis ao dano, pela alteração de sinal destacada pela seta de cor laranja, e que as métricas de dano confirmaram o diagnóstico (SILVA, 2017).

FIGURA 22 - Assinatura de impedância do PZT1 referente à laje antes e após o dano por punção

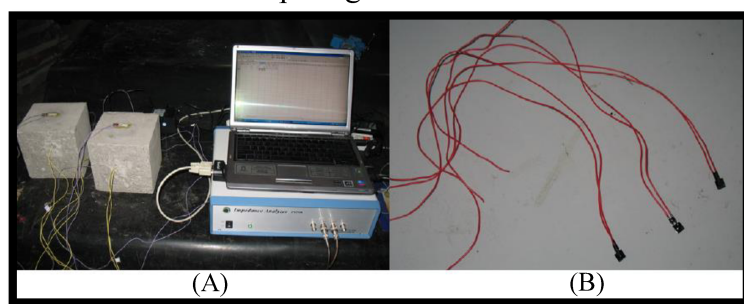


Fonte: Adaptado de Silva (2017).

2.5.3 Monitoramento do ganho de resistência do concreto com PZT embutido

Dansheng e Hongping (2011) realizaram ensaios com 42 cubos de concreto de 150 mm de aresta, colando um PZT sem cápsula na superfície do corpo de prova e incorporando ao concreto outro sensor PZT, protegido com uma membrana asfáltica conforme ilustra a FIGURA 23.

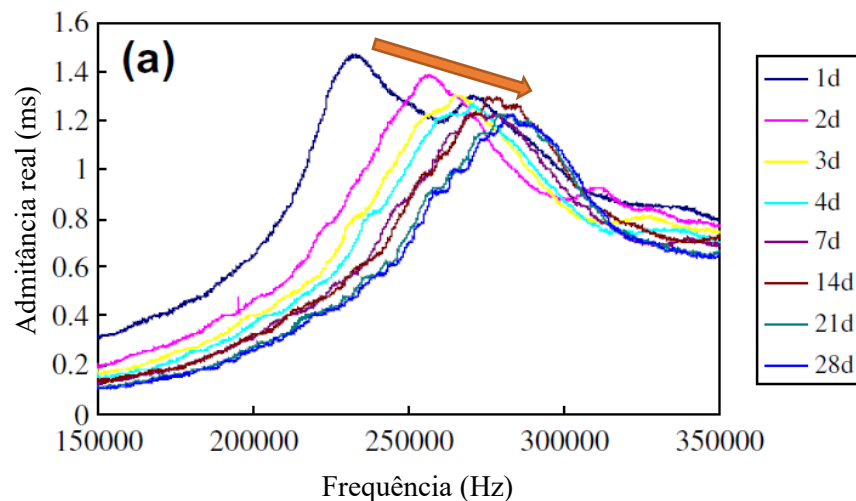
FIGURA 23 - Monitoramento do concreto: a) PZT colado na superfície e embutido; b) PZT a ser embutido protegido com camada asfáltica



Fonte: Dansheng e Hongping (2011).

O sinal de admitância (inverso da impedância) do PZT embutido foi monitorado em uma faixa de frequência de 150 a 350 kHz, em 1, 2, 3, 4, 7, 14, 21 e 28 dias, sendo submetidos também à ruptura por compressão nessas idades. Os picos das curvas de admitância se deslocaram para direita e para baixo, isto é, a frequência foi incrementada e diminuiu o valor da admitância com a evolução das idades, sendo mais expressivo o deslocamento entre 1 e 7 dias, conforme pode ser analisado seguindo a seta de cor laranja na FIGURA 24. Segundo os autores, o aumento da frequência ressonante e a diminuição da magnitude da ressonância sugerem um aumento gradual na rigidez e resistência do cubo de concreto (DANSHENG; HONGPING, 2011).

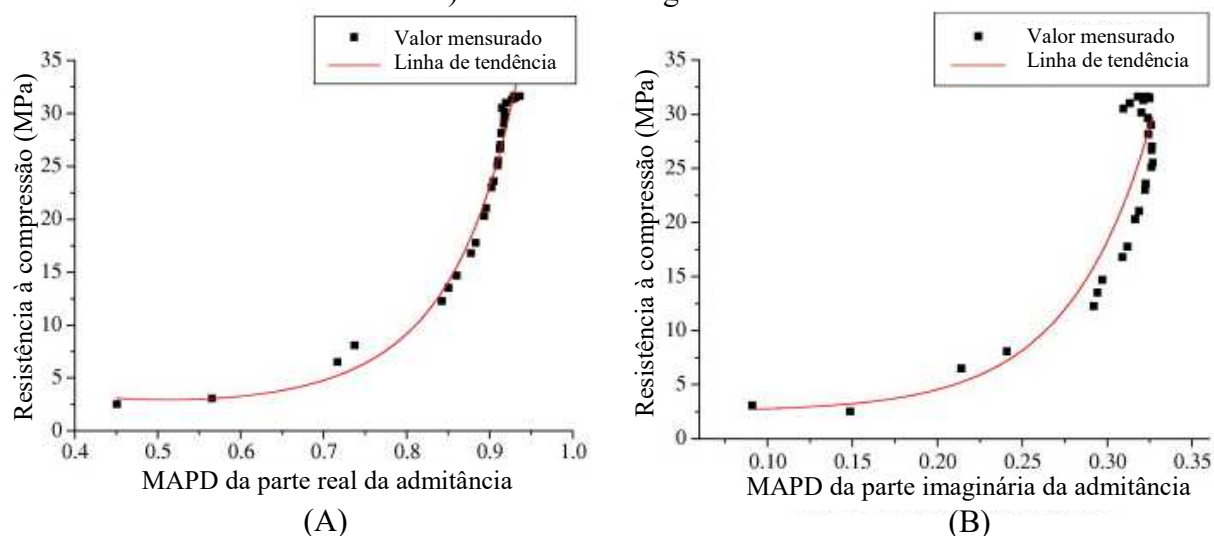
FIGURA 24 - Curva da parte real da admitância em diferentes idades



Fonte: Adaptado de Dansheng e Hongping (2011).

Foi correlacionado o ganho de resistência à compressão do concreto com índices estatísticos: RMSD e MAPD, parte real e imaginária. Os autores concluíram que os índices calculados com a parte real da admitância, representaram melhor o ganho de resistência do concreto, se comparado com os resultados obtidos com a parte imaginária, como pode ser visto na FIGURA 25 que ilustra o caso para o MAPD (DANSHENG; HONGPING, 2011).

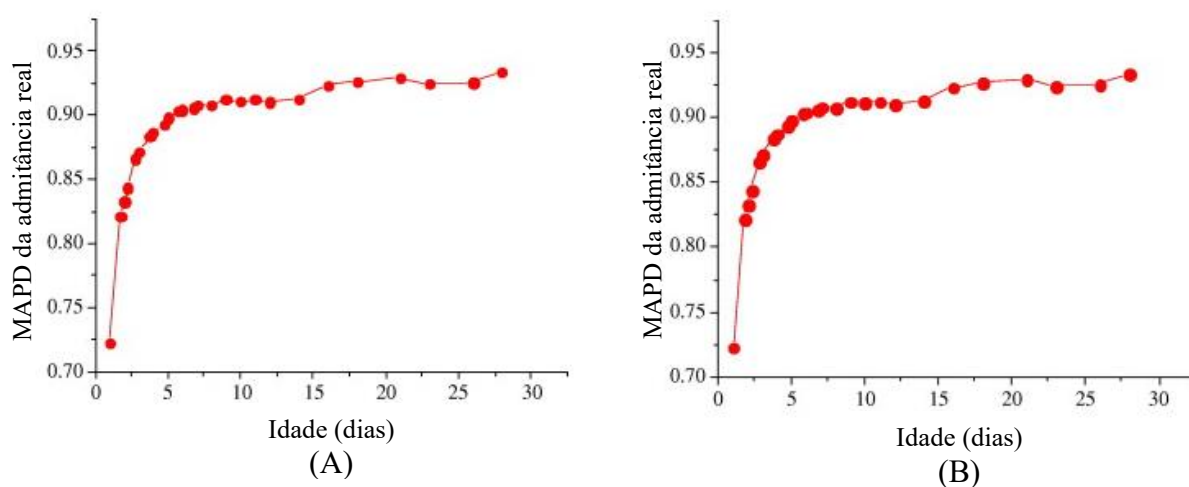
FIGURA 25 - A correlação entre a resistência à compressão e o MAPD: a) admitância real; b) admitância imaginária



Fonte: Adaptado de Dansheng e Hongping (2011).

Pela FIGURA 25 pode-se verificar que o índice MAPD de admitância real aumenta com o incremento da resistência à compressão do concreto, emitindo uma boa correlação desses parâmetros. O mesmo ocorreu com o índice RMSD. As métricas também foram plotadas em função do tempo, valores de MAPD e RMSD de admitância real aumentam acentuadamente nos primeiros 7 dias, enquanto aumentam lentamente nas próximas idades, conforme FIGURA 26 (DANSHENG; HONGPING, 2011).

FIGURA 26 - Índices determinados com a admitância real: a) MAPD; b) RMSD

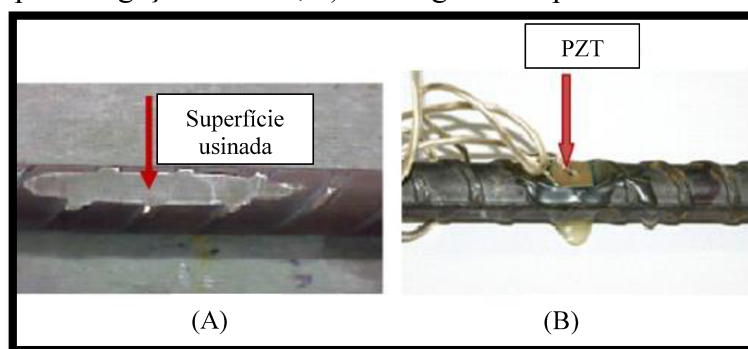


Fonte: Adaptado de Dansheng e Hongping (2011).

2.5.4 Monitoramento do processo de hidratação do cimento em concreto armado

Visalakshi, Bhalla e Gupta (2018) acoplaram sensores piezelétricos quadrados de 10x10x0,3mm em uma barra de aço de 16 mm de diâmetro, com resina epóxi, em seguida concretaram seis cilindros de 70x100 mm, posicionando a barra no centro, a superfície de acoplamento é ilustrada na FIGURA 27. Os eletrodos soldados do PZT foram fixados ao medidor LCR, em torno de uma hora após a concretagem. As assinaturas de admitância eletromecânica, consistindo na parte real (condutância G) e na parte imaginária (susceptância B) foram adquiridas em uma faixa de frequência de 50 kHz a 400 kHz, com intervalo de frequência de 100 Hz usado para cada medição de impedância.

FIGURA 27 - Acoplamento do PZT na superfície da barra: a) superfície usinada e acabada para a ligação do PZT; b) PZT ligado à superfície da barra



Fonte: Adaptado de Visalakshi; Bhalla; Gupta (2018).

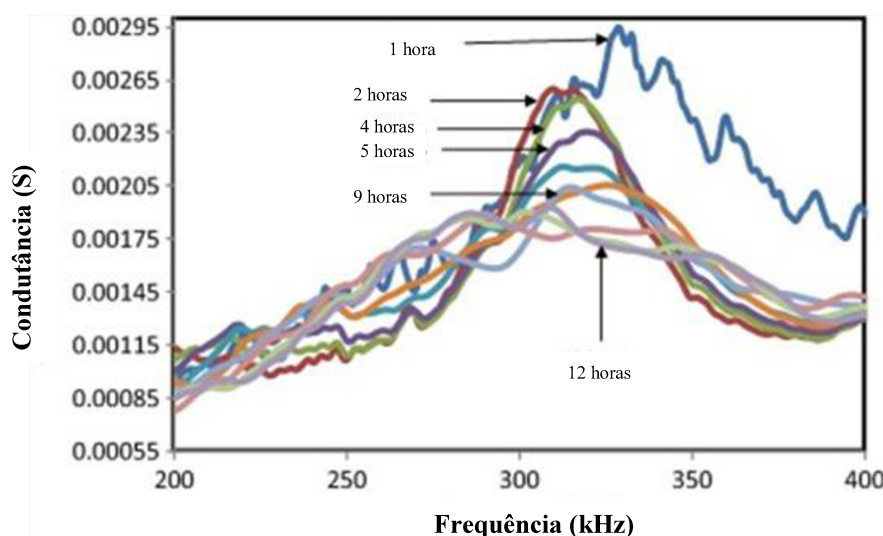
Os autores relatam sobre o cuidado que se deve ter ao aplicar a técnica EMI em uma estrutura de concreto real, onde o calor gerado no processo de hidratação pode impactar nos sinais coletados, uma vez que o volume de concreto é grande, devendo ser realizadas compensações de temperatura. Entretanto, no caso de corpos de prova de laboratório, os quais são pequenos o suficiente para permitir uma rápida dissipação do calor, a compensações de temperatura passa a não ser necessária, não sendo empregada nesse estudo (VISALAKSHI; BHALLA; GUPTA, 2018).

Os autores trazem a ressalva, que a precisão das assinaturas adquiridas está intimamente relacionada à integridade da camada de ligação. Portanto, é importante verificar periodicamente a integridade do sensor PZT ligado, durante o monitoramento, para garantir a confiabilidade da medição (VISALAKSHI; BHALLA; GUPTA, 2018).

Quando as propriedades da estrutura hospedeira são alteradas devido ao aumento da resistência, por exemplo, a impedância mecânica da estrutura sofre alteração, que é então refletida como a mudança da assinatura de admitância. Como o processo de hidratação também envolve mudanças nos parâmetros estruturais, as mudanças na assinatura de admittance foram monitoradas em dois cenários diferentes: monitoramento de curto prazo (STM), 1 hora a 12 horas, e monitoramento de longo prazo (LTM), 1º dia a 28 dias. No STM o endurecimento inicial é o início de um enrijecimento perceptível e, o final, é o início do endurecimento (perda completa de plasticidade, isto é, o concreto não pode ser deformado mais sem comprometer suas propriedades) (VISALAKSHI; BHALLA; GUPTA, 2018).

A FIGURA 28 mostra as assinaturas da parte real da admitância, a condutância, adquirida do PZT de um dos corpos de prova, durante o período de STM. A variação da assinatura de susceptância, parte imaginária, não é muito representativa.

FIGURA 28 - Variação de assinaturas de condutância durante o STM



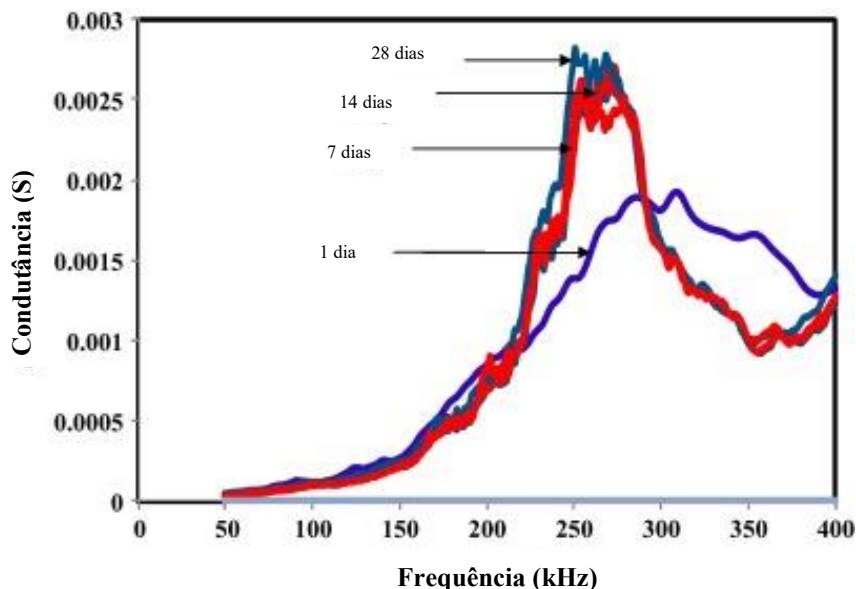
Fonte: Adaptado de Visalakshi; Bhalla; Gupta (2018).

Pelo gráfico da FIGURA 28 pode-se observar que o pico de ressonância durante a segunda hora muda bruscamente para a esquerda de acordo com a rápida reação de silicato tricálcico (C_3S) e aluminato tricálcico (C_3A) com adição de água, acompanhada de liberação de grande quantidade de calor. Durante este período, o pH sobe rapidamente acima de 12 devido à liberação de íons de hidróxido alcalino. Essa hidrólise inicial então desacelera rapidamente (na segunda hora), resultando em uma diminuição no calor desenvolvido. Após a segunda hora, a

assinatura da condutância muda gradualmente para a direita conforme o processo de hidratação prossegue e a pasta se torna mais rígida (por causa da reação do C_3S), isto é, há um aumento da frequência de ressonância que mudou de 326 kHz para 358 kHz e a magnitude da condutância mudou de 0,0012 S para 0,0045 S (VISALAKSHI; BHALLA; GUPTA, 2018).

A FIGURA 29 mostra a variação das assinaturas de condutância para uma amostra no período LTM. Observa-se que do dia 1 ao dia 7, a assinatura torna-se mais nítida por conta do aumento da rigidez e redução do amortecimento, pois o concreto ganha mais de 70% de sua resistência nesse período em condições normais de cura. Após o dia 7, qualquer alteração adicional na assinatura de condutância é mínima (VISALAKSHI; BHALLA; GUPTA, 2018).

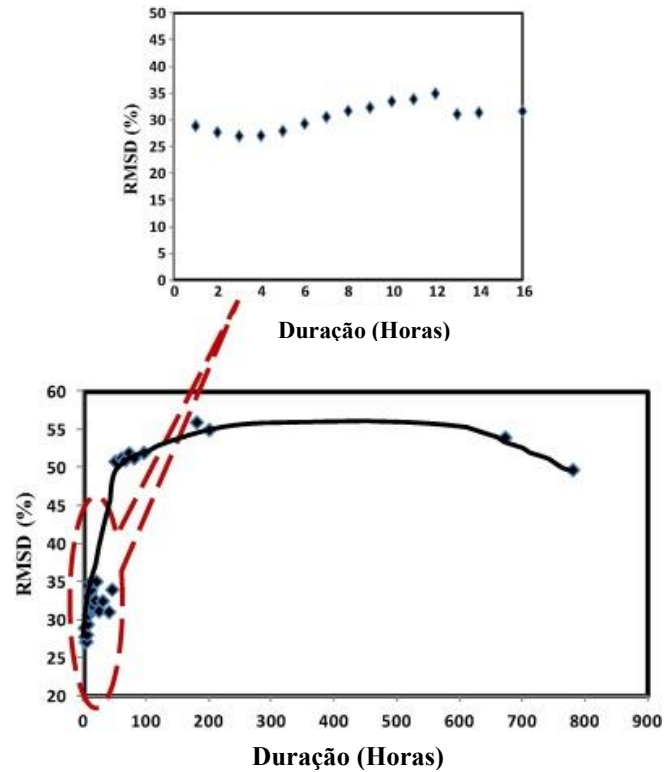
FIGURA 29 - Variação de assinaturas de condutância durante o LTM



Fonte: Adaptado de Visalakshi; Bhalla; Gupta (2018).

O índice estatístico RMSD foi determinado, pode-se notar pela FIGURA 30 que durante o processo de hidratação total (1 h a 28 dias) os valores do RMSD seguem mais ou menos uma tendência crescente (VISALAKSHI; BHALLA; GUPTA, 2018).

FIGURA 30 - Variação RMSD em diferentes idades

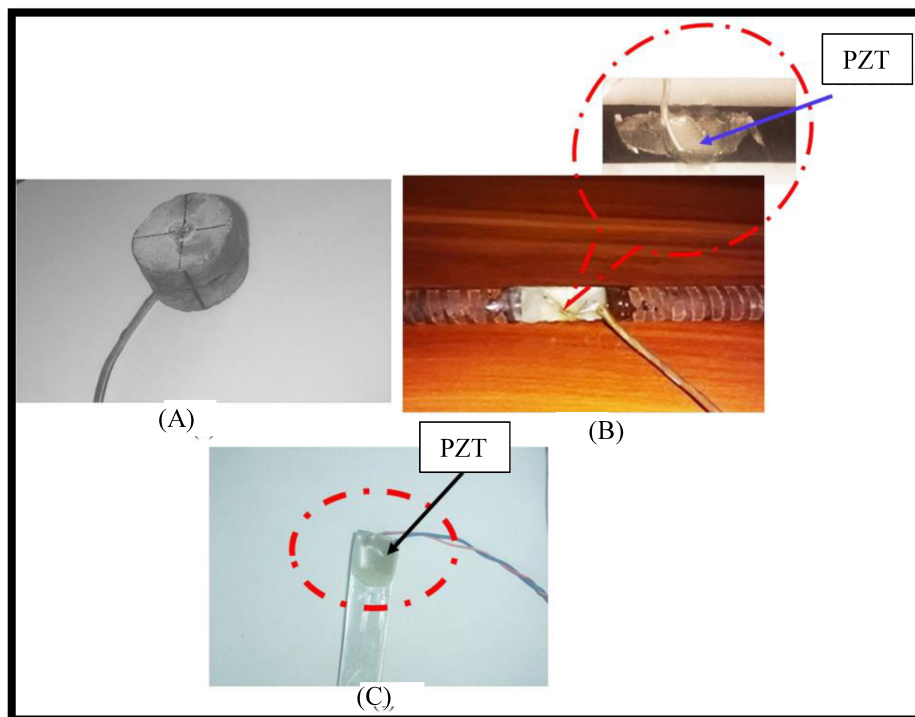


Fonte: Adaptado de Visalakshi; Bhalla; Gupta (2018).

2.5.5 Comparação entre três diferentes configurações de ligação do PZT ao concreto

Moharana e Bhalla (2019) propuseram um novo monitoramento de hidratação do cimento pela técnica de impedância eletromecânica de um transdutor piezelétrico reutilizável, acoplado na parte externa de uma fina folha de metal incorporada parcialmente ao concreto. Para isso, moldaram três amostras de cubos com 150 mm de aresta feitos com concreto de traço 1:1,34:2,74: 0,44. O PZT, tamanho 10×10×0,3 mm, foi associado ao cubo de concreto em três configurações diferentes para fins de avaliação (FIGURA 31): (a) embutido no concreto ao redor da barra de aço, (b) colado com adesivo epóxi a vergalhões de aço embutidos no concreto como reforço e (c) preso no final de uma folha de alumínio, por sua vez embutido dentro do concreto.

FIGURA 31 - Várias configurações de sensor consideradas no estudo: a) PZT embutido na forma de CVS; b) PZT ligado a barra de aço e c) PZT ligado a folha de metal



Fonte: Adaptado de Moharana e Bhalla (2019)

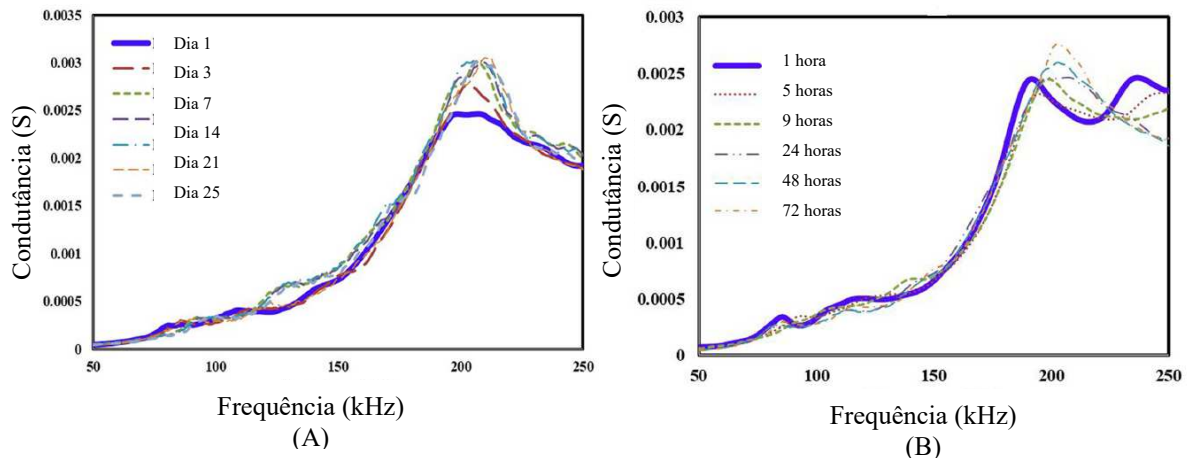
A configuração c da FIGURA 31, era a nova configuração piezoelétrica testada pelos autores. A EMI foi baseada na técnica MWBEMI a qual usou um fio metálico para monitoramento de hidratação de concreto, pela primeira vez. Na configuração proposta, o PZT não é diretamente colado na superfície da estrutura, como comumente usado em pesquisas anteriores, mas opera a partir da extremidade do fio de aço por sua vez preso à amostra de concreto (MOHARANA; BHALLA, 2019).

O corpo de prova de concreto foi instrumentado com um medidor LCR (Agilent 4980A) e um laptop equipado com software de aquisição de dados (VEEPRO 9.2). Foram medidos os sinais de condutância e suscetância dos PZTs para a faixa de frequência de 50 kHz a 300 kHz, em um intervalo de 100 Hz. As assinaturas EMI foram registradas a cada hora, para as 12 horas iniciais, e foi monitorado pelos próximos 28 dias (MOHARANA; BHALLA, 2019).

A partir da FIGURA 32, FIGURA 33 e FIGURA 34, da plotagem dos sinais reais de admitância (condutância), pode-se observar picos inicialmente agudos nas frequências ressonantes dos PZTs, que achataram com o passar do tempo, quando o concreto passou do plástico para o

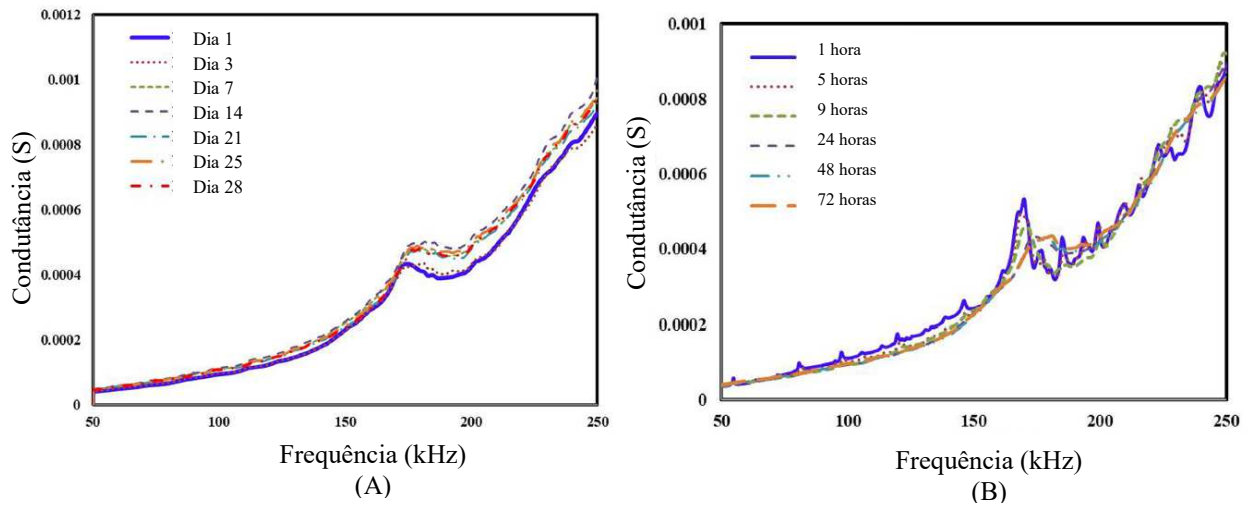
estado endurecido. As maiores mudanças foram observadas nas primeiras 40 horas. Depois disso, os deslocamentos foram bem graduais, indicando que o concreto atinge a maior parte de sua rigidez nas horas iniciais, seguido de variações nominais (MOHARANA; BHALLA, 2019).

FIGURA 32 - Assinatura de condutância para a configuração A - PZT embutido: a) hidratação de longo prazo; b) hidratação primeiras horas



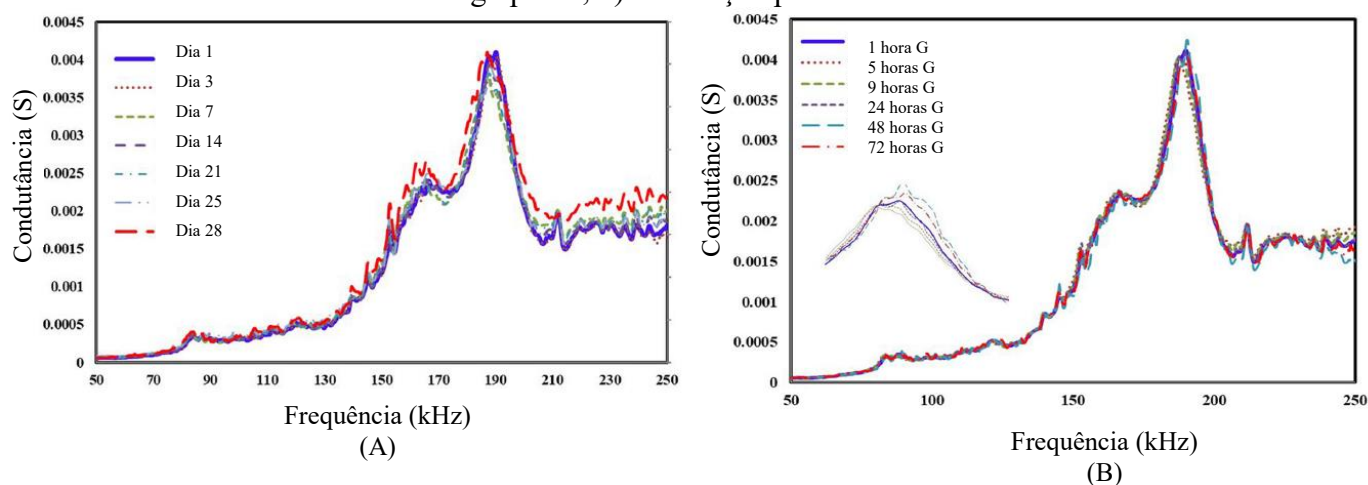
Fonte: Adaptado de Moharana e Bhalla (2019)

FIGURA 33 - Assinatura de condutância para a configuração B - PZT colado à barra de aço: a) hidratação de longo prazo; b) hidratação primeiras horas



Fonte: Adaptado de Moharana e Bhalla (2019)

FIGURA 34 - Assinatura de condutância para a configuração C - MFBPS: a) hidratação de longo prazo; b) hidratação primeiras horas

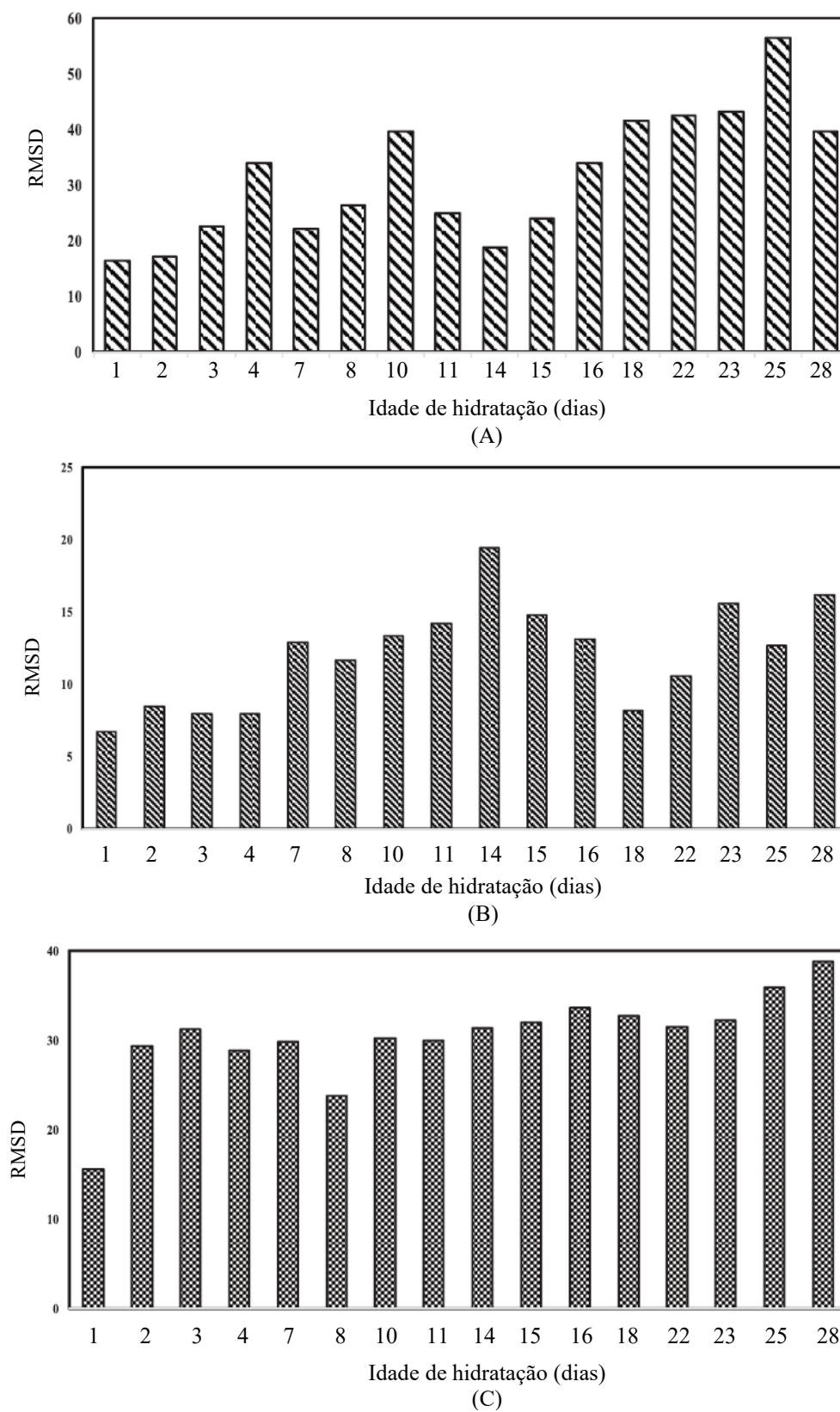


Fonte: Adaptado de Moharana e Bhalla (2019)

As três técnicas mostraram-se sensíveis. Com relação à nova configuração testada, do sensor piezelétrico colado em folha de metal (MFBPS), os picos de ressonância das assinaturas de condutância aumentam significativamente em magnitude ao longo do processo de hidratação envolvendo solidificação, densificação e endurecimento. O aumento contínuo do pico de ressonância demonstra sua excelente capacidade de monitorar o processo de ganho de resistência do concreto. Portanto, pode ser amplamente utilizado para monitoramento e técnicas de identificação de danos para aquelas estruturas onde a acessibilidade é o principal desafio (MOHARANA; BHALLA, 2019).

Por fim, foi realizado o cálculo do RMSD para monitorar o processo quantitativamente, cujos gráficos são apresentados na FIGURA 35. Observou-se que inicialmente os valores de RMSD aumentaram significativamente devido à rápida pega do concreto, mas a partir daí atingem valores mais ou menos constantes com o tempo. Exceto pela magnitude, a tendência do RMSD é semelhante para todas as configurações de PZT, no entanto, um número significativo de pontos discrepantes também pode ser observado (MOHARANA; BHALLA, 2019).

FIGURA 35 - Variação do RMSD durante o monitoramento da hidratação: a) sensor embutido; b) sensor ligado ao vergalhão; c) sensor MFBPS



Fonte: Adaptado de Moharana e Bhalla (2019)

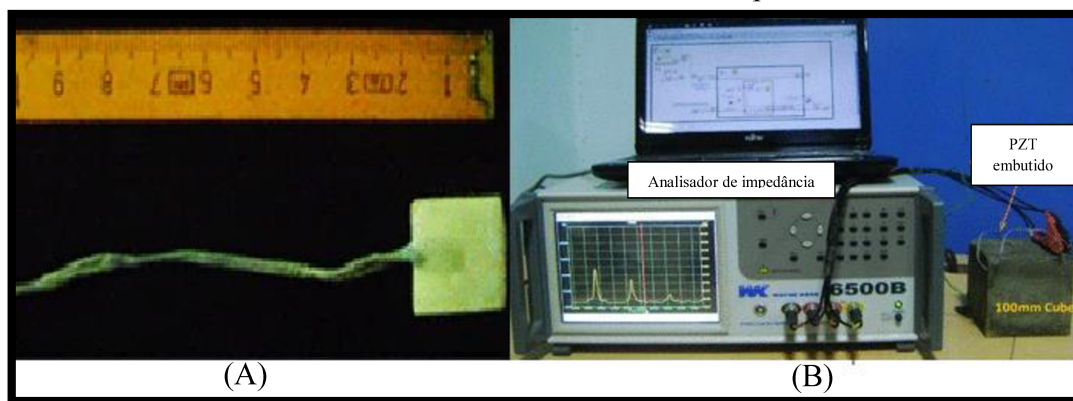
2.5.6 Monitoramento da hidratação de diferentes traços de argamassa

Narayanan, Kocherla e Subramaniam (2017) procederam um programa experimental envolvendo o monitoramento de diferentes misturas de argamassa a partir da técnica EMI com sensor PZT embutido, as medições dos sinais de admitância foram realizados usando um analisador de impedância série 6500B da marca Wayne Kerr, com tensão aplicada de 1 V e faixa de frequência de 10 kHz a 500 kHz.

Foram incorporados às argamassas sensores de PZT de 1 mm de espessura e dimensões de 20×20 mm protegidos por multicamadas: a primeira consistia em uma fina camada de polímero epóxi de dois componentes, que fornecia a proteção física além de evitar curto-circuito elétrico entre os terminais; a segunda era composta por uma fina camada de revestimento hidrofóbico (à base de acetona, propano e n-butano) foi pulverizada uniformemente no sensor revestido com epóxi, o PZT revestido é ilustrado na FIGURA 36 - A (NARAYANAN; KOCHERLA; SUBRAMANIAM, 2017).

O PZT revestido foi inserido em cubos, com 100 mm de aresta, moldados com três diferentes misturas de argamassa preparadas com diferentes relações água/ cimento (a/c): 0,5; 0,4; 0,3. A proporção da massa de cimento Portland comum para areia foi mantida fixa em 1:2 em todas as misturas de argamassa. O procedimento experimental montado é ilustrado na FIGURA 36 - B (NARAYANAN; KOCHERLA; SUBRAMANIAM, 2017).

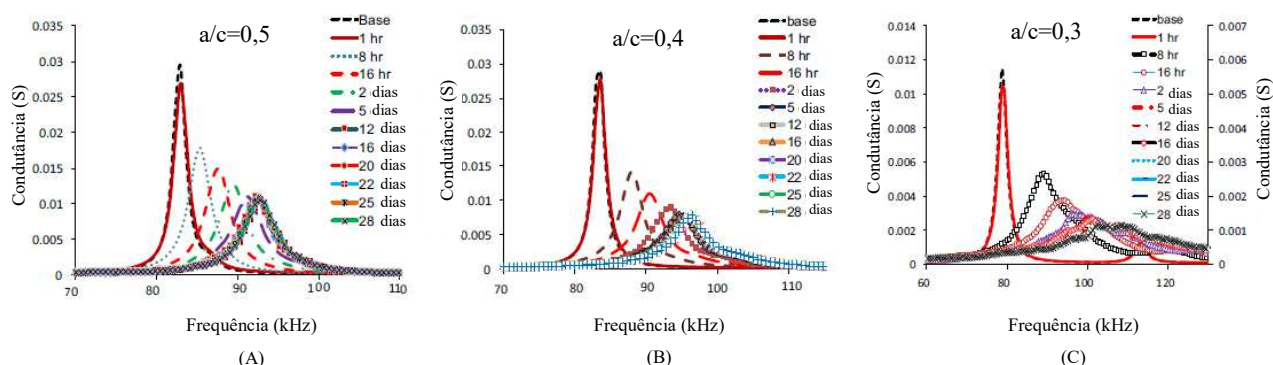
FIGURA 36 - Procedimento experimental: a) PZT revestido; b) cubo de argamassa com PZT embutido conectado ao analisador de impedância



Fonte: Adaptado de Narayanan, Kocherla e Subramaniam (2017).

Os sinais de condutância obtidos são apresentados na FIGURA 37. As medidas indicam uma mudança muito rápida na amplitude do pico ressonante nas primeiras 24 horas, que é seguida por uma diminuição contínua até os 28 dias de idade. O aumento inicial da rigidez da argamassa, que está associado à mudança de estado durante a hidratação e ao ganho de resistência inicial no sólido, é detectado com sensibilidade em todas as amostras usando o sensor PZT (NARAYANAN; KOCHERLA; SUBRAMANIAM, 2017).

FIGURA 37 - Espectros de condutância registrados a partir do sensor PZT embutido nas misturas de argamassa: a) $a/c = 0,5$; b) $a/c = 0,4$; c) $a/c = 0,3$



Fonte: Adaptado de Narayanan, Kocherla e Subramaniam (2017).

As mudanças na impedância mecânica da mistura de argamassa são funções do tempo e da relação a/c da mistura de argamassa. As medições de condutância indicam uma taxa mais rápida de endurecimento da argamassa de cimento circundante na mistura com menor razão a/c . Partindo do estado fluido, com o tempo, a argamassa torna-se menos trabalhável e eventualmente torna-se um sólido após passar pela pega. O aumento da rigidez do material resulta em um aumento da impedância mecânica ao movimento vibratório do sensor PZT. A rigidez adicionada ao sensor PZT incorporado do meio circundante resulta em uma mudança na frequência de ressonância. A redução no valor do pico de condutância com o tempo é comparável para misturas de argamassa com relações a/c 0,4 e 0,5 enquanto a mistura de argamassa com relação a/c 0,3 mostra uma redução significativamente maior com o tempo, o que indica uma maior rigidez (NARAYANAN; KOCHERLA; SUBRAMANIAM, 2017).

Narayanan, Kocherla e Subramaniam (2017) analisaram as mudanças na frequência e amplitude do modo ressonante determinadas em relação à frequência de pico e amplitude do sensor PZT antes de embuti-lo dentro da argamassa conforme Equações 19 e 20.

$$\Delta w = w_c - w_0 \quad (19)$$

$$\Delta Y(\%) = \frac{Y'_c - Y'_0}{Y'_0} * 100 \quad (20)$$

Sendo:

Δw : magnitude da mudança na frequência de pico;

w_c : frequência de pico em um determinado momento;

w_0 : frequência de pico inicial do sensor PZT;

ΔY : mudança percentual na condutância de pico em um determinado momento em relação à frequência de pico inicial e amplitude;

Y'_c : condutância no pico de ressonância em um determinado momento;

Y'_0 : condutância inicial no pico de ressonância do sensor PZT.

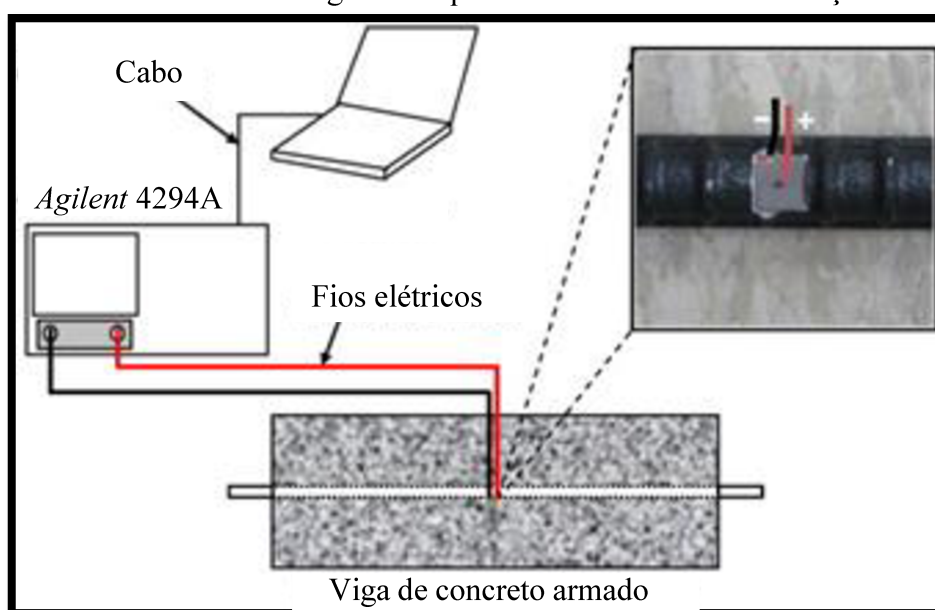
O valor de $\Delta\omega$ do PZT para a mistura com relação a/c menor exibe uma taxa de aumento significativamente mais rápida e um valor significativamente mais alto de $\Delta\omega$ (16 kHz nas primeiras 14 h) em um determinado momento quando comparado com as outras duas misturas. Consistente com outras medidas, o percentual na condutância observado na amostra de argamassa com a/c de 0,3 é significativamente maior do que as outras duas relações a/c. As argamassas com a/c de 0,5 e 0,4 exibiram diminuições de 43% e 59%, respectivamente, do valor de base, enquanto a amostra com a/c de 0,3 exibe uma diminuição de 81% do valor inicial (NARAYANAN; KOCHERLA; SUBRAMANIAM, 2017).

2.5.7 *Hidratação de concreto armado como um indicador do desenvolvimento de aderência na interface aço-concreto*

Tawie e Lee (2010b) analisaram, a partir das medições EMI, que a adesão gradual entre o vergalhão de aço e o concreto fresco pode ser detectada por meio das mudanças medidas nos espectros de condutância do sensor PZT ligado ao vergalhão de aço. Para isso, colaram na superfície de uma barra de aço, com adesivo epóxi, um PZT com tamanho de 10×10×0,3 mm, revestido com massa epóxi para protegê-lo contra a umidade e incrustação no concreto fresco.

O aço com PZT foi então instalado dentro de um molde de viga (150×150×500 mm) com o sensor posicionado para baixo, conforme esquema da FIGURA 38. O concreto fresco com traço de 1:1:2:0,4 foi despejado na forma, em duas camadas de altura aproximadamente iguais. Dez minutos após a concretagem foi realizada a medição de admitância eletromecânica (E/M) inicial. Em seguida, as medidas foram realizadas 1, 3, 6, 9, 12, 24, 72 e 168 horas após a moldagem. O corpo de prova só foi deformado após 48 horas e levado para cura úmida (TAWIE; LEE, 2010b).

FIGURA 38 - Diagrama esquemático do sistema de medição



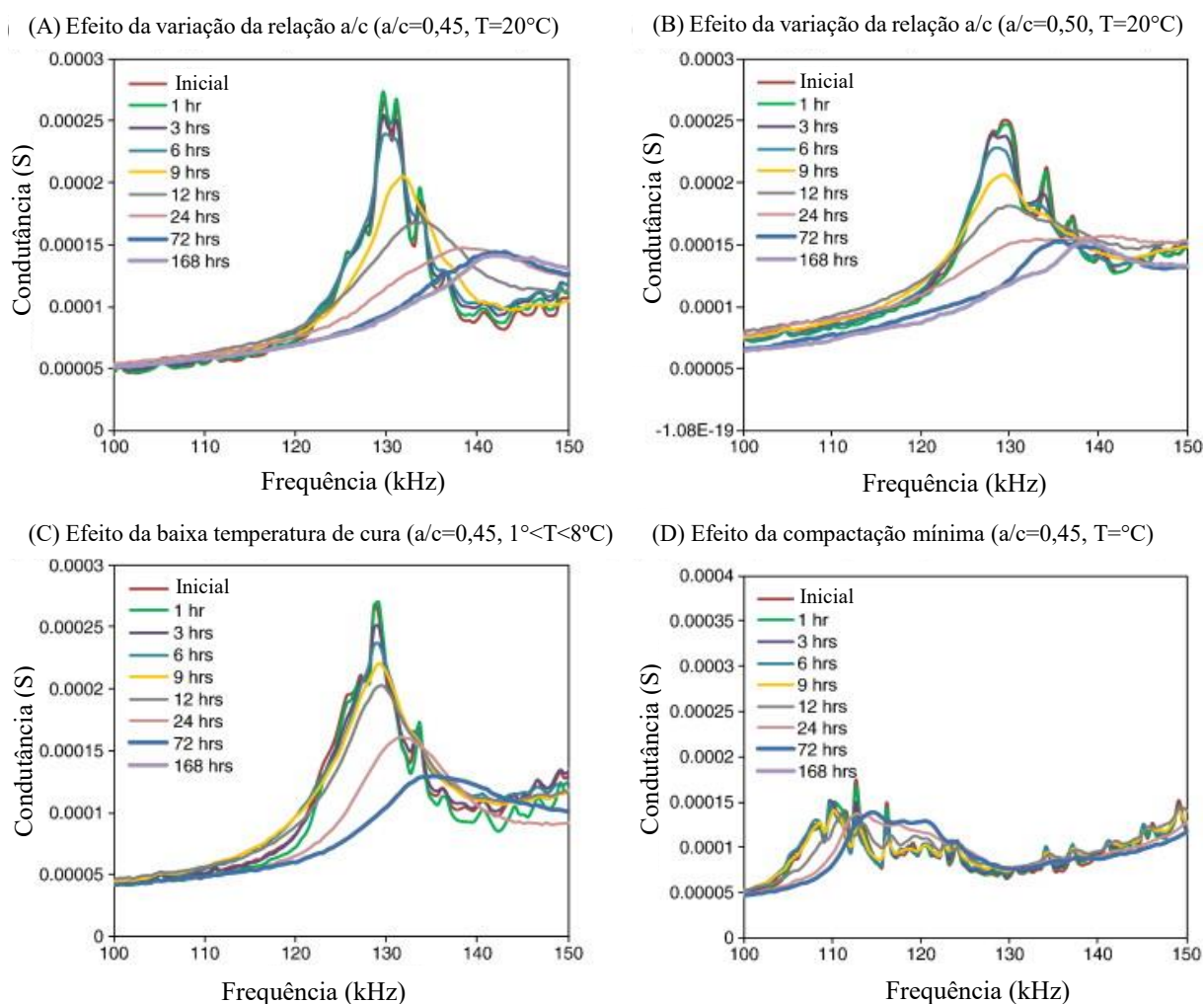
Fonte: Adaptado de Tawie e Lee (2010b).

Excitação de alta frequência, até 400 kHz, foi usada na medição da admitância, utilizando um analisador Agilent 4294A. A aderência do concreto à barra de aço foi analisada em situações distintas: foi investigado o efeito da variação da razão a/c, temperatura de cura e compactação nos espectros de condutância do PZT (TAWIE; LEE, 2010b).

A FIGURA 39 - A apresenta os sinais obtidos para cada situação, podendo-se perceber que a magnitude reduziu drasticamente até a 3ª hora, enquanto a frequência de ressonância permaneceu constante. Então, uma mudança repentina na magnitude e frequência foi observada entre a 3ª hora e a 9ª hora. A mudança repentina pode sugerir o início de rigidez no concreto fresco. Tawie e Lee (2010b) acreditam que o rápido desenvolvimento da aderência ocorreu durante este período, quando o concreto perdeu sua plasticidade e enrijeceu até certo ponto.

Após a 9ª hora, o espectro de condutância mudou para a direita, sugerindo que o endurecimento do concreto começou e o aumento gradual na frequência de ressonância reflete o desenvolvimento contínuo da ligação ao longo do tempo a resistência de união em 1, 3 e 7 dias foi de 26, 57 e 68%, respectivamente, daquela aos 28 dias. As mudanças significativas no espectro de condutância foram perceptíveis até a 72ª hora.

FIGURA 39 - Resultados experimentais: a) relação a/c de 0,45, boa compactação e cura à 20°C; b) relação a/c de 0,5, boa compactação e cura à 20°C; c) relação a/c - 0,45, boa compactação e cura entre 1°C e 8°C; d) relação a/c - 0,45, compactação mínima e cura à 20°C



Fonte: Adaptado de Tawie e Lee (2010b).

O desenvolvimento da aderência pode ser atribuído à transformação do concreto do estado plástico para o sólido controlado pela hidratação do cimento e, monitorando a hidratação do concreto com relação ao tempo, o estado de aderência pode ser estimado. Comparando a FIGURA 39 - A e B, o efeito da relação a/c mais alta pode ser visto onde a relação a/c de 0,45

teve um período de inatividade mais curto. Durante a mistura do concreto, a relação a/c mais alta torna as partículas de cimento mais afastadas, devido à microestrutura solta, misturas com altas razões a/c se fixariam mais lentamente e ganhariam menor resistência de aderência (TAWIE; LEE, 2010b).

As curvas da FIGURA 39 - A e C foram geradas a partir de curas distintas: a) em temperatura controlada de 20°C em sala de laboratório; c) foi exposta ao frio durante o inverno com temperatura aproximada não superior a 8°C, mas acima de 1°C. Pelas curvas percebe-se que a baixa temperatura de cura afeta a taxa de mudança de frequência, devido ao retardo na pega e no ganho de resistência do concreto, o desenvolvimento da aderência foi mais lento sob a baixa temperatura de cura (TAWIE; LEE, 2010b).

As curvas da FIGURA 39 - A e D foram obtidas de situações diferentes de compactação: a) corpo de prova totalmente compactado seguiu o procedimento padrão de compactação e acabamento; d) apenas a compactação mínima foi aplicada durante a colocação do concreto. O desenvolvimento do deslocamento de frequência para a amostra menos compactada, durante o período inicial até a 3ª hora, ocorreu para a esquerda, resultando em uma taxa negativa de deslocamento de frequência. O provável motivo pode ser a distribuição não uniforme do concreto fresco na forma, a falta de aderência entre o vergalhão de aço e o concreto foi evidente a partir da menor quantidade de deslocamento de frequência demonstrada pelo corpo de prova com compactação deficiente (TAWIE; LEE, 2010b).

2.5.8 *Monitoramento do processo de hidratação e pega de pasta de cimento Portland*

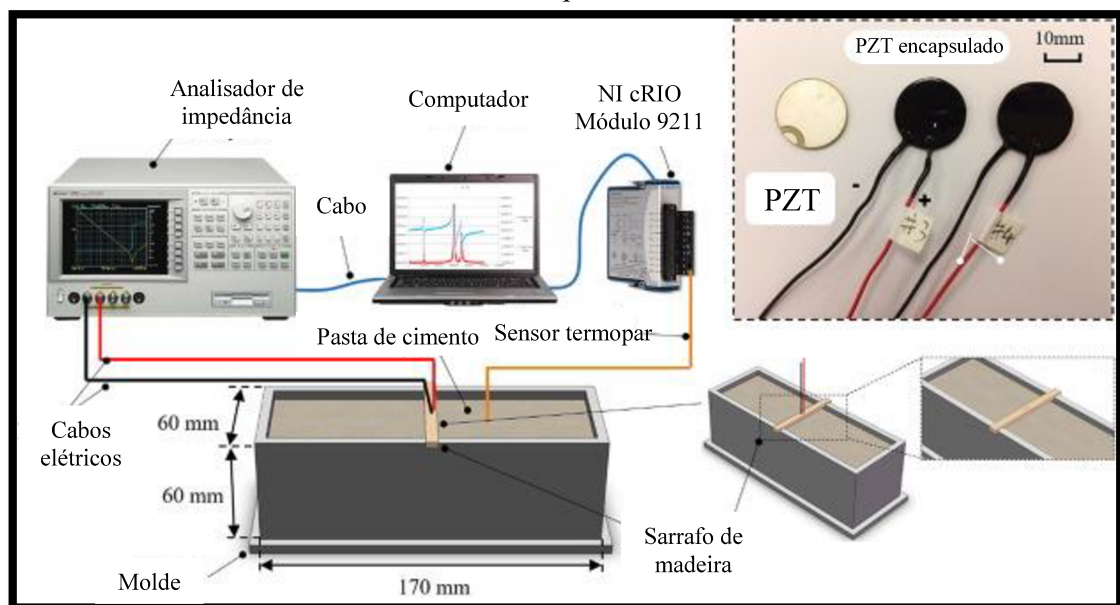
Zhang *et al.* (2020) buscaram correlacionar os sinais obtidos pela técnica EMI, para a hidratação de pastas de cimento com duas relações a/c diferentes, com ensaios normalmente utilizados para esse fim, como: teste de agulha de Vicat, teste exotérmico de hidratação, teste de DRX e MEV.

O cimento Portland comum foi misturado uniformemente com água em um liquidificador e, em seguida, foram moldadas seis amostras prismáticas com dimensões de 50 x 50 x 150 mm (largura, altura e comprimento, respectivamente). Foram empregadas duas relações a/c diferentes de 0,45 e 0,55 (três amostras para cada). O PZT com diâmetro e espessura de 20 mm e 1 mm,

respectivamente, foi protegido por uma cobertura total de uma fina camada de fita isolante líquida, para isolamento elétrico e tratamento à prova d'água. Após a secagem da camada de proteção, o PZT revestido foi posicionado no centro da amostra, com sua direção de espessura paralela à direção do comprimento do molde de pasta (ZHANG *et al.*, 2020).

O analisador de impedância 4294A foi utilizado, com frequência de varredura variando de 40 Hz a 110 MHz foi adotado para o teste de EMI. Além disso, um sensor termopar tipo K foi inserido dentro da amostra de cimento e conectado a um módulo NI cRIO 9211 para capturar a variação de temperatura em tempo real durante o processo de hidratação. A FIGURA 40 apresenta o esquema de ensaio montado, bem como o PZT antes e depois da proteção (ZHANG *et al.*, 2020).

FIGURA 40 - Configuração experimental da medição EMI e PZT antes e depois de encapsular



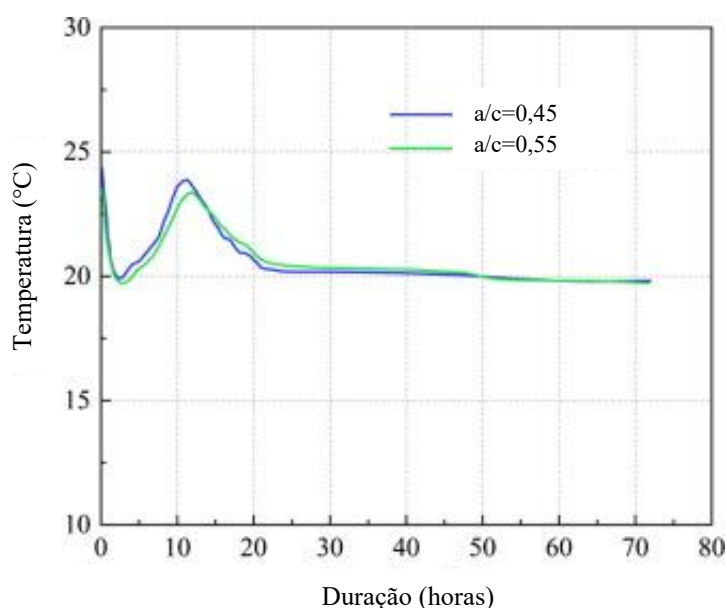
Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2020).

A medição EMI do PZT foi realizada a cada hora dentro das 24 horas iniciais após a moldagem, em seguida, a medição foi realizada a cada um dia. Portanto, os espectros EMI do transdutor PZT excitado por duas faixas de frequência diferentes, ou seja, de 100Hz a 1000kHz e de 100Hz a 3000kHz, foram capturados, respectivamente. Apenas a parte real da admitância, ou seja, a condutância, foi rastreada e investigada neste estudo, pois várias pesquisas apontaram que a

parte real da assinatura serve como um indicador mais sensível e confiável em comparação com a parte imaginária (ZHANG *et al.*, 2020).

O teste de temperatura da pasta de cimento foi realizado simultaneamente com o teste de EMI e os dados foram registrados automaticamente a cada 10 s. Pode ser visto na FIGURA 41 que a temperatura varia dentro de 4 °C ao longo do processo de hidratação inicial, portanto, seu efeito nas assinaturas de impedância capturadas é insignificante (ZHANG *et al.*, 2020).

FIGURA 41 - Variações de temperatura das pastas cimentícias no processo de hidratação

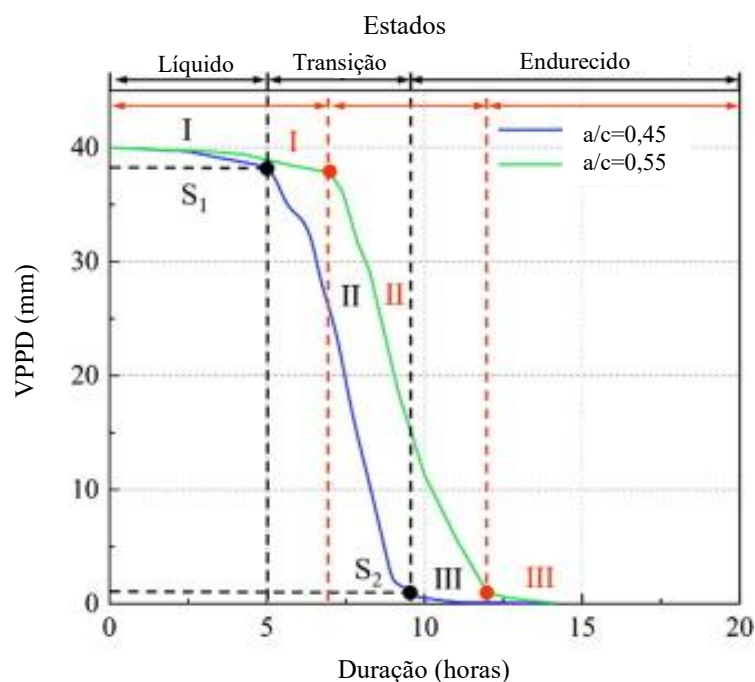


Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2020).

O aparelho de agulha Vicat foi usado para medir os tempos de pega: inicial e final da pasta de cimento. A FIGURA 42 apresenta as curvas da profundidade de penetração do pino Vicat (VPPD) das pastas de cimento com duas relações a/c diferentes, ao longo do processo de hidratação e pega. Zhang *et al.* (2020) verificaram que ambas as curvas podem ser divididas em três estágios: I. estágio inicial, no qual a pasta de cimento está completamente em fase plástica, o VPPD permanece quase inalterado e apresenta uma tendência ligeiramente decrescente conforme a pasta se aproxima da pega inicial, com a profundidade de penetração de 36 ± 1 mm; II. fase de transição, pode-se observar um acentuado declínio do VPPD, devido ao início da transformação da pasta de cimento da fase líquida para a fase sólida; III. estágio final, tempo de pega final no qual ocorreu o enrijecimento da pasta e VPPD é nulo. Com base no teste de Vicat, as configurações inicial e final, respectivamente, das pastas de cimento, em função das

relações a/c , são: 5 h e 9 h 5 min, para de 0,45; 6 h 55 min e 12 h 5 min, para a/c de 0,55 (ZHANG *et al.*, 2020).

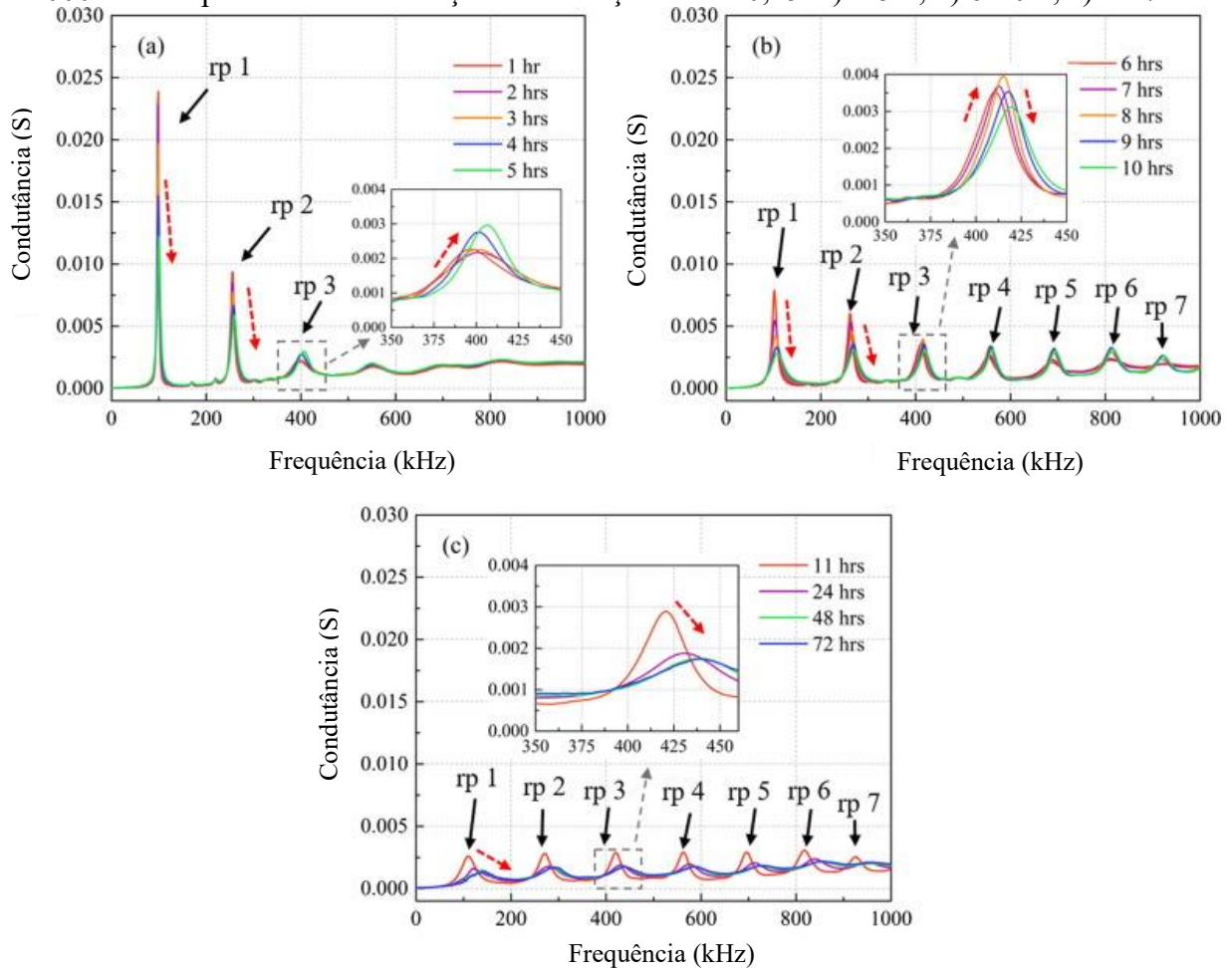
FIGURA 42 - Tendências da profundidade de penetração do pino Vicat (VPPD) no processo de hidratação inicial: S1 e S2 denotam início e fim de pega, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2020).

Na FIGURA 43 podem-se observar as curvas de condutância pela frequência. A tendência das assinaturas de condutância apresenta características únicas em diferentes estágios, o que permitiu que Zhang *et al.* (2020) pudessem relacionar os trechos com comportamentos padrões aos três estágios de hidratação da pasta de cimento. Na FIGURA 43 é possível observar sete picos de ressonância (rp) do 1 ao 7, que apresentam comportamento semelhantes, mas o primeiro pico é o que melhor representa por sua amplitude mais forte, os demais enfraquecem na sequência. Os resultados ilustram bem que a assinatura de condutância mostra uma resposta muito sensível à hidratação da pasta de cimento. Tendências semelhantes também foram observadas na medição das pastas de cimento com relação a/c de 0,55 (ZHANG *et al.*, 2020).

FIGURA 43 - Variação das assinaturas de condutância na faixa de frequência de 100 Hz a 1000 kHz no processo de hidratação com relação a/c de 0,45: a) 1-5 h; b) 6-10 h; c) 11-72 h.



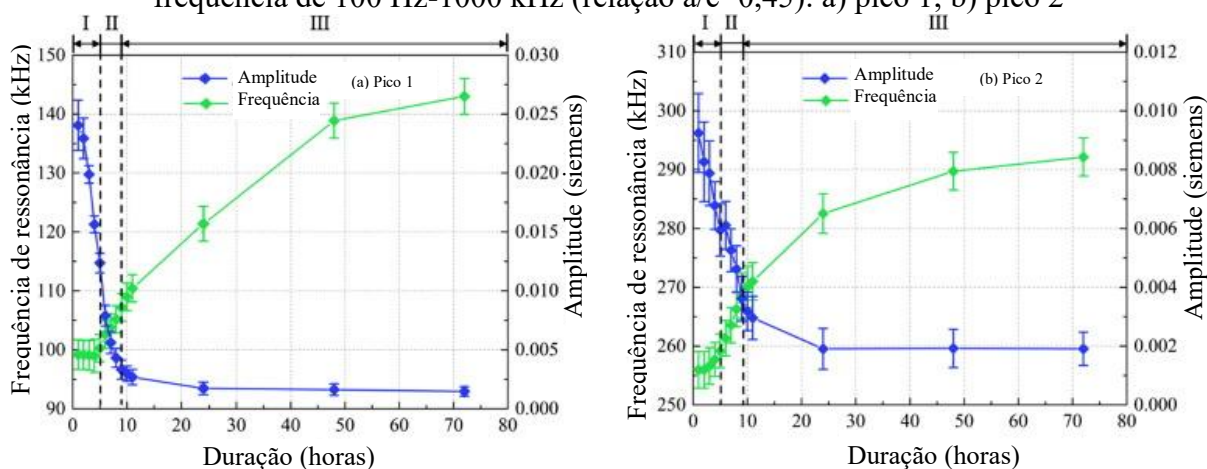
Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2020).

Observando a FIGURA 43, nota-se: no estágio I, antes que a pasta de cimento comece a enrijecer, o primeiro pico de ressonância apresenta um declínio significativo, enquanto as frequências de ressonância permanecem basicamente inalteradas, o que é atribuído ao fato de que, conforme a hidratação começou e prosseguiu, a mistura mudou de líquida para semissólida. Este processo resultou em um maior amortecimento do PZT, ocasionando uma redução na amplitude dos picos de ressonância. Imediatamente após a pasta de cimento atingir a pega inicial, ela começa a perder plasticidade e endurece. Durante o estágio II de transição, os dois primeiros picos ainda continuam a diminuir, no entanto, as frequências de ressonância gradualmente começam a se deslocar na direção certa. Enquanto isso, os outros cinco picos (rps 2–7) apresentam uma tendência diferente, todos eles tendem a se mover para a direita para cima com o desenvolvimento da hidratação do cimento. No momento em que a pasta é finalmente

endurecida, é perceptível que todos os picos de ressonância possuem uma magnitude quase igual e começam a se deslocar na mesma direção (ZHANG *et al.*, 2020).

Para o mesmo grupo de medições, os valores médios e desvios padrão foram calculados para cada pico de ressonância observado e plotado conforme FIGURA 44. A magnitude do pico apresenta aproximadamente uma tendência linear decrescente durante os estágios I e II. No entanto, conforme a pasta de cimento fica completamente endurecida no estágio III, a tendência de queda diminui gradualmente até que a curva se estabilize eventualmente. Em termos de frequência de ressonância, a tendência pode ser claramente agrupada em três seções, o que mostra uma concordância muito boa com os três diferentes estágios do processo de pega do cimento. A frequência de ressonância permanece constante no estágio I. Depois, ela começa a subir diretamente no estágio II. E a tendência de aumento continua a durar, mas com uma taxa de crescimento decrescente gradualmente conforme o cimento atinge a pega final e ganha resistência e rigidez (ZHANG *et al.*, 2020).

FIGURA 44 - Mudança de pico de ressonância de assinaturas de condutância na faixa de frequência de 100 Hz-1000 kHz (relação $a/c=0,45$): a) pico 1; b) pico 2



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2020).

Os mesmos padrões de mudança dos picos de ressonância foram aplicáveis à pasta de cimento com relação a/c diferente. Embora as curvas compartilhem um padrão semelhante, para a pasta de cimento com menor relação a/c , logo após o segundo estágio, as curvas de frequência e amplitude de ressonância variam significativamente com gradientes decrescentes. Especificamente, após a idade de hidratação de 2 dias, as curvas quase se achatam. Enquanto para a pasta com uma relação a/c superior, os gradientes variam menos significativamente além

do segundo estágio das curvas. Isso se deve ao fato que a pasta com a/c mais alta menor taxa de crescimento da resistência da pasta de cimento (ZHANG *et al.*, 2020).

Zhang *et al.* (2020) desenvolveram outros testes para complementar a compreensão da hidratação e o processo de pega da pasta de cimento Portland comum. O teste exotérmico de hidratação, com um equipamento de teste de hidratação de cimento digital PTS-12S, foi desenvolvido para obter a curva de taxa de calor de hidratação. Usando um difratômetro de raios-X DX-2700 (Karaltay) e um microscópio eletrônico de varredura JSM-7500F (JEOL EUA), respectivamente, os testes de DRX e MEV também foram conduzidos na amostra de cimento em diferentes idades para auxiliar na avaliação do processo de reação da hidratação inicial. Foram realizados apenas com corpos de prova de pasta de cimento com relação a/c de 0,45, pois Zhang *et al.* (2020) afirmam que devido ao fato de serem do mesmo tipo de cimento, embora com relações a/c diferentes, gera produtos de hidratação muito semelhantes em cada idade.

Segundo Zhang *et al.* (2020) os ensaios de DRX e MEV oferecem apenas uma análise qualitativa ou no máximo semiquantitativa, enquanto os testes de EMI podem alcançar uma medição quantitativa precisa. Nessa revisão de literatura sobre a técnica EMI, não serão apresentados os gráficos e imagens obtidos por Zhang *et al.* (2020) pelos ensaios exotérmicos, DRX e MEV, pois na sessão 3 essas caracterizações serão apresentadas com o foco nos tipos específicos de cimento Portland que foram usados na atual pesquisa.

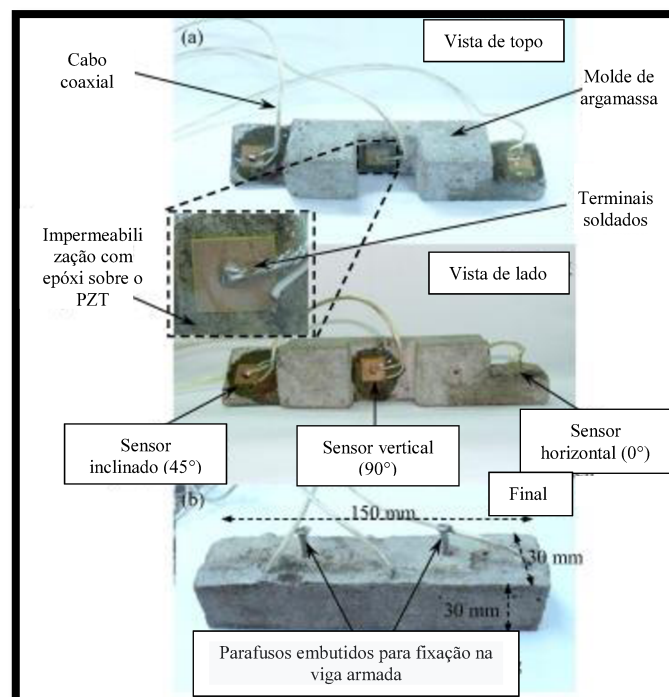
2.5.9 *Breves considerações sobre PZT a partir de diferentes estudos*

Em seu trabalho de revisão da literatura, Lim *et al.* (2021) afirmou que as dimensões planas dos sensores PZT afetam a capacidade de atuação e detecção da técnica EMI. Espera-se que um PZT de tamanho maior forneça uma atuação mais forte e, portanto, uma faixa de detecção maior, porém a sensibilidade pode estar comprometida. Assim os sensores PZT são preferencialmente colocados em elementos estruturais críticos, sendo importante na fase de planejamento fazer a análise do posicionamento e espaçamento ideais, essenciais para maximizar a eficiência e, ao mesmo tempo, minimizar os custos. Isso requer um entendimento completo do tamanho ideal do PZT, faixa de frequência, faixa de detecção e sensibilidade.

Finzi Neto *et al.* (2010) evidencia que, para grandes estruturas, é desejável implantar uma matriz de transdutores piezelétricos sobre a área a ser monitorada e monitorar esses transdutores sucessivamente de modo a aumentar a probabilidade de detecção bem-sucedida do estado real do material.

Negi *et al.* (2018) analisou três diferentes posicionamentos de sensores PZT quadrados ($10 \times 10 \times 0,3$ mm) acoplados em uma viga de concreto. Um molde especial de argamassa de cimento foi preparado com três superfícies planas para facilitar a colagem, com resina epóxi, de PZT a 0° , 45° e 90° com a horizontal, conforme mostrado na FIGURA 45 - A. Após a soldagem do cabo, os PZTs foram recobertos com o mesmo adesivo epóxi para impermeabilizá-los e, posteriormente, foram recobertos por argamassa FIGURA 45 - B.

FIGURA 45 - Sensores piezelétricos: a) colados a 0° , 45° e 90° no molde de argamassa, b) totalmente embutidos.

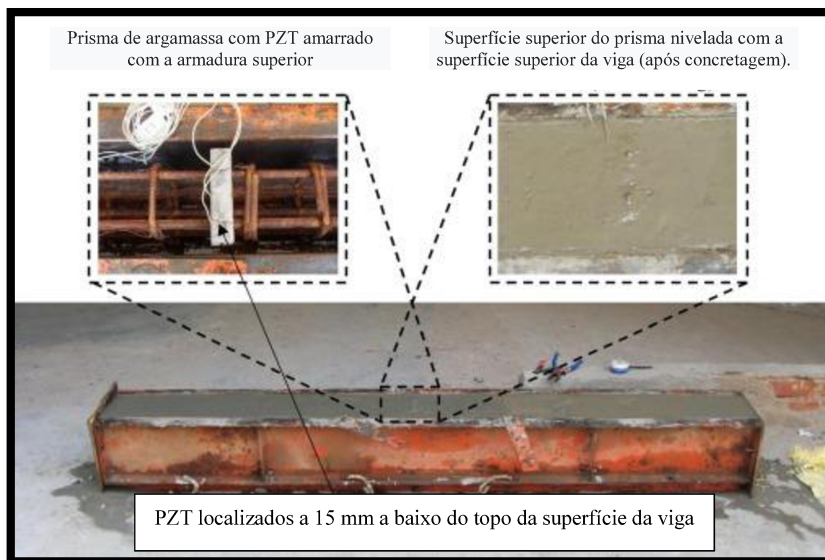


Fonte: Adaptado de Negi *et al.* (2018).

Uma viga de tamanho real foi concretada e em seu centro na parte superior, sobre a armadura, foi posicionado o pequeno prisma de argamassa com os três sensores embutidos, conforme FIGURA 46. Esse posicionamento visa ocupar a zona de compressão máxima, para simular a

condição de tensão máxima de compressão, sob o peso próprio dentro da viga, enquanto ela está sendo curada na condição simplesmente apoiada (NEGI *et al.*, 2018).

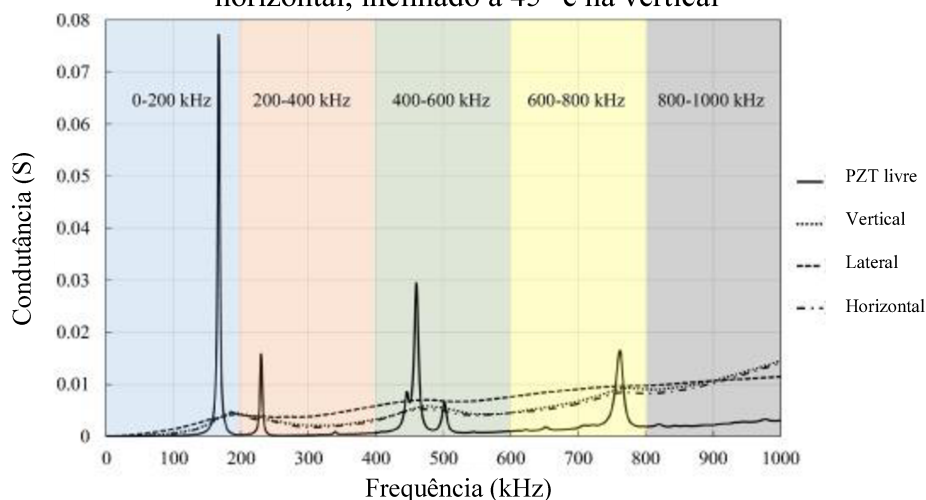
FIGURA 46 - Viga de concreto armado concretada com o prisma de argamassa e PZT sobre a armadura de topo central



Fonte: Adaptado de Negi *et al.* (2018).

As assinaturas de condutância foram registradas para o 3º, 7º, 14º, 21º, 25º e 28º dias de cura do concreto na faixa de frequência de 0 a 1000 kHz com intervalo de passos de 1000 Hz, para exemplificar os sinais do terceiro dia nas diferentes disposições do PZT são apresentados na FIGURA 47 (NEGI *et al.*, 2018).

FIGURA 47 - Assinatura de condutância por frequência no 3º dia de cura com PZT livre, na horizontal, inclinado a 45º e na vertical



Fonte: Adaptado de Negi *et al.* (2018).

Na técnica EMI, o modo d_{31} é o modo proeminente para as frequências de excitação, consequentemente, o PZT orientado verticalmente mostrou picos de ressonância mais nítidos do que as outras duas orientações. O PZT colocado na orientação horizontal mostra uma tendência de deslocamento das assinaturas, para baixo e para a direita, semelhante ao PZT orientado verticalmente. Por fim, o PZT inclinado a 45° tem os coeficientes d_{31} e d_{33} dominantes, entretanto seus sinais são opostos e eles tendem a cancelar o efeito um do outro, na zona de compressão. Isso resultou em picos de ressonância quase planos em comparação com as outras duas orientações onde os picos são claramente visíveis. Além disso, a mudança nas assinaturas com o aumento dos dias de cura não é consistente. Dessa forma, Negi *et al.* (2018) concluíram que os remendos orientados na direção horizontal e vertical com a direção longitudinal do feixe capturaram as mudanças na assinatura EMI de uma maneira melhor do que o PZT colocado em uma posição inclinada.

Por fim, Lim *et al.* (2020) trouxeram algumas considerações sobre a durabilidade do PZT, visto que a vida útil do mesmo é de difícil determinação por estar em função de vários parâmetros. Para monitorar a cura de materiais cimentícios, que normalmente atingem a resistência requerida em 28 dias, a durabilidade de curto prazo do PZT tem-se mostrado suficiente nas pesquisas realizadas. A longo prazo, o desenvolvimento da resistência dos materiais cimentícios é frequentemente menos significativo, no entanto, os PZTs instalados podem permanecer funcionais para o diagnóstico de danos durante a vida útil da estrutura, quando devidamente protegidos.

3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

As principais propriedades mecânicas do concreto são: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Dentre elas, a resistência à compressão simples é a característica mecânica mais difundida experimentalmente para avaliar a qualidade do concreto. Isso se deve a uma aproximação razoável dos valores de diversas propriedades em função da resistência à compressão (QUADROS, 2014).

Em materiais multifásicos como o concreto, a porosidade dos componentes pode limitar o desenvolvimento da resistência. Os agregados geralmente são densos e resistentes, logo os vazios existentes na matriz pasta de cimento e na zona de transição, na interface entre a matriz e o agregado gráudo, se tornam determinantes para a resistência do concreto de densidade normal (METHA; MONTEIRO, 2014).

Os principais fatores que influenciam na porosidade dessas fases são: relação água/ cimento; tipo e quantidade de cimento; adensamento e condições de cura (grau de hidratação do cimento); presença e tipo de aditivos e adições; idade do concreto; umidade e temperatura; mineralogia e dimensão do agregado; procedimento de mistura, transporte e lançamento; forma e dimensões dos corpos-de-prova; tipo e duração do carregamento (METHA; MONTEIRO, 2014).

Visto a importância da resistência mecânica à compressão do concreto na construção, essa propriedade foi escolhida para ser correlacionada aos sinais de impedância. Essa seção resume os três principais fatores que influenciam no desenvolvimento dessa propriedade mecânica, visto que foram os únicos parâmetros alterados no procedimento experimental adotado na pesquisa.

3.1 RELAÇÃO A/C

Segundo Metha e Monteiro (2014) a relação água/ cimento é um dos fatores mais importantes, pois afeta diretamente a porosidade da matriz e da zona de transição e, conseqüentemente, a

resistência. A lei de Abrams evidencia a relação entre o fator a/c e a resistência, como pode ser visto na Equação 21.

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (21)$$

Sendo:

f_c : Resistência à compressão do concreto;

k_1 e k_2 : Constantes empíricas;

a/c : Relação água/cimento.

Para a produção de concreto, sem aditivos, com consistência conveniente para aplicação em obra, emprega-se uma quantidade de água superior à necessária para as reações de hidratação. Dessa forma, a água tem função de propiciar a suspensão e dispersão homogêneas do sólido para interagir com todas as partículas. No fenômeno inicial da dissolução-precipitação, parte da água disponível é consumida na hidratação e o excesso evapora, deixando vazios, poros e capilares no compósito, enfraquecendo progressivamente a matriz (FUNAHASHI JÚNIOR, 2018).

Para relações de água/cimento abaixo de 0,3, aumentos desproporcionalmente elevados na resistência à compressão podem ser alcançados, com reduções muito pequenas de a/c . Por outro lado, normalmente a natureza das reações de hidratação não são afetadas pela variação da relação a/c no intervalo de 0,3 a 0,8 (SENFF; FOLGUERAS; HOTZA, 2005).

Em concretos com baixa e média resistência (f_{ck} menor que 50 MPa) produzidos com agregado normal, a porosidade na zona de transição e na matriz determina a resistência, mantendo-se a relação direta entre a/c e a resistência do concreto. Esse não parece ser o caso para misturas de concreto de alta resistência (f_{ck} maior que 50 MPa) que apresentam relação a/c muito baixa. Nesse caso há uma diminuição da água excedente, que costuma se acumular na zona de transição, consequentemente reduz a quantidade de vazios e melhora sua resistência. Além disso, baixas relações a/c resultam em produtos de hidratação com cristais muito menores e uma área superficial maior (METHA; MONTEIRO, 2014).

3.2 ADITIVOS

Os aditivos químicos são utilizados para alterar alguma propriedade do concreto, como: reduzir a quantidade de água, melhorar trabalhabilidade, alterar tempo de pega, incorporar ar, entre outros (METHA; MONTEIRO, 2014).

Os aditivos redutores de água permitem diminuir a relação a/c mantendo a consistência, dessa forma possibilita elevar tanto a resistência inicial, quanto a final do concreto. Nesse grupo de aditivos encontram-se os superplastificantes, usado no procedimento experimental, merecendo aqui destaque.

Os superplastificantes são aditivos que promovem uma alta redução da água de mistura, e podem apresentar um retardo nas primeiras idades do processo de hidratação. São polímeros orgânicos hidrossolúveis obtidos sinteticamente, usando um processo complexo de polimerização para a obtenção de moléculas longas de elevada massa molecular. Essas moléculas longas envolvem as partículas do cimento, conferindo-lhes uma carga altamente negativa o que faz com que passem a se repelir. Isso resulta na defloculação e dispersão das partículas de cimento, possibilitando melhor reação com a água e aceleração da taxa de hidratação (CARVALHO, 2002).

Dois efeitos são possíveis com o uso desse aditivo: alta trabalhabilidade ou alta resistência. O primeiro efeito ocorre quando se mantém a relação a/c, assim o efeito dispersante do aditivo resultará em uma maior consistência, sem perder a coesão, podendo originar concretos autoadensáveis. O segundo efeito, a quantidade de água é reduzida, logo diminui a relação a/c, o aditivo é incorporado à mistura para manter a consistência. A redução da água, como visto no item 3.1, diminui a quantidade de vazios na matriz, possibilitando produzir concretos com alta resistência (CARVALHO, 2002).

Os aditivos aceleradores e retardadores de pega são aqueles que interferem diretamente nos tempos de início e fim de pega do cimento, promovendo ou impedindo a dissolução de íons no cimento. Claramente possuem grande influência na taxa de ganho de resistência, entretanto, as

resistências finais podem não ser significativamente alteradas (METHA; MONTEIRO, 2014). Como não foram utilizados no procedimento experimental, não serão aprofundados.

3.3 CIMENTO PORTLAND

Segundo a ABNT NBR 16697 (2018) o cimento Portland é um “ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos”.

A substituição parcial do clínquer por constituintes minerais, produzem cimentos compostos e mais sustentáveis (menor emissão de gás carbônico). Durante a moagem podem ser adicionadas adições pozolânicas, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos (fíler calcário), com teores previamente especificados (FUNAHASHI JÚNIOR, 2018).

Quando o cimento é colocado em contato com a água ocorrem diversas reações químicas, dando origem aos produtos de hidratação. Os surgimentos das fases hidratadas possuem velocidades distintas, conferindo características importantes como enrijecimento, endurecimento e resistência do concreto. Além do fator a/c relatado no item 3.1 e do aditivo (item 3.2), o tipo de cimento e suas características como composição e finura, alteram essa velocidade (SENFF; FOLGUERAS; HOTZA, 2005).

Essa subseção se inicia com os aspectos gerais de composição química, hidratação do cimento Portland e tempos de início e final de pega, bem como ensaios existentes para determinação desses parâmetros. Na sequência serão abordadas características específicas dos tipos de cimentos Portland utilizados no procedimento experimental, sendo eles: cimento Portland de alta resistência inicial e o de alto-forno com classe de resistência de 40 MPa e resistente a sulfatos; baseando-se em alguns trabalhos de referência.

3.3.1 *Composição química do cimento Portland*

O cimento Portland é composto majoritariamente por silicatos de cálcio, aluminato e ferroaluminato de cálcio, entretanto as impurezas eventualmente presentes também reagem

formando compostos, em menor quantidade, como: óxido de magnésio e de cálcio, bem como compostos alcalinos e sulfatos (METHA; MONTEIRO, 2014). Na TABELA 1 são apresentadas as proporções, fórmulas químicas dos compostos e abreviações padronizadas dos principais constituintes do cimento Portland.

TABELA 1 - Principais compostos químicos do cimento Portland

Proporção	Composto	Abreviação	Classificação
35 - 65%	3CaOSiO_2	C_3S	Silicato tricálcico
10 - 40%	2CaOSiO_2	C_2S	Silicato dicálcico
0 - 15%	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C_3A	Aluminato tricálcico
5 - 15%	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Ferroaluminato de cálcio

Fonte: Adaptado de Metha e Monteiro (2014).

O C_3S e o C_2S são os dois silicatos comumente encontrados nos clínques de cimento Portland. Ambos possuem pequenas quantidades de impurezas, sendo suas formas impuras conhecidas como Alita e Belita, respectivamente (METHA; MONTEIRO, 2014). O C_3S é o constituinte mais importante do cimento Portland, por sua alta reatividade é o responsável pelo desenvolvimento da resistência do concreto nas primeiras idades, antes de 28 dias, enquanto o C_2S é responsável pela resistência nas maiores idades, por sua lenta reação com a água (TAYLOR, 1990).

O aluminato, por sua vez, reage rapidamente com a água liberando grande calor de hidratação, tem sua pega controlada pela adição de gesso ao clínquer. Por fim, a ferrita tem a taxa de reatividade com a água inicialmente alta e intermediária à alita e belita em idades posteriores (TAYLOR, 1990).

3.3.2 Processo de hidratação do cimento Portland

O processo de hidratação consiste em reações simultâneas dos diversos compostos anidros com a água, em velocidades distintas. Nos estágios iniciais de hidratação do cimento, acontece o mecanismo de dissolução-precipitação que envolve a dissolução de compostos anidros em seus constituintes iônicos, a formação de hidratos em solução e, devido à sua baixa solubilidade, uma eventual precipitação de hidratos resultantes da solução supersaturada. Nos estágios posteriores, quando a mobilidade iônica se torna reduzida, o mecanismo passa a ser o

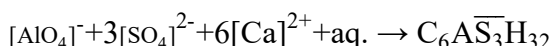
topoquímico ou hidratação no estado sólido, no qual as reações acontecem diretamente na superfície dos compostos sem que eles entrem em solução (METHA; MONTEIRO, 2014).

Os aluminatos são conhecidos por se hidratarem a uma velocidade muito mais rápida que os silicatos. Dessa forma, as características de enrijecimento (perda de consistência) e pega (solidificação) de uma pasta de cimento Portland são amplamente determinadas por reações de hidratação envolvendo os aluminatos. Por outro lado, as características de endurecimento (taxa de desenvolvimento da resistência) são influenciadas pela hidratação dos silicatos (METHA; MONTEIRO, 2014).

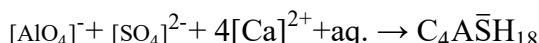
3.3.2.1 Hidratação dos aluminatos e ferroaluminatos

A gipsita e os álcalis entram em solução rapidamente, diminuindo a solubilidade do C₃A, em no máximo 24 horas aqueles não são mais detectáveis (TAYLOR, 1990). Segundo Metha e Monteiro (2014) dependendo da concentração de aluminato e íons sulfato na solução, o produto cristalino é o trissulfoaluminato de cálcio hidratado (Etringita) ou o monossulfoaluminato de cálcio hidratado, cujas reações químicas podem ser expressas como:

Etringita:



Monossulfato:



Após o sulfato ter sido consumido, a concentração de íons aluminato volta a se elevar devido à nova hidratação de C₃A e C₄AF, a etringita, cristalizada como pequenas agulhas prismáticas, se torna instável e é gradualmente convertida para a fase de monossulfato, cristalizado como finas placas hexagonais. Essa reação química é apresentada a seguir e, na FIGURA 48, é ilustrada micrografia eletrônica de varredura dos cristais hexagonais típicos de monossulfato hidratado e cristais aciculares de etringita.

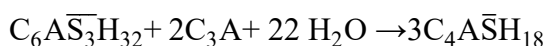
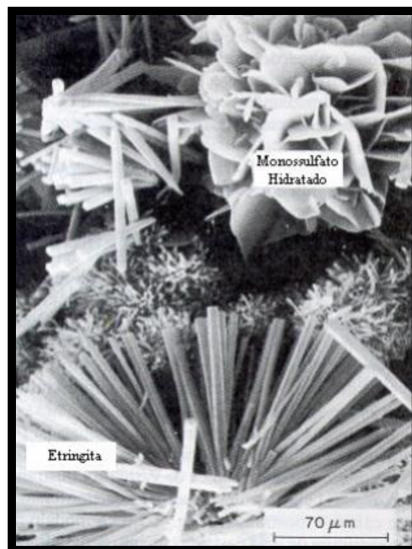


FIGURA 48 - Micrografia eletrônica de varredura dos cristais de etringita e monossulfato



Fonte: Metha e Monteiro (2014).

3.3.2.2 Hidratação dos silicatos

A hidratação do C_3S e do C_2S , em algumas horas após o início da hidratação do cimento, dá origem aos produtos: silicatos de cálcio hidratados (representado por C-S-H) e hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, também conhecido como portlandita e representado pela abreviação CH, compostos estes que preenchem o espaço ocupado pela água e pelas partículas do cimento em dissolução. O C-S-H, devido a sua alta área específica, é responsável pela propriedade adesiva da pasta e resistência mecânica.

O hidróxido de cálcio, por sua vez, reduz a durabilidade da pasta endurecida quando na presença de águas ácidas e sulfatadas. A estrutura cristalina do hidróxido de cálcio é maciça composta por cristais prismáticos, enquanto que o C-S-H é pouco cristalino e apresenta uma morfologia fibrosa, conforme FIGURA 49 (METHA; MONTEIRO, 2014). As reações químicas que sofrem os silicatos de cálcio são apresentadas na sequência.

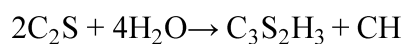
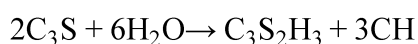
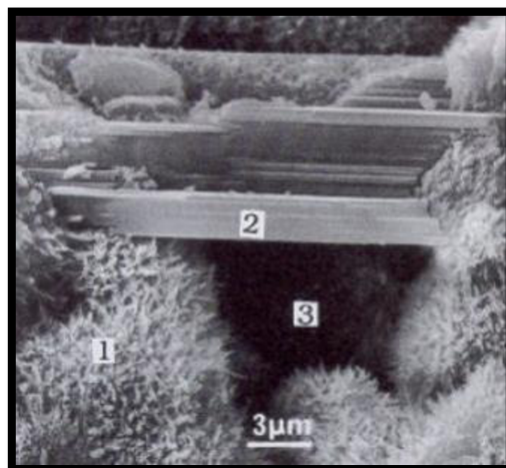


FIGURA 49 - Microestrutura do cimento hidratado: 1- C-S-H; 2- CH; 3- vazio capilar

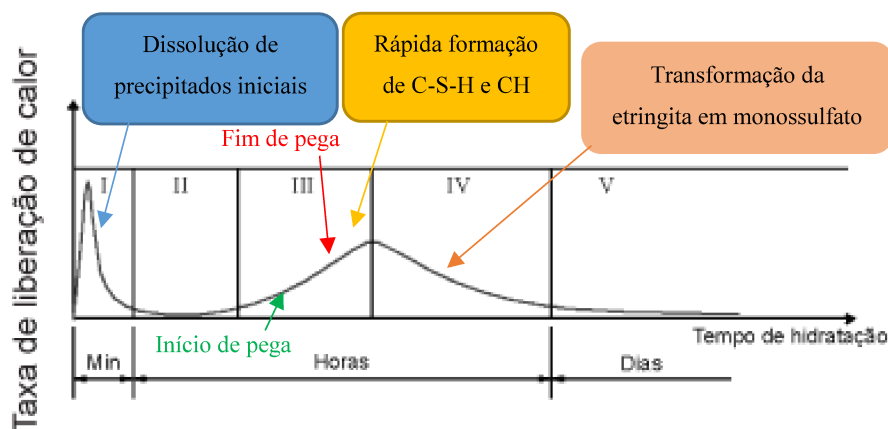


Fonte: Moranville (1992, *apud* SILVA, 2005).

3.3.2.3 Estágios da hidratação

São cinco os estágios iniciais da hidratação do cimento Portland: I – pré-indução; II – indução; III – período de aceleração; IV – período de desaceleração; V - estágio final. Cada uma dessas fases correlaciona-se a um trecho da curva de taxa de evolução de calor por tempo, a qual é ilustrada na FIGURA 50, sendo explicadas na sequência.

FIGURA 50 - Taxa de calor liberado ao longo dos estágios de hidratação



Fonte: Adaptado de Viecili, Hastenpflug e Girardi (2018).

Fase I – logo após a mistura, os diferentes íons liberados pelas diversas fases (C_3A e C_3S) entram em solução, isto faz com que ocorra uma rápida evolução de calor durante poucos minutos. Esta dissolução é exotérmica e gera dois hidratos de reação rápida, o silicato de cálcio

hidratado e a etringita, os quais formam uma camada ou membrana de gel que cobre as superfícies dos grãos (VIECILI; HASTENPFLUG; GIRARDI, 2018). O gel formado é amorfo, coloidal e rico em alumina e sílica, mas também contém quantidades significativas de cálcio e sulfato (dissolução inicial da alita). Em poucos minutos, agulhas de etringita também são visualizadas. A esse período dá-se o nome de Pré-Indução (TAYLOR, 1990).

Fase II - indução, fase na qual há uma redução na taxa de hidratação, devido a precipitação de gel de C-S-H e etringita (cujas agulhas aumentam de tamanho) sobre as fases anidras. Há o aumento da concentração de íons $[Ca]^{2+}$ em solução, além da precipitação inicial da portlandita $Ca(OH)_2$. A hidratação da belita ainda é desprezível (TAYLOR, 1990).

Fase III - período de aceleração, no qual há uma saturação de íons cálcio ocorrendo uma intensa precipitação de C-S-H e portlandita, recobrindo a fração anidra solúvel (*outer shell*). Ocorrência dos tempos de início e fim de pega, com enrijecimento da pasta e redução da porosidade, desenvolvendo a resistência mecânica inicial (TAYLOR, 1990).

Fase IV - entra-se no período de desaceleração com queda gradual da taxa de hidratação, ocorrendo a transição da hidratação por dissolução para precipitação topoquímica. Difusão da água através da *outer shell* para atingir as fases anidras, ocorrendo a dissolução *inner-shell* do C-S-H. Picos de etringita são detectados em poucas horas e aumentam de intensidade até o período em que ocorre sua dissolução inicial com formação de placas hexagonais de monossulfaluminato. Começa a hidratação da belita, aumento da compacidade da microestrutura (TAYLOR, 1990).

Fase V - último estágio, os grãos de cimentos estão cobertos por uma camada de hidratos, e que com o passar do tempo, esta camada vai se tornando mais espessa e com isto a água vai tendo dificuldades de chegar nas partes não hidratadas (VIECILI; HASTENPFLUG; GIRARDI, 2018).

3.3.3 Ensaios para monitoramento da hidratação

No momento da mistura, a pasta de cimento apresenta-se sob a forma de uma suspensão concentrada, comportando-se como um líquido visco-plástico que evolui com o tempo. O início

de pega é o período em que começa o enrijecimento da pasta de cimento ou, em outras palavras, é o momento em que a pasta começa a perder a plasticidade e se torna não mais trabalhável. Posteriormente ocorre um aumento brusco de temperatura, atingindo o final da pega, momento em que a pasta de cimento perde plasticidade e se solidifica por completo (METHA; MONTEIRO, 2014).

Os tempos de início e fim de pega, a taxa de calor liberado pelas reações e a identificação dos compostos hidratados que fazem parte da mudança de estados da pasta de cimento, são fatores importantes para entendimento da hidratação.

A seguir serão apresentadas algumas técnicas atuais que permitem o monitoramento da hidratação do cimento e determinação dos tempos de final e início de pega, bem como identificação de seus compostos. Vale ressaltar que os ensaios aqui apresentados não foram desenvolvidos no procedimento experimental, apenas Vicat foi empregado pelo fornecedor dos cimentos para caracterizá-los. No entanto, a apresentação dessas técnicas permitirá uma correlação entre as mesmas e a técnica EMI que é proposta na pesquisa atual.

3.3.3.1 Método da agulha de Vicat

O Método da agulha de Vicat, padronizado pela ABNT NBR 16607:2018, é comumente empregado para definição dos tempos de pega da pasta cimentícia com consistência normal, conforme a ABNT NBR 16606:2017. No decorrer do ensaio dois pontos são bem característicos e nestes ocorrem mudanças bruscas na reologia da pasta de cimento. O primeiro ocorre um aumento da viscosidade da pasta conhecido como início de pega, geralmente é percebido a partir de 150 minutos da adição da água na pasta (para cimento comum). O segundo ponto conhecido como fim da pega ocorre à passagem do estado plástico para o estado sólido (VIECILI; HASTENPFLUG; GIRARDI, 2018).

3.3.3.2 Calorimetria

Conforme seção 3.3.2.3, os compostos de cimento Portland são produtos de reação de alta temperatura que não estão em equilíbrio e, assim, estão em estado de alta energia. Quando um cimento é hidratado, os compostos reagem com a água para adquirir estados estáveis de baixa

energia, e o processo é acompanhado pela liberação de energia em forma de calor, ou seja, as reações de hidratação dos compostos de cimento é um fenômeno exotérmico (METHA; MONTEIRO, 2014).

A quantidade total de calor liberada e as taxas de liberação de calor da hidratação de compostos individuais, podem ser usadas como índices de suas reatividades e podem ser usados para caracterizar os comportamentos de pega, enrijecimento e aumento de temperatura em pastas de cimentos, argamassas e concretos. O calor de hidratação depende da composição química do cimento e é igual à soma do calor de hidratação de cada fase pura hidratada separadamente (FUNAHASHI JÚNIOR, 2018).

O método da Calorimetria tem sido amplamente utilizado para estudo da hidratação do cimento, tendo como base a taxa de calor gerada em cada mudança de entalpia. A técnica mais comum é a calorimetria isotérmica (ou calorimetria por condução isotérmica de calor) em que a taxa de produção de calor (potência térmica) de pequenas amostras de pasta ou argamassa é medida diretamente a uma dada temperatura constante (FUNAHASHI JÚNIOR, 2018).

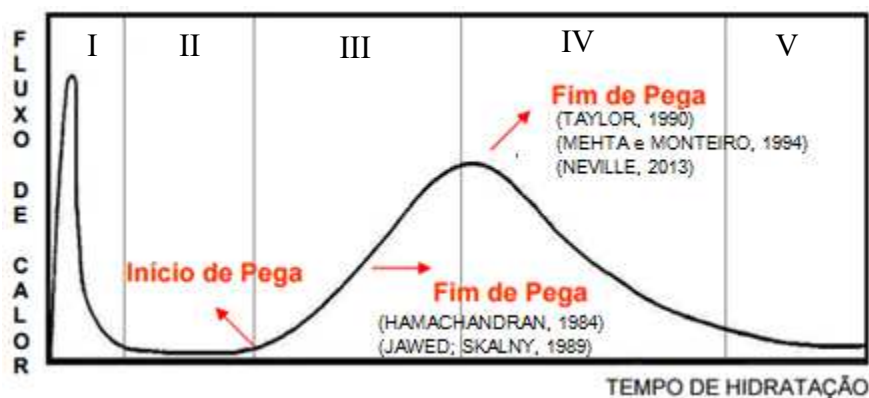
Existem também os calorímetros semi-adiabáticos nos quais são permitidas as trocas de calor com o ambiente, sendo necessário conhecer a capacidade térmica do calorímetro para determinar a quantidade de calor gerado a partir da hidratação do cimento. Através das curvas de calorimetria (como apresentada na FIGURA 50) de calor liberado versus tempo de hidratação do cimento, pode-se avaliar o período de indução, o calor liberado no período de hidratação, a desaceleração desta evolução de calor e os tempos em que isto ocorre (VIECILI; HASTENPFLUG; GIRARDI, 2018).

No Brasil, existem duas normas que padronizam alguns desses ensaios: ABNT NBR 12006 (1990) método da garrafa de Langavant e ABNT NBR 8809 (2013) de determinação do calor de hidratação a partir do calor de dissolução. Há vários outros procedimentos estabelecidos em normas internacionais, que também são bastante utilizados para esse fim.

Conforme pode-se analisar na FIGURA 51, o tempo de início de pega corresponde ao final do período dormente (estágio II), com pequena elevação na temperatura. O período de final de

pega para alguns autores ocorre no meio do período de aceleração e, para outros, corresponde o início do estágio III, conforme FIGURA 51.

FIGURA 51 - Localização dos tempos de pega e estágios da hidratação na curva de evolução de calor



Fonte: Viecili, Hastenpflug e Girardi (2018).

Com o conhecimento prévio do desenvolvimento da resistência mecânica em relação ao tempo em pelo menos uma condição isotérmica de cura, torna-se possível estimar o ganho de resistência para as outras condições isotérmicas, a partir de funções de maturidade, relacionando os parâmetros de tempo e temperatura. Nesse processo nomeado método de maturidade, o desenvolvimento da resistência mecânica do concreto endurecido pode ser estimado em função do desenvolvimento das temperaturas no elemento estrutural. Abordado brevemente na introdução, como um dos mecanismos indiretos que se tem desenvolvido atualmente, não será aqui aprofundado por não ser o objetivo da pesquisa.

3.3.3.3 Difração de raio-X

A difração de raios-X (DRX) possibilita a identificação qualitativa de compostos cristalinos. No método de difração de raios-X usando amostra policristalina, a amostra deve estar moída na granulação máxima de 80 μm e se baseia no fato de que o padrão de difração de raios-X é único para cada substância cristalina. Dessa forma, busca-se a concordância exata entre o padrão produzido pela amostra desconhecida e o de uma amostra conhecida, então a identidade química da amostra desconhecida pode ser atribuída (SKOOG et al., 2002 *apud* Magalhães, 2007).

3.3.4 Tipo de cimento

Segundo Funahashi Júnior (2018) o desenvolvimento das propriedades do cimento em reação com a água é função da solubilidade de cada um de seus constituintes, da área específica e reatividade das fases do clínquer. Dessa forma, quanto maior for a reatividade, a área superficial, a temperatura e pressão, mais rapidamente é iniciada a interação e formação dos produtos.

A ABNT NBR 16697 (2018) estabelece limites de composição de cada tipo de cimento Portland, bem como os requisitos físicos, mecânicos e químicos. Essas características referentes aos cimentos utilizados na pesquisa são apresentadas na TABELA 2, TABELA 3 e TABELA 4, respectivamente.

TABELA 2 - Limites de composição do cimento Portland

Sigla/ Classe de resistência/ Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
CP III - 40 RS	25 -65	35-75	0	0-10
CP V - ARI	90-100	0	0	0-10

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 16697 (2018).

TABELA 3 - Requisitos físicos e mecânicos

Tipo de cimento	Finura - Resíduo na peneira 75 µm	Tempo de pega (min)		Resistência à compressão (MPa)			
		Início	Fim	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
CP III - 40 RS	≤ 8,0	≥ 60	≤ 720	-	≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0
CP V - ARI	≤ 6,0	≥ 60	≤ 600	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 16697 (2018).

TABELA 4 - Requisitos químicos (expresso em porcentagem de massa)

Tipo de cimento	Resíduo insolúvel (RI)	Perda ao fogo (PF)	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO ₃)
CP III - 40 RS	≤ 5,0	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP V - ARI	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5

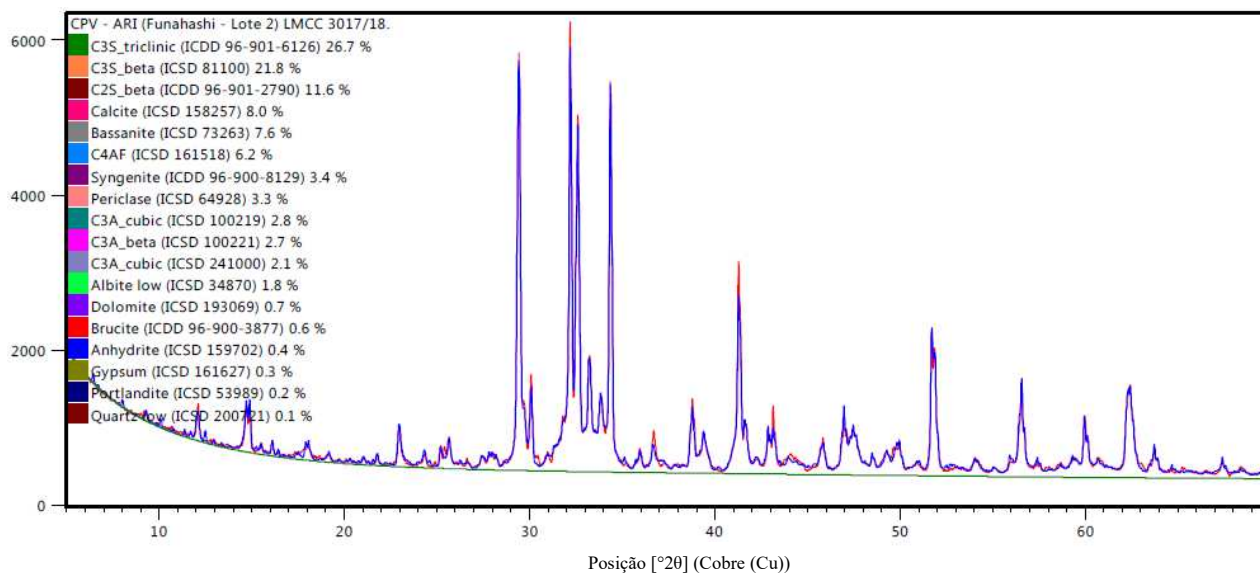
Fonte: Adaptado da ABNT NBR 16697 (2018).

3.3.4.1 Cimento Portland de alta resistência inicial

O cimento Portland de alta resistência inicial, conhecido nacionalmente pela sigla CP V - ARI, difere-se do cimento comum, devido a sua maior finura o que o torna mais reativo na presença água, hidratando-se mais rapidamente que os demais tipos de cimento. Além disso, possui alto teor de C₃S, responsável por sua alta resistência nas primeiras idades (METHA; MONTEIRO, 2014).

A FIGURA 52 apresenta o difratograma de raios-X de uma amostra do cimento CP V- ARI, realizado por Funahashi Júnior (2018), com quantitativos dos minerais descritos na TABELA 5, sendo possível constatar a alta porcentagem de C₃S.

FIGURA 52 - Difratograma de raios-X da amostra do cimento CP V - ARI



Fonte: Funahashi Júnior (2018).

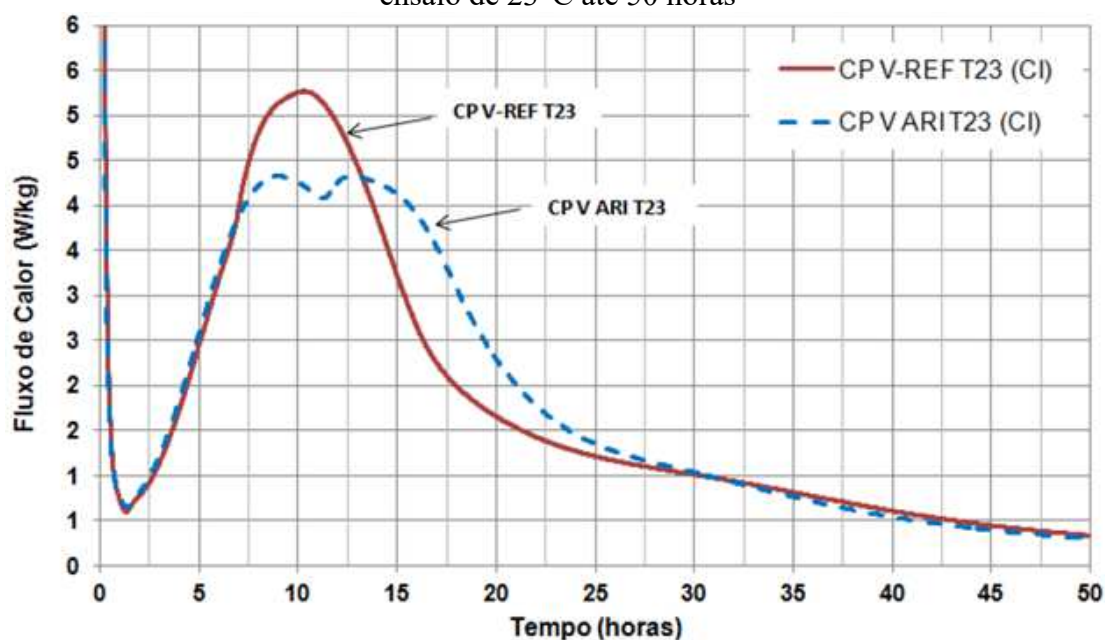
TABELA 5 - Amostra CP V - ARI dados quantitativos dos minerais identificados por DRX com suas respectivas fichas

Amostra	Ficha ICSD-ICDD	Fórmula das espécies químicas	Fases mineralógicas	(%)
CP V ARI	ICDD 96-901-6126	$\text{Ca}_{54,00}\text{Si}_{18,00}\text{O}_{90,00}$	Silicato anidro (C_3S)	26,7
	ICSD 81100	$\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$	Silicato anidro (C_3S)	21,8
	ICDD 96-901-2790	$\text{Ca}_{8,00}\text{Si}_{4,00}\text{O}_{16,00}$	Silicato anidro (C_2S)	11,6
	ICSD 158257	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	Calcita	8,0
	ICSD 73263	$\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_{0,5}$	Bassanita	7,6
	ICSD 161518	$\text{Ca}_2[(\text{Fe}_{1,63}\text{Al}_{0,37})\text{O}_5]$	Fases ferríferas (C_4AF)	6,2
	ICDD 96-900-8129	$\text{K}_{4,00}\text{Ca}_{2,00}\text{S}_{4,00}\text{O}_{18,00}\text{H}_{4,00}$	Singenita	3,4
	ICSD 64928	MgO	Periclásio	3,3
	ICSD 100219	$\text{Ca}_{8,688}\text{Na}_{0,625}(\text{Al}_6\text{O}_{18})$	Aluminatos anidros (C_3A)	2,8
	ICSD 100221	$\text{Ca}_{8,25}\text{Na}_{1,5}(\text{Al}_6\text{O}_{18})$	Aluminatos anidros (C_3A)	2,7
	ICSD 241000	$\text{Al}_{14}\text{Ca}_{12}\text{O}_{33}$	Aluminatos anidros (C_3A)	2,1
	ICSD 34870	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Feldspato	1,8
	ICSD 193069	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dolomita	0,7
	ICDD 96-900-3877	$\text{Mg}_{3,00}\text{O}_{6,00}\text{H}_{6,00}$	Brucita	0,6
	ICSD 159702	$\text{Ca}(\text{SO}_4)$	Anidrita	0,4
	ICSD 161627	$\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$	Gesso	0,3
	ICSD 53989	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandita	0,2
	ICSD 200721	SiO_2	Quartzo	0,1

Fonte: Funahashi Júnior (2018).

Utilizando o método de Vicat, Funahashi Júnior (2018), encontrou o tempo de início de pega de 165 minutos e final, 225 min. Em seguida, o autor realizou o ensaio de calorimetria isotérmica, com a pasta do cimento com temperatura de ensaio de 23°C e relação a/c de 0,5. A FIGURA 53 mostra as isotérmicas para duas pastas de cimento CP V – ARI, de mesmo fabricante, mas de lotes diferentes. O tempo de indução e a taxa de aceleração da reação são praticamente idênticos para os cimentos de lotes diferentes, mudando no pico de aceleração-desaceleração, o que sugere diferença na composição do material.

FIGURA 53 - Curvas de fluxo de calor - cimento CP V-REF x CP V ARI - Temperatura de ensaio de 23°C até 50 horas



Fonte: Funahashi Júnior (2018).

Os cimentos de alta resistência inicial diferem-se principalmente pela finura maior em relação aos demais cimentos (METHA; MONTEIRO, 2008). Com maior finura tem-se um aumento significativo da resistência entre os períodos de 10h a 20h, mantendo essa diferença até o 28º dia. Na idade de 2 a 3 meses, na mesma condição de cura úmida, as resistências dos cimentos se igualam. Mas ao longo do tempo tem-se o aumento da resistência do cimento com menor finura ultrapassando o de maior finura (NEVILLE, 1997 *apud* MASUELA, 2016).

3.3.4.2 Cimento Portland de alto forno

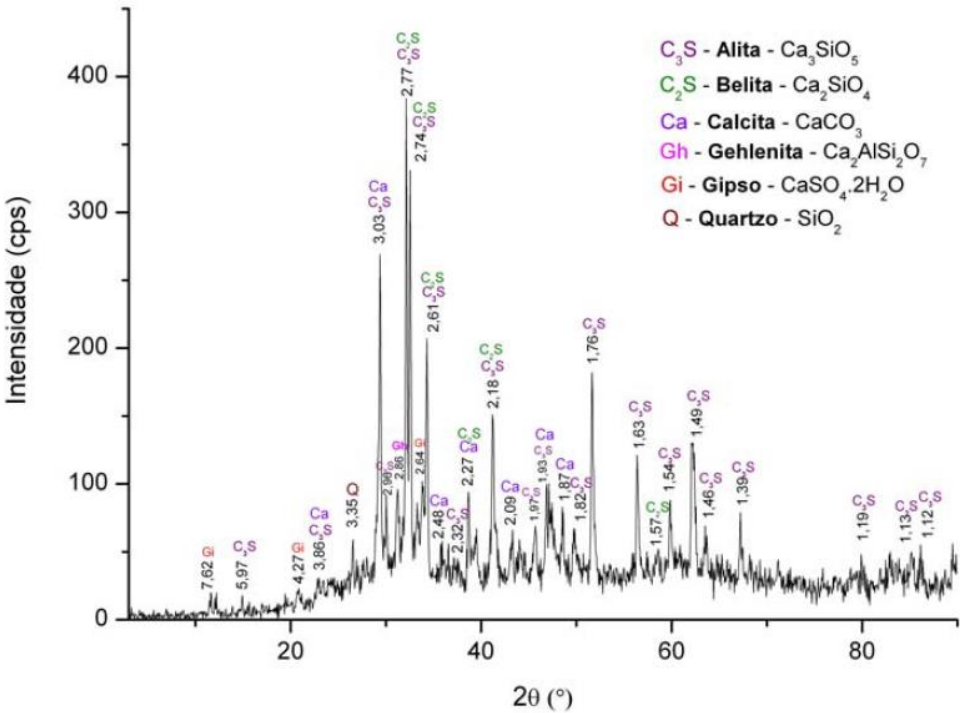
O cimento Portland de alto forno, conhecido nacionalmente pela sigla CP III, é obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e escória granulada de alto-forno, moídos em conjunto ou separadamente, podendo conter uma ou mais formas de sulfato de cálcio e materiais carbonáticos (ABNT NBR 16697, 2018).

A escória de alto-forno fundida é um subproduto do processo de fabricação siderúrgico, sendo um produto vítreo formado pelo seu resfriamento rápido, durante a imersão em água. Composta essencialmente por silicatos e aluminossilicatos de cálcio e outras bases, quando finamente

moída é auto-cimentante, isto é, basta a reação com a água para formação de produtos cimentícios (METHA; MONTEIRO, 2014).

A FIGURA 54 apresenta o difratograma de raios-X da amostra de um cimento CP III, realizado por Magalhães (2007), com quantitativos dos minerais descritos na TABELA 6, sendo possível constatar a baixa quantidade de compostos aluminatos responsáveis pelas altas liberações de calor nas primeiras horas.

FIGURA 54 - Caracterização do cimento Portland CP III 32 por meio de difratometria de raios X pelo método do pó em amostra total passante na peneira #200



Fonte: Magalhães (2007).

TABELA 6 - Composição mineralógica dos cimentos determinada do DRX

Cimento	Mineral Identificado			
	Predominante (>30%)	Maior (<30%)	Menor (<10%)	Minoritário (<3%)
CP III 32	Alita	Belita Calcita	Gehlenita Gipso	Magnetita

Fonte: Adaptado de Magalhães (2007).

A escória hidrata lentamente, dessa forma sua adição ao cimento faz com que ele desenvolva baixo calor de hidratação e menor resistência à compressão inicial, quando comparado ao cimento Portland comum ou CPV. A lenta reação de hidratação prolonga o tempo de cura

necessário. Por outro lado, eleva a resistência a sulfatos e agentes químicos, aumentando a durabilidade do material. Essas características o tornam um cimento recomendado para obras de concreto com grande volume, concreto-massa, além de concreto ou argamassas que necessitem de resistência ao sulfato ou água do mar (NEVILLE; BROOKS, 2013 *apud* MASUELA, 2016).

Na TABELA 7, do ensaio de calorimetria isotérmica de Funahashi Júnior (2018), é possível perceber o baixo calor de hidratação do CP III em relação aos demais tipos de cimento, bem como ressaltar que a evolução da hidratação é acelerada com o aumento da temperatura no ambiente de ensaio.

TABELA 7 - Resultados de ensaio de calor de hidratação acumulado por calorimetria isotérmica: Temperatura de ensaio de 23°C, 44°C e 65°C

Calor de hidratação (CH) – Calorímetro isotérmico (CI)											
Idade de ensaio (horas)			41h			72h			168h		
Temperatura de ensaio (°C)			23	44	65	23	44	65	23	44	65
Amostra	CP V – REF (CI)	J/g	310	331	350	342	344	359	365	360	372
	CP II E6 (CI)		298	319	362	334	333	371	362	351	385
	CP II E34 (CI)		222	284	328	269	305	342	316	330	364
	CP III E70 (CI)		133	206	271	174	224	284	230	243	301
	CP II M8 (CI)		297	324	339	335	338	349	367	357	364
	CP IV M15 (CI)		286	309	317	331	320	327	371	334	346
	CP V ARI (CI)		321	339	359	349	350	368	370	364	380
	CP V-REF ARG (CI)		312	292	245	335	303	255	356	320	268
	CP IV M15 ARG (CI)		292	276	217	332	284	224	367	295	234

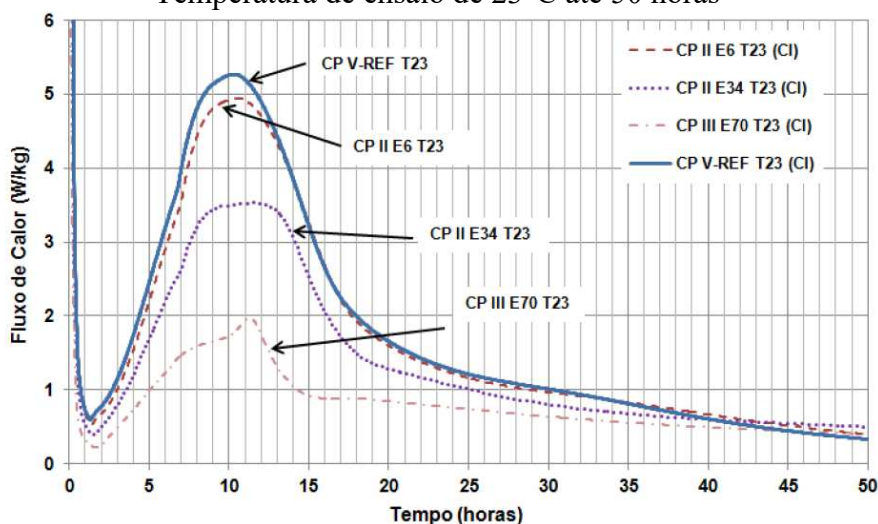
Fonte: Funahashi Júnior (2018).

A finura pode proporcionar uma reação mais rápida. Entretanto, para o cimento Portland com escória de alto forno, a finura contribui para formação de um produto hidratado com microestrutura mais densa, contribuindo para resistência a compressão, em longo prazo, bem como maior impermeabilidade e durabilidade em vista do cimento Portland comum ou CP V, por adquirir uma matriz com menores espaços capilares (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Funahashi Júnior (2018) produziu diversos tipos de cimento a partir de um cimento CP V de referência, incorporando diferentes quantidades de adições minerais, entre esses a escória de

alto-forno. Na FIGURA 55 tem-se a curva de calorimetria isotérmica para cimentos com escória: cimento CP II-E com 6% e 34% de escória, bem como CP III (70% de escória).

FIGURA 55 - Curva de fluxo de calor - cimento composto com escória de alto forno - Temperatura de ensaio de 23°C até 50 horas



Fonte: Funahashi Júnior (2018).

Funahashi Júnior (2018) concluiu, pelas curvas de calorimetria, que os cimentos com adição de escória de alto forno apresentam comumente um perfil com dois picos de aceleração quase superpostos, onde o primeiro pico refere-se à hidratação do clínquer (especificamente da fase C_3S) e o segundo à escória de alto forno, por ser de hidratação mais lenta em função da mineralogia desta adição mineral, com diâmetro de partículas maiores quando comparados com as partículas de cimento CP V-REF. A partir das curvas verificou-se a evidência da presença do segundo pico relacionado a escória de alto forno e que quanto maior o seu teor, menor é a taxa de aceleração da reação.

Assim, às primeiras idades da hidratação (1, 3 e 7 dias) e a uma dada relação a/c, um concreto produzido com o CP V – ARI terá uma porosidade mais baixa e, de modo correspondente, uma resistência mais alta. Por outro lado, o concreto de cimento CP III processa as reações de hidratação de forma mais lenta até os 28 dias. Entretanto, as diferenças normalmente desaparecem após essa idade, quando tiverem alcançado um grau de hidratação semelhante (METHA; MONTEIRO, 2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta as características dos materiais empregados e o procedimento experimental de preparo, moldagem, ensaios mecânicos e monitoramento do ganho de resistência, com base na técnica EMI, dos concretos produzidos com diferentes tipos de cimento Portland.

4.1 MATERIAIS

Segue a caracterização dos materiais utilizados para a produção do concreto: cimento Portland, aditivos, agregados graúdos e miúdos, bem como as especificações dos sensores PZTs empregados.

4.1.1 Cimento Portland

Foram utilizados dois tipos de cimento: o de alta resistência inicial (CP V – ARI) e o de alto-forno (CP III – 40). Os parâmetros físicos e químicos dos cimentos empregados, foram obtidos diretamente com o fornecedor, cujos valores estão registrados na TABELA 8 e na TABELA 9 e atendem aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 16697:2018, apresentados na seção 3.3.4.

A massa específica dos cimentos foi determinada conforme norma ABNT NBR 16605:2017 sendo seu valor para o CP V e para o CP III, respectivamente, igual a 2,99 g/cm³ e 2,89 g/cm³.

TABELA 8 - Composição química dos cimentos Portland

Tipo de cimento	Resíduo insolúvel (RI)	Perda ao fogo (PF)	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO ₃)
CP III - 40 RS	0,9	5,6	3,4	2,4
CP V - ARI	-	4,2	2,7	4

Fonte: InterCement (2021).

TABELA 9 - Propriedades físicas dos cimentos Portland

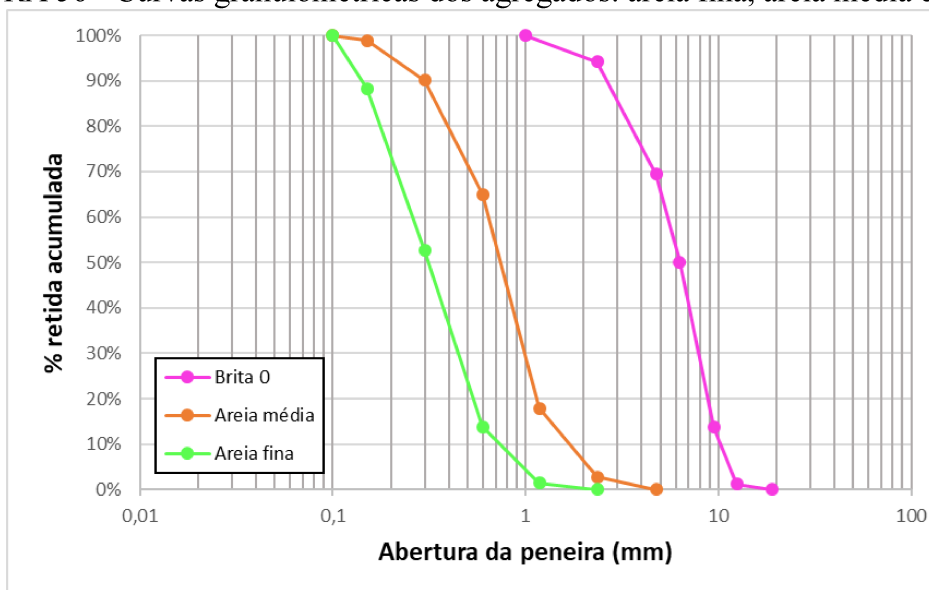
Tipo de cimento	Finura - Resíduo na peneira 75 µm	Tempo de pega (min)		Resistência à compressão (MPa)			
		Início	Fim	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
CP III - 40 RS	-	196	255	-	17	28,6	43,7
CP V - ARI	0,1	145	185	29,8	39,6	43,1	-

Fonte: InterCement (2021).

4.1.2 Agregados

Utilizou-se como agregado miúdo areia natural quartzosa com granulações fina e média, enquanto que para o agregado graúdo foi adotada brita 0 de origem basáltica. As curvas granulométricas são mostradas na FIGURA 56, obtidas conforme ensaio da ABNT NBR NM 248:2003.

FIGURA 56 - Curvas granulométricas dos agregados: areia fina, areia média e brita 0



Fonte: A autora (2021).

O ensaio de massa unitária, conforme a ABNT NBR 16972:2021, foi realizado para obter uma proporção ideal entre as areias. A porcentagem encontrada foi de 6% de areia fina em relação à massa total de agregado miúdo.

Por fim, a TABELA 10 apresenta os dados de dimensão máxima do agregado e módulo de finura, do ensaio de granulometria, além da massa específica dos agregados, determinada conforme as normas ABNT NBR NM 52:2009 e ABNT NBR NM 53:2009.

TABELA 10 - Dados físicos dos agregados

Material	Dimensão máxima do agregado (mm)	Módulo de finura	Massa específica (g/cm³)
Areia Fina	1,18	1,56	2,7
Areia Média	2,36	2,75	2,7
Brita 0	12,5	5,77	2,8

Fonte: A autora (2021).

4.1.3 Aditivo

Para redução da quantidade de água, mantendo o abatimento, foi utilizado o aditivo líquido superplastificante *MasterGlenium 3500* da BASF, composto por policarboxilatos e livre de cloretos. As especificações fornecidas pelo fabricante encontram-se na TABELA 11, e o consumo recomendado pela ficha técnica é de 0,2 a 1 % da massa de cimento. Conforme o fabricante, o produto contém mistura de 5-CLORO-2-METIL-2H-ISOTIAZOLE-3-ONA E 2-METIL-2H-. ISOTIAZOLE-3-ONA (3:1).

TABELA 11 - Especificações do aditivo superplastificante

Propriedade	Dados
Base química	Éter policarboxilato
Cor	Amarelado
Massa específica (g/cm ³)	1,1-1,14
pH	7-9
Odor	Leve

Fonte: BASF (2019).

4.1.4 Sensores piezelétricos

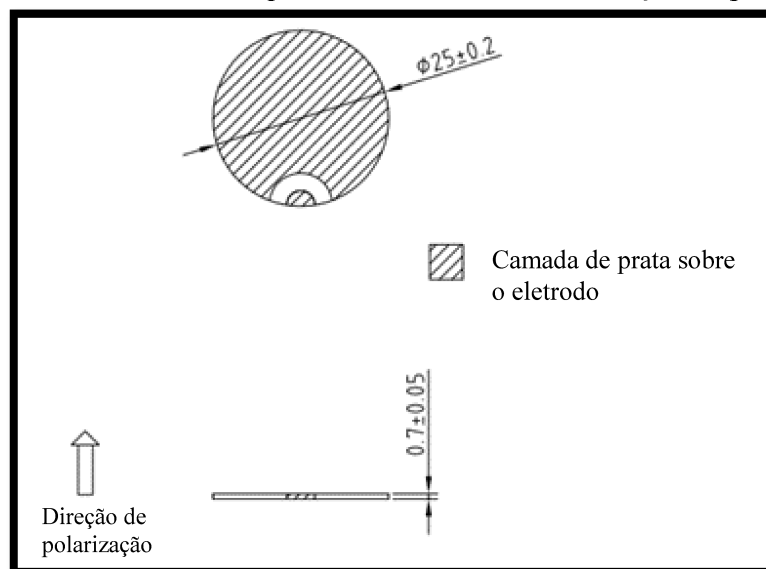
Utilizaram-se sensores piezelétricos cerâmicos com camada de prata, modelo PED25T07F3000R com 25 mm de diâmetro e 0,7 mm de espessura. As especificações elétricas são apresentadas na TABELA 12, a FIGURA 57 é o desenho esquemático do PZT contendo a direção de polarização (*Poling Direction*).

TABELA 12 - Especificações elétricas do PZT

Propriedade	Dados
Frequência ressonante	3MHz \pm 5%
Impedância ressonante	$Z_m \leq 1\Omega$
Coefficiente de acoplamento eletromecânico	$K_t \geq 45\%$
Capacitância estática	Cs= 8400pF \pm 15%@1KHz Medidor LCR a 1KHz 1Vrms
Teste Condição	23 \pm 3°C 40~70%R.H.

Fonte: Ultraceram (2021).

FIGURA 57 - Desenho esquemático do PZT com a direção de polarização



Fonte: Ultraceram (2021).

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A seção se inicia com a preparação e teste de sinal dos sensores piezelétricos, fundamentais antes de sua incorporação no concreto. Na sequência são relatados os procedimentos experimentais de dosagem do concreto, moldagem dos corpos de prova cilíndricos, cura, ensaio à compressão, determinação do índice de vazios e monitoramento do corpo de prova com PZT pela técnica EMI.

4.2.1 Preparação dos sensores

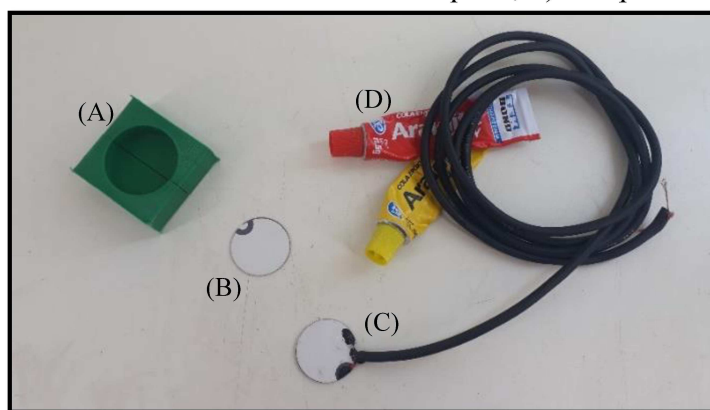
Os PZTs cerâmicos são materiais frágeis, por essa razão, precisam de uma cápsula protetora para resistirem à vibração na moldagem do concreto e à pressão durante o processo de cura. Essa cápsula visa proteger o sensor de danos, mas não deve alterar a sensibilidade do mesmo em detectar as variações mecânicas do material.

Utilizou-se o método desenvolvido por Silva (2017) para criação de cápsulas inteligentes, que apresentou resultados satisfatórios para o monitoramento em concreto. Trata-se de uma cápsula na qual o PZT é revestido com adesivo à base de resina epóxi, com alto poder de adesão, capaz

de resistir a temperaturas de até 80°C e apresenta uma resistência superior à do concreto (aproximadamente 100 MPa).

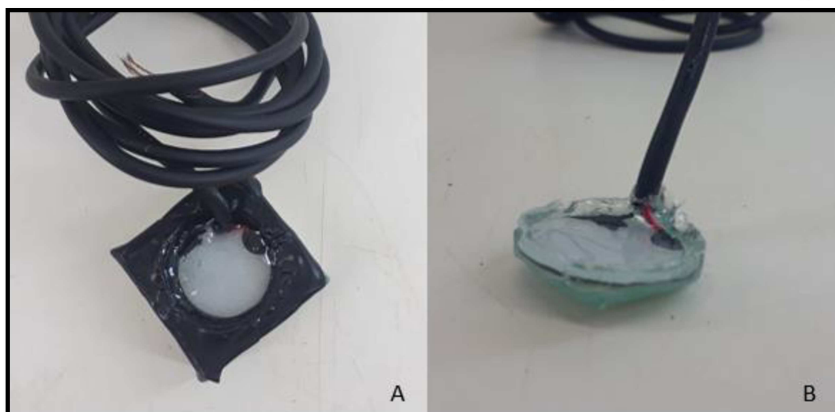
O processo de fabricação da cápsula iniciou com a confecção da fôrma, com 30 mm de diâmetro, utilizando uma impressora 3D modelo Replicator2X da marca *MakerBot*. Aplicou-se sobre a forma a primeira camada de resina epóxi e aguardou seu endurecimento por 4 horas. Vale ressaltar que o molde foi recoberto por fita isolante para facilitar a desforma. Em seguida, o PZT, com os fios condutores já soldados, foi inserido sobre a camada endurecida e aplicada resina em sua superfície. O tempo de cura da cápsula foi de 24 horas, conforme especificado por Silva (2017). A FIGURA 58 apresenta os materiais utilizados e a FIGURA 59 ilustra a execução e a cápsula inteligente.

FIGURA 58 - Materiais utilizados para criação da cápsula inteligente: a) fôrma; b) PZT; c) PZT com fio soldado e isolado com fita isolante líquida; d) componentes da resina epóxi



Fonte: A autora (2021).

FIGURA 59 - Proteção do PZT : a) execução; b) cápsula inteligente



Fonte: A autora (2021).

O PZT encapsulado tem média de: 28,19 mm de diâmetro; 5,7 mm de espessura e massa de 37,06 g.

4.2.2 *Teste de sinal*

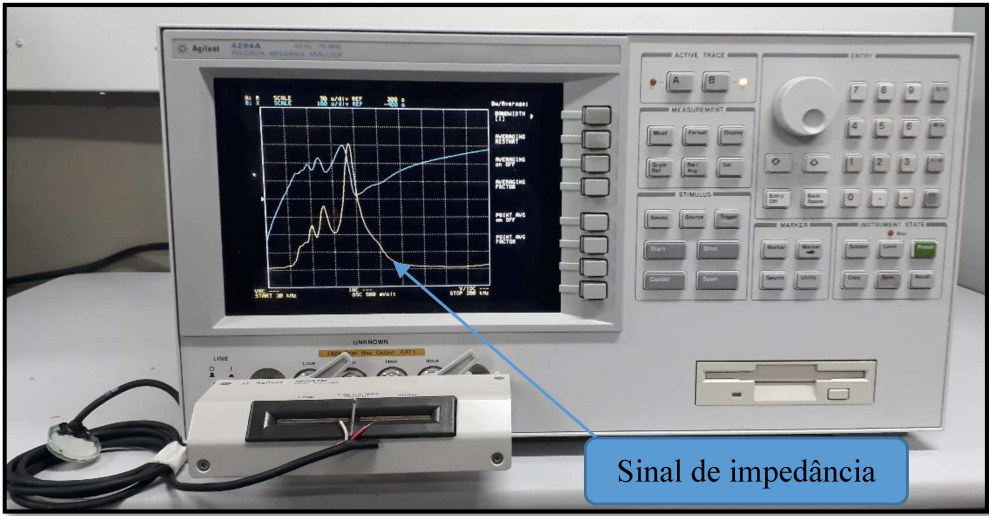
As cápsulas inteligentes tiveram seus sinais de impedância testados, a fim de avaliar seu devido funcionamento. O fio, soldado de um lado ao PZT, teve sua outra extremidade ligada ao analisador de impedância *Agilent 4294A* (especificações na TABELA 13) do Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEST) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da UFU. A FIGURA 60 ilustra o sinal de impedância gerado pela cápsula inteligente em devido funcionamento.

TABELA 13 - Dados do analisador de impedância

Característica	Dados
Faixa de frequência	40 Hz a 110 MHz
Precisão básica de impedância	+/-0,08%
Intervalo de nível de sinal	5 mV a 1 V rms 200 uA a 20 mA rms
Intervalo de viés DC	0 V a +/-40 V 0 mA a +/-100 mA

Fonte: CEYUAN (2021).

FIGURA 60 - Teste de sinal das cápsulas inteligentes



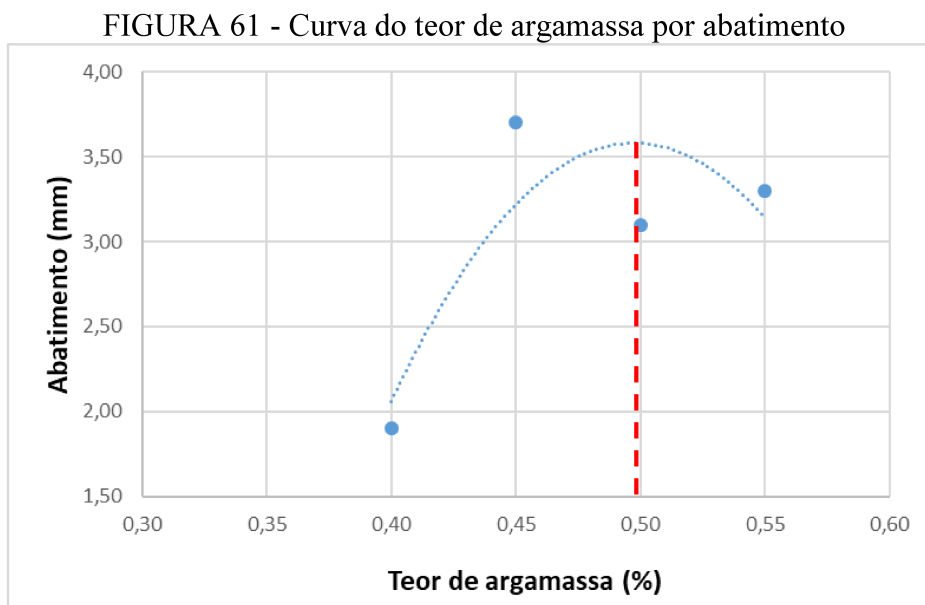
Fonte: A autora (2021).

A fim de testar seu funcionamento, foi inserido um pequeno esforço mecânico com as mãos e verificado se havia mudança do sinal de impedância registrado no analisador. Todas as cápsulas tiveram seu funcionamento confirmado, estando prontas para a incorporação no concreto.

4.2.3 Dosagem do concreto

Para dosagem do concreto foi utilizado o método do IBRACON com qual se determinou a melhor proporção entre os agregados de forma que consumisse a menor quantidade de água, considerando também a interferência do aglomerante na proporção total de materiais (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

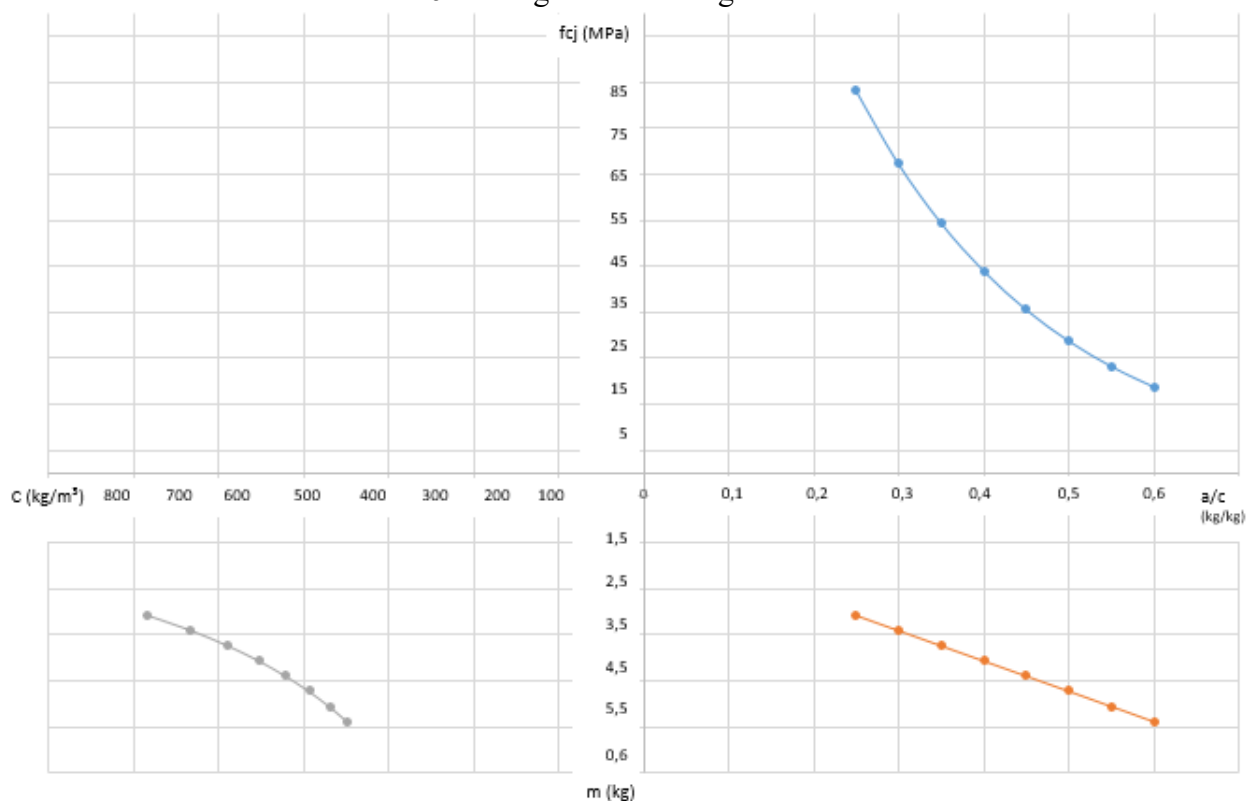
O teor ótimo de argamassa foi obtido utilizando um traço de 1:5:0,6 (cimento: agregados: a/c) sem aditivo e com cimento Portland CP V. Foram testados os teores de 0,4; 0,45; 0,5 e 0,55 acrescentando cimento, água e areia para cada teor, anotando o abatimento de cada um. Foi traçado o diagrama de relação a/c por abatimento e traçado uma curva parabólica de tendência, o teor ótimo é aquele referente ao ponto máximo da curva, na FIGURA 61 pode-se identificar o teor de 0,5 adotado.



Fonte: A autora (2021).

Uma nova mistura com o traço de 1:5, com o teor ótimo da argamassa determinado, foi produzida variando a relação a/c a fim de obter o abatimento desejado de 210 mm. Na sequência foram também executados dois traços auxiliares de 1:3,5 e 1:6,5 com o mesmo teor de argamassa e variando a relação a/c para atingir o abatimento de 210 mm. O diagrama de dosagem é apresentado na FIGURA 62.

FIGURA 62 - Diagrama de dosagem do concreto



Fonte: A autora (2021).

A partir do diagrama de dosagem, foram determinados dois traços, sendo o A com resistência à compressão aos 28 dias de 30 MPa e o B, de 60 MPa. Cada traço desenvolvido com os dois tipos de cimento Portland, areia fina, média, brita 0, água e aditivo superplastificante. Os teores de aditivo foram definidos para cada traço, de forma que o abatimento atingisse 210 ± 30 mm. Os traços finais são apresentados na TABELA 14.

TABELA 14 - Traços do concreto

Grupo	Resistência média alvo aos 28 dias (MPa)	Abatimento (mm)	Traço	Tipo de cimento	Teor de aditivo
A	30	210 ± 30	1:1,83:2,82:0,49	CP V - ARI	0,50%
				CP III - 40 RS	0,60%
B	60		1:1,3:2,3:0,33	CP V - ARI	0,70%
				CP III - 40 RS	0,60%

Fonte: A autora (2021).

4.2.4 *Produção do concreto e moldagem dos corpos de prova*

Os traços A e B foram preparados em betoneira estacionária com cimento CP V - ARI e CP III. O aditivo foi dosado para atingir um abatimento de tronco de cone de 210 ± 30 mm, procedimento realizado conforme a ABNT NM 67:1998. Antes da moldagem dos corpos de prova, foi realizado o ensaio da massa específica do concreto no estado fresco, seguindo as instruções da norma ABNT NBR 9833:2008.

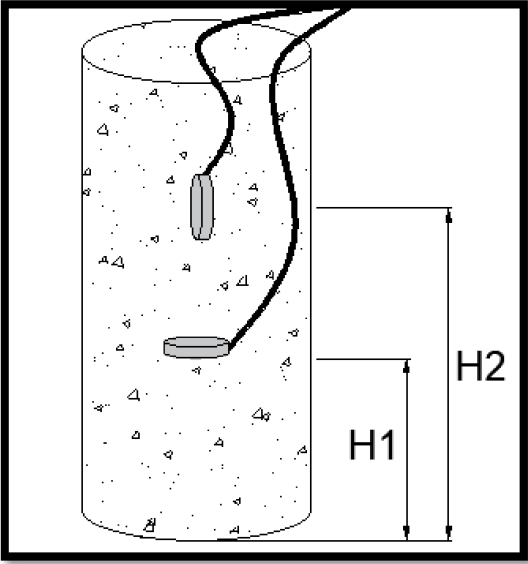
Foram moldados para cada grupo e para cada tipo de cimento, corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura sendo: quatro unidades para cada idade de ensaio à compressão (1, 3, 7, 28 e 91 dias), bem como quatro exemplares para o ensaio de índice de vazios aos 28 dias e um cilindro para monitoramento com dois sensores piezelétricos encapsulados incorporados. Além de três corpos de prova cilíndricos menores, 50mm por 100mm (diâmetro x altura) para cada idade de ensaio (1, 3, 7, 28 e 91 dias) a fim de acompanhar a variação do índice de vazios com a idade.

Os resultados de índice de vazios obtidos pelos ensaios com as amostras menores (50x100 mm) foram comparados aos resultados obtidos em amostras cilíndricas maiores (100x200 mm), aos 28 dias. Como foi usado agregado de menor dimensão característica máxima, utilizaram-se as amostras menores para produzir menos material e facilitar a execução dos ensaios, considerando os quatro tipos de concreto e os ensaios realizados em cinco idades diferentes para cada tipo.

No corpo de prova a ser monitorado, foram inseridas duas cápsulas inteligentes: uma a 0° com o eixo horizontal, na parte inferior, e a outra a 90°, na parte superior, como ilustra o esquema

da FIGURA 63 completada com os dados apresentados na TABELA 15. Esse posicionamento foi adotado para verificar se a posição exercia influência significativa nos sinais monitorados, considerando a possibilidade de alteração das propriedades dos concretos segundo as direções paralelas e perpendiculares à direção de lançamento e adensamento do concreto na forma. Além disso, há a influência da mudança da direção de polarização do PZT (FIGURA 57). Negi *et al.* (2018) analisou essas direções para sensores PZT quadrados, conforme descrito na sessão 2.5.9, acoplados em uma viga de concreto, nessa pesquisa o teste se diferencia por ser um PZT redondo incorporado ao corpo de prova de concreto.

FIGURA 63 - Esquema do posicionamento das cápsulas inteligentes no corpo de prova



Fonte: A autora (2021).

TABELA 15 - Dados das cápsulas inteligentes

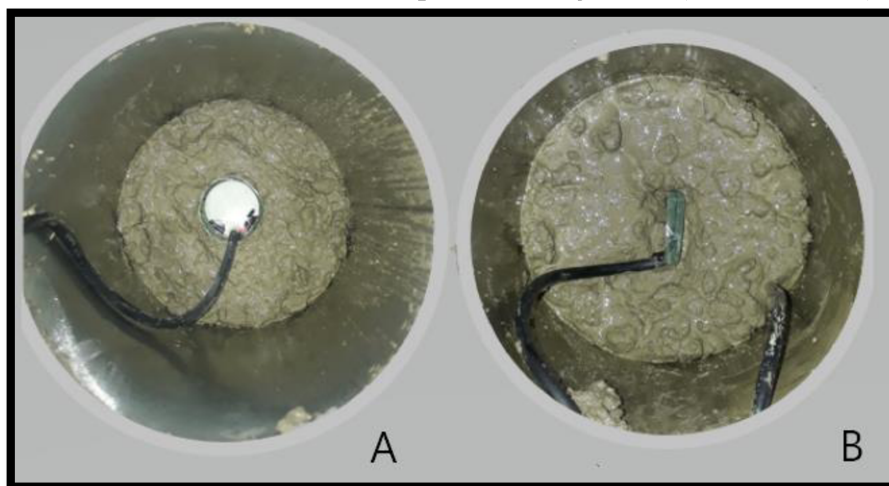
Traço/ cimento	Cápsula inteligente	Diâmetro médio (mm)	Espessura média (mm)	Massa (g)	H1 (mm)	H2 (mm)
A/ CP III	PZT 1	28,92	5,53	36,44	62	
	PZT 2	28,68	6,56	37,4		126
A/ CPV	PZT 3	24,08	5,635	37,07	70	
	PZT 4	28,855	5,535	37,88		145
B/ CPV	PZT 5	28,205	6,43	37	63	
	PZT 6	28,695	5,8	37,78		130
B/ CPIII	PZT 9	28,715	5,37	33,55	50	
	PZT 10	29,245	7,29	35,2		165

Fonte: A autora (2021).

A ABNT NBR 5738:2015 recomenda que o número de camadas, para adensamento das amostras, seja reduzido pela metade quando o abatimento do concreto é superior a 160 mm. Logo, os corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro foram moldados com uma camada, adensados manualmente com doze golpes com a haste metálica. A moldagem das amostras com 50 mm de diâmetro, foi realizada em duas camadas com doze golpes de soquete em cada uma.

O corpo de prova que recebeu as cápsulas revestidas foi moldado com três camadas. Sobre a primeira, posicionou-se uma cápsula inteligente na posição horizontal (FIGURA 64 - A) diretamente sobre o concreto; sobre a segunda camada, um PZT encapsulado na vertical (FIGURA 64 - B) que foi coberto pela última camada. Procurou-se distribuir os doze golpes nas três partes de concreto, para manter o mesmo adensamento.

FIGURA 64 - Posicionamento das cápsulas inteligentes: a) horizontal; b) vertical



Fonte: A autora (2021).

4.2.5 *Cura e monitoramento dos corpos de prova*

Após a moldagem, os corpos de prova foram levados para a câmara úmida na qual permaneceram por 24 horas. Após esse período, as amostras foram desformadas e imersas em um tanque com água saturada com cal, no qual permaneceram até a data dos ensaios, conforme recomendações da ABNT NBR 5738:2015.

As amostras que continham as cápsulas inteligentes, não foram levadas à câmara úmida, visto que imediatamente após sua moldagem os fios, ligados aos PZTs, foram conectados no analisador de impedância para monitoramento das primeiras horas. O sinal da primeira medição realizada foi adotado como referência e recebeu o nome de *baseline*.

Tanto as amostras de concreto com PZT quanto o analisador e computador utilizados, que são apresentados posteriormente nessa sessão, foram mantidos em uma sala com condições controladas de temperatura. Nas primeiras 24 horas esses corpos de prova foram cobertos com pano sempre úmido para evitar a perda de água, transcorrido esse tempo, estas amostras também foram desformadas e imersas em água saturada com cal, em um recipiente localizado na mesma sala. A FIGURA 65 ilustra um corpo de prova com as cápsulas inteligentes incorporadas assim que foi desformado, enquanto a FIGURA 66 ilustra o mesmo imerso em água saturada com cal, durante o monitoramento de impedância.

FIGURA 65 - Monitoramento de corpo de prova antes da imersão



Fonte: A autora (2021).

FIGURA 66 - Corpo de prova imerso e em monitoramento



Fonte: A autora (2021).

O equipamento utilizado para a aquisição dos sinais, emitidos pelas cápsulas inteligentes, foi o analisador de impedância portátil SySHM desenvolvido por Finzi Neto et al. (2010) no LMEST da FEMEC. Alternativa de baixo custo e altamente expansível para monitorar uma matriz de transdutores piezoelétricos multiplexados. O analisador desenvolvido não usa algoritmos de transformada de *Fourier* caros e nem requer um computador digital para processamento, sendo suficiente o uso de um computador pessoal para a interface com o usuário. O sistema pode trabalhar em frequências que variam de 0 a 400 kHz, com alta precisão e estabilidade (FINZI NETO ET. AL., 2010). A TABELA 16 apresenta as especificações do SySHM.

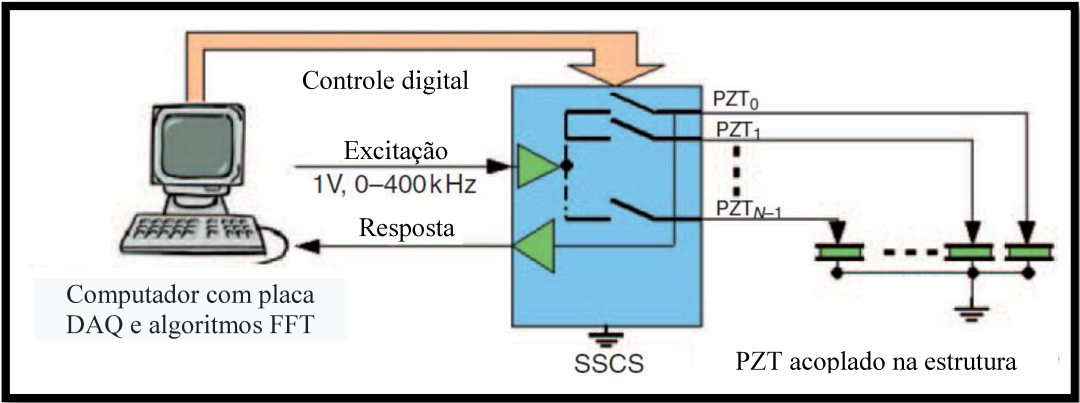
TABELA 16 - Especificações do analisador de impedância SySHM

Característica	Dados
Faixa de frequência	0 a 400 kHz
Tensão de excitação	1 V
Número de pontos por iteração	20.000
Médias por ponto	512

Fonte: Finzi Neto et al. (2010).

O analisador de impedância possui capacidade para conectar até quatro PZTs, sendo capaz de medir diversos sinais com um único dispositivo de medição. Os sensores conectados com o sistema de comutação e condicionamento do sinal (SSCS) tinha sua ativação e desativação controlada. A matriz com a quantidade de iterações a ser realizadas, era determinada por um controlador digital externo, fornecido por um computador e uma placa de aquisição de dados (DAQ). O controlador digital ativava apenas um único PZT de cada vez, e sua resposta era digitalizada pelo cartão DAQ e processado pelo computador. A FIGURA 67 apresenta um desenho esquemático que ilustra o processo descrito.

FIGURA 67 - Desenho esquemático do funcionamento do SySHM



Fonte: Adaptado de Finz Neto et al. (2010).

Após a resposta a recebida, um arquivo com o banco de dados de cada PZT era então processado e armazenado no computador. Todos os passos apresentados correspondiam a uma iteração que durava cerca de 8 minutos e, após finalizada, começava a iteração do próximo PZT.

Antes de iniciar o monitoramento, era necessário que a faixa de frequência fosse determinada. A TABELA 17 apresenta a correlação das faixas utilizadas nos trabalhos de referência que trabalharam com o monitoramento do ganho de resistência. Nota-se que utilizaram uma ampla faixa chegando em torno da frequência máxima do equipamento, logo foi adotada a faixa de frequência de 50 kHz a 400 kHz para este trabalho.

TABELA 17 - Trabalhos de referência com as taxas de frequência utilizadas

Trabalhos de referência	Faixas de frequência	Material
Dansheng e Hongping (2011)	150 kHz a 350 kHz	Cubos de concreto com PZT acoplado
Visalakshi, Bhalla e Gupta (2018)	50 kHz a 400 kHz	Concreto com PZT colado na barra de aço
Moharana e Bhalla (2019)	50 kHz a 300 kHz	Concreto com PZT reutilizável
Narayanan, Kocherla e Subramaniam (2017)	10 kHz a 500 kHz	Argamassa com PZT embutido
Tawie e Lee (2010b)	100 kHz a 400 kHz	Concreto com PZT colado no aço
Zhang <i>et al.</i> (2020)	100 kHz a 1000 kHz	Pasta de cimento com PZT embutido

Fonte: A autora (2021).

Após a moldagem dos corpos de prova, as cápsulas horizontal e vertical foram conectadas no SySHM. Pelo programa SySHMv2R2.jar, instalado no computador, foi inserida a faixa de frequência adotada; a identificação dos sensores conectados e suas configurações; bem como o número de iterações por malha. Para calcular esse último dado de aquisição, dividia-se o tempo total a ser monitorado pelo tempo de aquisição de cada iteração (8 minutos) encontrando o número de iterações sobre a malha, ajustando para a quantidade de cápsulas conectadas.

O monitoramento de impedância E/M foi realizado de forma contínua imediatamente após a moldagem até 48 horas, abrangendo as primeiras 40 horas de maiores mudanças de sinais conforme identificado por Moharana e Bhalla (2019). Próximo às idades de ensaio (7, 28 e 91 dias) os sinais voltaram a ser medidos desde 1 dia antes até 1 dia após as datas dos ensaios, permanecendo a amostra sempre imersa.

Foram realizados os seguintes totais de iterações para cada PZT, com todas as idades juntas: traço A com CPV, 633 iterações; traço A com CP III, 927 iterações; traço B com CP V 1032 iterações; traço B com CP III, 709 iterações. Essas diferenças de quantidade se devem ao fato de que, alguns corpos de prova estavam conectados no mesmo intervalo de tempo quando as idades coincidiam, levando mais tempo para percorrer os quatro PZTs e gerando menos arquivos. Cada arquivo gerado em 1 iteração possui 20.000 pontos de frequência dentro da faixa adotada (50 kHz a 400 kHz), cada uma dessas linhas contém colunas com valores de resistência ôhmica, corrente, voltagem e fase, correspondentes a cada ponto de frequência.

Com o programa Matlab os dados foram inseridos em matrizes e calculadas as métricas estatísticas, bem como plotados os gráficos. Essa parte será aprofundada na seção 5.

4.2.6 Ensaios compressão e determinação do índice de vazios

Os corpos de prova foram retificados e submetidos ao ensaio de compressão aos 1, 3, 7, 28 e 91 dias, na máquina universal de ensaios EMIC DL-60000 conforme recomendações da norma ABNT NBR 5739:2018.

Nas mesmas idades acima referidas, os corpos de prova de 50 x 100mm foram submetidos ao ensaio para determinação de índice de vazios. Na idade de 28 dias foi realizado o ensaio com as amostras cilíndricas com diâmetro de 50 mm e 100 mm a fim de comparar os resultados obtidos. Para ambos, foi seguido o procedimento da ABNT NBR 9778:2009. Para imersão dos corpos de prova em água em ebulição foi utilizada autoclave vertical FABBE – PRIMAR modelo 103.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Essa sessão inicia-se com os resultados do concreto no estado fresco e nas primeiras 24 horas durante o processo de hidratação. Em seguida, aqueles referentes às propriedades do concreto no estado endurecido serão apresentados e discutidos. Vale ressaltar que os resultados da técnica EMI também serão divididos nessas subseções, sendo apresentado de forma gradual e correlacionando com as propriedades dos ensaios mecânicos.

5.1 PRIMEIRAS 24 HORAS APÓS A CONCRETAGEM

Os resultados dos ensaios realizados com o concreto no estado fresco, encontram-se na TABELA 18. Percebe-se que os traços B, para produção de concretos com alta resistência, tiveram maiores consumos de cimento.

TABELA 18 - Resultados dos ensaios do concreto no estado fresco

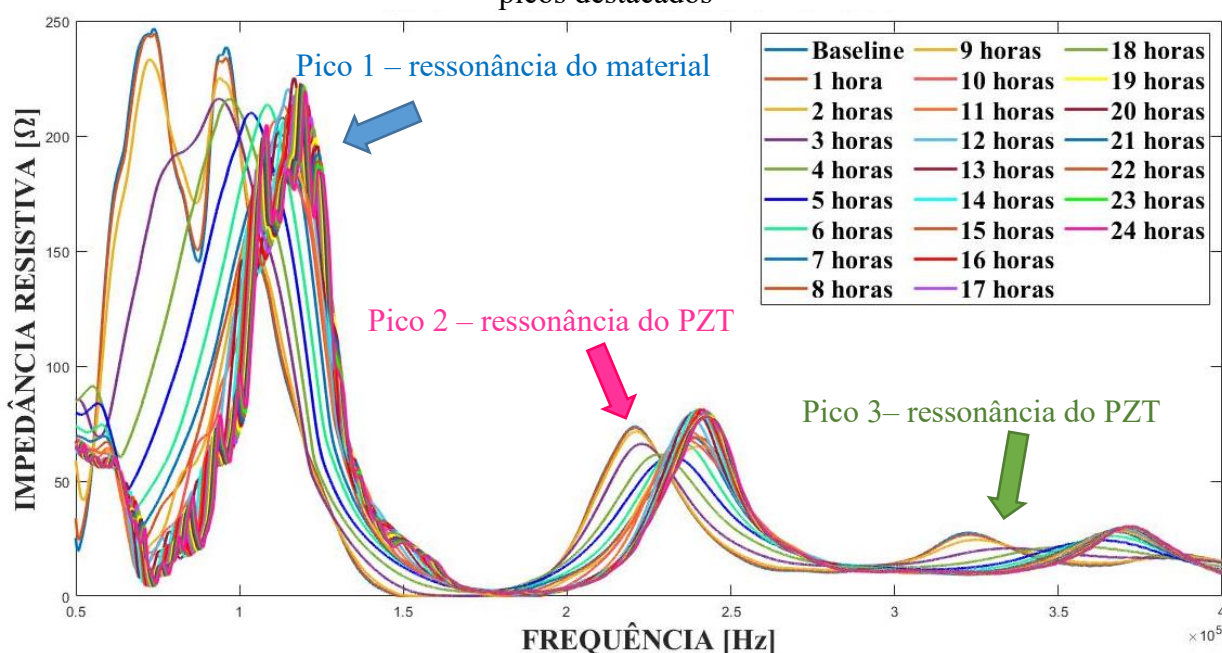
Concreto no estado fresco		
Traço A com cimento CP V		
Abatimento (mm)	Massa específica do concreto (g/cm ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)
235	2,20	357,92
Traço A com cimento CP III		
Abatimento (mm)	Massa específica do concreto (g/cm ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)
180	2,29	372,84
Traço B com cimento CP V		
Abatimento (mm)	Massa específica do concreto (g/cm ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)
227	2,20	445,77
Traço B com cimento CP III		
Abatimento (mm)	Massa específica do concreto (g/cm ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)
225	2,33	472,30

Fonte: A autora (2021).

Após os ensaios do concreto no estado fresco e a moldagem dos corpos de prova, iniciou-se o monitoramento dos sinais de impedância eletromecânica, sendo o primeiro sinal adquirido chamado de *baseline* e usado como referência. Com os dados obtidos, foi traçado um gráfico com o valor médio da resistência (parte real da impedância) nas primeiras horas pela frequência, utilizando o Matlab. Assim como os trabalhos de referência afirmaram, a parte real do sinal é a mais confiável e estável à temperatura e, portanto, somente ela será utilizada nos resultados.

A FIGURA 68 exemplifica o gráfico gerado com a faixa total de frequência, de 50 kHz a 400 kHz, pela média dos valores de impedância resistiva em cada hora, medidos no primeiro dia. Esse gráfico foi traçado com os dados coletados pela cápsula inteligente horizontal (PZTh) do concreto de traço A com cimento Portland CP V. É possível identificar 3 picos de frequência, sendo o primeiro referente à ressonância do material e os outros dois, do PZT.

FIGURA 68 - Impedância resistiva pela frequência para o traço A com cimento CP V com os picos destacados



Fonte: A autora (2021).

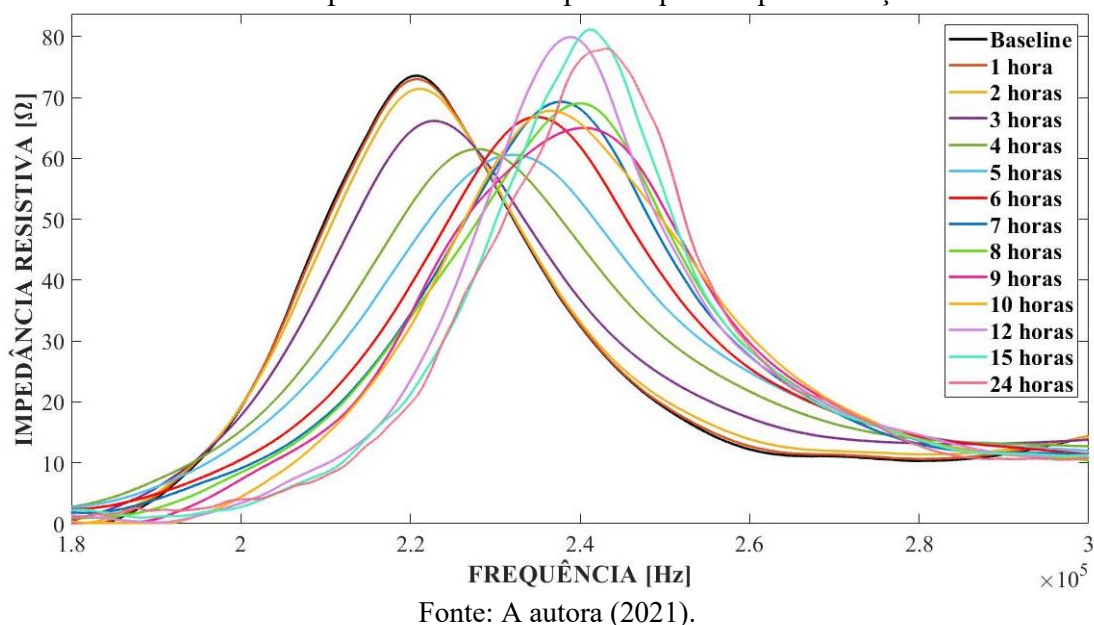
Conforme abordado por LIM *et al.* (2021) na revisão teórica, os picos de ressonância direta do material (comumente chamado de pico da estrutura), somente representam bem o comportamento mecânico após o concreto atingir o estado sólido, dessa forma o monitoramento do ganho de resistência deve ser realizado pelo pico do PZT, sendo utilizado o pico 2 para a análise. Assim, as figuras apresentadas na sequência são referentes ao pico 2, as curvas para faixa de frequência ampla para os demais traços encontram-se no Apêndice A.

O pico traçado com todas as horas impossibilita uma boa análise qualitativa, pois as curvas a partir de 13 horas ficam pouco espaçadas o que dificulta seu reconhecimento separado, conforme pode ser analisado na FIGURA 68. Por essa razão, a partir de 10 horas serão representadas, nos gráficos, apenas as curvas de 12, 15 e 24 horas. Outra consideração é que as

cápsulas inteligentes aqui estão sendo chamadas apenas de PZT, por uma questão de simplificação e facilidade de comparação com os trabalhos de referência.

Por fim, é importante ressaltar o parâmetro elétrico que está sendo analisado: a impedância, a qual é o inverso da admitância empregada nos trabalhos de referência, logo os movimentos das curvas em relação ao eixo Y também possuirão sentido inverso ao que apresenta a literatura. A FIGURA 69 apresenta o pico 2 do concreto de traço A com cimento Portland CP V e PZTh, isolado para análise.

FIGURA 69 - Pico 2 - impedância resistiva por frequência para o traço A - CP V PZTh



Fonte: A autora (2021).

Fazendo a análise qualitativa da FIGURA 69 tem-se as curvas de 1 e 2 horas pouco se diferem da *baseline*, a leve descida do pico indica um pequeno ganho de massa (pela formação inicial de produtos de hidratação) mas a frequência é praticamente constante. Segundo os ensaios realizados por Zhang *et al.* (2020) esse comportamento corresponde ao estágio inicial, antes do início de pega, sendo chamado de período de pré-indução (fase I) do gráfico de estágios de hidratação, no qual os compostos C_3A e C_3S entram em solução, formando uma camada de gel dos produtos que cobre a superfície dos grãos anidros, entrando na fase II de indução, ocorrendo uma redução da taxa de hidratação.

A curva de 3 horas tem o pico deslocado para direita, isto é, um aumento da frequência que indica que o concreto, que se encontrava na fase líquida, começou a ganhar resistência e se

encontra semi-sólido. Analisando o tempo de início de pega do cimento CP V pelo ensaio de Vicat (TABELA 9) seu valor é de 145 minutos o que corresponde a 2 horas e 25 minutos, ou seja, entre 2 e 3 horas, sendo então o primeiro aumento de frequência da curva um indicativo para o início da pega. A curva de 4 horas continua o deslocamento para a direita, enquanto a de 5 horas aumenta a frequência e se achata, indicando uma continuação no ganho de resistência e amortecimento.

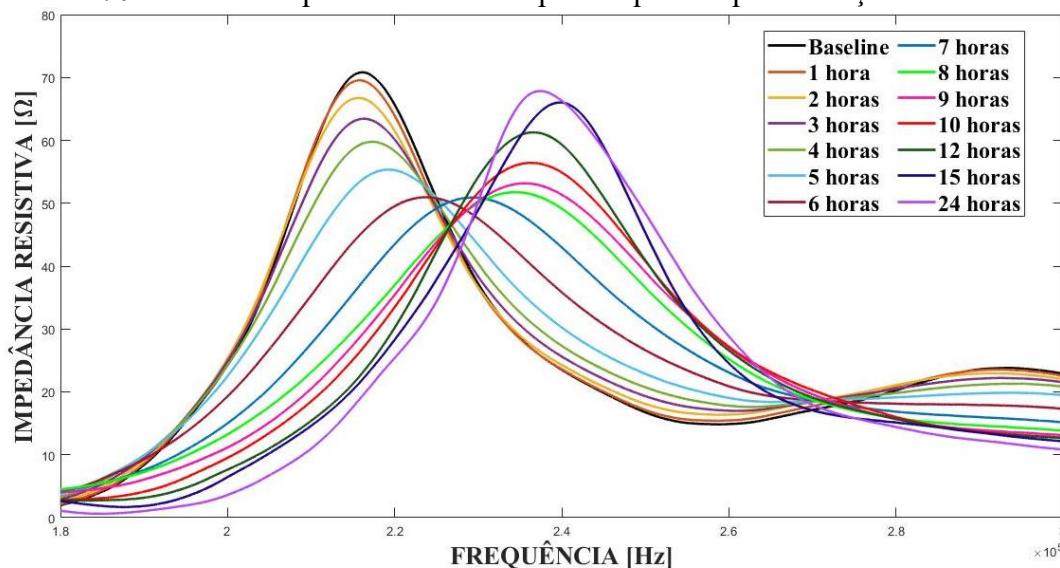
A partir da curva de 6 horas até a 8 horas há um movimento ascendente e para a direita, indicando ganho de resistência e massa. Segundo Zhang *et al.* (2020) esse comportamento do sinal corresponde à fase transição entre os tempos de pega de Vicat e ao período de aceleração do processo de hidratação. Nessa fase, segundo LIM *et al.* (2021) o concreto muda de semi-sólido para sólido, ocorrendo intensa precipitação de C-S-H e CH, produtos responsáveis pelo enrijecimento do concreto e redução da porosidade (aumento do parâmetro mecânico massa). O achatamento do pico de 9 horas sugere que a propriedade mecânica de amortecimento teve uma alteração mais considerável.

Nos picos seguintes, principalmente após o de 12 horas a taxa de hidratação vai diminuindo gradualmente, entrando no estágio final após o tempo de fim de pega de Vicat e no período de desaceleração da hidratação, na qual há uma transição da hidratação por dissolução para precipitação topoquímica. Essa diminuição da taxa é verificada no gráfico pelo menor espaçamento entre as curvas acima de 12 horas, mantendo a altura do pico (valor da impedância) e movimento para a direita, uma vez que o ganho de resistência continua.

A FIGURA 70 apresenta as curvas para o mesmo traço A, porém com cimento Portland CP III. Os picos de 1 e 2 horas descem, mas não se deslocam para a direita, o que demonstra que até esse tempo não houve ganho de resistência, apenas variação de massa pela formação dos primeiros precipitados. Entre 3 e 4 horas inicia-se uma leve mudança para direita, trecho que possui o tempo de início de pega de Vicat (TABELA 9) de 196 minutos ou 3 horas e 15 minutos. Em 6 e 7 horas a resistência continua aumentando e, com a intensa formação de produtos de hidratação, o amortecimento foi significativo, achatando as curvas. De 8 a 12 horas tem-se o período de aceleração, enrijecimento do concreto e redução da porosidade (aumento do parâmetro mecânico massa) o que causa o efeito de subida da curva. A curvas de 15 e 24 horas

com picos mais altos fazem parte do estágio de desaceleração, no qual o espaçamento das curvas diminui.

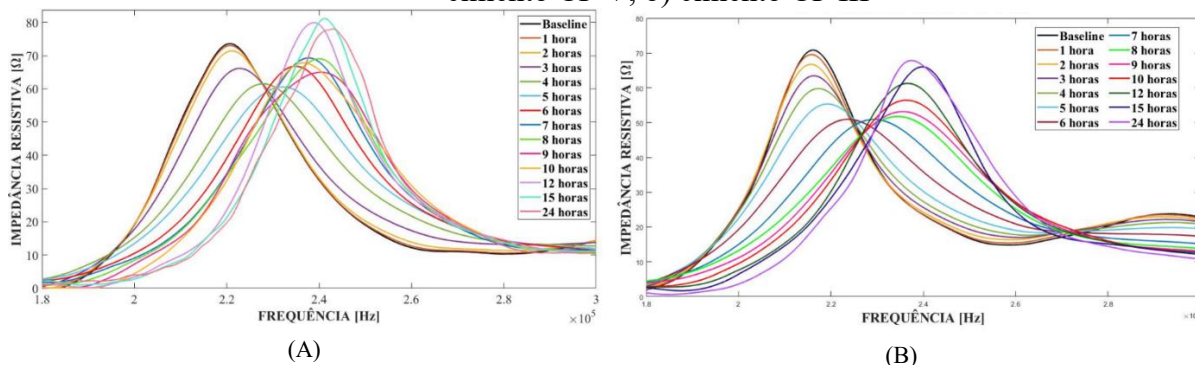
FIGURA 70 - Pico 2 - Impedância resistiva por frequência para o traço A - CP III PZTv



Fonte: A autora (2021).

A FIGURA 71 contendo as FIGURA 69 e FIGURA 70 lado a lado, visa apenas associar as curvas do mesmo traço com cimentos diferentes. É possível perceber que as curvas do CP V (FIGURA 71 A) mudam de direção bruscamente no início da pega, o que indica a maior resistência inicial que ocorre pela composição (maior quantidade de C_3S) e finura do CP V. Por outro lado, os picos do CP III (FIGURA 71 B) se alteram em uma taxa quase constante, o movimento gradual para direita reforça o pequeno ganho de resistência apresentado pelo cimento que possui escória em sua composição.

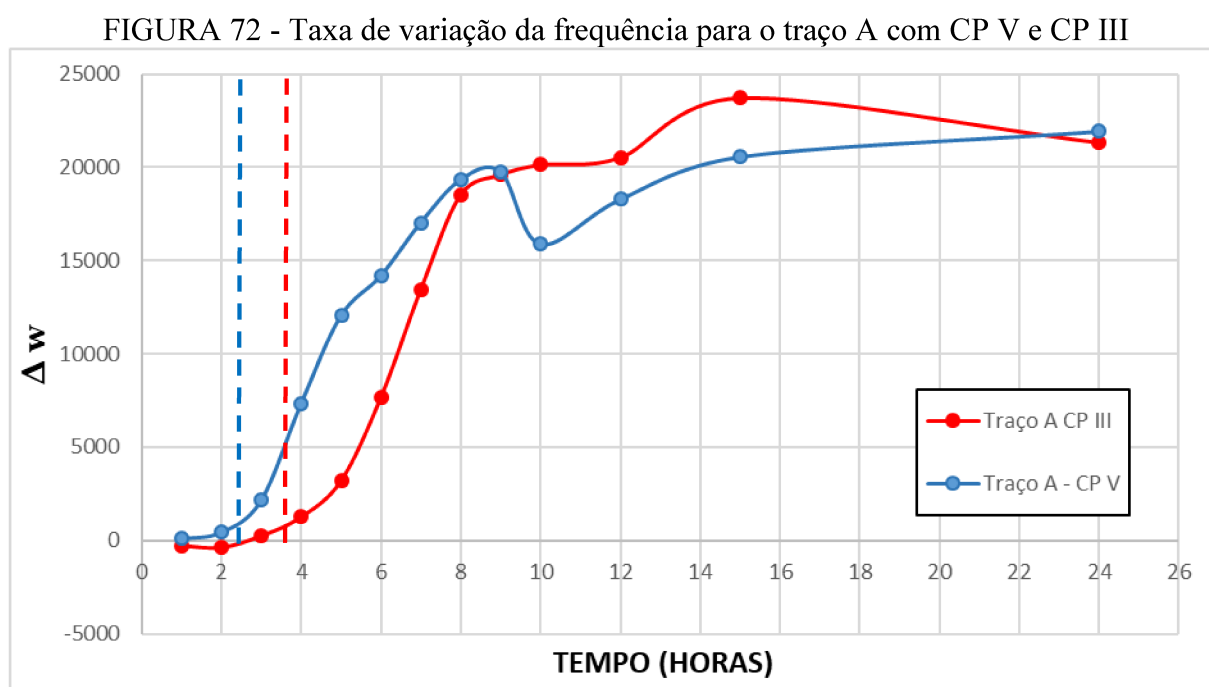
FIGURA 71 - Associação das curvas de impedância a resistiva por frequência do traço A: a) cimento CP V; b) cimento CP III



Fonte: A autora (2021).

Os sinais de impedância são únicos para aquela cápsula e material, não podendo comparar seus valores numéricos entre si. Entretanto, a taxa de frequência (Δw) dos picos das curvas, proposta por Narayanan, Kocherla e Subramaniam (2017) na Equação 19, é uma alternativa para analisar diretamente dois casos distintos.

A FIGURA 72 corresponde a plotagem da variação de frequência nas primeiras 24 horas para os dois tipos de /d do traço A. As linhas em pontilhado marcam o tempo de início de pega de Vicat, cada linha com a cor correspondente da curva, percebe-se que o tempo de início de pega está bem próximo do ponto onde começa a parte mais inclinada da curva, trecho que tem alta taxa de aumento da frequência correspondendo ao estágio de aceleração da curva de calor de hidratação, sendo a fase de transição entre os tempos de pega Vicat. Após o trecho íngreme, a taxa de variação da frequência começa a decrescer e as curvas se achatam, estando o concreto já endurecido, no estado sólido.

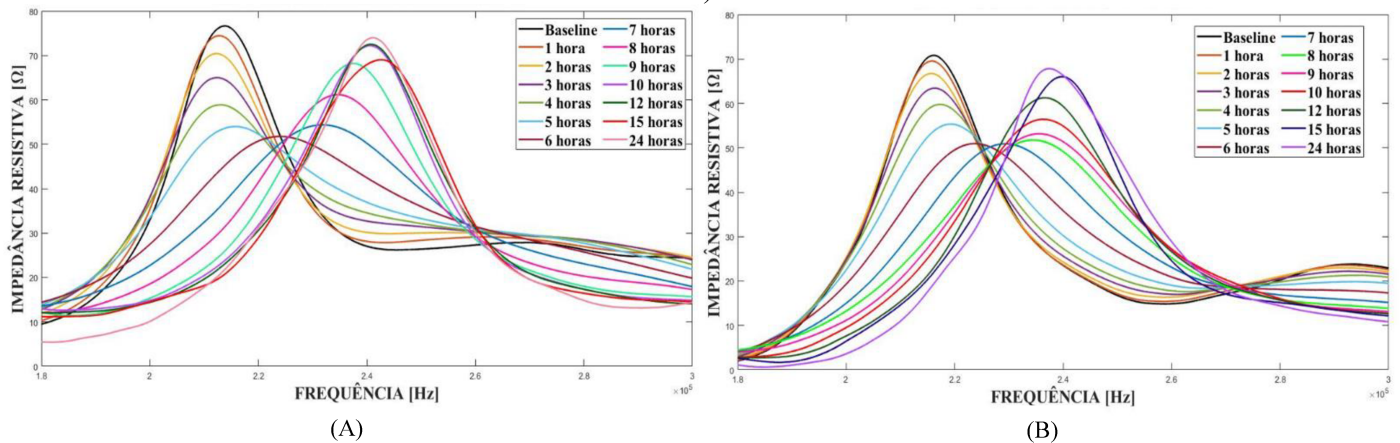


Fonte: A autora (2021).

O comportamento esperado é o mesmo para as curvas das cápsulas inteligentes, posicionadas no mesmo concreto, com direções diferentes. A FIGURA 73 relaciona cápsulas inteligentes colocadas no mesmo concreto (traço A – CP III) mas na posição horizontal (PZTh) e na vertical (PZTv). É perceptível comportamentos semelhantes das curvas, validando a afirmação de Negi

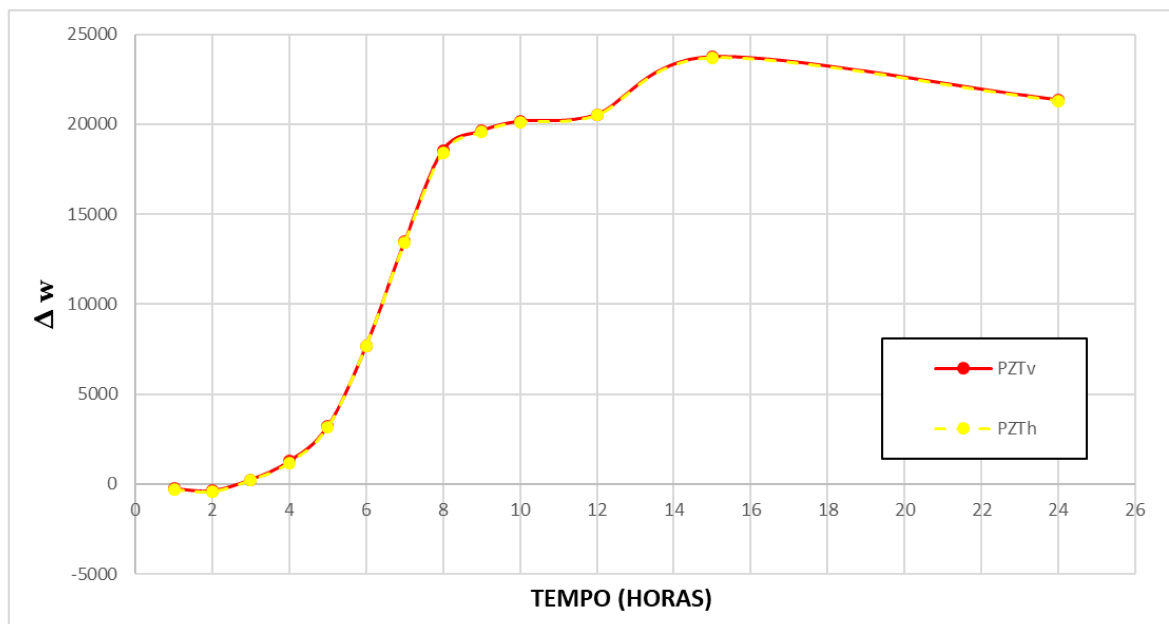
et al. (2018) de que os dois tipos de posicionamentos (0° e 90°) se mostraram eficientes e coerentes para monitorar o processo de hidratação desse traço. Para melhorar a correlação a FIGURA 74 apresenta o gráfico de variação da frequência pelo tempo, nele as curvas praticamente coincidem.

FIGURA 73 - Relação das curvas de impedância por frequência do traço A CP III: a) PZTh; b) PZTv



Fonte: A autora (2021).

FIGURA 74 - Variação de frequência com o tempo para o traço A CP III para PZTh e PZTv

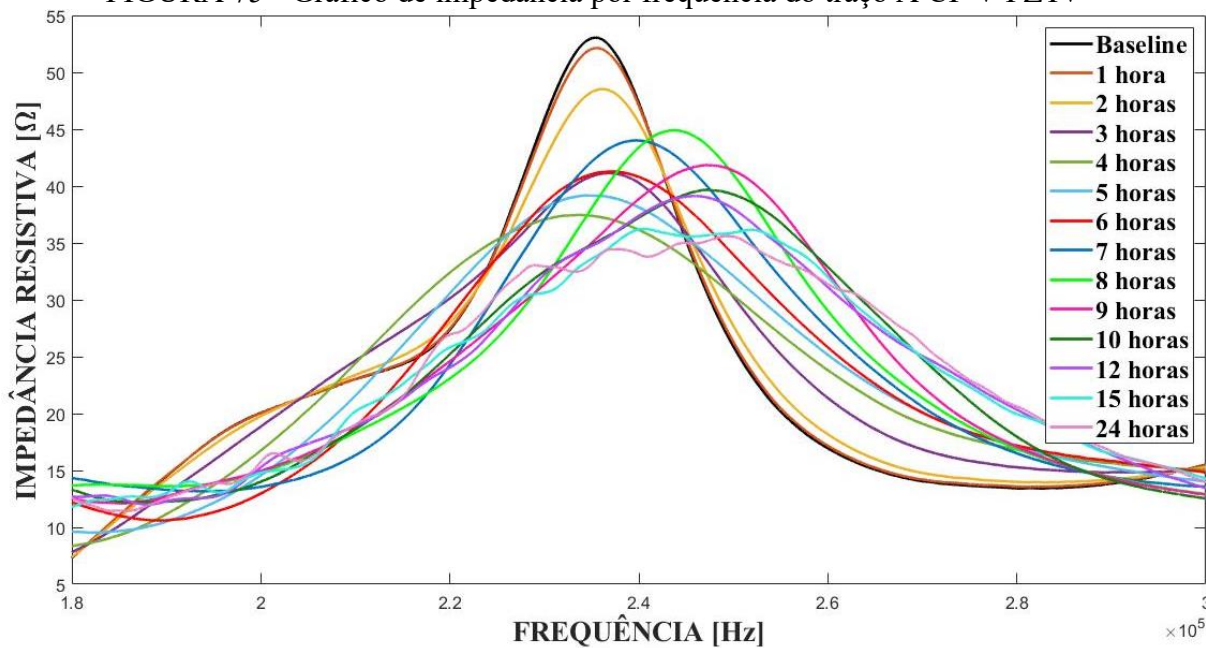


Fonte: A autora (2021).

Esse comportamento nem sempre é possível de ser analisado qualitativamente, a FIGURA 75 mostra as curvas das primeiras horas para o traço A CP V da cápsula posicionada na vertical,

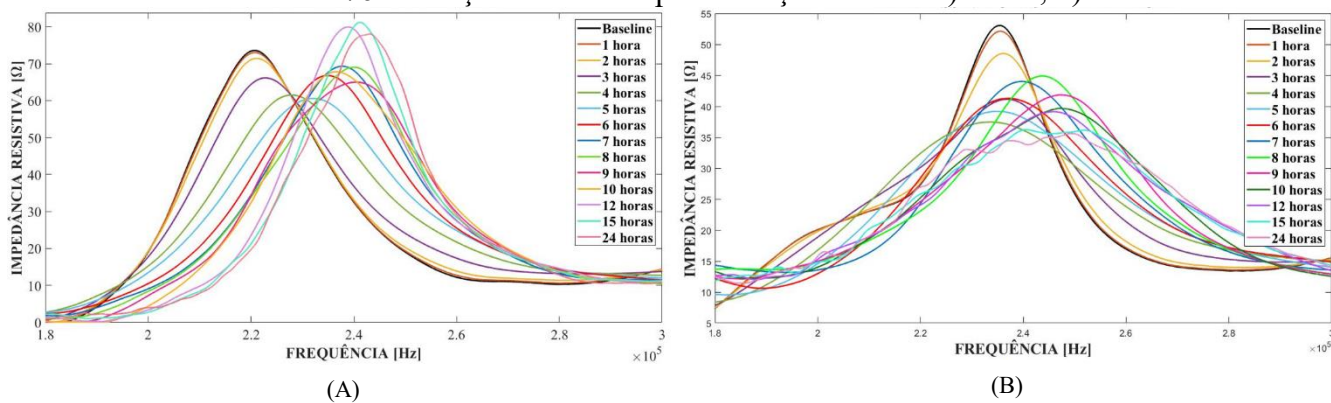
enquanto a FIGURA 76 relaciona as duas situações. O sinal obtido pela PZTv achata e perde o pico com o tempo, não sendo possível obter seus valores para analisar a variação. Nesse caso, a análise somente poderá ser realizada de forma quantitativa com as métricas estatísticas.

FIGURA 75 - Gráfico de impedância por frequência do traço A CP V PZTv



Fonte: A autora (2021).

FIGURA 76 - Relação das curvas para o traço A CP V: a) PZTh; b) PZTv

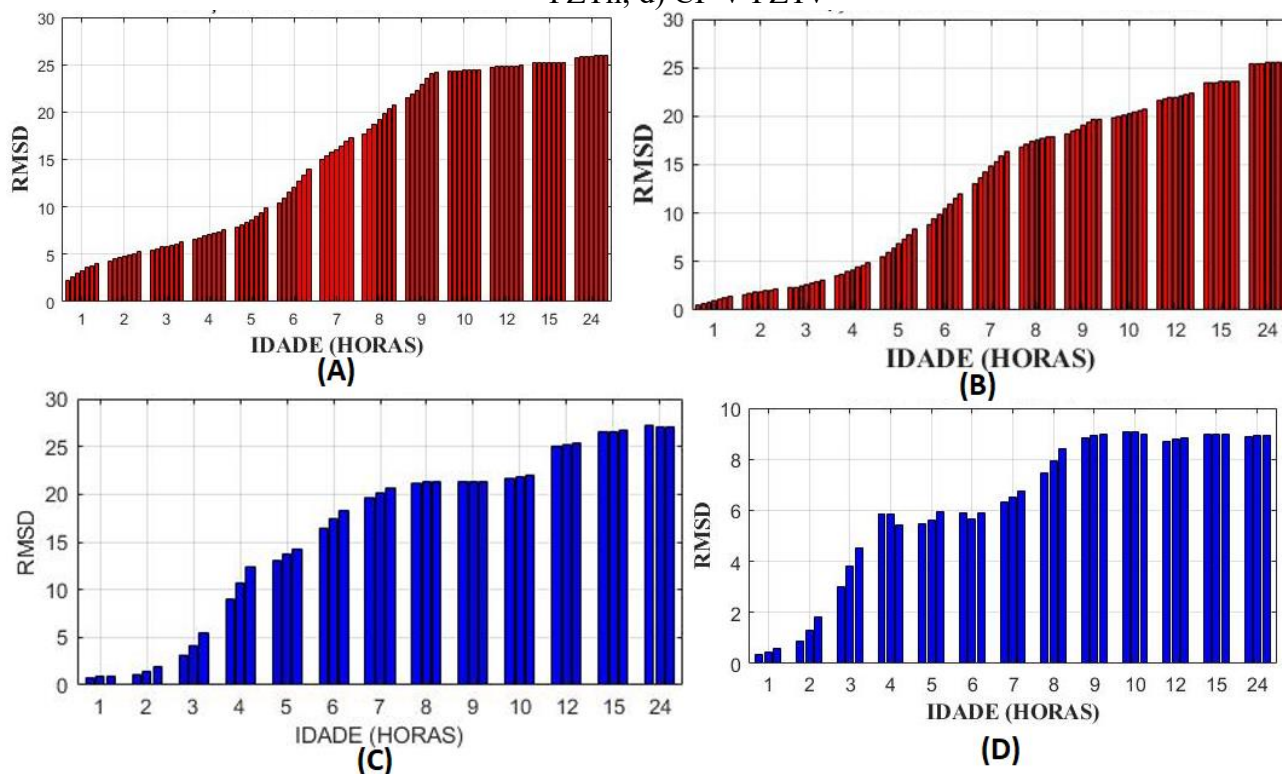


Fonte: A autora (2021).

Dasheng e Hongping (2011), Visalaski, Bhalla e Gupta (2018), Moharana e Bhalla (2019), entre vários outros autores, definiram a métrica RMSD como eficiente para quantificação das primeiras horas, comportando-se com uma tendência crescente. Dessa forma, apenas o RMSD, calculado pela Equação 12, será apresentado, enquanto as outras métricas encontram-se no

Apêndice B. A FIGURA 77 apresenta os índices de RMSD calculados, para todas as cápsulas inteligentes incorporadas no traço A.

FIGURA 77 - RMSD para os concretos do traço A: a) CP III PZTh; b) CP III PZTv; c) CP V PZTh; d) CP V PZTv



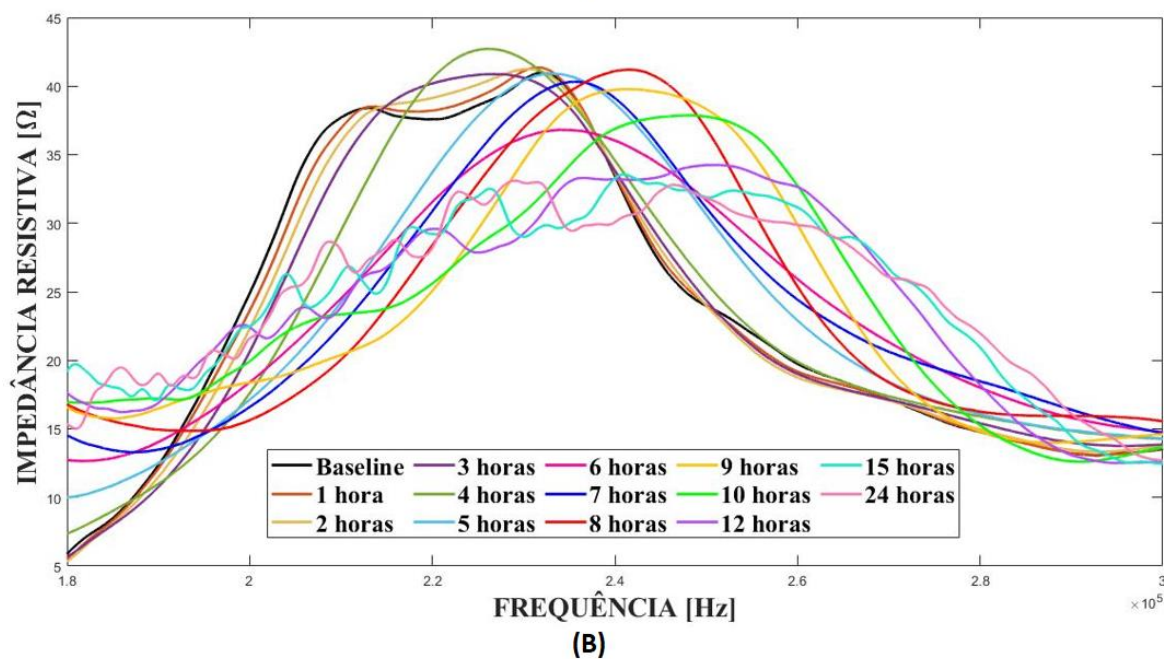
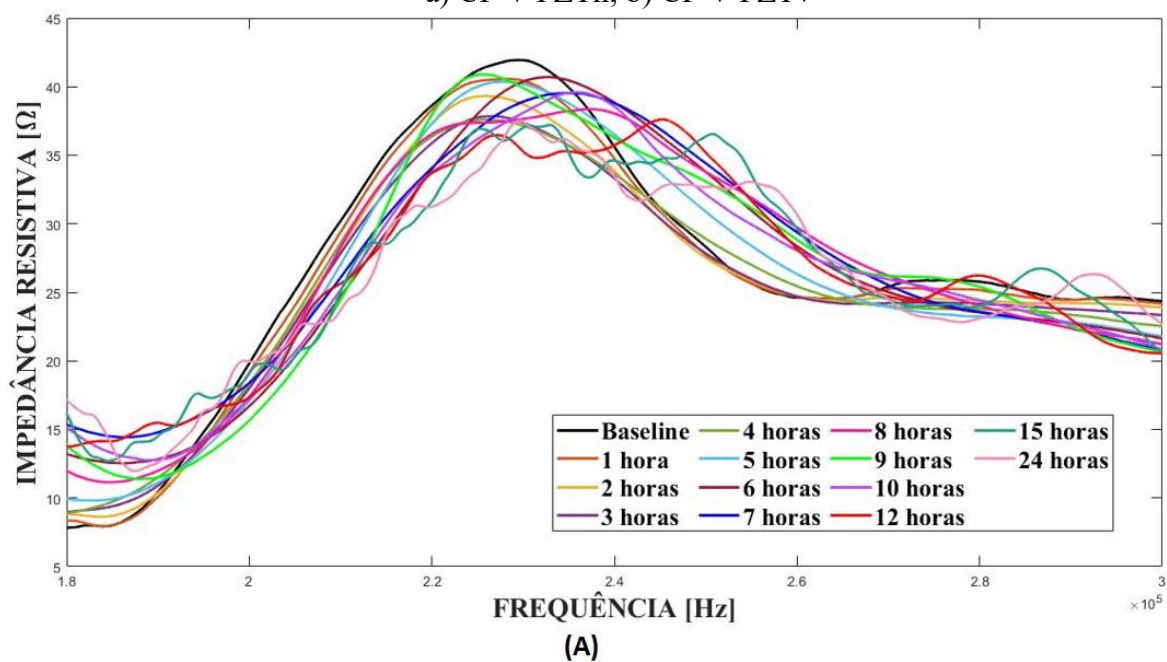
Fonte: A autora (2021).

Conforme a literatura, a métrica RMSD evoluiu de forma crescente nas primeiras 24 horas. Comparando o comportamento da curva do CP III PZTh (FIGURA 77 - A) e CP V PZTh (FIGURA 77 - C) percebe-se que os valores da métrica evoluem mais rápido para o CP V, com 4 horas, por exemplo, já ultrapassou 10% para o CP V enquanto que, para o CP III, a média está pouco acima de 5%. Considerando que a métrica descreve o desvio da impedância em relação ao valor da baseline, quanto maior a variação da métrica, maior será a impedância resistiva e significa que as propriedades mecânicas, como o ganho de rigidez/ resistência, do concreto com o CP V estão se desenvolvendo mais rápido. Dessa forma, o gráfico do CP III tem curva mais suave, enquanto que a curva do CP V é mais íngreme.

Com relação ao CP V PZTv (FIGURA 77 - D) que não foi possível avaliar qualitativamente, seus valores de RMSD também estão discrepantes dos demais, enquanto a tendência da curva continua crescente como esperado. Esse último concreto será analisado nas idades superiores.

A FIGURA 78 ilustra as curvas para o traço B com cimento Portland CP V. Percebe-se que para traços com alta resistência à compressão aos 28 dias, a faixa de frequência utilizada no ensaio impossibilita realizar uma análise qualitativa, uma vez que os picos das curvas se tornam muito próximos e irregulares.

FIGURA 78 - Curvas de impedância por frequência nas primeiras horas para o traço B:
a) CP V PZTh; b) CP V PZTv



Fonte: A autora (2021).

Kim *et al.* (2013) realizou o monitoramento de um concreto de alta resistência, em que a faixa adotada por ele foi de 35 kHz a 40 kHz, justificando que essa faixa foi selecionada para promover uma observação mais clara da mudança nas frequências ressonantes nos sinais de impedância. Com base na FIGURA 78 e nos estudos de Kim *et al.* (2013) pode-se afirmar que a faixa de monitoramento de concretos de resistência normal e alta resistência deve ser diferente, sendo mais baixa a desses últimos.

A FIGURA 79 ilustra as curvas para o traço B com cimento Portland CP III. Os picos iniciais se tornaram irregulares por causa de uma desconfiguração automática que ocorreu no equipamento, identificado e concertado a partir de 6 horas. Na cápsula horizontal (FIGURA 79) mesmo irregular, o sinal ainda faz o formato da curva, entretanto no vertical (FIGURA 80) o impacto foi maior.

Observando as curvas a partir de 6 horas, percebe-se que estão bastante próximas e, assim como para o traço B CP V, o ideal seria uma mudança de faixa de frequência por se tratar também de um concreto de alta resistência. Para o traço B com os dois tipos diferentes de cimento, a análise possível será a quantitativa pelas métricas estatísticas.

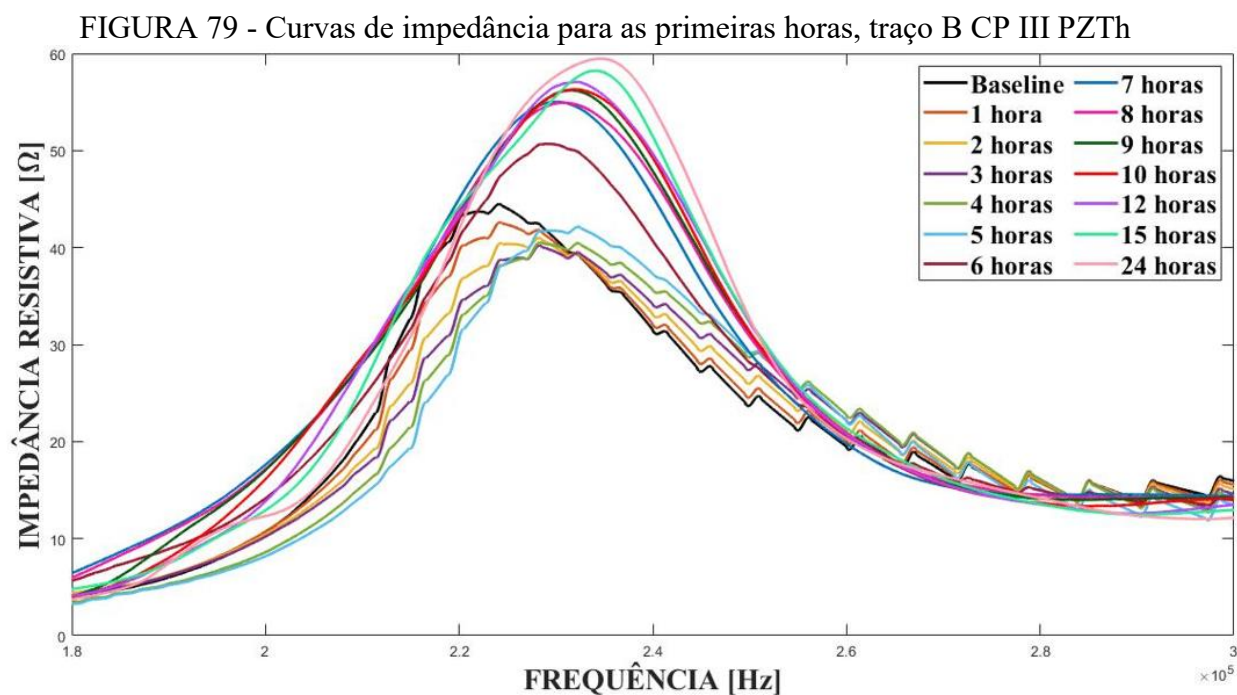
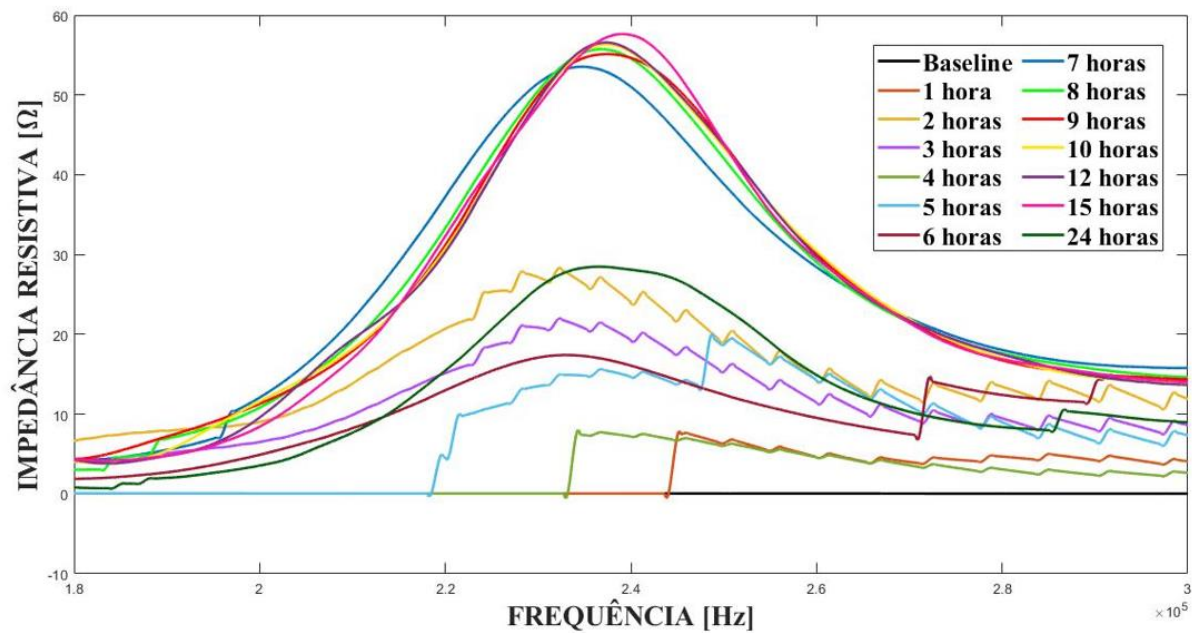


FIGURA 80 - Curvas de impedância para as primeiras horas, traço B CP III PZTv

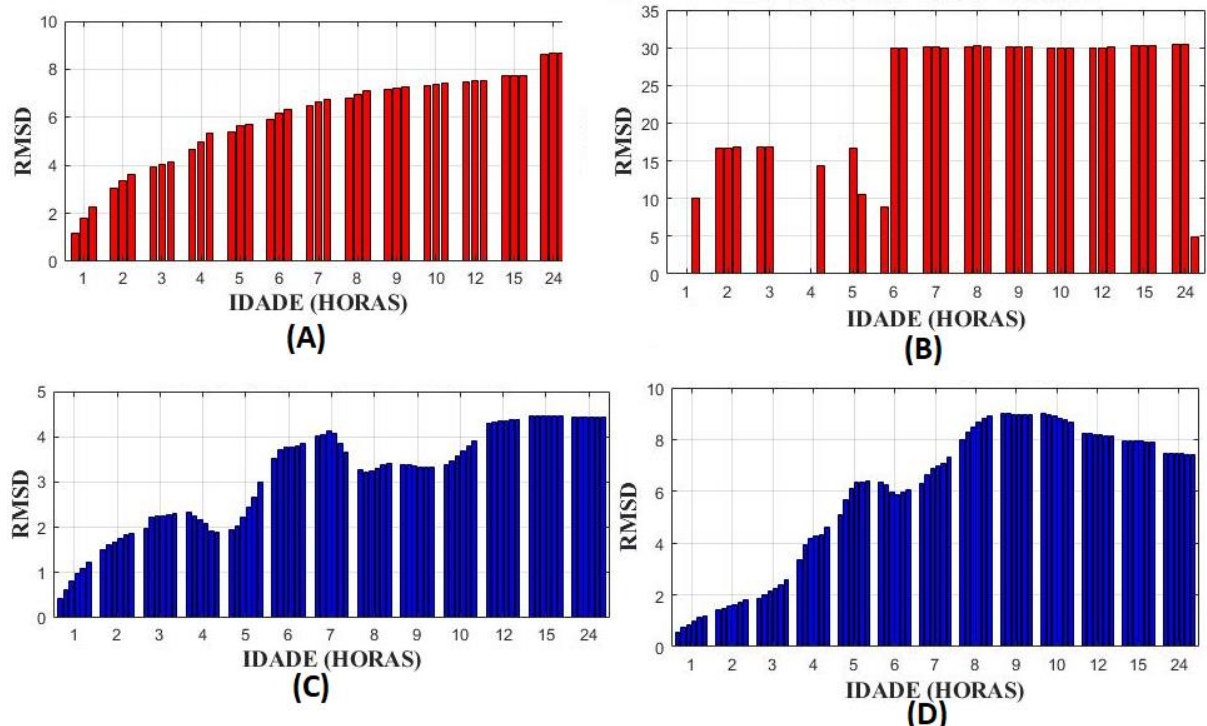


Fonte: A autora (2021).

A FIGURA 81 apresenta os gráficos de RMSD para os concretos do traço B. Na FIGURA 81 A, percebe-se que a desconfiguração do equipamento impactou apenas no traçado da curva, mas não nos valores numéricos sendo possível o cálculo da métrica de dano. Entretanto, para a cápsula da vertical (FIGURA 81 B) o problema se mantém e reflete em um sinal irregular tanto do RMSD, quanto das demais métricas que se encontram no Apêndice B. Logo, outra interferência foi responsável pelo dano no sinal.

A cápsula inteligente posicionada na vertical está mais sujeita ao desacoplamento eletromecânico que na horizontal, pelo fato de que o adensamento com a haste metálica precisa ser cuidadoso próximo ao PZT, devido a sua fragilidade, podendo não gerar o devido adensamento. Por outro lado, o posicionamento horizontal é mais efetivo, para o PZT incorporado, pois o próprio peso do concreto já se distribui melhor na superfície da cápsula, além de somar-se ao fato de estar na parte inferior do corpo de prova intensificando esse efeito. Tawie e Lee (2010b) testaram corpos de prova com adensamentos ineficientes, os sinais dos mesmos não se desenvolveram bem e apresentaram comportamento fora do padrão. Logo, essa é uma das possibilidades que pode ter ocorrido com o PZTv do traço B CP V, alertando sobre o desafio de se posicionar o PZT incorporado na vertical.

FIGURA 81 - Curvas RMSD dos concretos traço B: a) CP III PZTh; b) CP III PZTv; c) CP V PZTh; d) CP V PZTv

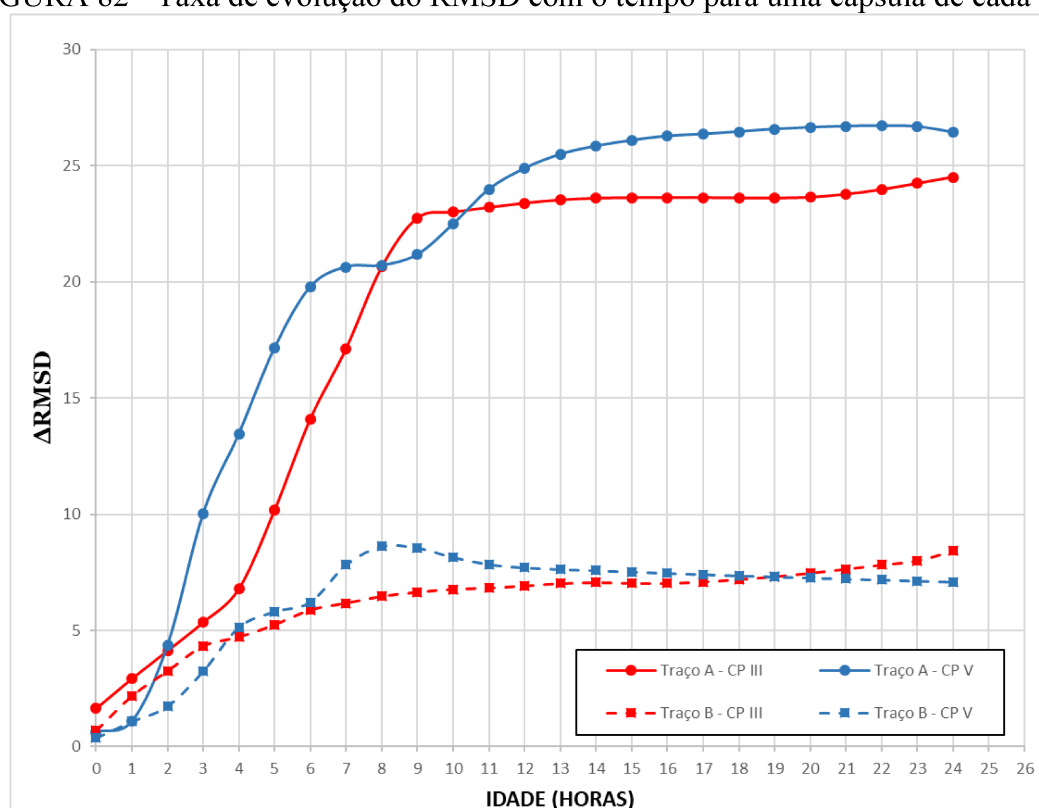


Fonte: A autora (2021).

A FIGURA 81 A e FIGURA 81 D apresentaram as curvas crescentes mais coerentes e ordem de grandeza que permite compará-las. Inicialmente o traço B CP III apresentou RMSD mais alto, entretanto sua taxa de crescimento é menor e gradual, sendo ultrapassado pelo RMSD do traço B CP V, por exemplo às 8 horas o CP III possui RMSD pouco maior que 7% enquanto que o do CPV está próximo de 10%. A alta taxa de crescimento do CP V o leva a desenvolver resistências iniciais maiores.

Para comparar os traços com relações a/c diferentes, foi criado um gráfico de variação do RMSD por tempo, para uma amostra representante de cada traço e cimento. No gráfico, apresentado na FIGURA 82, percebe-se que o valor da variação do RMSD dos traços A com a/c de 0,49 são maiores, que os dos traços B a/c de 0,33. Quando o RMSD evolui em grande taxa, significa que os parâmetros mecânicos estão se alterando intensamente, a parte íngreme das curvas provavelmente coincide com o período de aceleração, onde produtos de hidratação estão sendo formados em quantidade significativa. Enquanto o trecho final horizontal, com taxa reduzida, indica uma desaceleração devido ao provável enrijecimento atingido.

FIGURA 82 - Taxa de evolução do RMSD com o tempo para uma cápsula de cada traço



Fonte: A autora (2021).

Segundo Zhang *et al.* (2020), a pasta cimento com a/c mais alta apresenta menor taxa de crescimento da resistência mecânica. Dessa forma, o amortecimento se altera a menor taxa, gerando maiores variações nos valores de impedância e, conseqüentemente, maior variação de RMSD para o traço A. Assim, as curvas da FIGURA 82 do traço B, com a/c menor e maior consumo de cimento (TABELA 18), chegam mais rapidamente ao trecho horizontal, podendo indicar um endurecimento mais rápido, logo uma variação intensa do amortecimento nas primeiras horas, resultando em menores variações de RMSD. Comparando as 3 primeiras horas de concretos de mesmo traço com cimentos diferentes, percebe-se que as curvas do concreto com CP III possuem maior variação de RMSD, uma vez que seu enrijecimento é mais lento que do CP V, que altera consideravelmente o amortecimento já nas 3 primeiras horas. A análise da curva de variação do RMSD serve para relacionar quantitativamente traços distintos, quando a avaliação qualitativa não se aplica a todos.

5.2 CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

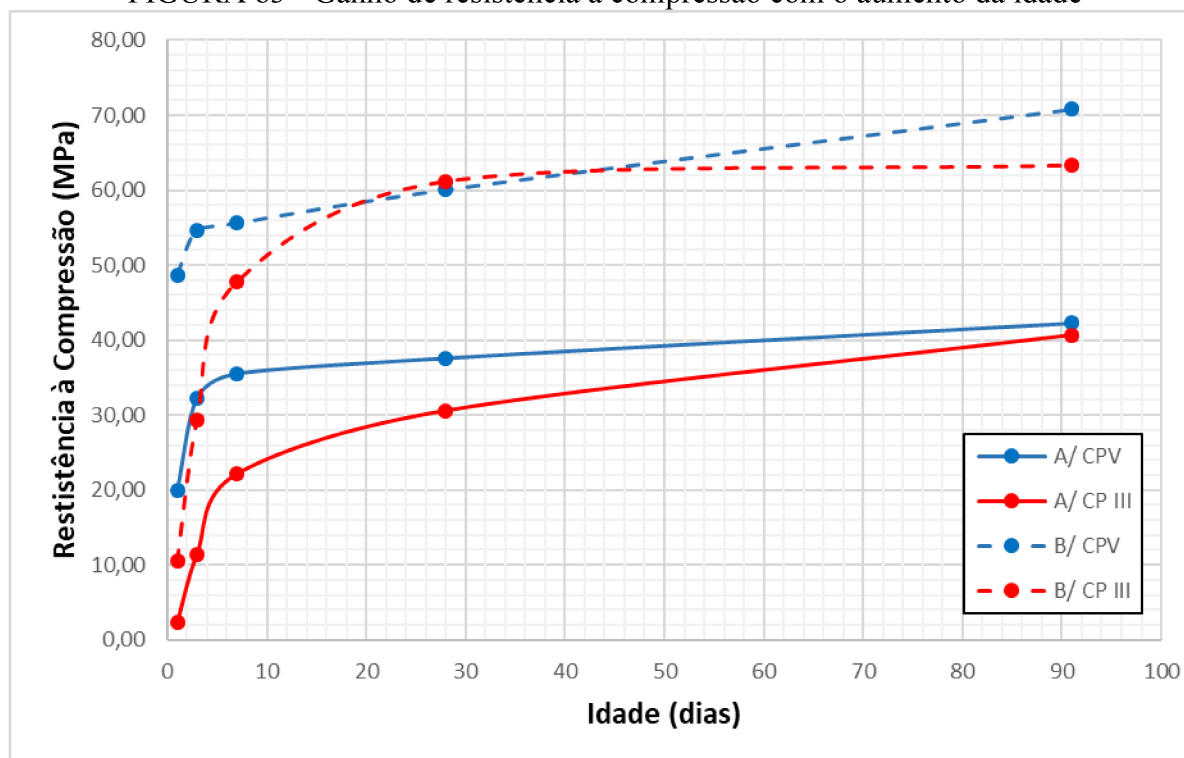
Os valores de resistência mecânica à compressão média do concreto para cada traço nas idades de ensaio são apresentados na TABELA 19, enquanto sua evolução pode ser analisada pelo gráfico da FIGURA 83. Os resultados de resistência com os desvios padrão se encontram no Apêndice C.

TABELA 19 - Valores médios de resistência à compressão para todos os traços

Resistência à compressão média (MPa)				
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
Traço A com cimento CP V				
19,90	32,29	35,56	37,62	42,29
Traço A com cimento CP III				
2,30	11,46	22,14	30,57	40,63
Traço B com cimento CP V				
48,72	54,63	55,58	60,03	70,79
Traço B com cimento CP III				
10,54	29,42	47,75	61,14	63,30

Fonte: A autora (2021).

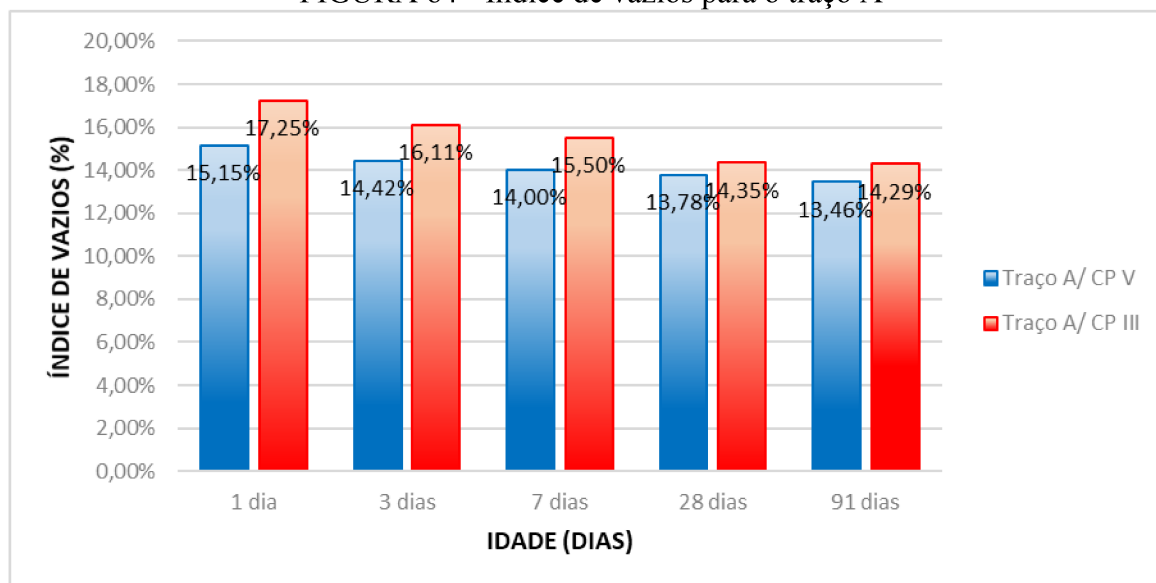
FIGURA 83 - Ganho de resistência à compressão com o aumento da idade



Fonte: A autora (2021).

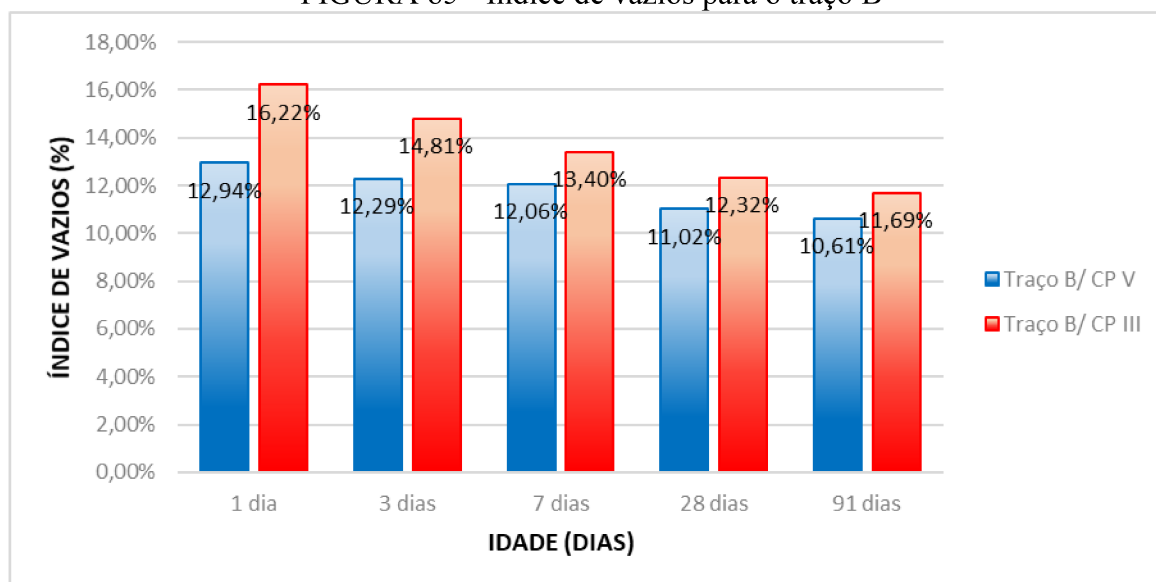
Para melhor análise da evolução da resistência, a FIGURA 84 e a FIGURA 85 apresentam o decréscimo de vazios com a idade, para os traços A e B, respectivamente. Os ensaios foram realizados com corpos de prova pequenos que apresentaram resultados coerentes. Os valores de índice de vazios obtidos para 28 dias para os corpos de prova 100x200 mm tiveram diferença desprezível em relação aos de 50x100 mm, validando-os.

FIGURA 84 - Índice de vazios para o traço A



Fonte: A autora (2021).

FIGURA 85 - Índice de vazios para o traço B

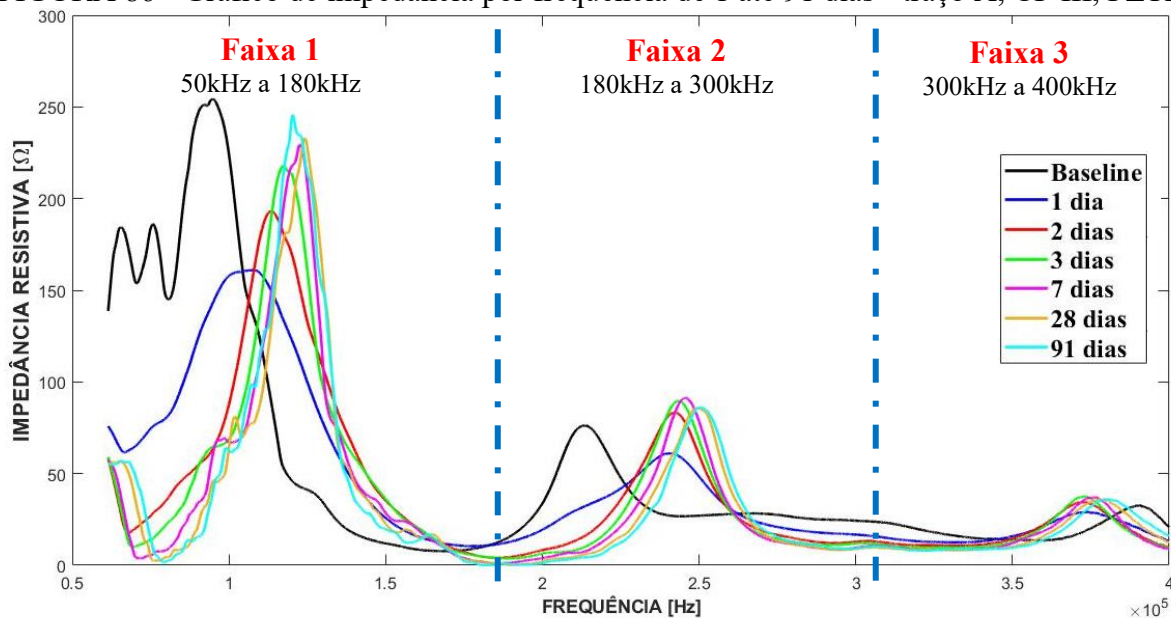


Fonte: A autora (2021).

O desenvolvimento da resistência inicial do cimento CP V está intimamente ligado com a rápida formação de produtos hidratados do cimento e, conseqüentemente, redução dos vazios. Logo, os traços com CP V apresentaram menores valores de índice de vazios, nas primeiras idades, quando comparados com aqueles produzidos com o CP III, cuja reação e formação de hidratos é mais lenta.

Para correlacionar com os resultados dos ensaios mecânicos, sinais de impedância foram coletados em 1, 2, 3, 7, 28 e 91 dias de idade. A FIGURA 86 apresenta a evolução do sinal de impedância para toda a faixa de frequência (50 kHz a 400 kHz), para o traço A com cimento CP III e cápsula inteligente horizontal (PZTh).

FIGURA 86 - Gráfico de impedância por frequência de 1 até 91 dias - traço A, CP III, PZTh



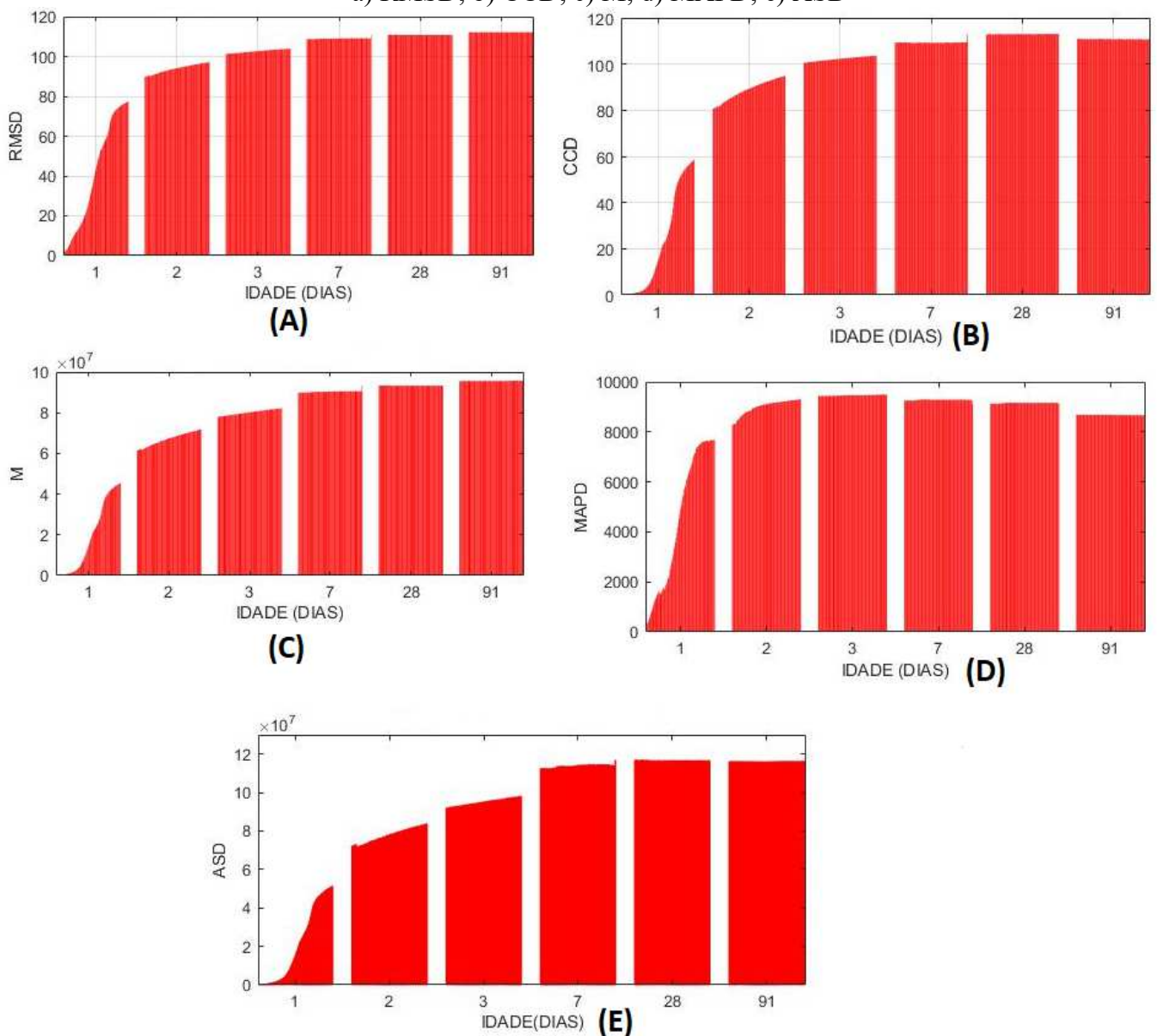
Fonte: A autora (2021).

Para as idades superiores, continuam a existir três picos, além disso o pico um já pode ser utilizado, segundo LIM *et al.* (2021). É notório que existe uma diferença no comportamento dos picos das curvas entre as diferentes faixas de frequência. Para analisar as curvas que melhor representam o ganho de resistência do concreto, o gráfico foi dividido em três trechos de faixas de frequência: 1) de 50kHz a 180kHz; 2) de 180kHz a 300kHz; 3) 300kHz a 400kHz, conforme FIGURA 86. Essas faixas foram escolhidas por abrangerem bem todas as curvas dos diferentes traços.

Para quantificar a impedância e torná-la possível de comparação com a resistência mecânica, foram calculadas as métricas (RMSD, MAPD, M, CCD e ASD) para cada faixa de frequência, em cada uma das cápsulas. Para exemplificar, a FIGURA 87, FIGURA 88 e FIGURA 89 apresentam as métricas para o traço A CP III PZTh, correspondentes às curvas da FIGURA 86. Os gráficos das métricas dos demais traços encontram-se no Apêndice D.

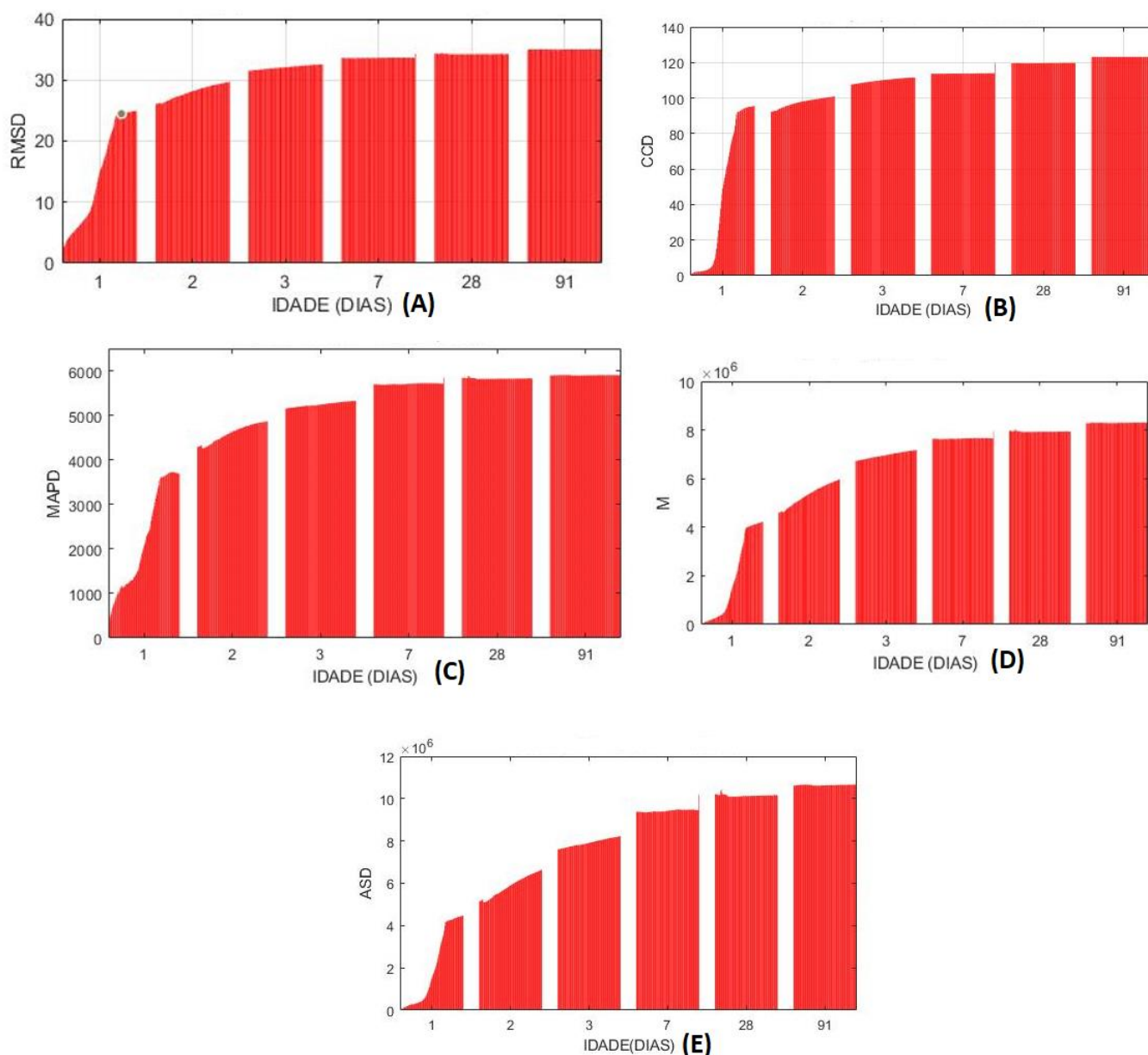
FIGURA 87 - Métricas estatísticas para a faixa 1 de frequência - Traço A, CP III, PZTh:

a) RMSD; b) CCD; c) M; d) MAPD; e) ASD



Fonte: A autora (2021).

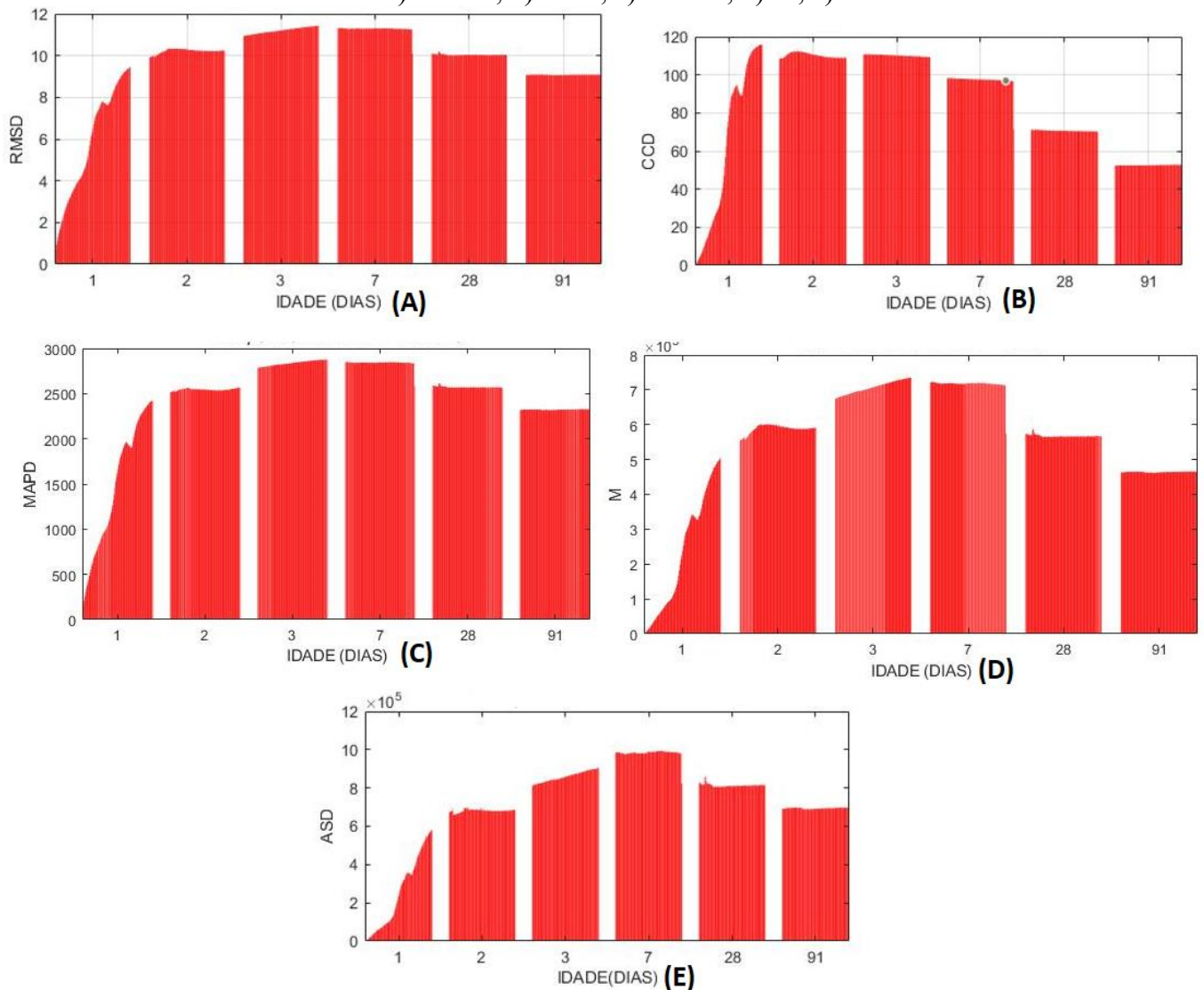
FIGURA 88 - Métricas estatísticas para a faixa 2 de frequência - Traço A, CP III, PZTh:
a) RMSD; b) CCD; c) MAPD; d) M; e) ASD



Fonte: A autora (2021).

Dansheng e Honping (2011) relataram que as curvas de RMSD e MAPD aumentam acentuadamente até 7 dias, depois seu acréscimo continua lentamente, informação também confirmada por outros autores. Na FIGURA 87 e na FIGURA 88 praticamente todas as métricas estatísticas possuem esse comportamento, o que é um primeiro indício que as faixas de frequência 1 e 2 são melhores para análise do que a faixa 3, cujas curvas na FIGURA 89 não seguem esse padrão.

FIGURA 89 - Métricas estatísticas para a faixa 3 de frequência - Traço A, CP III, PZTh:
a) RMSD; b) CCD; c) MAPD; d) M; e) ASD

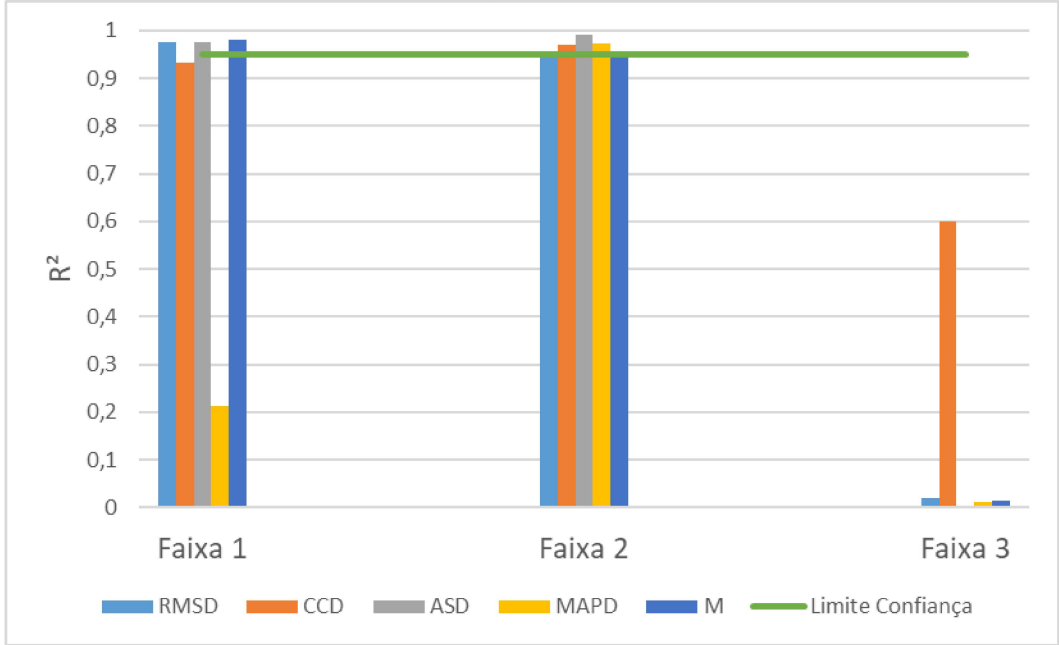


Fonte: A autora (2021).

Após geradas as curvas e extraídos os valores das métricas, pelo Matlab, foi traçado um gráfico da resistência mecânica média (TABELA 19) em função dos valores médios das métricas, para cada idade (1, 3, 7, 28 e 91 dias) e gerada uma linha de tendência exponencial, conforme recomendado por Dansheng e Honping (2011). A faixa que apresentar mais métricas com coeficiente de correlação (R^2) acima de 0,95, será adotada. É importante ressaltar que não necessariamente todas as métricas precisam estar nesse índice de confiança, cada faixa pode ter a métrica que melhor se adequa para o material. As FIGURA 90, FIGURA 91, FIGURA 92, FIGURA 93, FIGURA 94, FIGURA 95, FIGURA 96 e FIGURA 97 mostram os valores de R^2

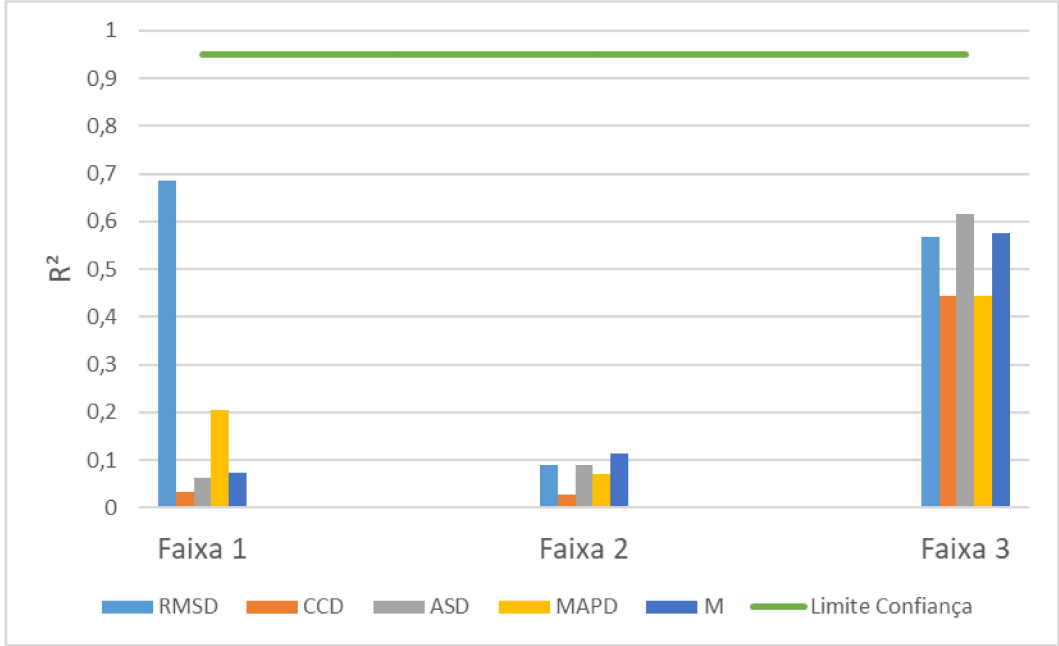
das métricas em cada faixa para os diferentes traços, os gráficos gerados para as correlações se encontram no Apêndice E.

FIGURA 90 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço A, CP III, PZTh



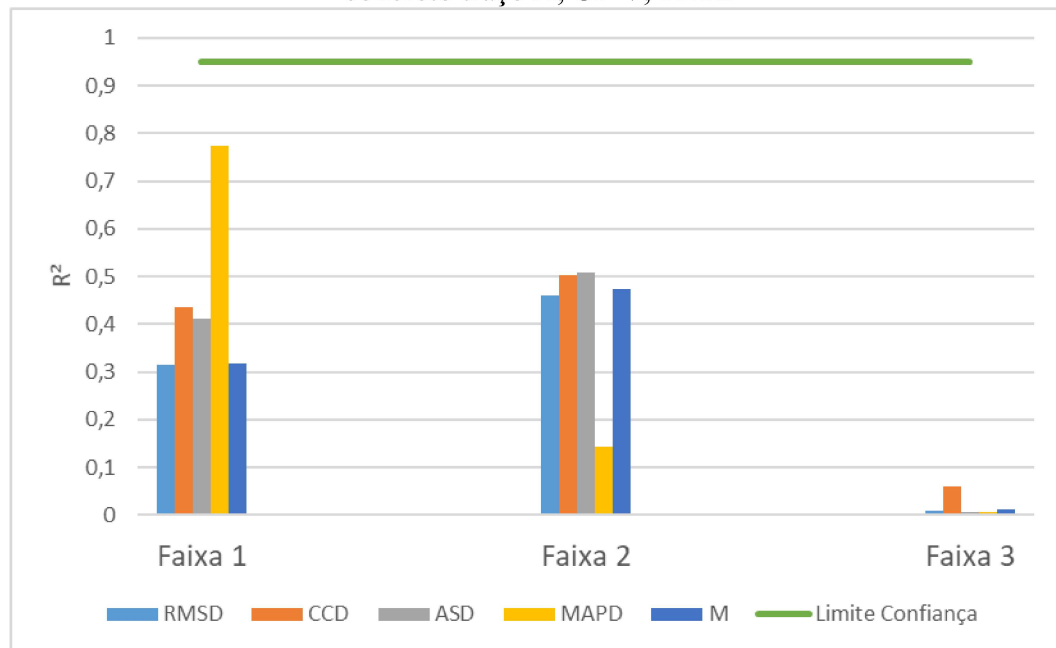
Fonte: A autora (2021).

FIGURA 91 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço A, CP III, PZTv



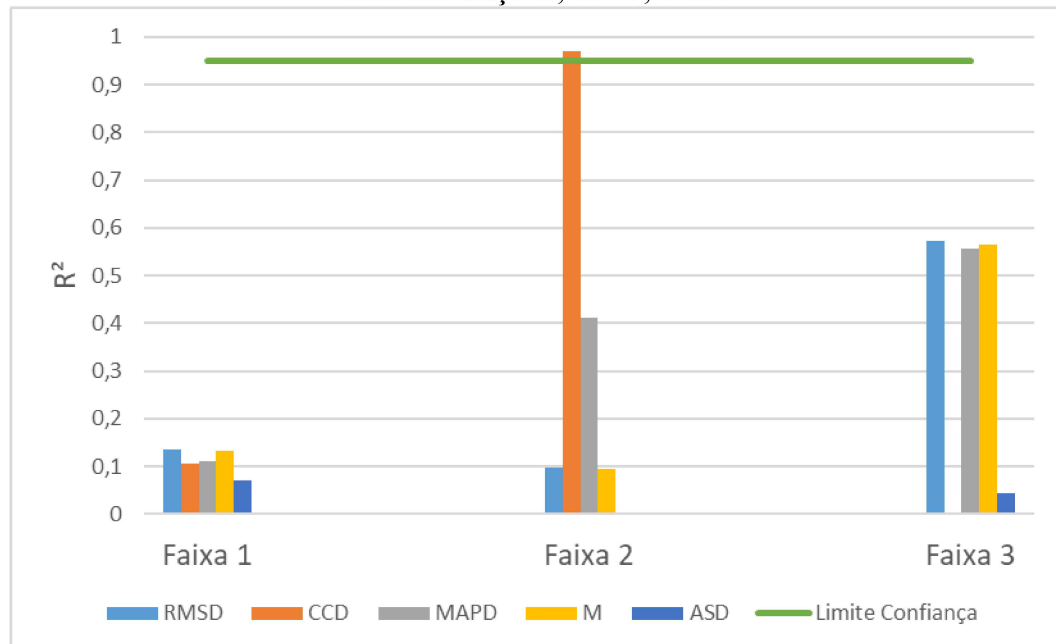
Fonte: A autora (2021).

FIGURA 92 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço A, CP V, PZTh



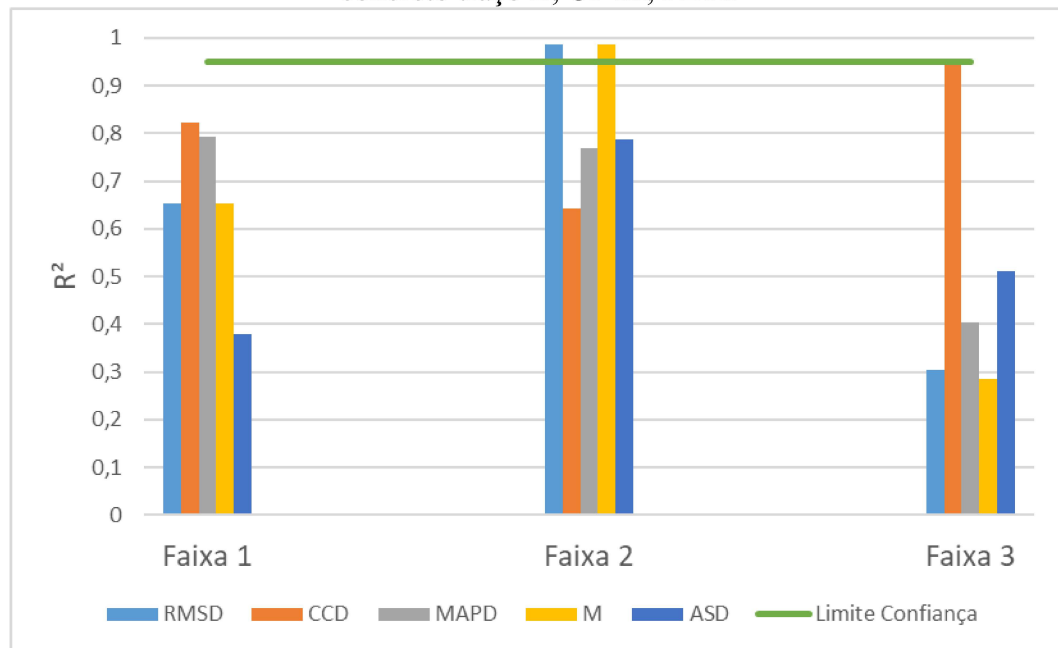
Fonte: A autora (2021).

FIGURA 93 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço A, CP V, PZTv



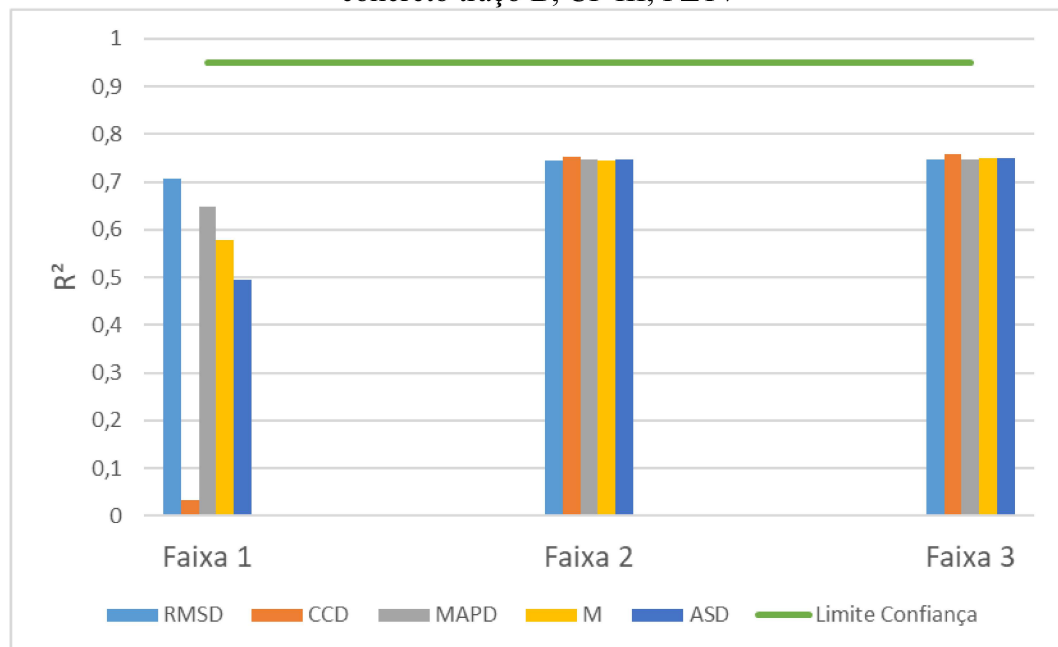
Fonte: A autora (2021).

FIGURA 94 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço B, CP III, PZTh



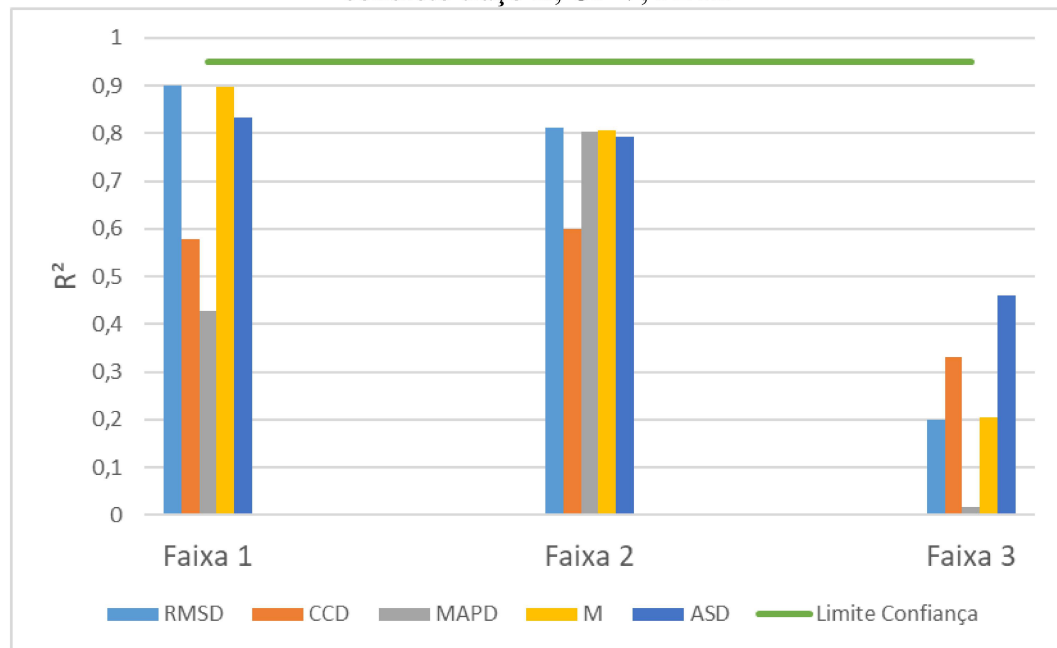
Fonte: A autora (2021).

FIGURA 95 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço B, CP III, PZTv



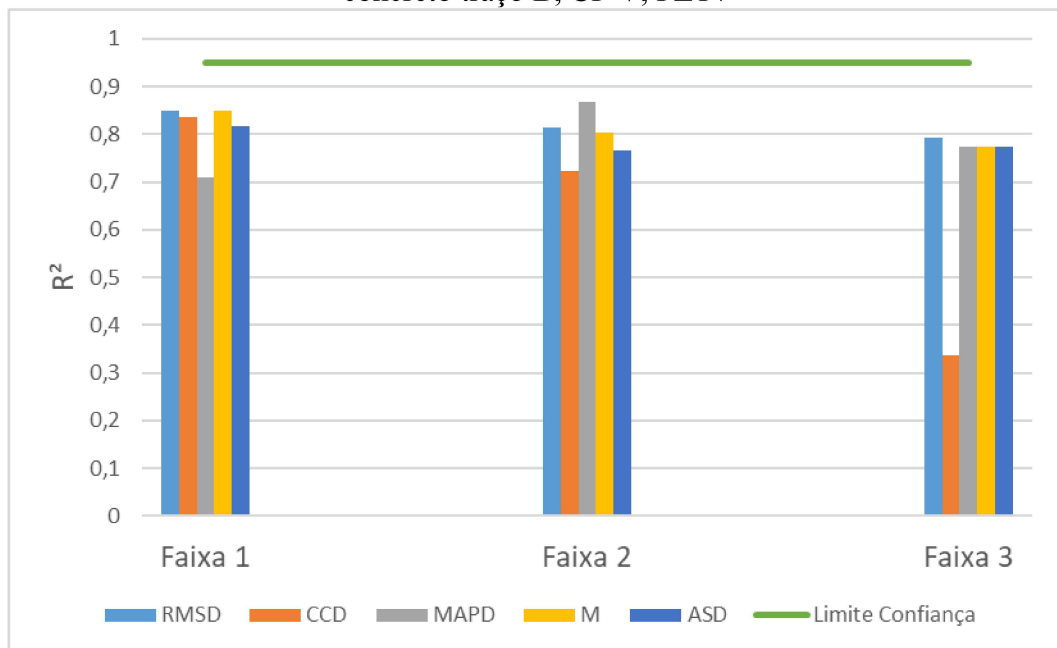
Fonte: A autora (2021).

FIGURA 96 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço B, CP V, PZTh



Fonte: A autora (2021).

FIGURA 97 - Confiabilidade da correlação da resistência à compressão pelas métricas concreto traço B, CP V, PZTv



Fonte: A autora (2021).

A faixa 2 apresentou um total de sete métricas com confiabilidade acima de 95%, a faixa 1, três métricas e a faixa 3, apenas uma. Logo, a faixa 2 mostrou-se a que melhor representa o comportamento do concreto nessa propriedade. Entretanto, uma observação se faz necessária, pelos gráficos notou-se que o ponto discrepante das curvas era o de 91 dias, pois várias métricas nessa idade descenderam, ao invés de crescer como era esperado. Assim, uma nova análise foi realizada retirando os valores de referentes a 91 dias. Segue na TABELA 20 os novos coeficientes de correlação para 1, 3, 7 e 28 dias.

TABELA 20 - Valores do coeficiente de correlação (R^2) excluindo os dados de 91 dias

Valores de R^2		RMSD	CCD	ASD	MAPD	M
Traço A CP III PZTh	Faixa 1	0,98	0,97	0,99	0,6	0,98
	Faixa 2	0,94	0,96	0,99	0,98	0,95
	Faixa 3	0,13	0,53	0,51	0,2	0,2
Traço A CP III PZTv	Faixa 1	0,25	0,27	0,25	0,47	0,26
	Faixa 2	0,02	0	0,03	0	0
	Faixa 3	0,45	0,31	0,63	0,3	0,46
Traço A CP V PZTh	Faixa 1	0,78	0,32	0,24	0,78	0,08
	Faixa 2	0,32	0,36	0,38	0,62	0,39
	Faixa 3	0,7261	0,07	0,68	0,47	0,74
Traço A CP V PZTv	Faixa 1	0,48	0,48	0,37	0,36	0,46
	Faixa 2	0,96	0,96	0,99	0,3	0,97
	Faixa 3	0,82	0,78	0,23	0,84	0,82
Traço B CP III PZTh	Faixa 1	0,63	0,98	0,6	0,92	0,63
	Faixa 2	0,99	0,93	0,84	0,76	0,99
	Faixa 3	0,35	0,96	0,52	0,31	0,34
Traço B CP III PZTv	Faixa 1	0,67	0,36	0,51	0,65	0,54
	Faixa 2	0,69	0,71	0,69	0,69	0,69
	Faixa 3	0,69	0,7	0,7	0,69	0,69
Traço B CP V PZTh	Faixa 1	0,93	0,05	0,48	0,96	0,93
	Faixa 2	0,75	0,88	0,39	0,84	0,77
	Faixa 3	0,14	0,2	0,64	0,03	0,16
Traço B CP V PZTv	Faixa 1	0,55	0,57	0,45	0,32	0,55
	Faixa 2	0,99	0,98	0,98	0,97	0,98
	Faixa 3	0,42	0,01	0,42	0,38	0,41

Fonte: A autora (2021).

A faixa 1 passou a ter seis métricas com 95% de confiança, a faixa 2, quinze métricas e, a faixa 3, se manteve com uma. Percebe-se que, no geral, as métricas se associaram melhor aos valores de resistência à compressão, sem os dados de 91 dias. A faixa 2 de frequência continua sendo

a mais confiável, sendo então adotada para análise. Considerando que os valores do ensaio mecânico à compressão estão conforme o esperado para os traços e cimentos, algumas questões foram levantadas para tentar explicar o acontecido e serão abordadas a seguir.

A primeira hipótese, contestada nas primeiras horas, seria a necessidade de um ajuste da faixa de frequência para um melhor resultado nos traços B, de alta resistência.

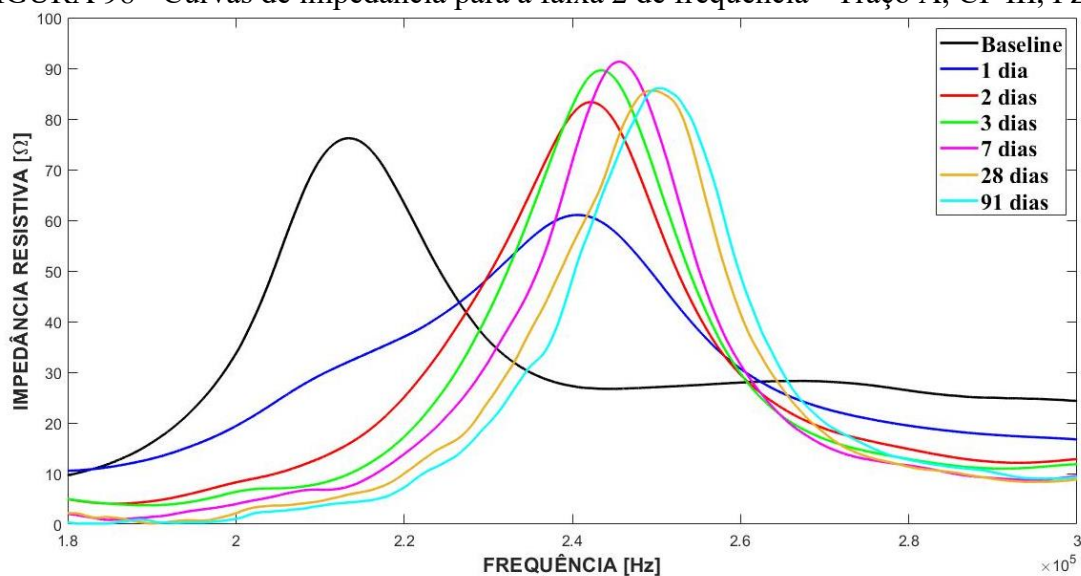
A segunda questão leva em conta a falta de estudos que mantenham o monitoramento para tempos superiores a 28 dias. Essa idade foi a máxima encontrada em todos os trabalhos de referência, visto que se trata da idade cuja resistência é especificada em projeto. No entanto, caso a intenção seja de um monitoramento contínuo da estrutura durante sua vida útil, para garantir que, após o ganho desejado de resistência, a integridade da estrutura se mantenha, é importante expandir os tempos de estudos para além de 28 dias.

Por fim, talvez o decréscimo das curvas das métricas, nas idades mais altas, tenha ocorrido devido a uma perda gradual de funcionalidade do PZT. Se realmente o for, as métricas tenderão a ir descendo e poderia ser confundido com uma mudança nas propriedades físicas do material, levando a uma interpretação errada do usuário. Assim, é necessário que mais ensaios sobre a durabilidade dos PZTs, sejam realizados.

Continuando a análise, a FIGURA 98 apresenta a faixa 2 isolada para o traço A CP III PZTh. Qualitativamente, percebe-se que as curvas de 1 até 91 dias se movem para a direita, indicando o ganho de resistência mecânica, conforme curva da FIGURA 83. Percebe-se também que os picos sobem de forma acentuada até 7 dias, esse movimento indica um aumento de massa, na medida que os vazios vão sendo preenchidos por produtos de hidratação, isto é, o índice de vazios diminui mais significativamente até 7 dias, decréscimo mostrado na FIGURA 84.

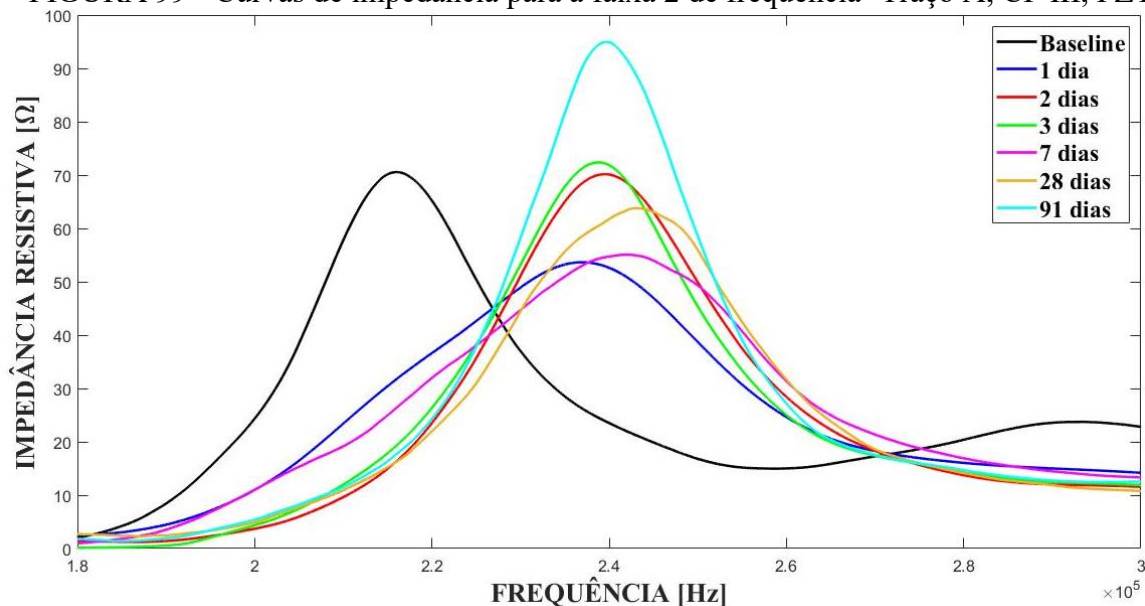
A FIGURA 99 corresponde ao PZT do mesmo traço A e cimento CP III, entretanto posicionado na vertical. O qual havia sido eficiente no monitoramento das primeiras horas, não conseguiu uma correção confiável, nem eliminando os dados de 91 dias, com a resistência à compressão. Isso não significa que não seja válido, simplesmente que não traz uma boa estimativa de resistência para idades acima de um dia. Analisando as curvas, percebe-se que de fato não há um padrão de movimento como do seu correspondente horizontal.

FIGURA 98 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço A, CP III, PZTh



Fonte: A autora (2021).

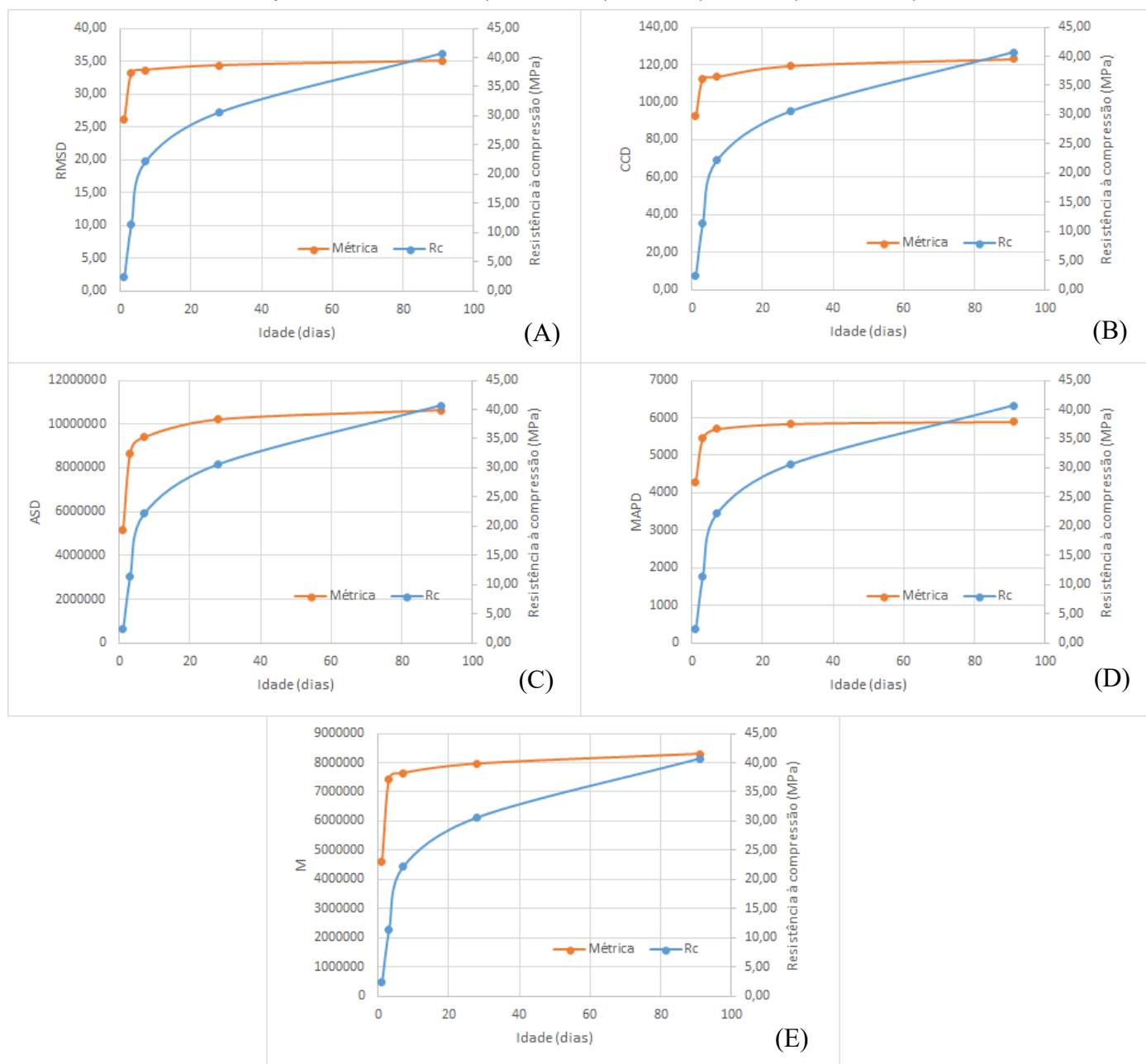
FIGURA 99 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço A, CP III, PZTv



Fonte: A autora (2021).

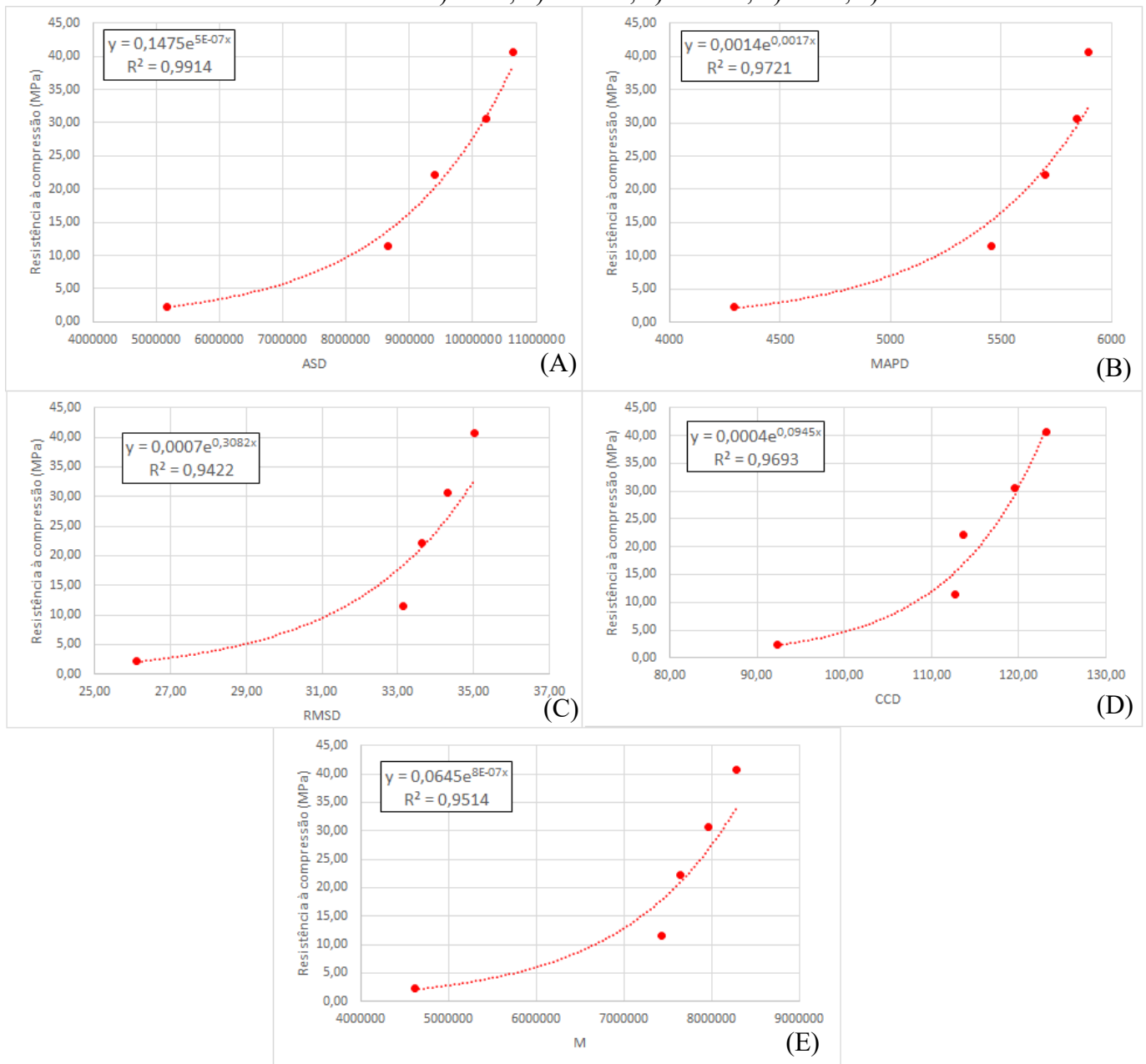
Os gráficos das métricas estatísticas foram apresentados e avaliados anteriormente. Percebe-se que existe uma tendência semelhante de crescimento entre as métricas e a resistência à compressão, conforme gráficos da FIGURA 100, resultando em uma correlação confiável conforme gráficos da FIGURA 101, nas quais são apresentadas também as equações que permitem a estimativa da resistência à compressão, a partir dos valores das métricas, para o traço A com cimento Portland CP III.

FIGURA 100 - Tendência de crescimento das métricas em relação à resistência à compressão traço A CP III PZTh: a) RMSD; b) CCD; c) ASD; d) MAPD; e) M



Fonte: A autora (2021).

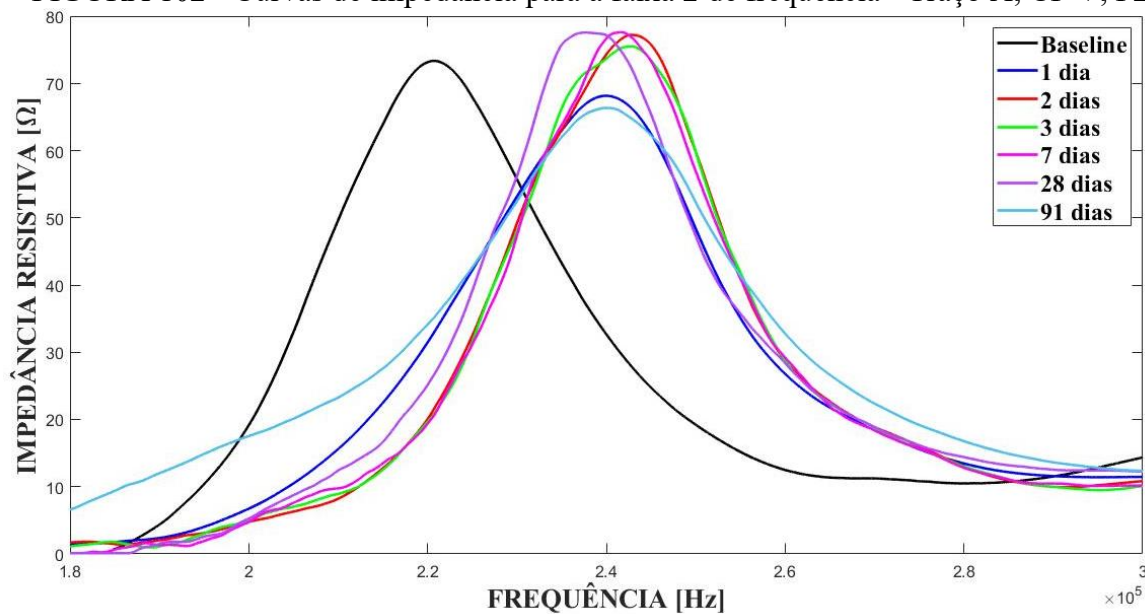
FIGURA 101 - Correlação confiável da resistência à compressão pelas métricas - traço A, CP III e PZTh: a) ASD; b) MAPD; c) RMSD; d) CCD; e) M



Fonte: A autora (2021).

A FIGURA 102 apresenta as curvas de impedância para o traço A com CPV. É possível perceber o movimento para direita indicando ganho de resistência, subida e definição dos picos, indicando ganhando de massa, até 7 dias, sendo coerente com a FIGURA 84 que evidencia que até nessa idade, há o decréscimo mais significativo do índice de vazios. Entretanto, o comportamento das curvas aos 28 e 91 dias não são coerentes, sendo esse um dos traços que teve sua confiabilidade aumentada com a exclusão dos dados de 91 dias.

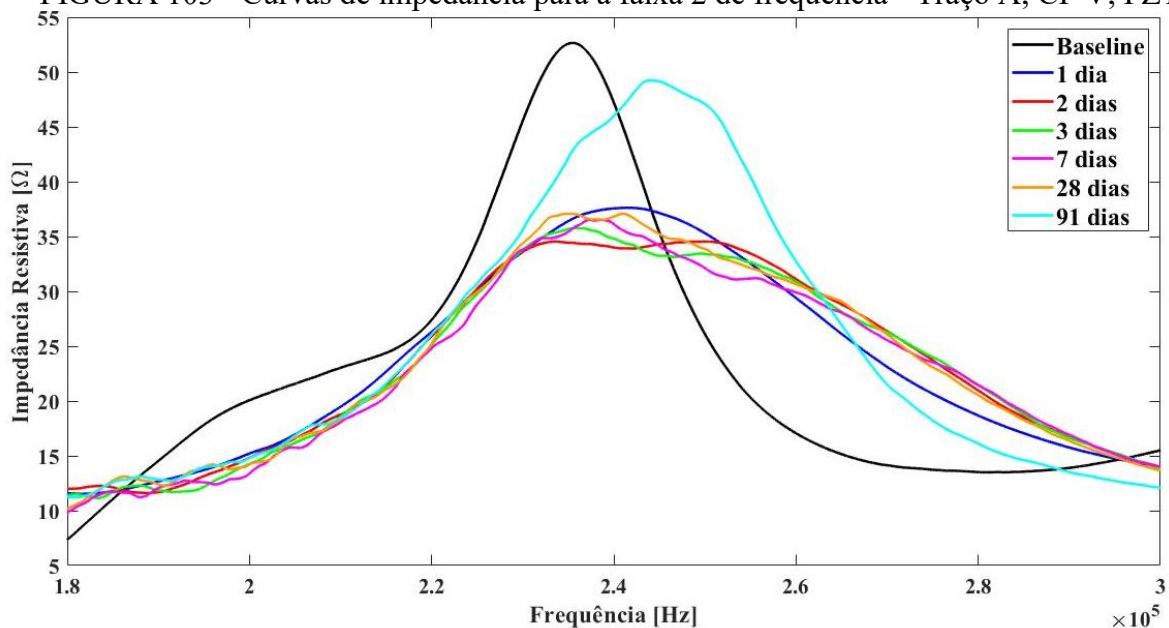
FIGURA 102 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço A, CP V, PZTh



Fonte: A autora (2021).

O PZTv do traço A com CP V, assim como ocorreu nas primeiras horas, não apresentou curvas que possibilitassem a análise qualitativa (FIGURA 103). Entretanto, com a eliminação dos dados de 91 dias, as métricas tiveram uma correlação confiável com a resistência à compressão, exceto o MAPD, conforme TABELA 20. De fato, a imagem deixa claro a discrepância do ponto de 91 dias.

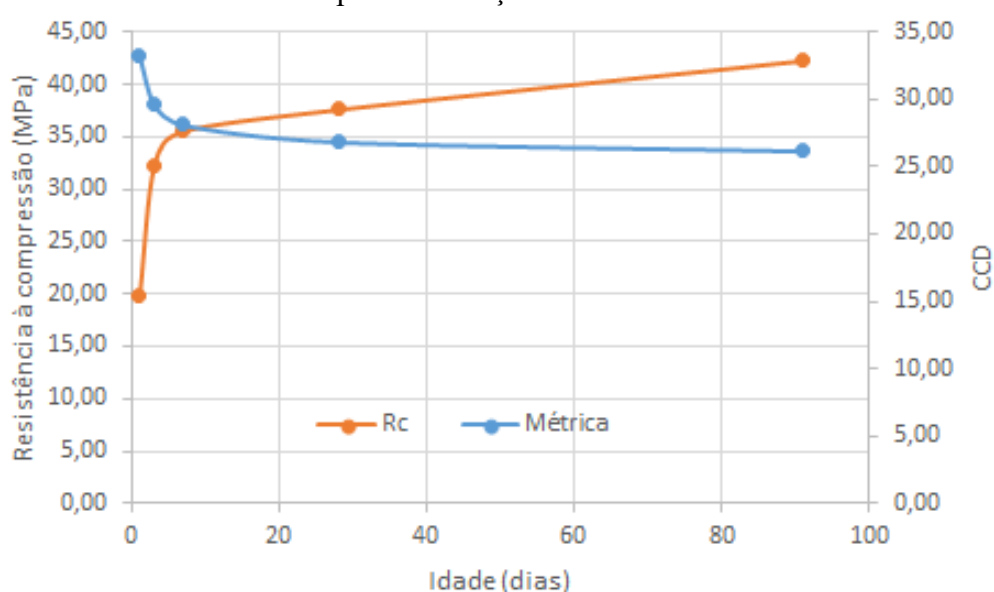
FIGURA 103 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço A, CP V, PZTv



Fonte: A autora (2021).

Assim, mesmo que a FIGURA 93 mostre que o CCD tem correlação confiável com a resistência mecânica à compressão, a métrica não apresenta um comportamento semelhante à evolução dessa propriedade, conforme evidencia o gráfico da FIGURA 104. Uma vez que esse comportamento não foi satisfatório desde as primeiras horas, pode-se concluir que a confiabilidade apresentada não é verdadeira, por tanto o gráfico e fórmula não serão aqui abordados. Por se tratar de um PZT posicionado na vertical, pode-se aqui também evidenciar o desafio de utilizá-lo bem incorporado nessa posição.

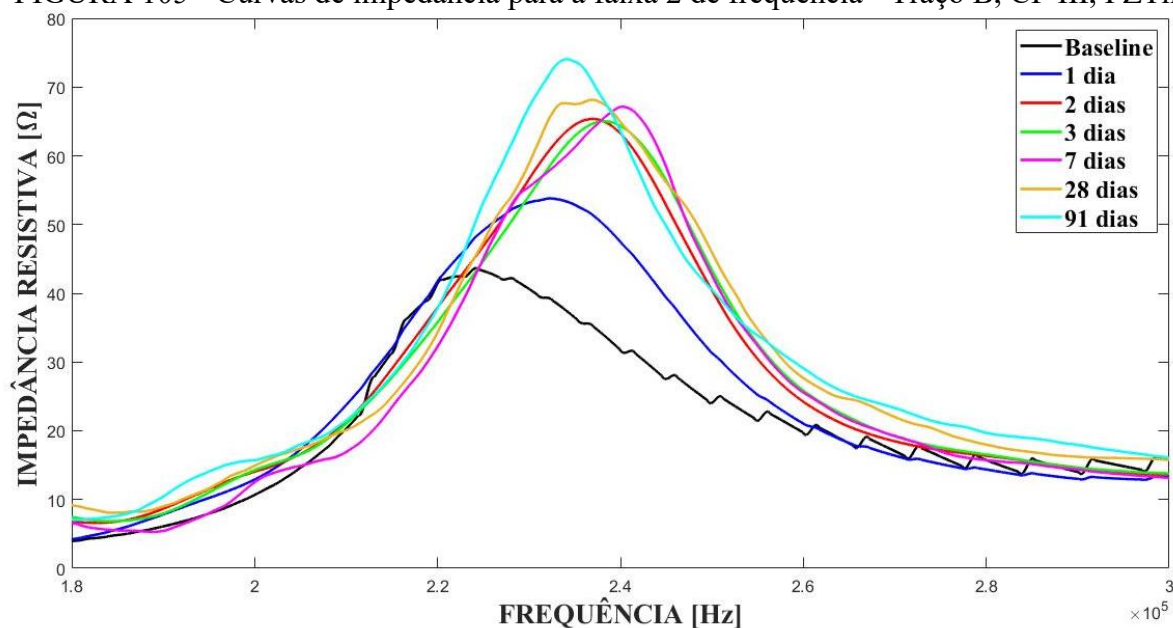
FIGURA 104 - Tendência de crescimento da métrica CCD em relação à resistência à compressão - traço A CP V PZTv



Fonte: A autora (2021).

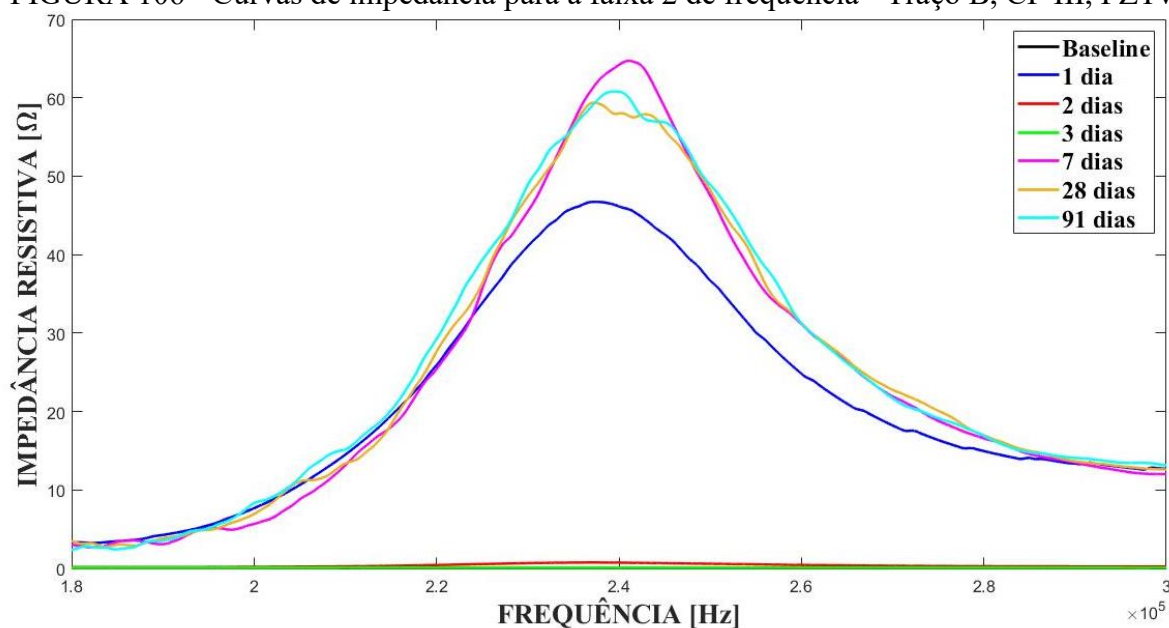
Para o traço B, as situações levantadas para as primeiras horas se repetem, isto é, os picos continuam a não possibilitar uma análise qualitativa. A FIGURA 105 ilustra as curvas do PZTh do traço B com CP III, sendo possível ver uma evolução dos picos, mas ainda sendo necessária a análise quantitativa para melhores avaliações. A FIGURA 106, por sua vez, apresenta as curvas para o PZTv do mesmo traço e cimento. Assim como nas primeiras horas, a cápsula vertical sofreu desacoplamento mecânico não possuindo resultados confiáveis.

FIGURA 105 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço B, CP III, PZTh



Fonte: A autora (2021).

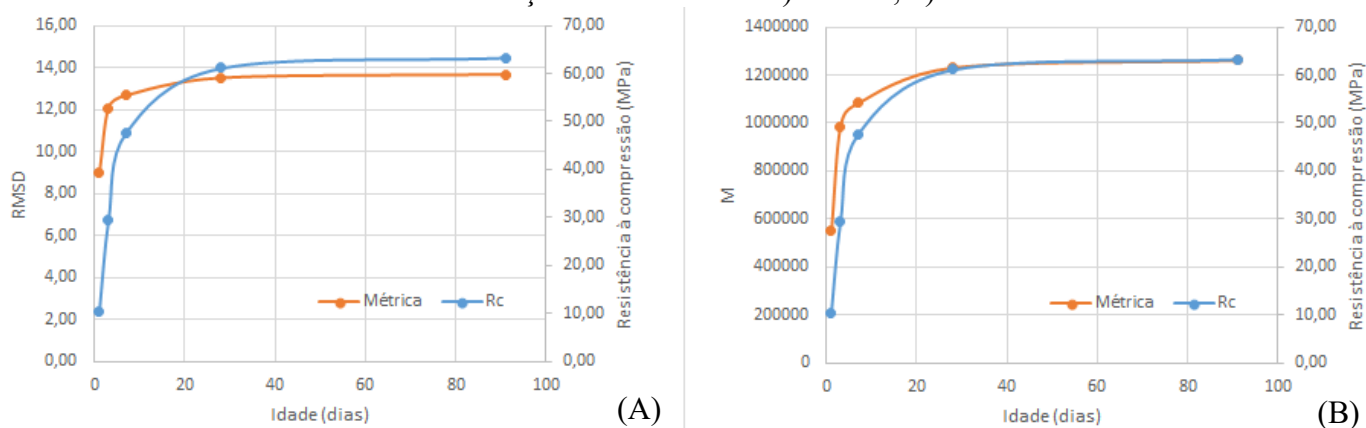
FIGURA 106 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço B, CP III, PZTv



Fonte: A autora (2021).

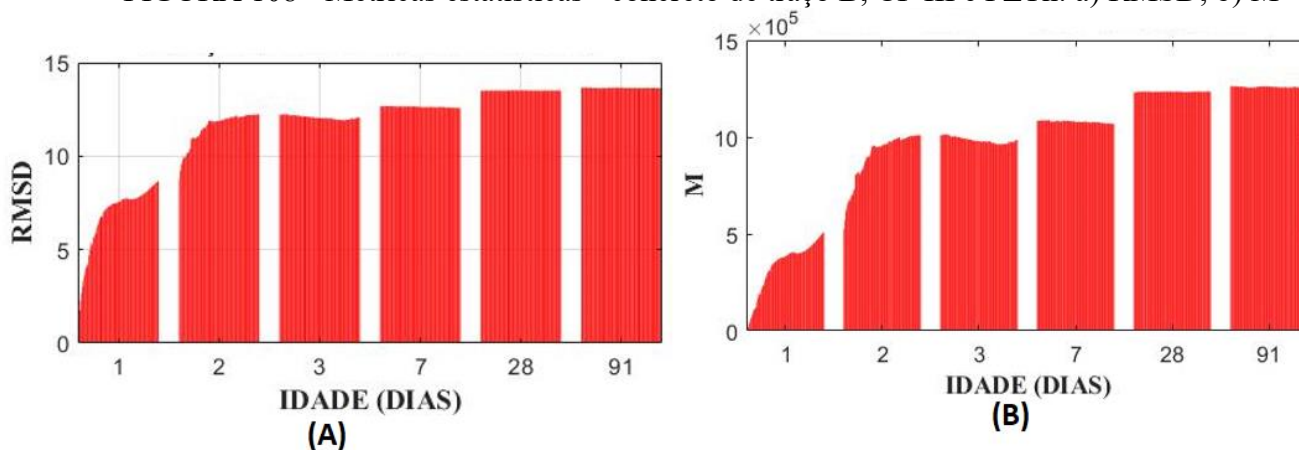
As métricas RMSD e M apresentaram tendência de crescimento semelhante ao de resistência mecânica do concreto até 91 dias (FIGURA 107), acarretando em confiabilidade de representação (FIGURA 94). A FIGURA 108 apresenta o gráfico dessas métricas para a faixa 2 de frequência, sendo perceptível sua evolução crescente com o passar dos dias.

FIGURA 107 - Tendência de crescimento das métricas em relação à resistência à compressão traço B CP III PZTh: a) RMSD; b) M



Fonte: A autora (2021).

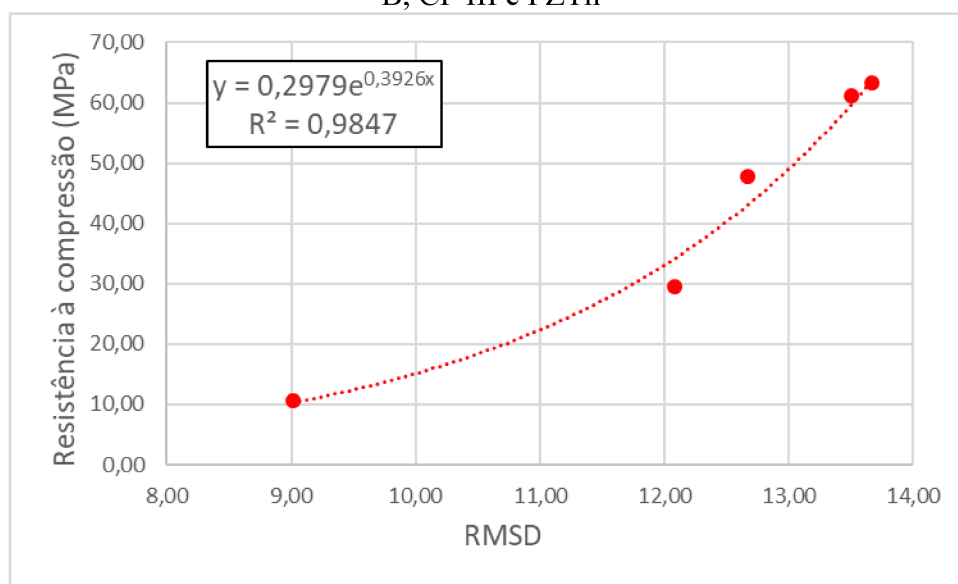
FIGURA 108 - Métricas estatísticas - concreto de traço B, CP III e PZTh: a) RMSD; b) M



Fonte: A autora (2021).

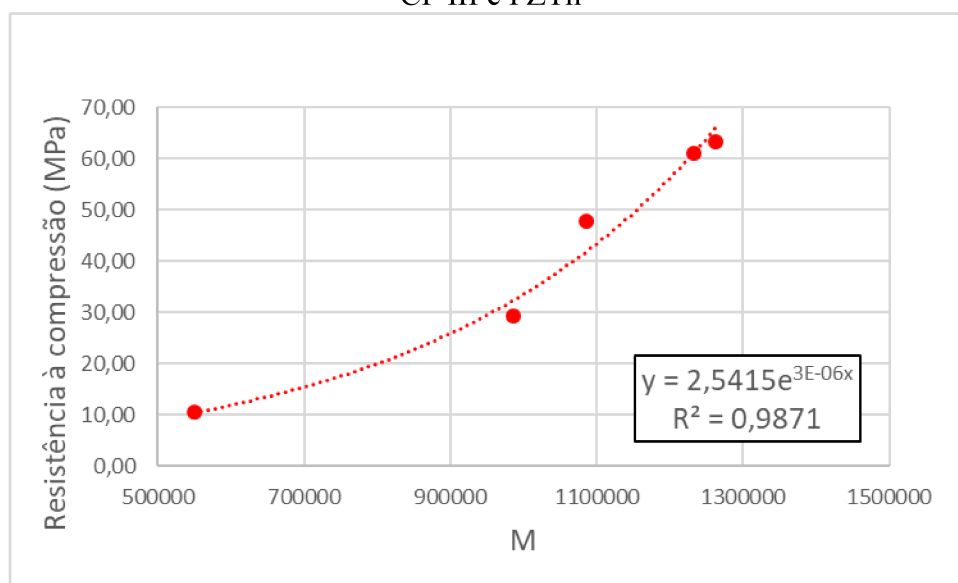
A FIGURA 109 e a FIGURA 110 mostra os gráficos de correlação das métricas RMSD e M com a resistência à compressão do concreto, para o concreto de traço B com CP III, na faixa 2 de frequência.

FIGURA 109 - Correlação confiável da resistência a compressão pela métrica RMSD - traço B, CP III e PZTh



Fonte: A autora (2021).

FIGURA 110 - Correlação confiável da resistência a compressão pela métrica M - traço A, CP III e PZTh

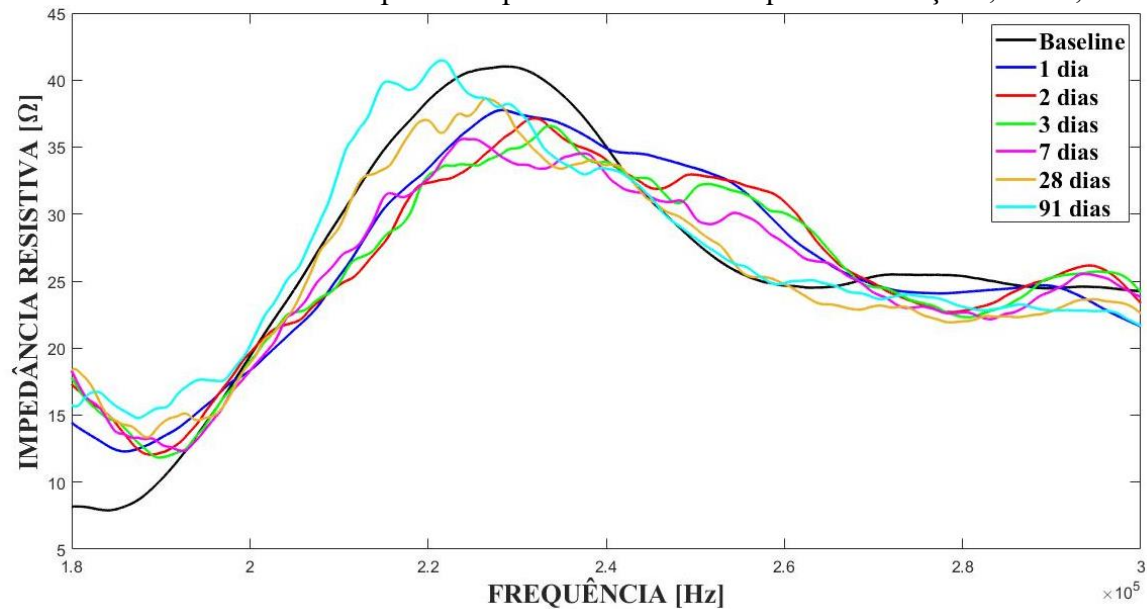


Fonte: A autora (2021).

Por fim, as FIGURA 111 e FIGURA 112 ilustram as curvas de impedância para a faixa 2 de frequência para o concreto de traço B com CP V e cápsulas inteligentes posicionadas na horizontal e vertical, respectivamente. Como já mencionado, as curvas para concretos de alta resistência não permitem boa leitura com as frequências utilizadas no ensaio, sugerindo que,

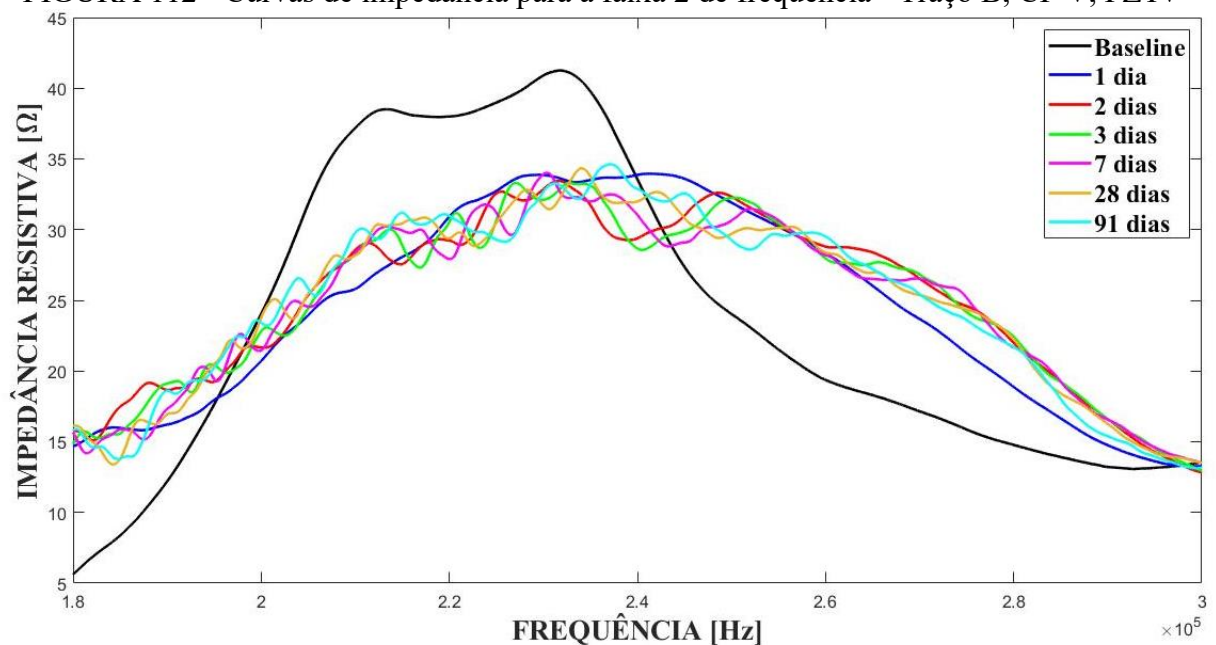
quando realizados ensaios com esse tipo de concreto seja utilizada outra faixa, menor que 50kHz.

FIGURA 111 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço B, CP V, PZTh



Fonte: A autora (2021).

FIGURA 112 - Curvas de impedância para a faixa 2 de frequência - Traço B, CP V, PZTv



Fonte: A autora (2021).

As métricas não apresentaram correlação confiável com a resistência mecânica à compressão do concreto produzido com o cimento Portland de alta resistência inicial, o que não as invalida,

talvez possam ser relacionadas com outra propriedade física do concreto. Uma alternativa seria comparar com ensaios de módulo de elasticidade, uma vez que essa propriedade se relaciona mais diretamente à rigidez do material. Os estudos que começaram a ser desenvolvidos nessa nova linha têm apresentados bons resultados.

Alguns autores, não conseguindo boas correlações com as métricas estatísticas, começaram a desenvolver modelos de elementos finitos, pelo Ansys, para extrair equações que determinem diretamente os parâmetros de massa, rigidez e amortecimentos, sendo chamados de parâmetros equivalentes. Essa modelagem de alta complexidade é realizada com as características físicas e elétricas do PZT e em função do tipo de material monitorado, sendo específico para cada caso. Assim, em estudos futuros, poderiam ser determinados os parâmetros equivalentes dos traços realizados nessa pesquisa para incrementar a análise dos resultados.

6 CONCLUSÃO

A técnica da impedância eletromecânica mostrou-se eficiente para o acompanhamento da evolução da resistência à compressão do concreto com cimento Portland de alta resistência inicial e com escória de alto forno. Para os concretos com resistência à compressão normal, traço A, a análise qualitativa, do primeiro pico do PZT (pico 2) das curvas de impedância resistiva por frequência, mostrou-se efetiva para ambos os tipos de cimento usados. Para esses concretos a curva de incremento de frequência pelo tempo mostrou-se uma ferramenta que se correlaciona aos estágios de hidratação, sendo possível estimar o tempo de início de pega próximo ao de Vicat. Para os concretos de alta resistência, traço B, a faixa de frequência utilizada (50 kHz a 400 kHz) não foi ideal para análise qualitativa, por gerarem curvas com picos não definidos, sugerindo que sejam utilizadas frequências mais baixas para esse tipo de concreto. Entretanto, a métrica estatística RMSD mostrou-se adequada para a avaliação quantitativa dos concretos de traço B, bem como os do traço A, além de ser sensível aos diferentes tipos de cimento, sendo a curva de variação da métrica pelo tempo uma proposta válida para comparação de concretos diferentes.

A técnica EMI permite um bom monitoramento do ganho de resistência mecânica até 7 dias, tanto pela análise qualitativa, das curvas de impedância resistiva por frequência, quanto pela análise das métricas estatísticas. Entretanto, o comportamento em idades mais avançadas como 28 e 91 dias começaram a apresentar comportamentos contrários ao esperado, principalmente aos 91 dias. Para determinar a melhor faixa de frequência para análise, foram traçados gráficos da resistência mecânica à compressão do concreto em função das métricas estatísticas para a idades de ensaio. Entre as três faixas de frequência testadas, a faixa 2 de 180 kHz a 300kHz foi a que apresentou melhor confiabilidade. O monitoramento da evolução da resistência do concreto após um dia, foi mais efetivo para os concretos executados com cimento Portland com escória de alto forno (CP III), sendo as métricas RMSD e M boas representantes em ambos os traços com esse cimento. Isso não significa que o cimento CP V – ARI não possa ser monitorado pela técnica e, sim, que a correlações dos sinais desse tipo de cimento podem ser melhores com outra propriedade mecânica do concreto, uma vez que a evolução de sua resistência tem alta taxa nos primeiros dias o que talvez cause um desencontro com a taxa das métricas.

Eliminando os dados de 91 dias, houve um aumento na confiabilidade das correlações das métricas com os valores de resistência à compressão do concreto. Essa discrepância não foi

percebida nos trabalhos de referência, uma vez que os ensaios sempre finalizam aos 28 dias. Dessa forma, há uma falta de estudos que investiguem o comportamento dos sinais para além dos 28 dias, caso a intenção seja de monitorar continuamente a estrutura durante sua vida útil. Essa necessidade também está associada a durabilidade do PZT que pode não ser condizente com o período de monitoramento desejado, faltando também pesquisas sobre esse tema. Assim, a discrepância dos dados de 91 dias poderia estar associada a uma perda de sinal do PZT, entretanto, pela falta de embasamentos teóricos, isso não pode ser afirmado.

Quanto ao posicionamento das cápsulas inteligentes, os melhores resultados foram obtidos daquelas posicionadas na horizontal. A pouca confiabilidade das cápsulas na direção vertical está relacionada com o acoplamento eletromecânico, uma vez que essa posição é desafiadora para um bom adensamento do concreto, podendo gerar diferenças de acoplamento do material à superfície da cápsula. Assim, um cuidado maior deve ser tomado com o adensamento do concreto ao redor de um PZT posicionado na vertical.

Com base na pesquisa desenvolvida nesta dissertação, têm-se as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Ensaio de módulo de elasticidade para os traços A e B, para verificação se as métricas estatísticas se correlacionariam melhor com essa propriedade do concreto, em vez da resistência à compressão.
- Pesquisa da melhor faixa de frequência para aplicação da técnica EMI para concretos de alta resistência.
- Modelagem de elementos finitos para determinação dos parâmetros equivalentes, que se adequem a concretos com PZT redondo incorporado.
- Análise da durabilidade da cápsula de PZT para monitoramentos acima de 28 dias.
- Comportamento dos sinais aplicados a uma estrutura real, na qual incidam os carregamentos de utilização, para analisar o impacto que os mesmos causariam nos sinais de impedância.
- Verificação da sensibilidade e interferência de fissuras térmicas nos sinais de hidratação das cápsulas inteligentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **ABNT NBR 5739:** Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **ABNT NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **ABNT NBR ISO 6892:** Materiais metálicos — Ensaio de Tração - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **ABNT NBR 8809:** Cimento Portland — Determinação do calor de hidratação a partir do calor de dissolução — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **ABNT NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **ABNT NBR 9833:** Concreto Fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **ABNT NBR 12006:** Cimento - Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

_____. **ABNT NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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

_____. **ABNT NBR 15575-2:** Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013

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

_____. **ABNT NBR 16606:** Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **ABNT NBR 16607:** Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **ABNT NBR 16972:** Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. **ABNT NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

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

_____. **ABNT NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **ABNT NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. **ABNT NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BASF. Master Builders Solutions - Ficha técnica: MasterGlenium 3000. São Paulo, 2019.

Bhalla, S. Soh, C.K. Structural health monitoring by piezo-impedance transducer. I: modelling. **Journal of aerospace engineering**. ASCE, v. 17 (4), p. 154–165, outubro, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2004\)17:4\(154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2004)17:4(154))

CARVALHO, A dos G. **Energia de ativação dos concretos: experimentação e modelagem**. Dissertação (mestrado). Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal Do Rio De Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

CERAMTEC. **Advanced Ceramics in Piezo Applications**. Reino Unido, 2003. Disponível em: <https://www.ceramtec.com/files/mf_brochure_piezoapplications_en_de.pdf>. Acesso em: 09 de julho de 2021.

CEYUAN. **Eletronic instrument**. Disponível em: < <http://m.pt.cyelectronic.com/impedance-analyzer/used-precision-impedance-analyzer-agilent.html> >. Acesso em: 09 de julho de 2021.

DANSHENG, W.; HONGPING, Z. Monitoring of the strength gain of concrete using embedded PZT impedance transducer. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 25, p. 3703–3708, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.020>

FINZI NETO, R. M. et al. A low-cost electromechanical impedance-based SHM architecture for multiplexed piezoceramic actuators. **SHM - Structural Health Monitoring**, SAGE Journals, v. 10, p. 301-402. 2010. <https://doi.org/10.1177/1475921710379518>

FROUFE, M. M. et al. Smart Buildings: Systems and Drivers. **Buildings**, v. 10(9), p. 153. 2020. <https://doi.org/10.3390/buildings10090153>

FUNAHASHI JÚNIOR, E. I. **Influência do tipo de cimento Portland no desempenho de pastas e argamassas a partir de medidas calorimétricas: uma contribuição ao estudo de desempenho do concreto**. 200 f. Dissertação (Mestrado em habitação: Planejamento e Tecnologia) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT - Área de Concentração: Tecnologia em Construção de Edifícios. São Paulo, 2018.

GIBILISCO, S. **Manual de Eletrônica e de Telecomunicação**. Editora Reichmann e Affonso, Brasil, 2002.

HTMG. **Cristais Piezos Cerâmicos**. Valinhos, SP. Disponível em: <<https://www.htmg.com.br/produto/cristais-piezos-ceramicos/>>. Acesso em: 09 de julho de 2021.

INTERCEMENT. **Mapa de qualidade**. Laudo enviado pelo fornecedor, técnica responsável: Suelba Souza Soares. Fábrica de Pedro Leopoldo, Belo Horizonte, MG, 2020.

KIM, W. J. *et al.* Real-time Strength Development Monitoring for Concrete Structures using Wired and Wireless Electro-mechanical Impedance Techniques. *Structural Engineering. KSCE Journal of Civil Engineering*, v.17 (16), p. 1432-1436, 2013.
<https://doi.org/10.1007/s12205-013-0390-1>

LEUCAS, L. DE F. **Utilização das técnicas de impedância eletromecânica e ondas de lamb para identificação de dano em estruturas com rebites**. 58 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

LIANG, C. *et al.* Coupled Electro-Mechanical Analysis of Adaptive Material Systems- Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer. **Journal Intelligent Material Systems and Structures**, p.5, 1994.
<https://doi.org/10.1177/1045389X9400500102>

LIM, Y. Y. Monitoring of concrete hydration using electromechanical impedance technique. **Australasian conference on the mechanics of structures and materials (ACMSM 23)**. 23^a edição, p. 1155–1160, 2014.

LIM, Y. Y. *et al.* Monitoring of concrete curing using the electromechanical impedance technique: review and path forward. **SHM - Structural Health Monitoring**, SAGE Journals, v. 20(2), p. 604–636, 2021. <https://doi.org/10.1177/1475921719893069>

MAGALHÃES, A. G. de. **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno**. Tese (doutorado). Engenharia de estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

MARAT-MENDES, J. N. *et al.* Materiais e estruturas inteligentes e sua importância na manutenção industrial. **1º Encontro Luso-Brasileiro de Manutenção**. 2003.

MASSOUD, M. **Impedance Methods for Machine Analysis: Modal Parameters Extraction Techniques**. p. 4-14. Universidade de Sherbrooke, Quebec, Canadá, 1985.

MASUELA, F. B. **Estudo da água não evaporável na hidratação do cimento Portland com escória de alto forno por meio de análise térmica**. 124 f. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2016.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. Editora: IBRACON, 2ª Edição. São Paulo, SP, 2014.

MOHARANA, S.; BHALLA, S. Development and evaluation of an external reusable piezo-based concrete hydration-monitoring sensor. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 30, p. 18-19, 2019. <https://doi.org/10.1177/1045389X19873414>

MOURA JUNIOR, J. DOS R. V. DE. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural aplicada a estruturas aeronáuticas e espaciais**. 268 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. Damage severity and propagation characterization with admittance signatures of piezo transducers. **Journal Smart Materials and Structures**. v.13, p. 393-403, 2004. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/2/018>

NARAYANAN, A. KOCHERLA, A. SUBRAMANIAM, K. V. L. Embedded PZT Sensor for Monitoring Mechanical Impedance of Hydrating Cementitious Materials. **Journal Nondestruct Eval**, Springer Science, p. 36-64, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0442-4>

NEGI, P. et al. Investigations on effectiveness of embedded PZT patches at varying orientations for monitoring concrete hydration using EMI technique. **Construction and Building Materials**. Elsevier, v. 169, p. 489-498, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.006>

PACHECO, J.; RIBEIRO, M.; HELENE, P. Contribuição dos concretos de alto desempenho na redução do impacto ambiental e incremento da sustentabilidade. **Concreto e Construções**, IBRACON. v. 95, p. 98-104, 2019.

PALOMINO, L. V. **Análise das métricas de dano associadas à técnica da impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural**. 117 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

QUADROS, P. A. **Estudo das correlações entre as propriedades mecânicas do concreto**. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

RABELO, D. DE S. **Monitoramento de integridade estrutural baseado na técnica da impedância eletromecânica incorporando compensação do efeito da variação da temperatura**. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

SEFF, L.; FOLGUERAS, M. V.; HOTZA, D. Hidratação do cimento CP V ARI – RS: influência da água nas reações de hidratação. **49º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. São Pedro, São Paulo, 2005.

SERAFINI, R. *et al.* Controle contínuo da resistência de estruturas de concreto pelo método da maturidade. **Concreto e Construções**, IBRACON, v.98, p. 85-90, 2020. <https://doi.org/10.4322/1809-7197.2020.98.0009>

SILVA, G. J. B. **Estudo do Comportamento do Concreto de Cimento Portland produzido com a Adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato**. 107 f. Dissertação (mestrado) - Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2005.

SILVA, R. N. F. **Monitoramento de Integridade Estrutural Utilizando a Técnica da Impedância Eletromecânica Aplicada em Estruturas de Concreto**. 146 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2017.

SILVA, R. N. F. *et al.* Impedance-based structural health monitoring applied to steel fiber-reinforced concrete structures. **Revista da Sociedade Brasileira de Ciências Mecânicas e Engenharia**, v. 42, Artigo número: 383, 2020.

<https://doi.org/10.1007/s40430-020-02458-4>

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. Academic Press, London, 1990.

TAWIE, R.; LEE, H. K. Monitoring the strength development in concrete by EMI sensing technique. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 24, p. 1746-1753, 2010a.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.014>

TAWIE, R.; LEE, H. K. Piezoelectric-based non-destructive monitoring of hydration of reinforced concrete as an indicator of bond development at the steel–concrete interface.

Cement and Concrete Research. Elsevier, v. 40, p. 1697–1703, 2010b.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.011>

TSURUTA, K. M. **Monitoramento de integridade estrutural de materiais compostos sujeitos a impactos empregando a técnica da impedância eletromecânica**. 114 f.

Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Concreto: Ciência e Tecnologia - Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. **IBRACON**, 2011.

ULTRACERAM. **Discos Cerâmicos Piezoelétricos (PZT)**. Disponível em:

<<https://ultraceram.com.br/ceramicas-piezoelétricas.php>> Acesso em: 28 de janeiro de 2021.

VIECILI, M. J. C.; HASTENPFLUG, D.; GIRARDI, R. Comparativo entre o teste de Vicat e a calorimetria semi-adiabática para determinação do tempo de início e fim de pega em cimentos Portland. **Revista Matéria**, v.23, n.3, 2018. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0506>

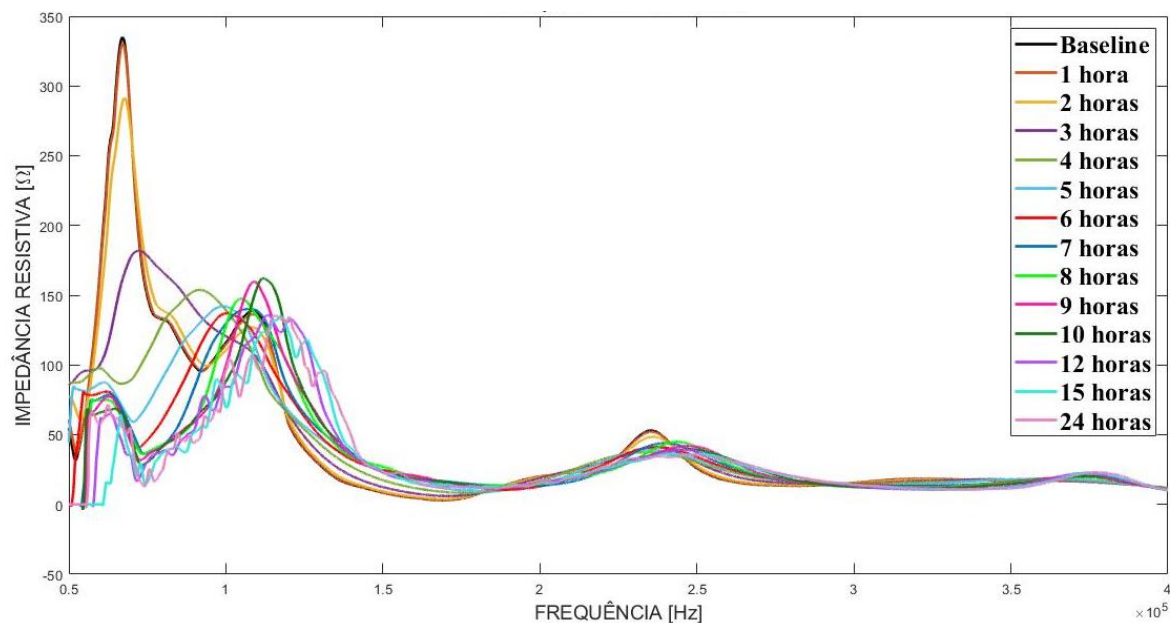
VISALASKHI, T.; BHALLA, S.; GUPTA, A. Monitoring early hydration of reinforced concrete structures using structural parameters identified by piezo sensors via electromechanical impedance technique. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Elsevier, v. 99, p. 129-141, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.05.042>

ZHANG, C. et al. Monitoring early-age hydration and setting of portland cement paste by piezoelectric transducers via electromechanical impedance method. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 258, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120348>

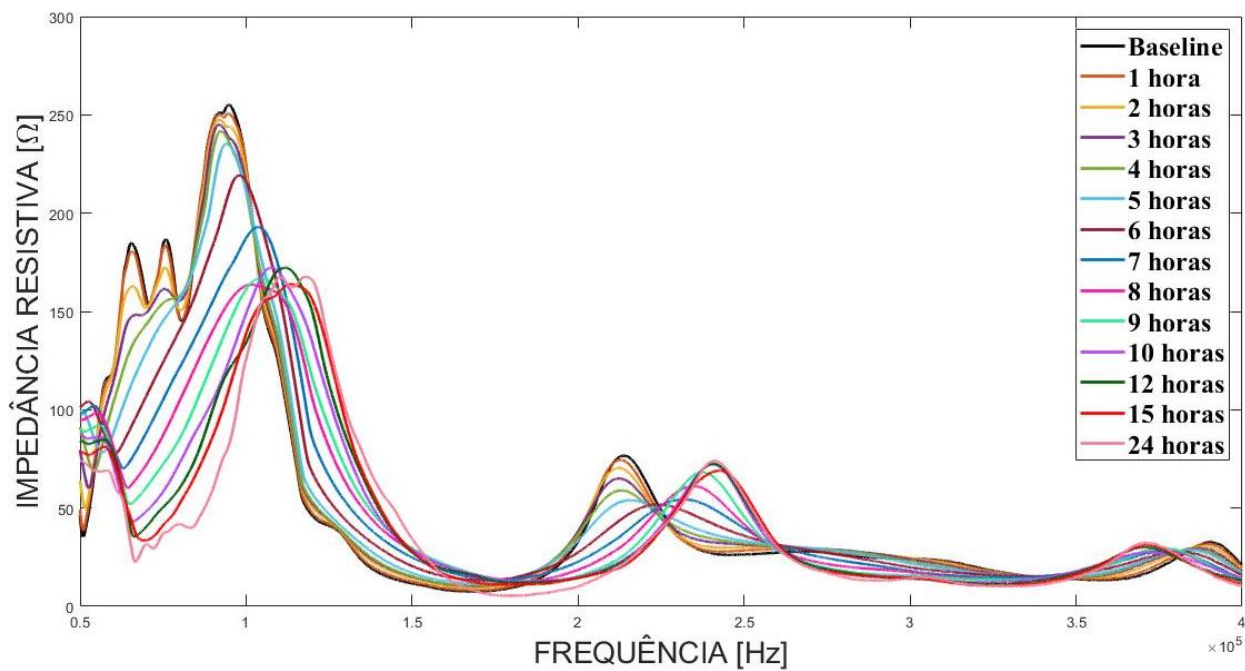
ZHOU, S.W. ; LIANG, C. ; ROGERS, C.A. An impedance- based system modelling approach for induced strain actuator-driven structures. **Journal of Vibration and Acoustics**. ASME, v.118 (3), p.323–331. 1998. <https://doi.org/10.1115/1.2888185>

APÊNDICE A – CURVAS DE IMPEDÂNCIA POR FREQUÊNCIA DAS PRIMEIRAS 24 HORAS

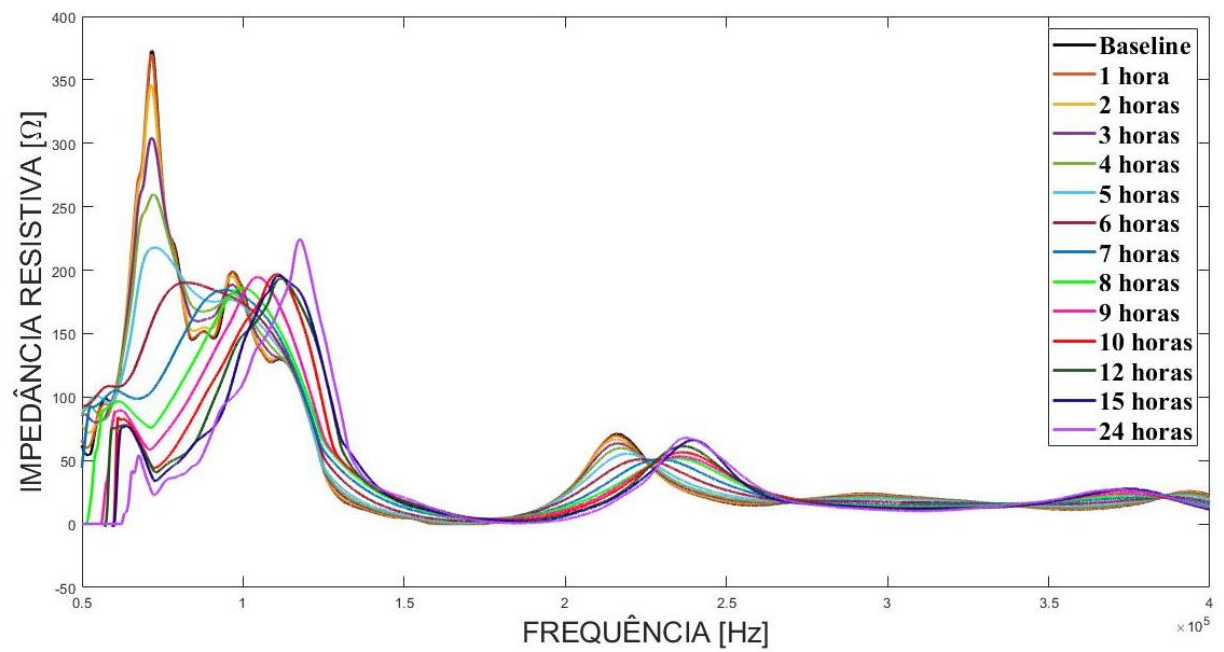
TRACO A – CP V - PZTv



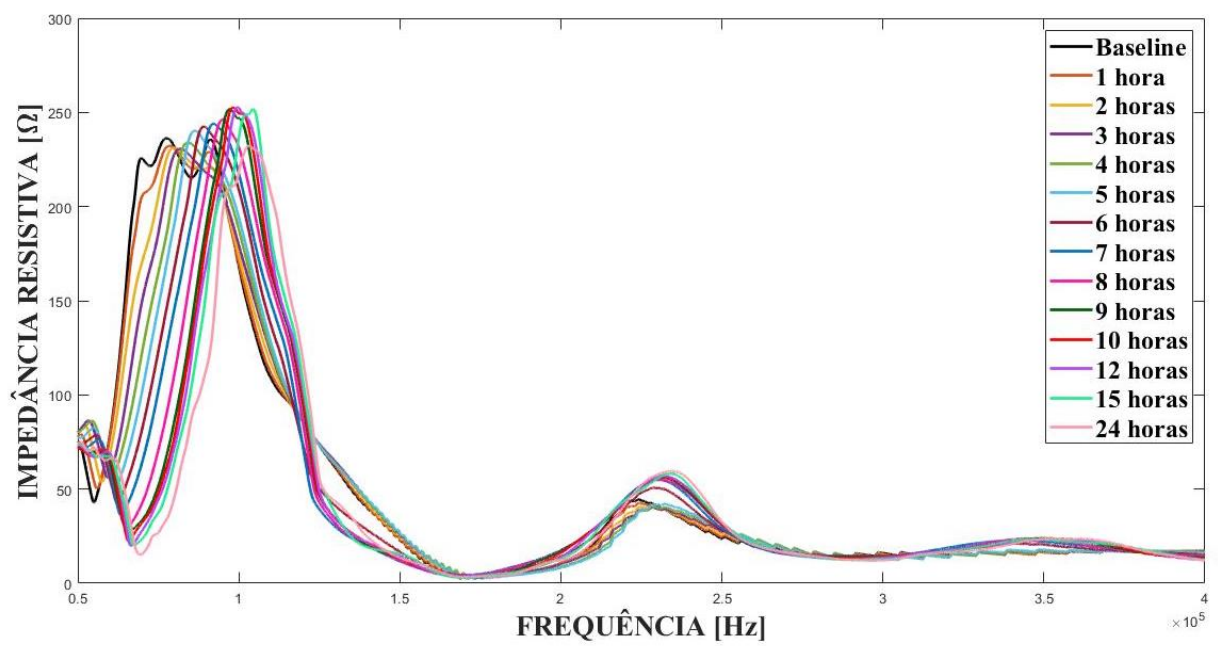
TRACO A - CP III – PZTh



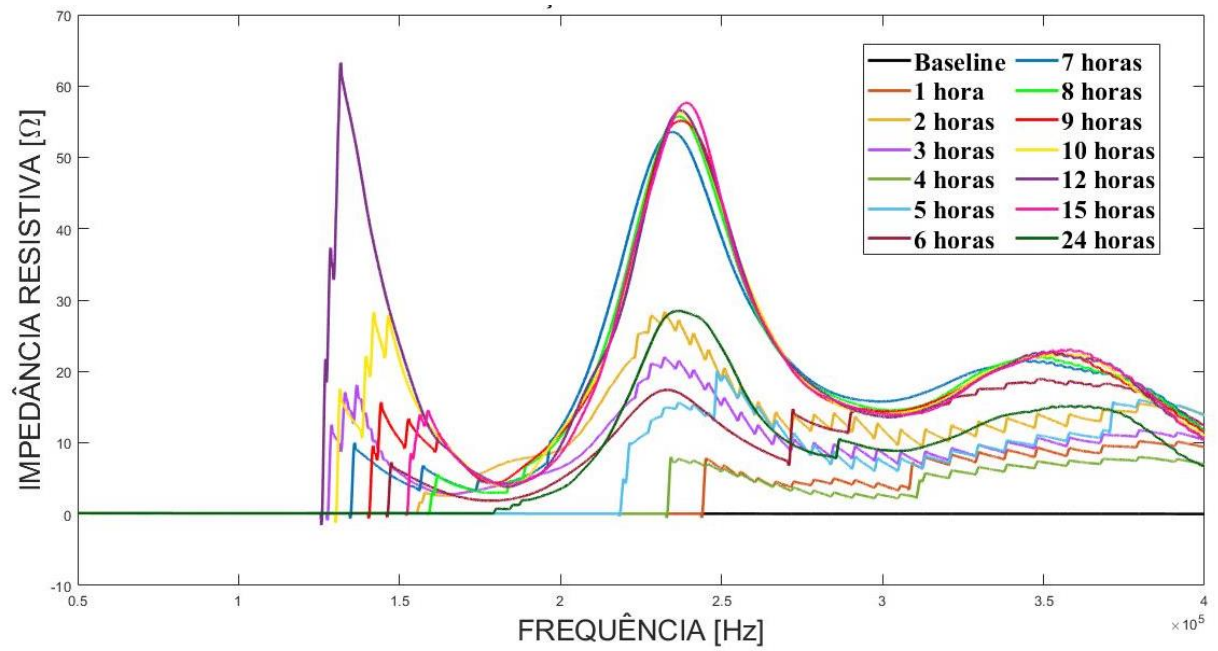
TRAÇO A – CP III – PZTv



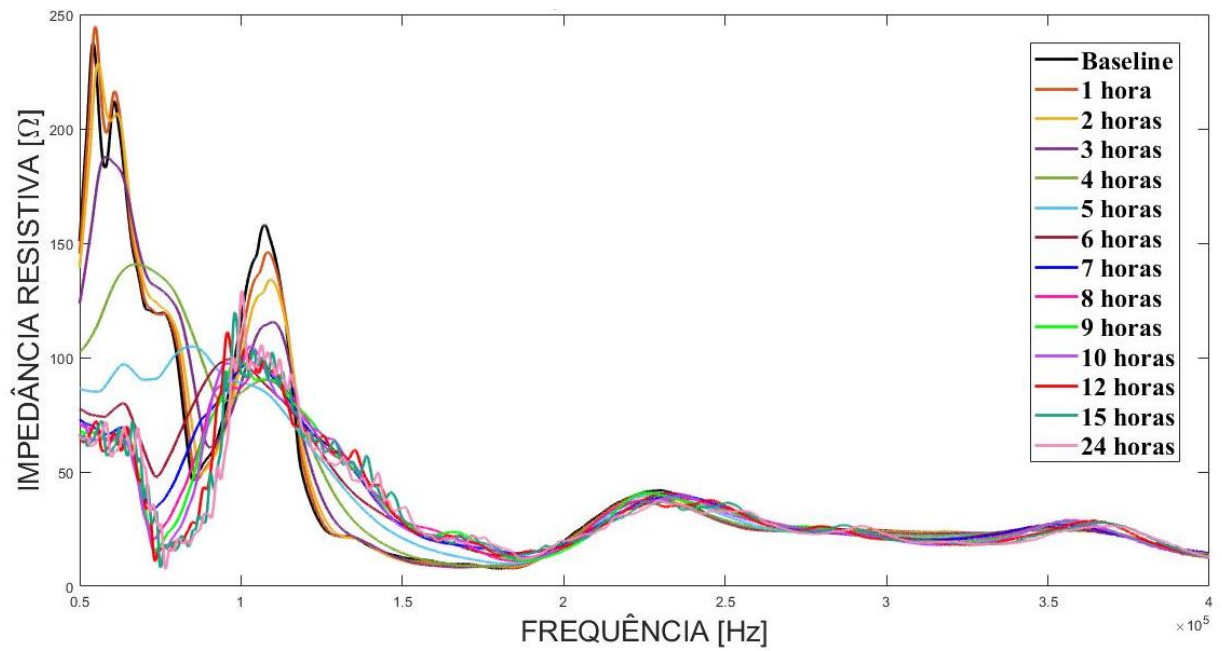
TRAÇO B – CP III – PZTh



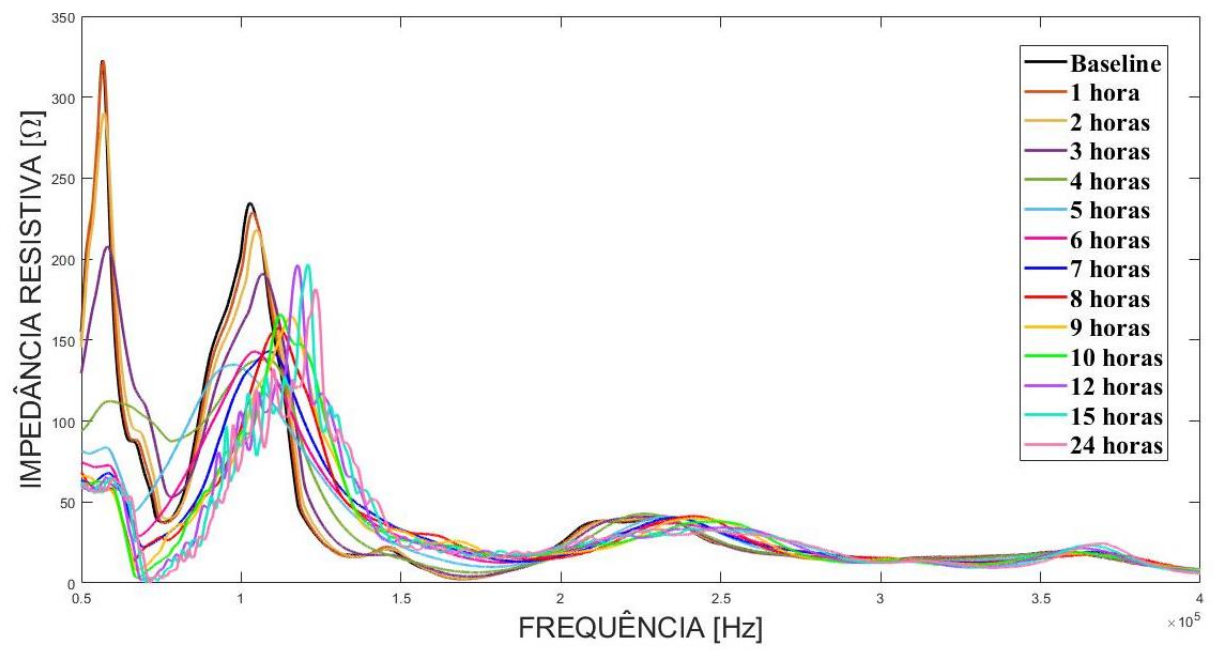
TRAÇO B – CP III – PZTv



TRAÇO B – CP V – PZTh

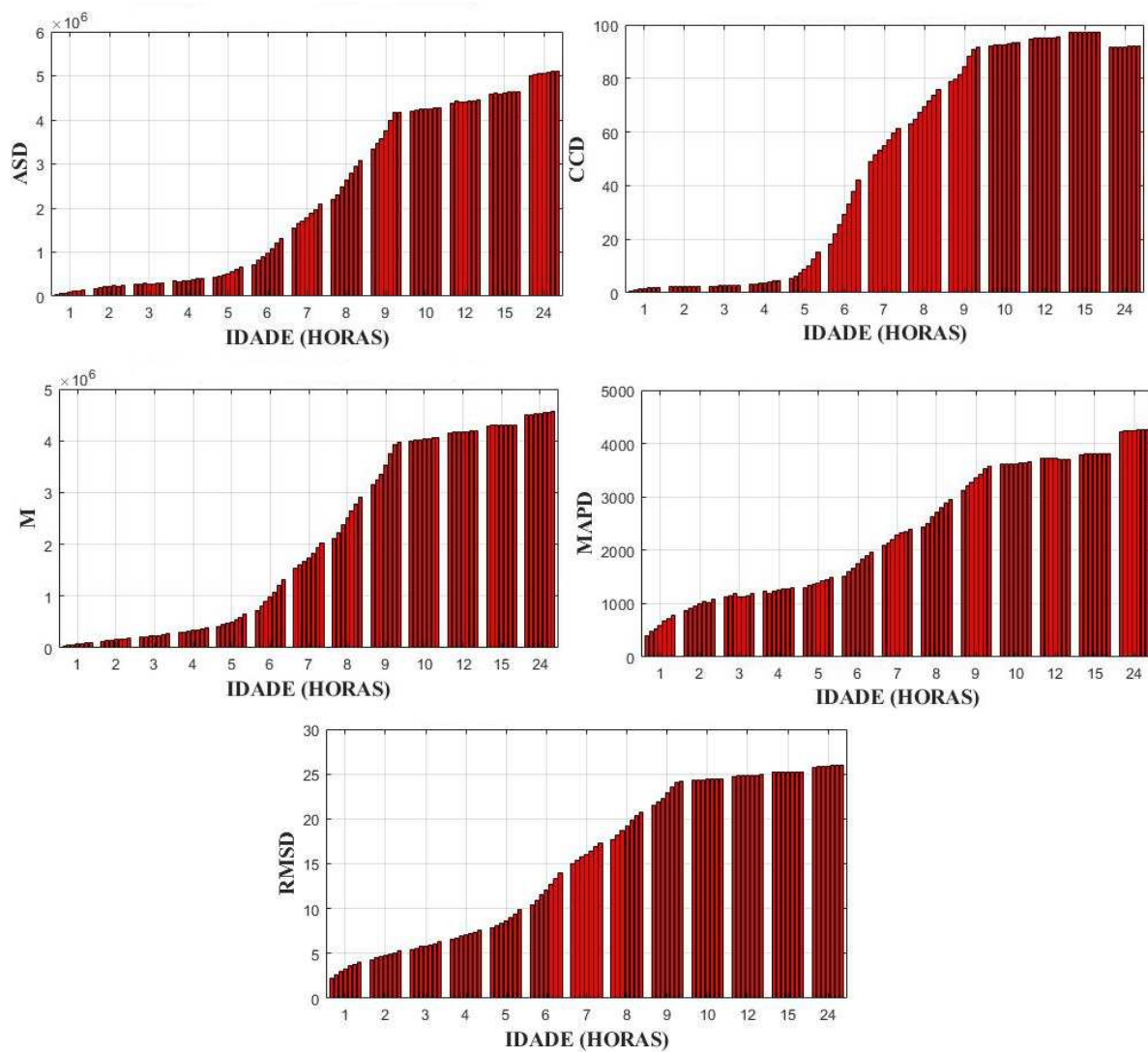


TRAÇO B – CP V – PZT_v

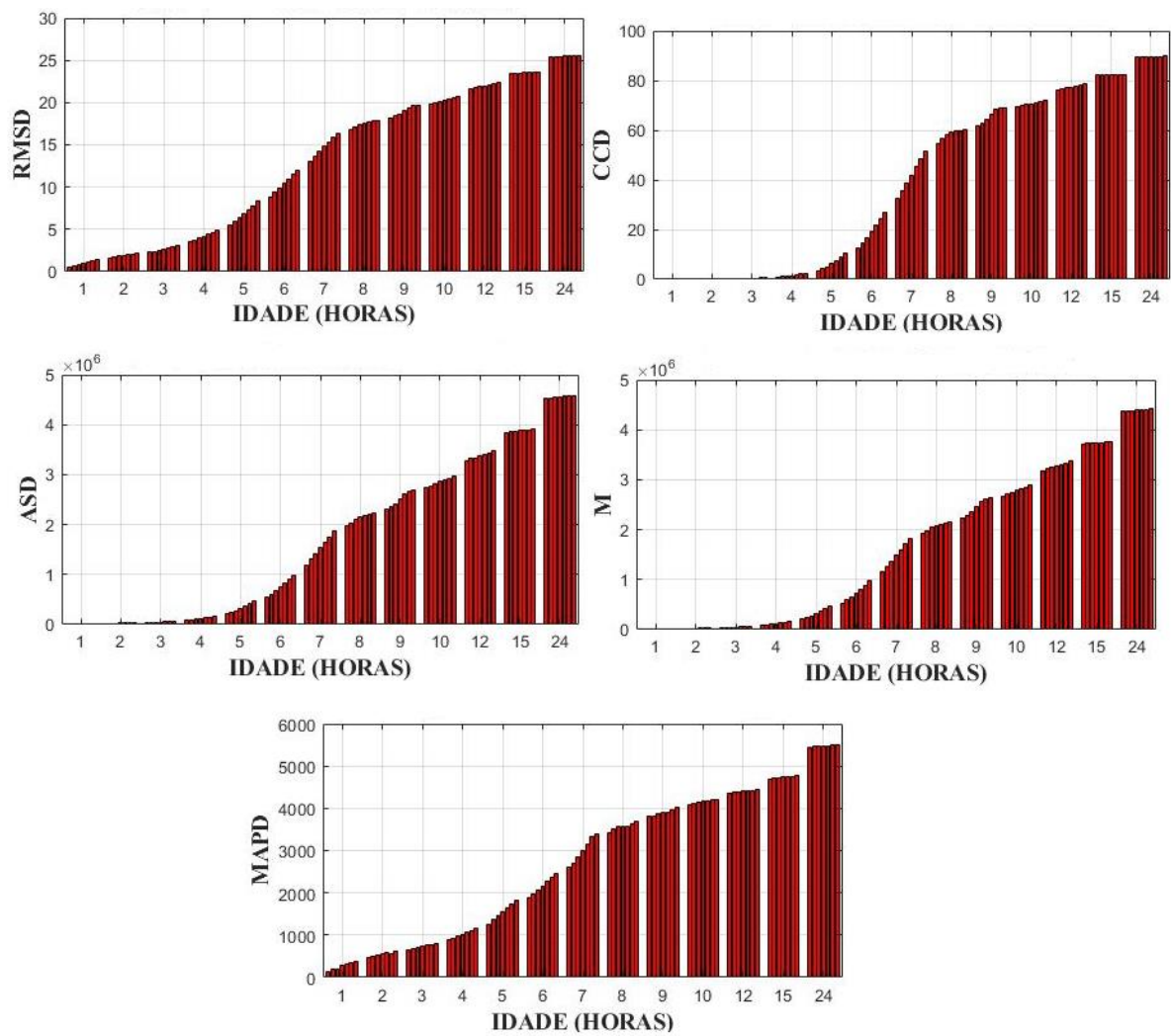


APÊNDICE B – MÉTRICAS ESTATÍSTICAS PRIMEIRAS 24 HORAS – PICO 2

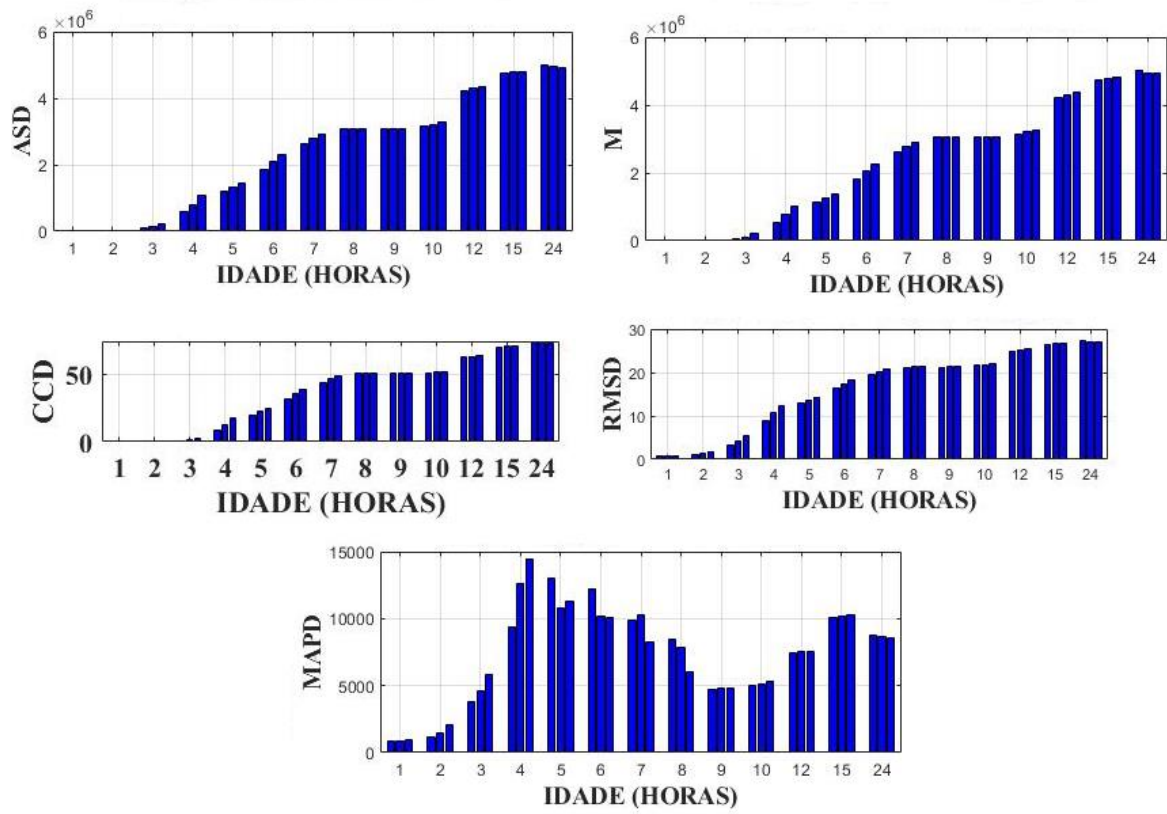
Traço A – CP III - PZTh



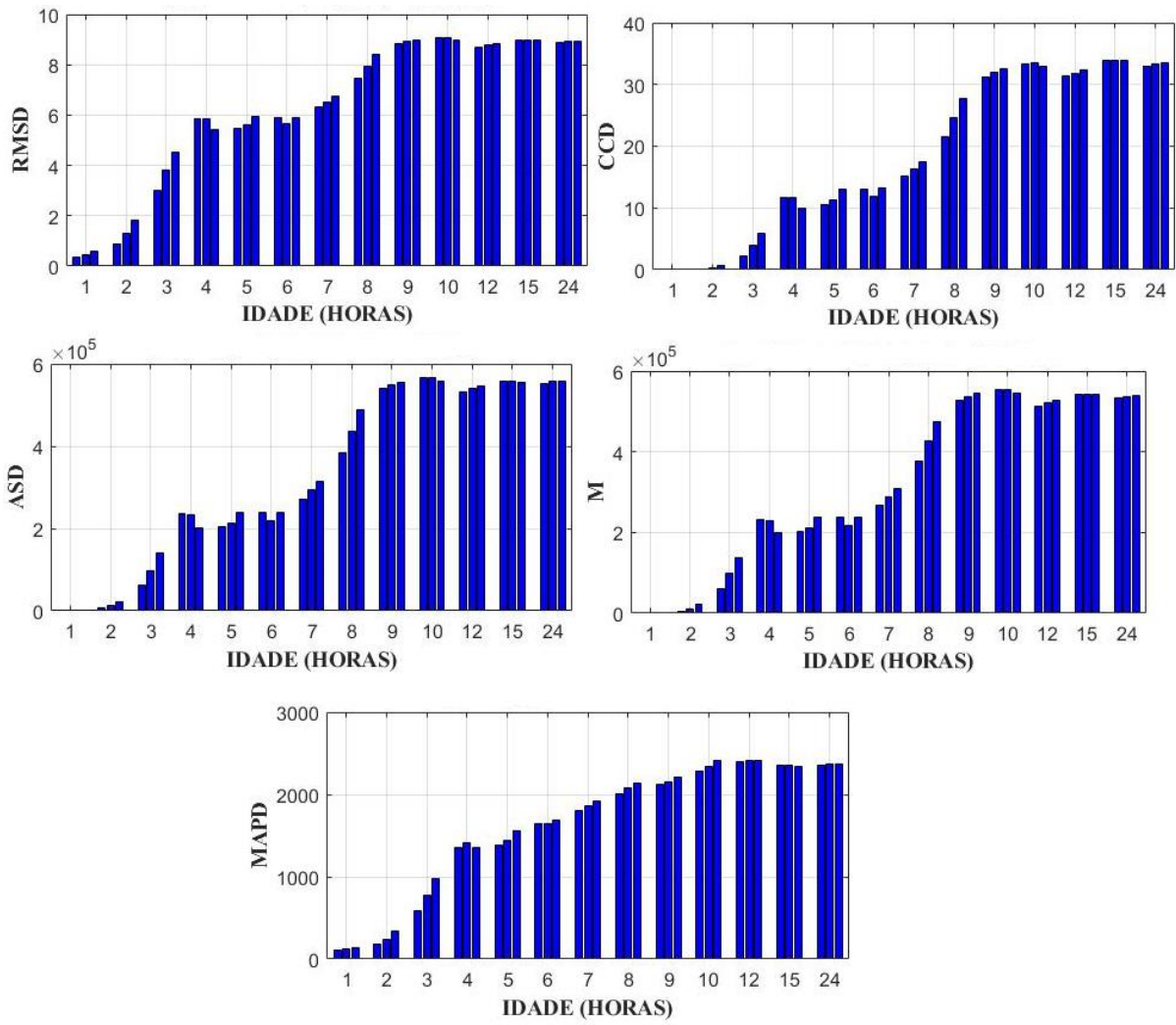
Traço A – CP III - PZTv



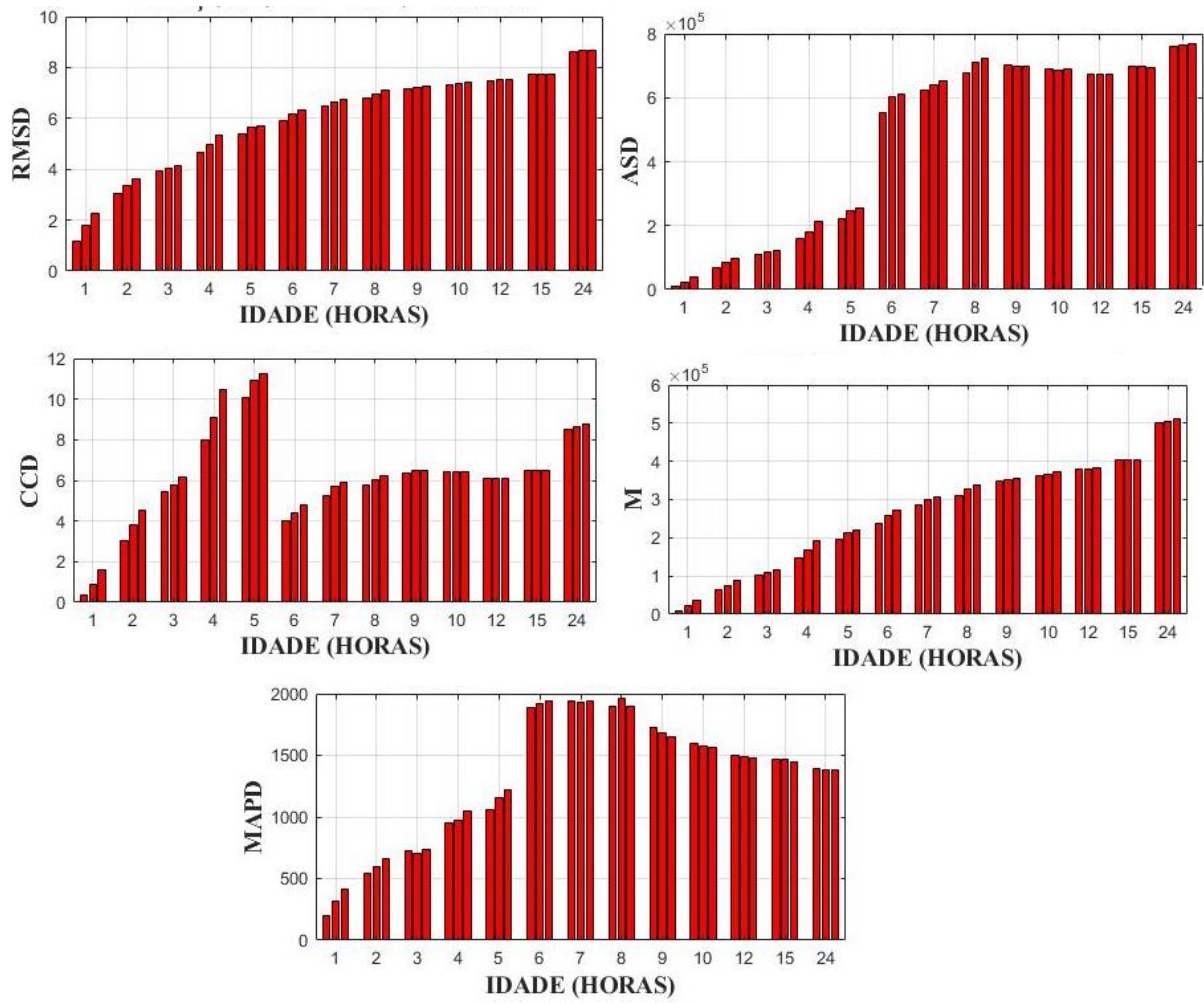
Traço A – CP V – PZTh



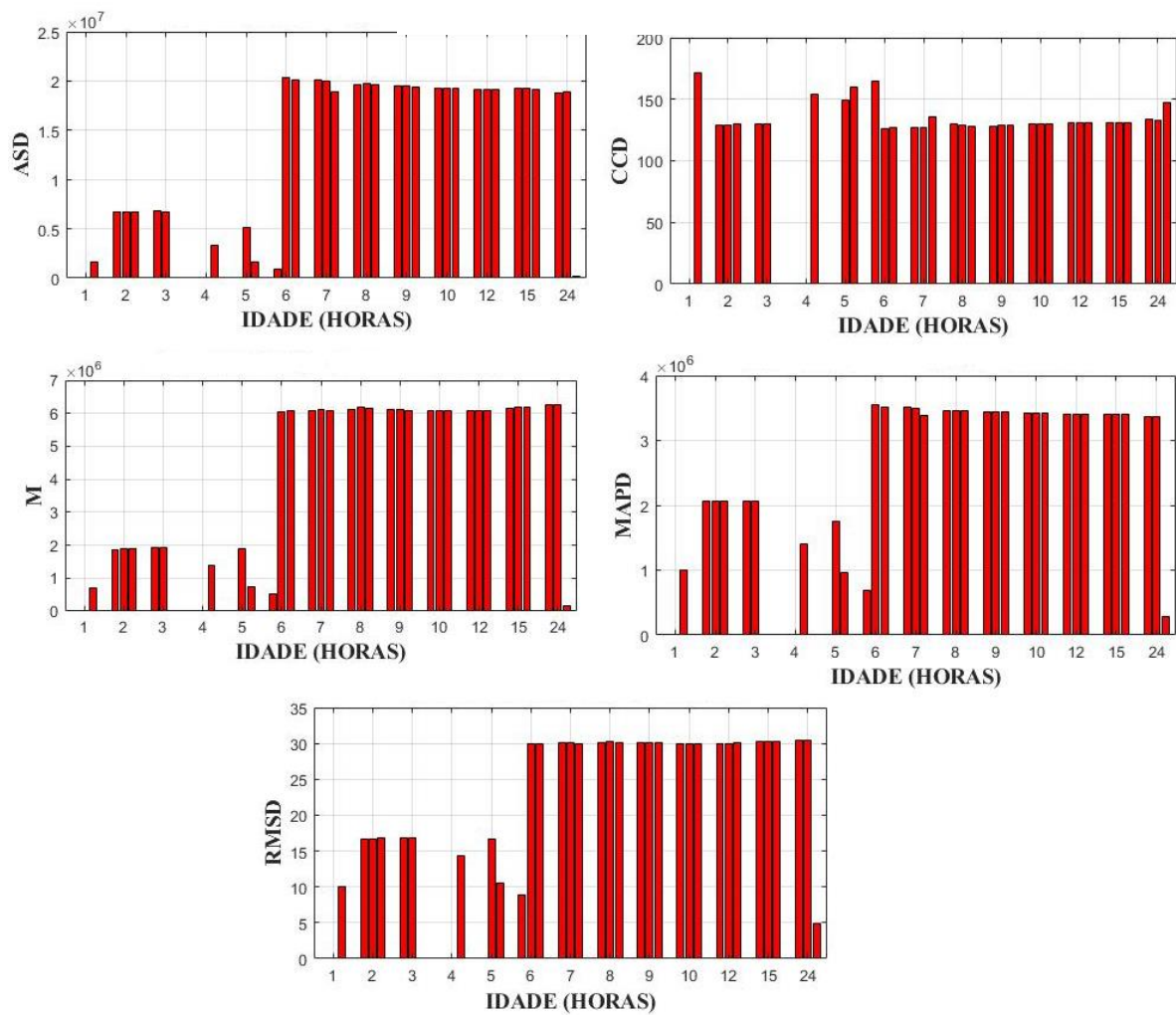
Traco A – CP V – PZTv



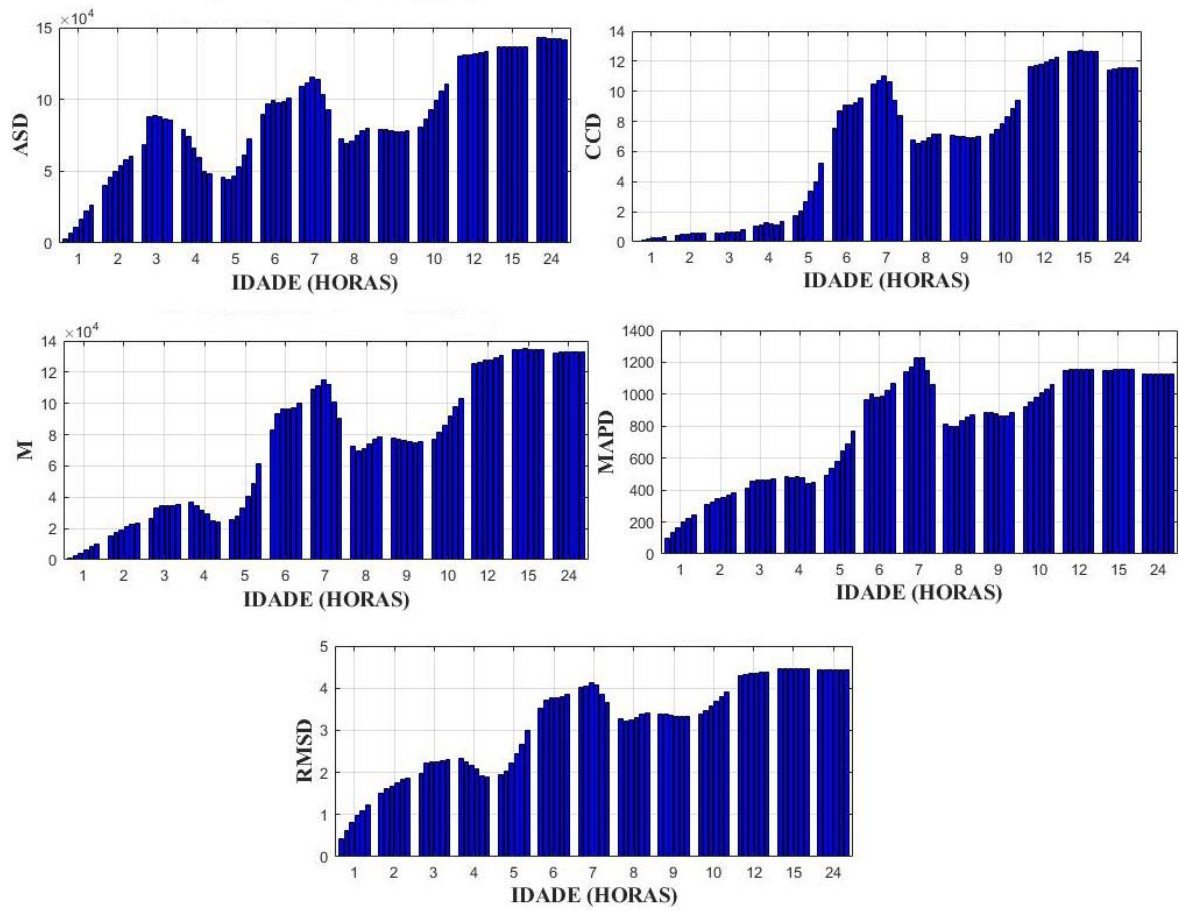
Traço B – CP III – PZTh



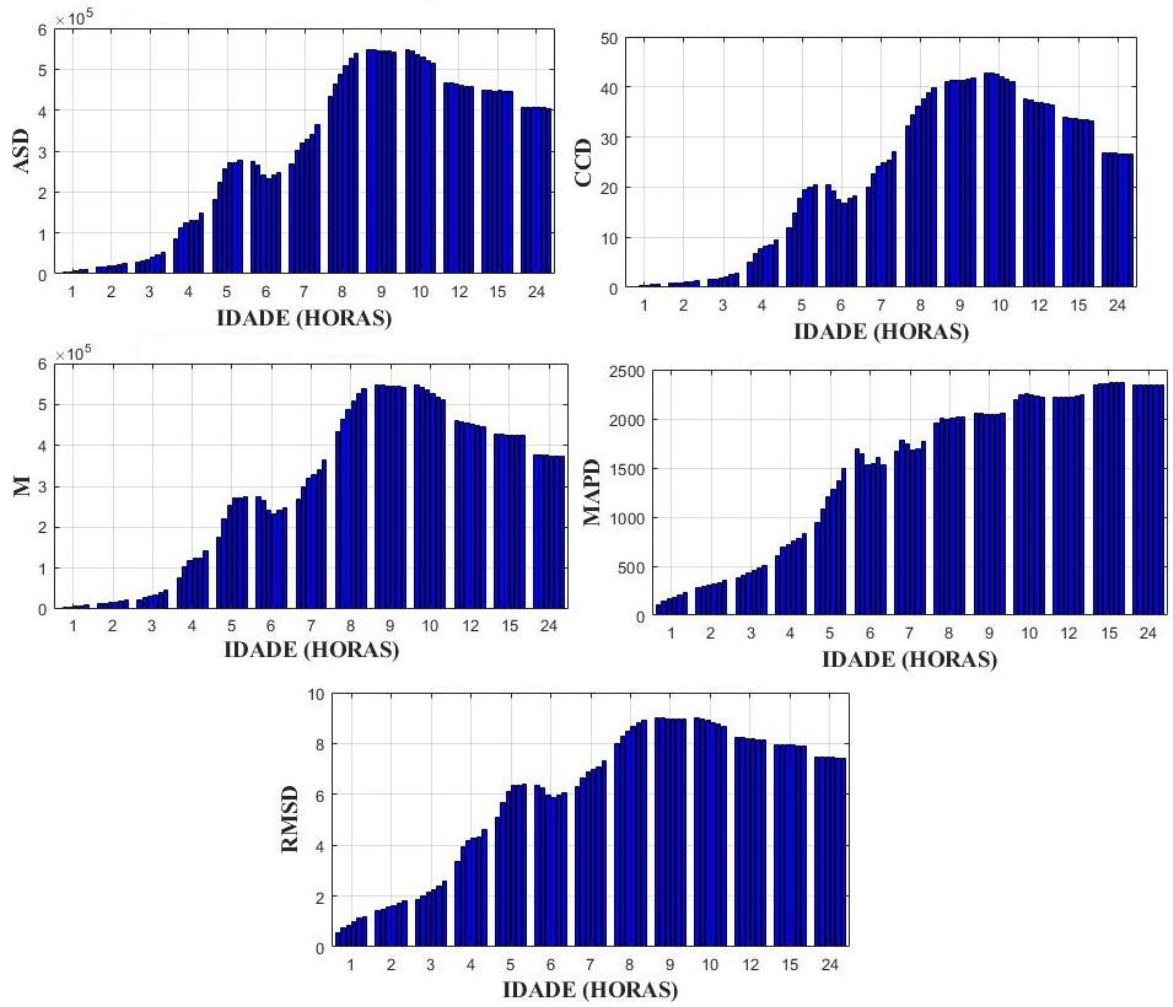
Traço B – CP III – PZTv



Traço B – CP V – PZTh



Traco B – CP V – PZTv



APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

Traço A com cimento CP V				
Resistência à compressão média (MPa)				
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
19,90	32,29	35,56	37,62	42,29
Desvio Padrão (MPa)				
1,65	1,71	2,59	2,04	3,70
Índice de Vazios - corpo de prova 50 x 100 mm				
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
15,15%	14,42%	14,00%	13,78%	13,46%
Desvio Padrão (%)				
0,0005	0,001	0,002	0,001	0,135
Índice de Vazios médio aos 28 dias - corpo de prova 100 x 200 mm				
Iv 28 (%)	13,87%	Desvio Padrão (%)		0,003
Massa específica seca média (g/cm³) - corpo de prova 50 x 100 mm				
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
2,25	2,25	2,28	2,28	2,43
Desvio Padrão (g/cm³)				
0,01	0,00	0,01	0,01	0,01

Traço A com cimento CP III				
Resistência à compressão média (MPa)				
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
2,30	11,46	22,14	30,57	40,63
Desvio Padrão (MPa)				
0,21	0,88	1,13	2,53	2,47
Índice de Vazios - corpo de prova 50 x 100 mm				
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
17,25%	16,11%	15,50%	14,35%	14,29%
Desvio Padrão (%)				
0,0021	0,003	0,004	0,002	0,003
Índice de Vazios médio aos 28 dias - corpo de prova 100 x 200 mm				
Iv 28 (%)	11,01%	Desvio Padrão (%)		0,007
Massa específica seca (g/cm³) - corpo de prova 50 x 100 mm				
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
2,14	2,15	2,17	2,19	2,19
Desvio Padrão (g/cm³)				
0,02	0,02	0,01	0,01	0,02

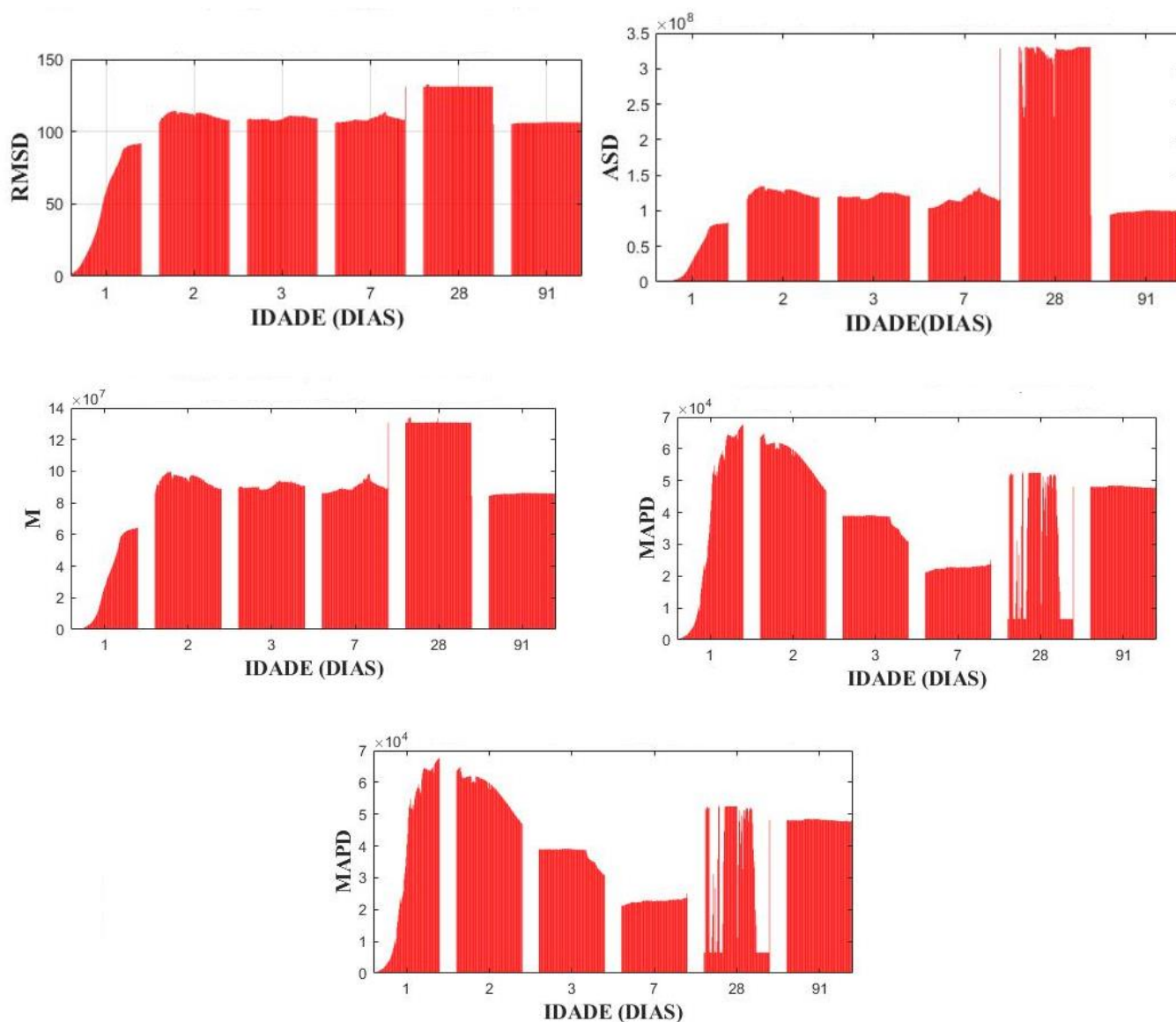
Traço B com cimento CP V				
Resistência à compressão média (MPa)				
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
48,72	54,63	55,58	60,03	70,79
Desvio Padrão (MPa)				
1,44	3,07	2,89	5,58	2,66
Índice de Vazios - corpo de prova 50 x 100 mm				
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
12,94%	12,29%	12,06%	11,02%	10,61%
Desvio Padrão (%)				
0,0014	0,001	0,002	0,000	0,002
Índice de Vazios médio aos 28 dias - corpo de prova 100 x 200 mm				
Iv 28 (%)	9,40%	Desvio Padrão (%)		0,001
Massa específica seca (g/cm³) - corpo de prova 50 x 100 mm				
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
2,32	2,34	2,32	2,36	2,43
Desvio Padrão (g/cm³)				
0,01	0,01	0,02	0,00	0,01

Traço B com cimento CP III				
Resistência à compressão média (MPa)				
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
10,54	29,42	47,75	61,14	63,30
Desvio Padrão (MPa)				
0,87	1,22	2,35	2,04	2,54
Índice de Vazios - corpo de prova 50 x 100 mm				
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
16,22%	14,81%	13,40%	12,32%	11,69%
Desvio Padrão (%)				
0,0008	0,001	0,001	0,011	0,006
Índice de Vazios médio aos 28 dias - corpo de prova 100 x 200 mm				
Iv 28 (%)	7,71%	Desvio Padrão (%)		0,001
Massa específica seca (g/cm³) - corpo de prova 50 x 100 mm				
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
2,32	2,30	2,35	2,37	2,38
Desvio Padrão (%)				
0,00	0,02	0,00	0,02	0,01

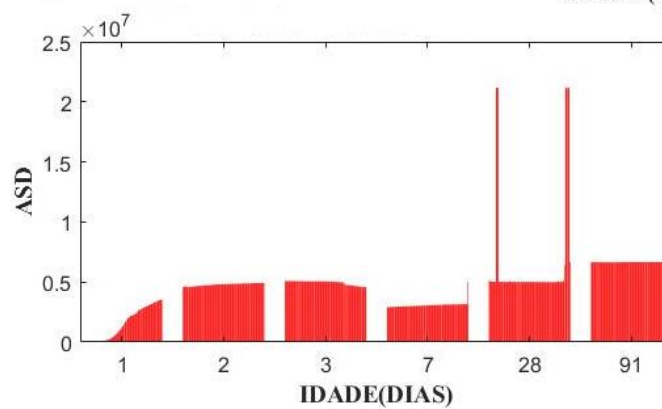
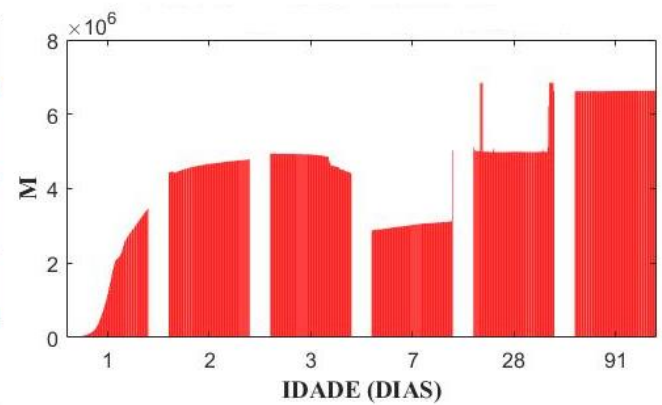
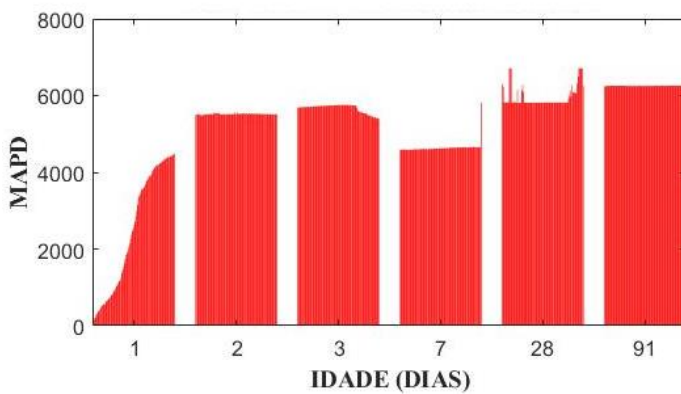
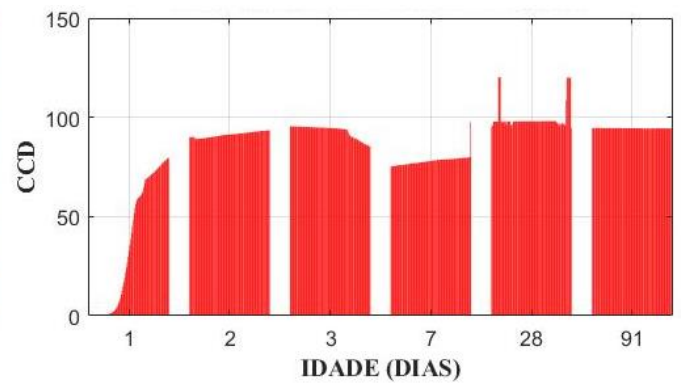
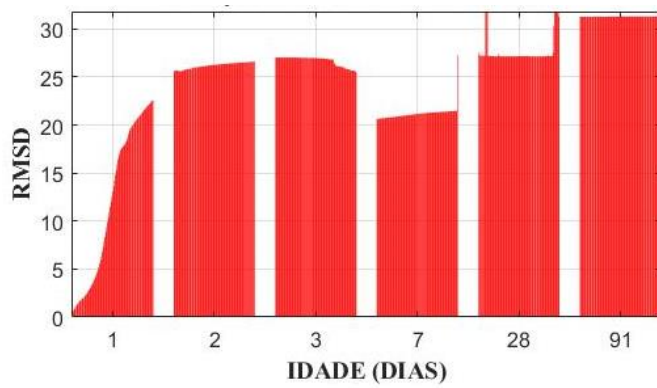
APÊNDICE D – MÉTRICAS ESTATÍSTICAS PARA DIFERENTES FAIXAS DE FREQUÊNCIA

Trço A – CP III – PZTv

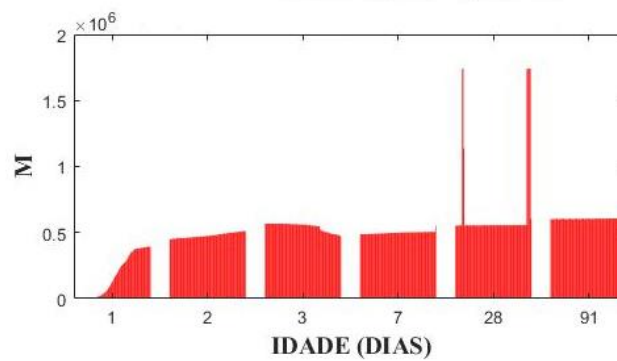
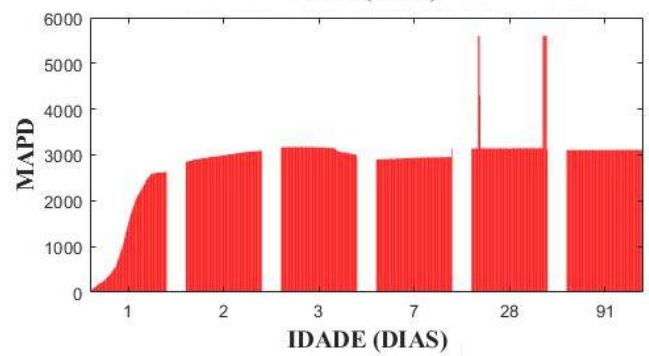
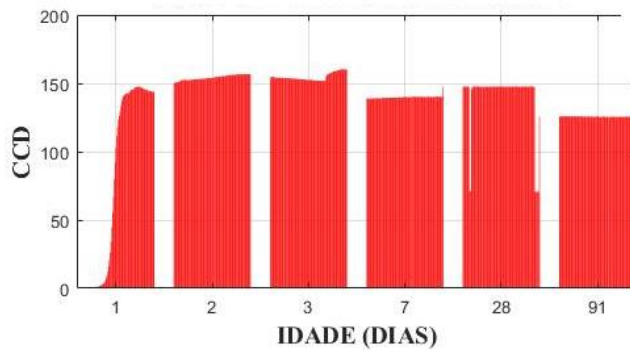
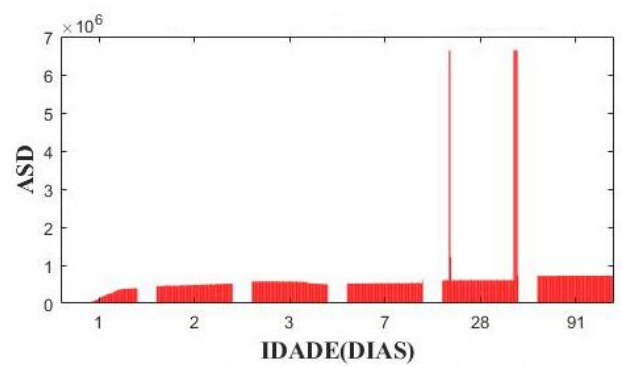
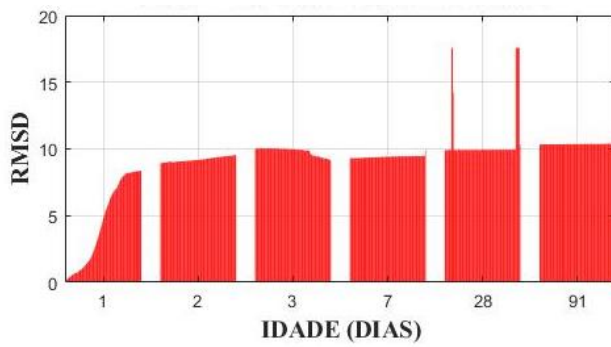
FAIXA 1: 50 kHz a 180 kHz



FAIXA 2: 180 kHz a 300 kHz

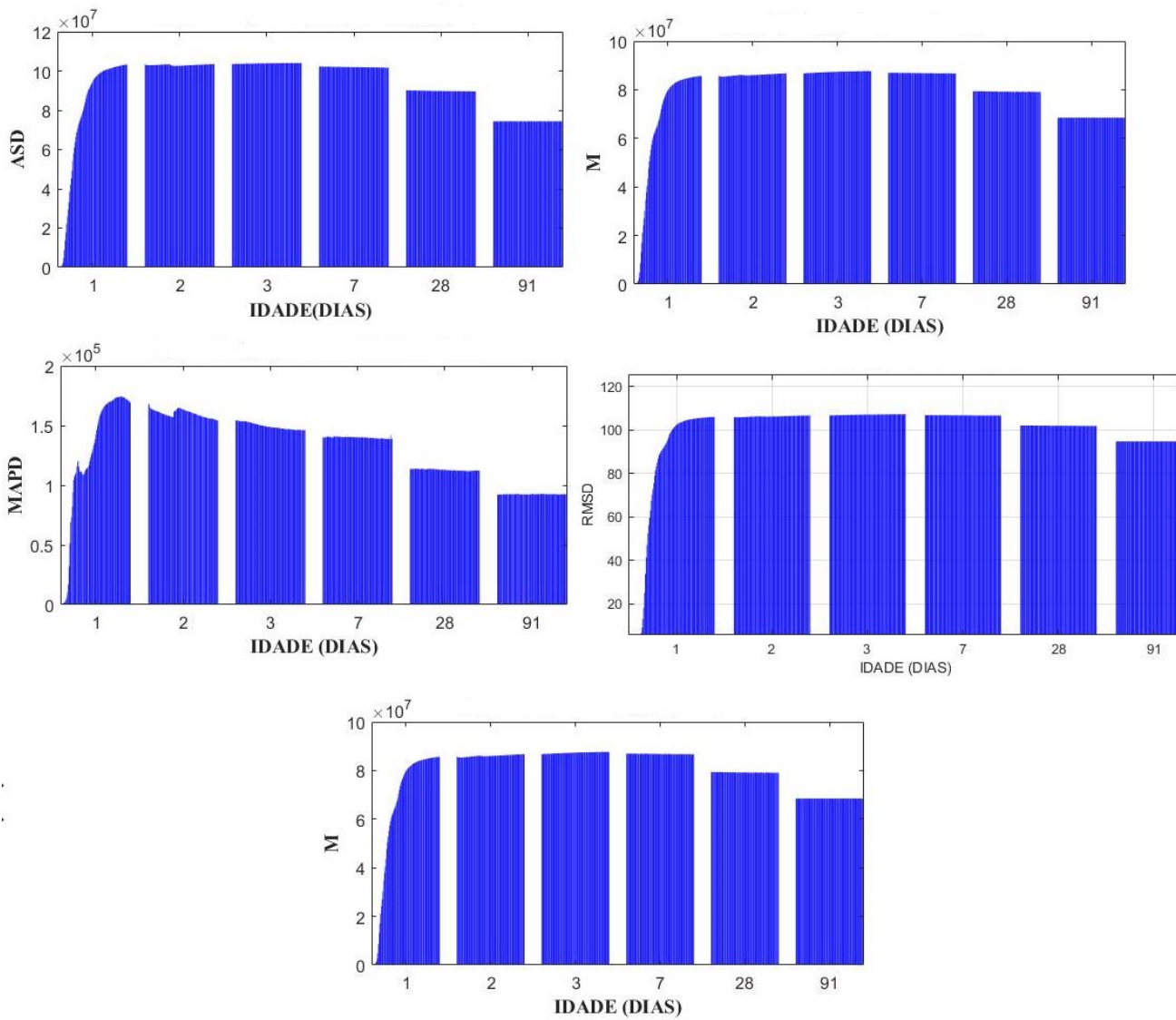


FAIXA 3: 300 kHz a 400 kHz

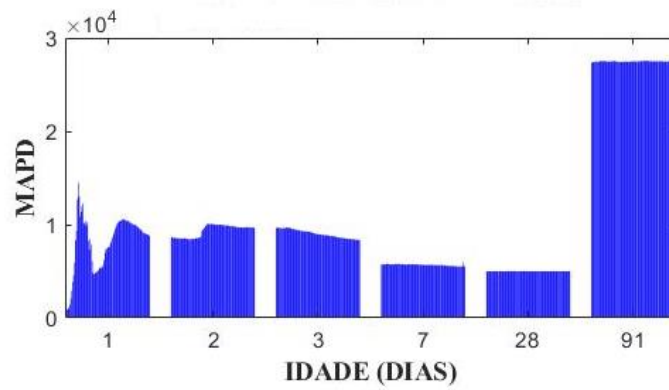
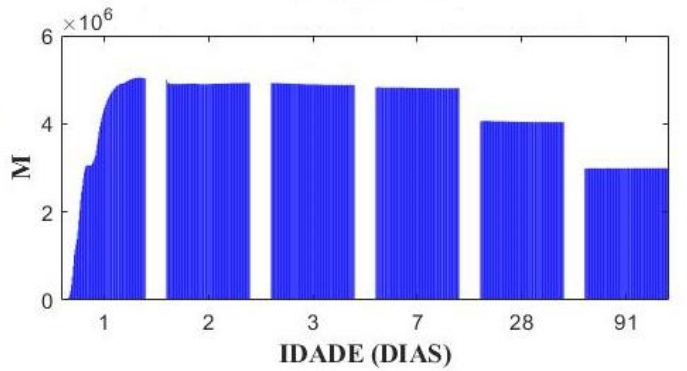
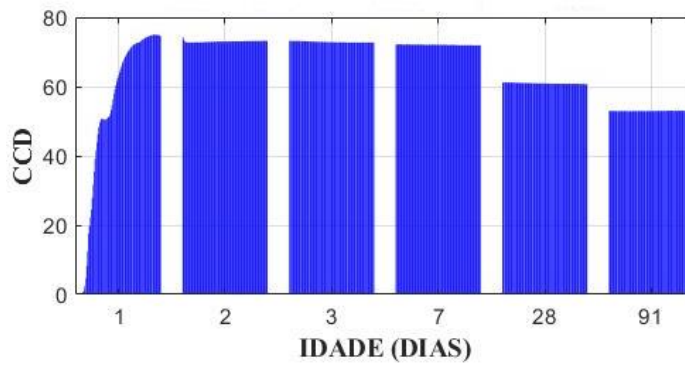
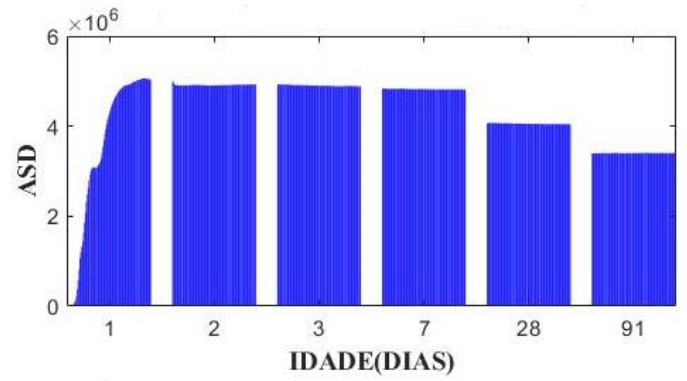
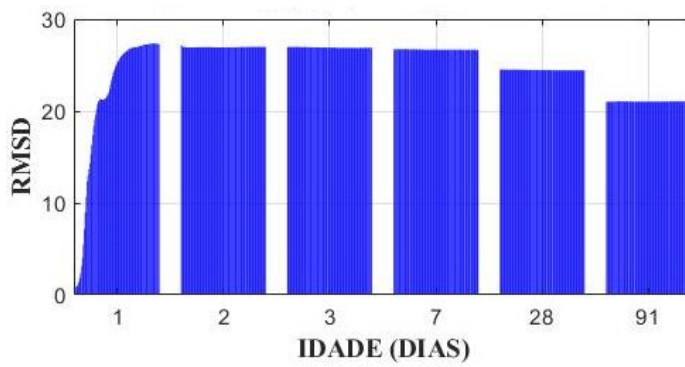


Trço A – CP V – PZTh

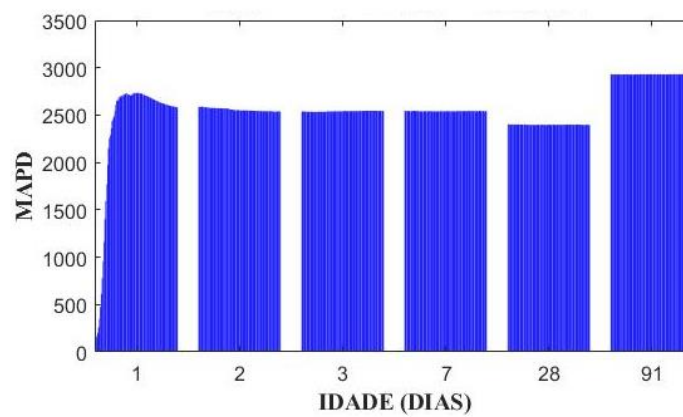
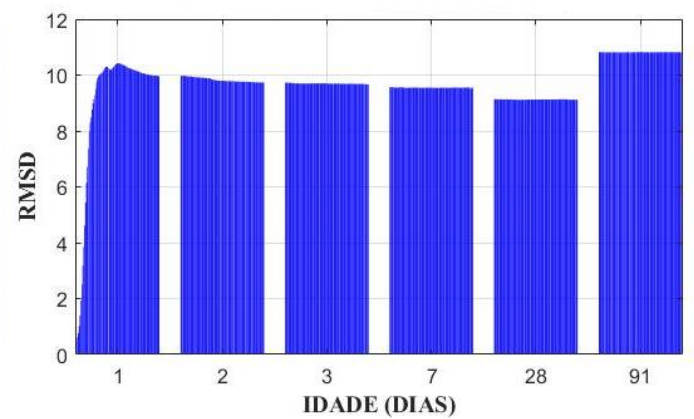
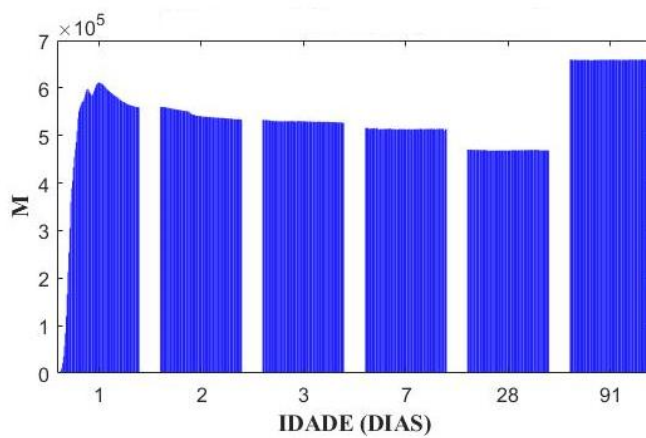
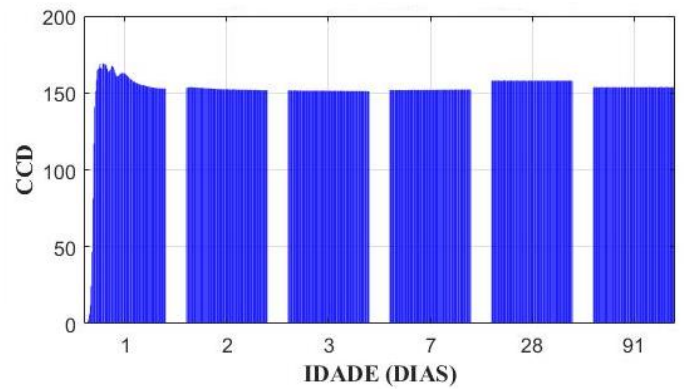
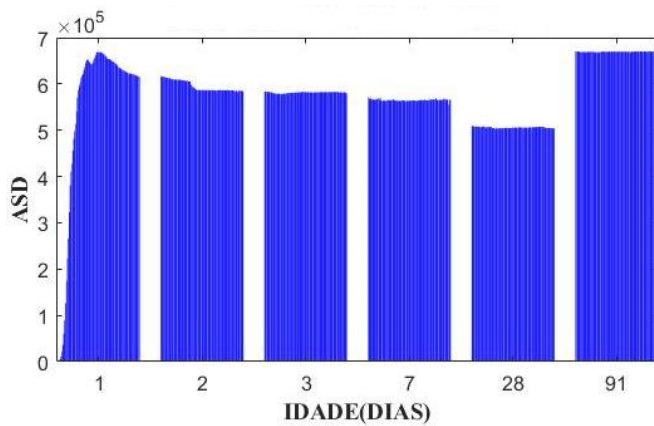
FAIXA 1: 50 kHz a 180 kHz



FAIXA 2: 180 kHz a 300 kHz

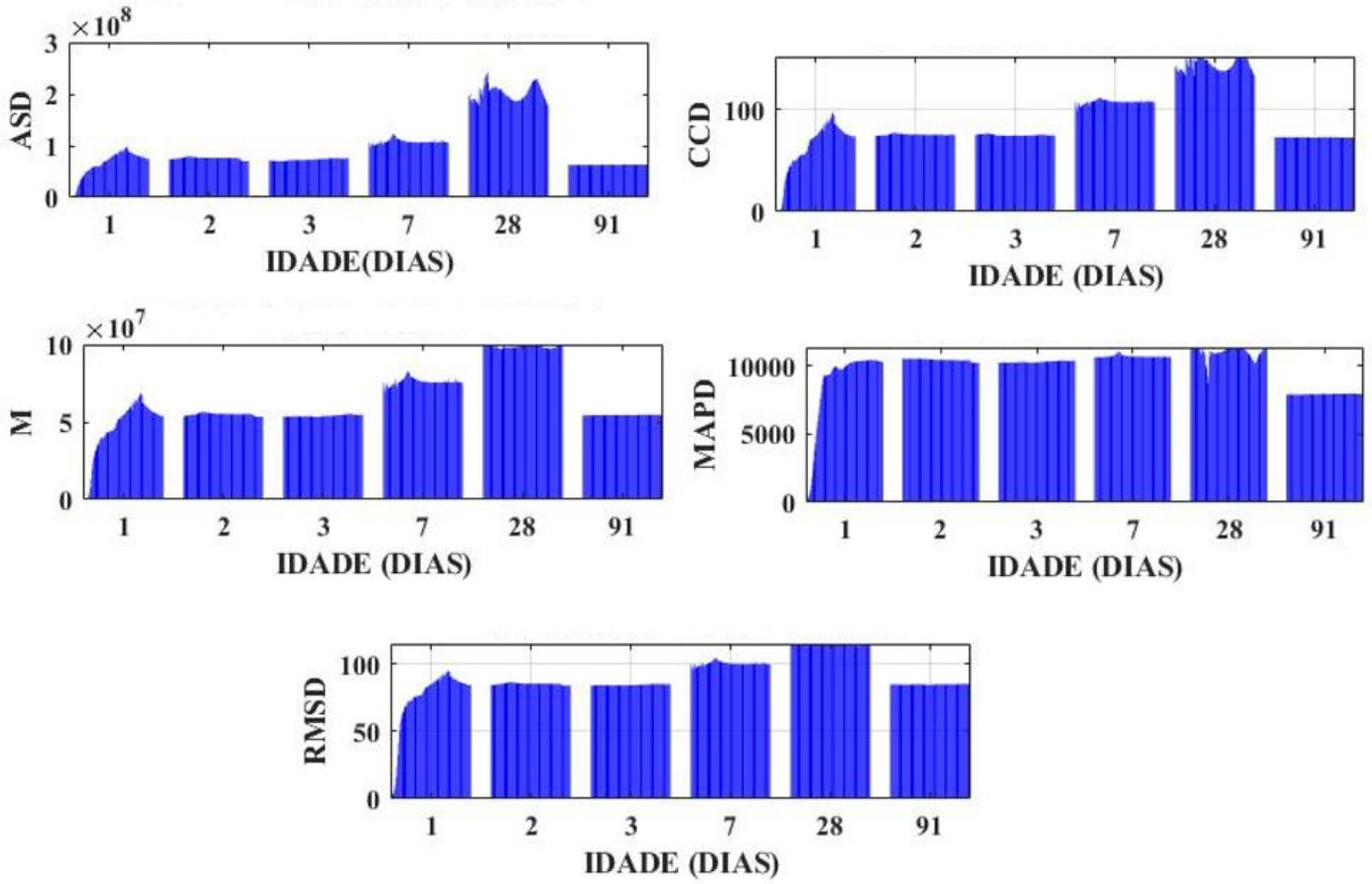


FAIXA 3: 300 kHz a 400 kHz

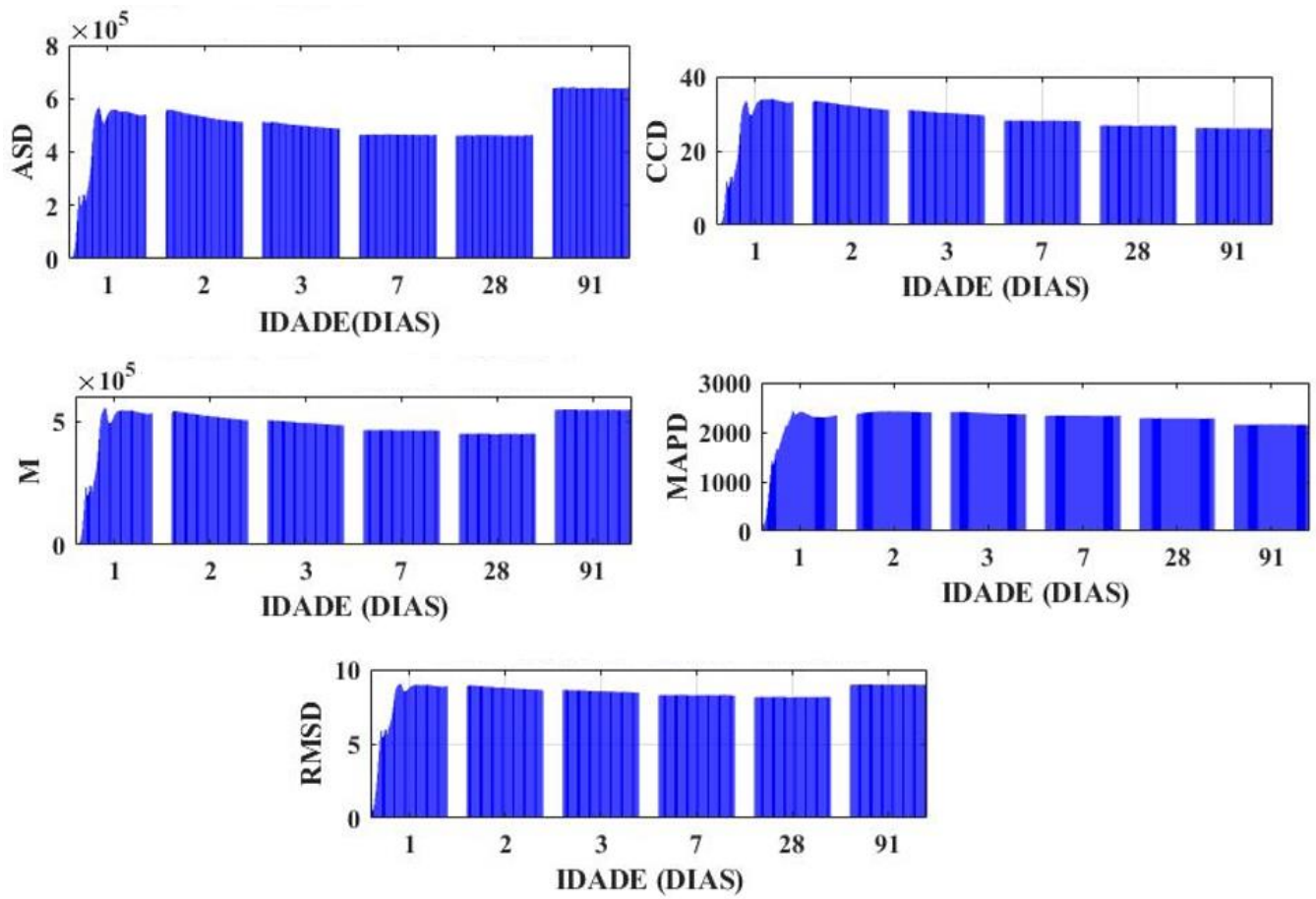


Trço A – CP V – PZTv

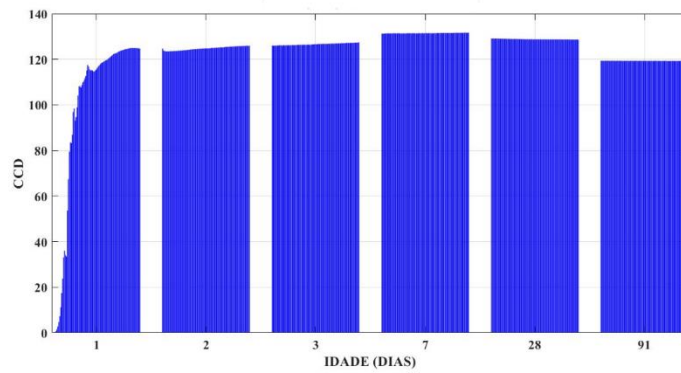
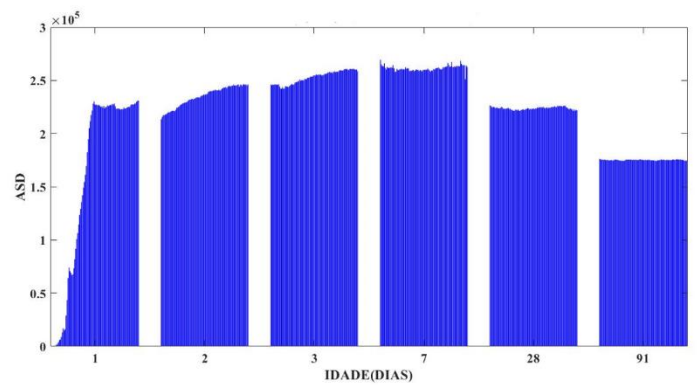
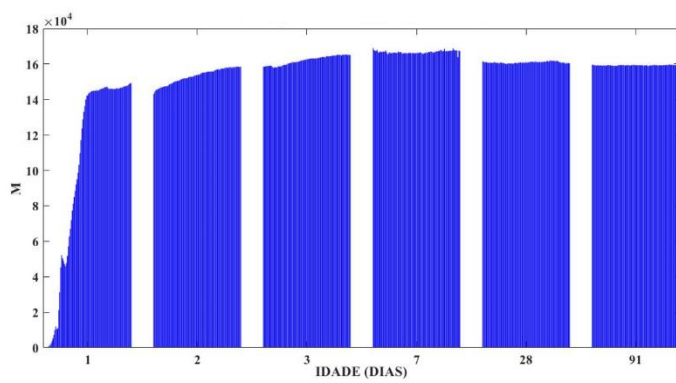
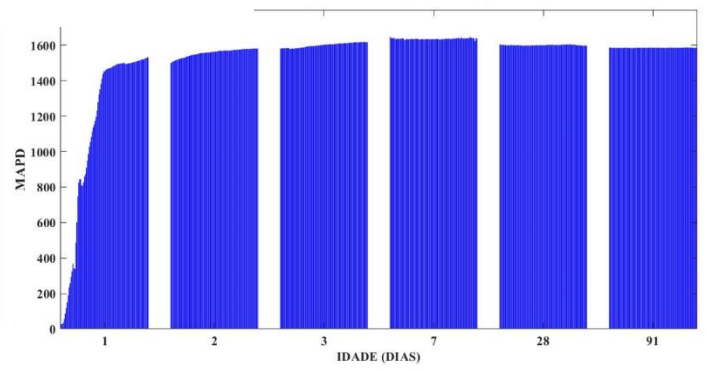
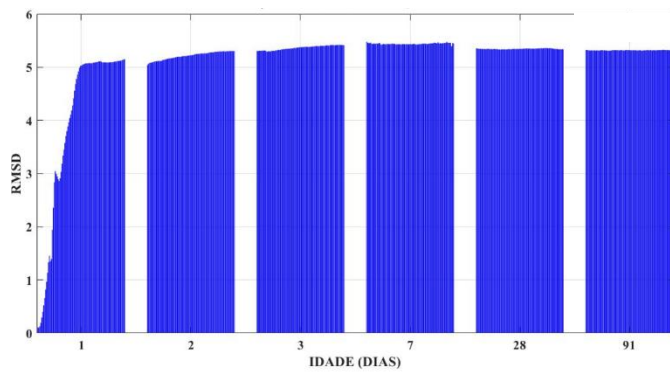
FAIXA 1: 50 kHz a 180 kHz



FAIXA 2: 180 kHz a 300 kHz

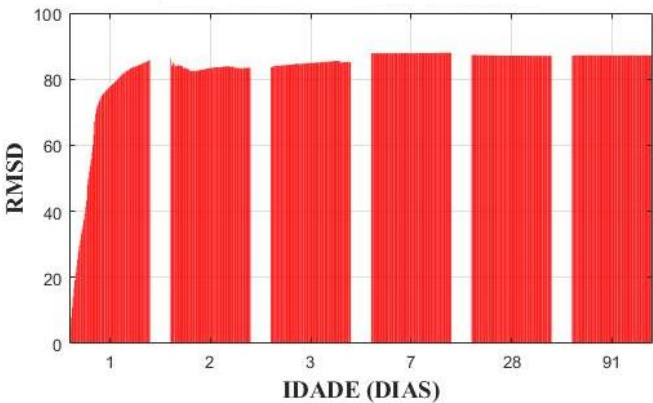
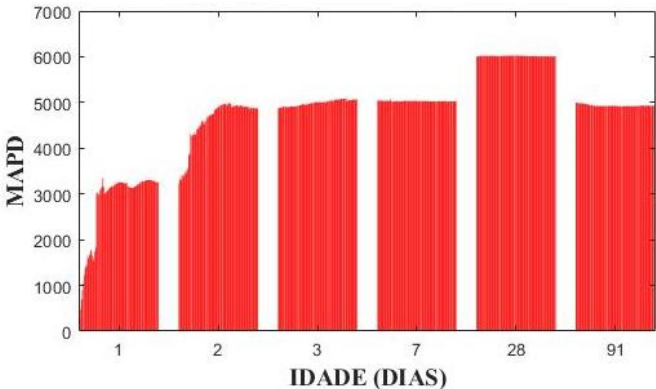
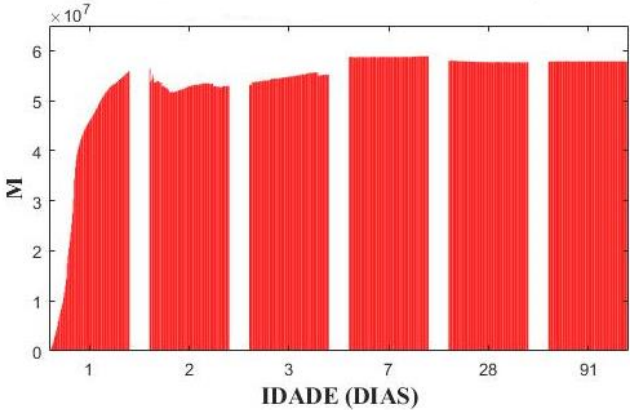
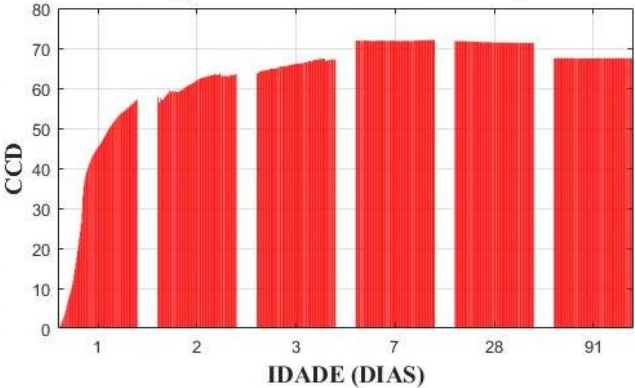
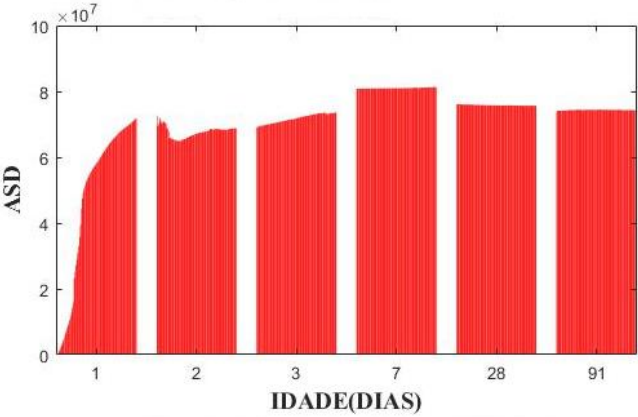


FAIXA 3: 300 kHz a 400 kHz

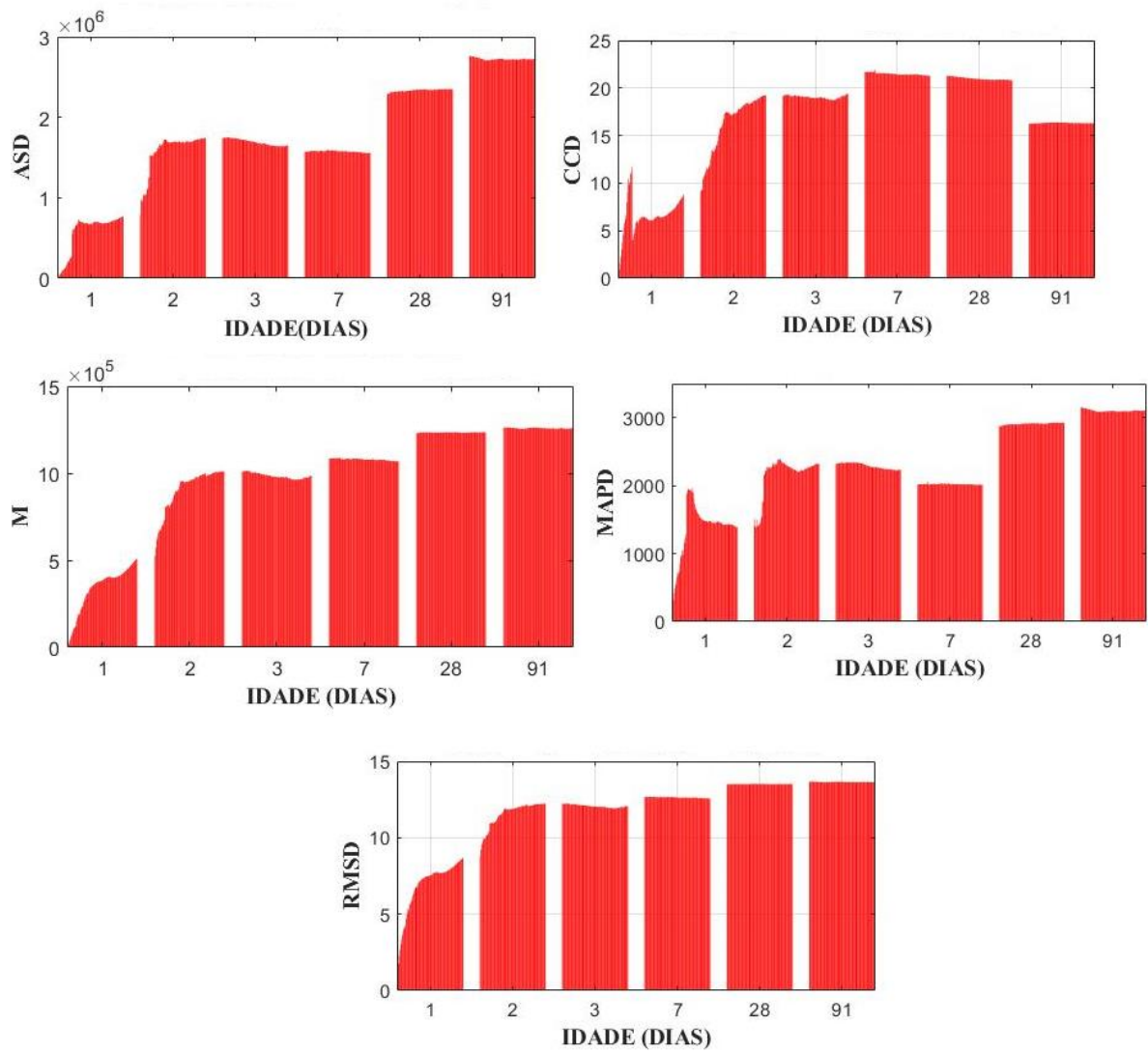


Traço B – CP III – PZTh

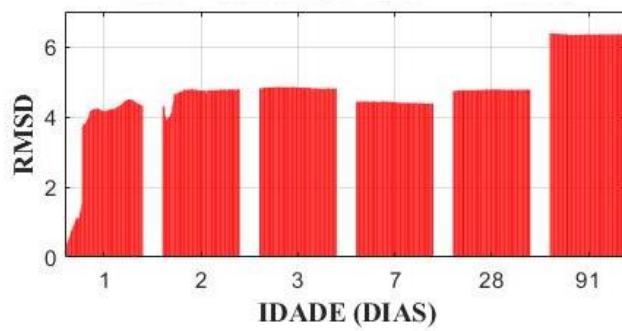
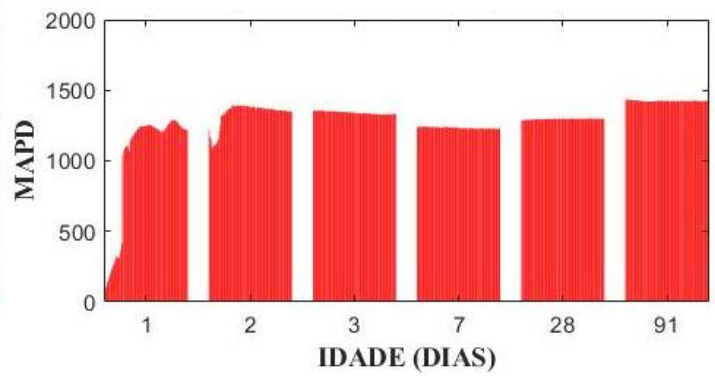
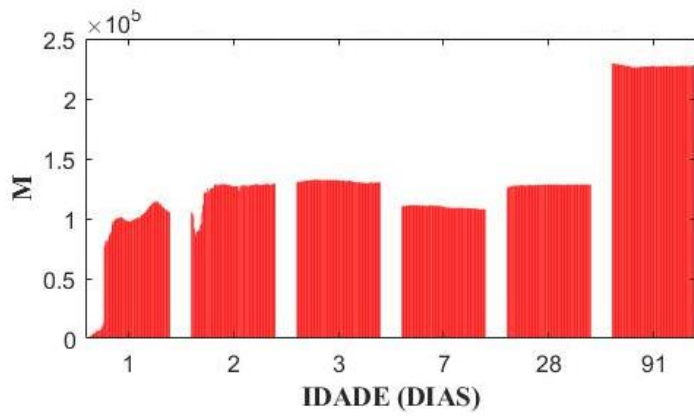
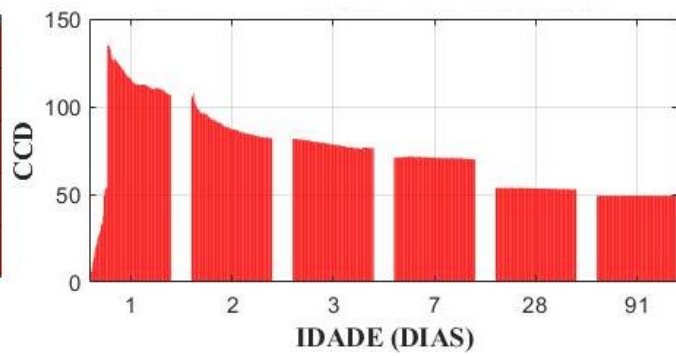
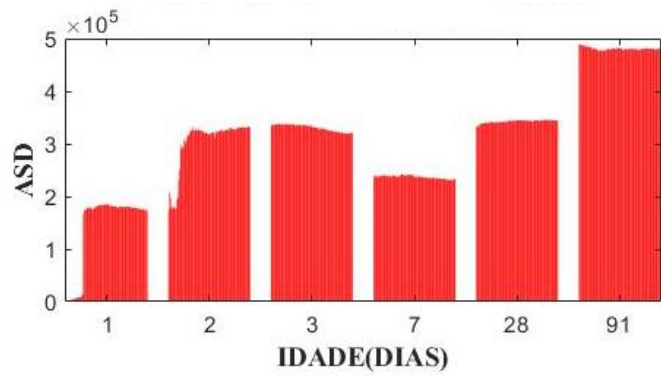
FAIXA 1: 50 kHz a 180 kHz



FAIXA 2: 180 kHz a 300 kHz

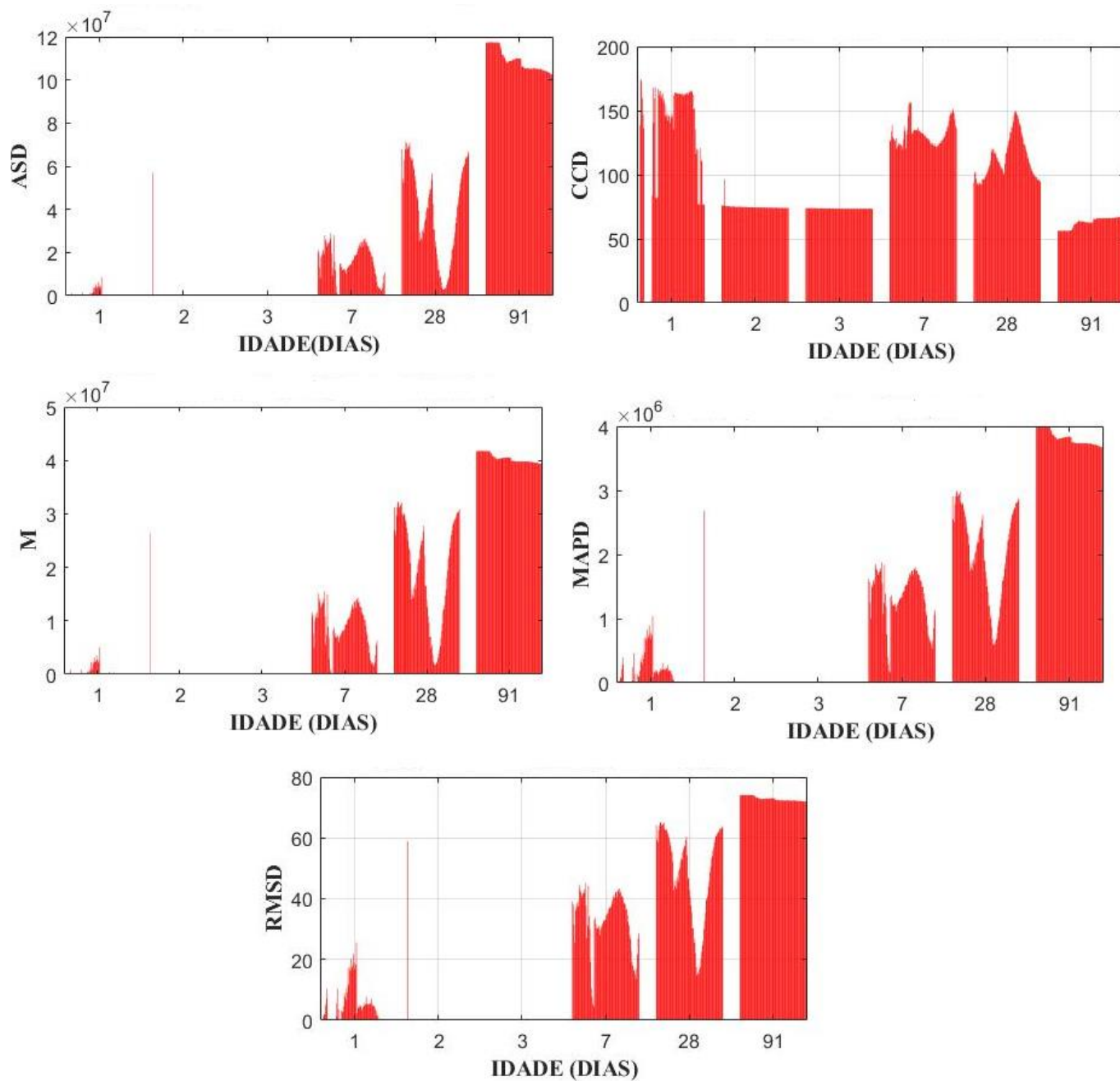


FAIXA 3: 300 kHz a 400 kHz

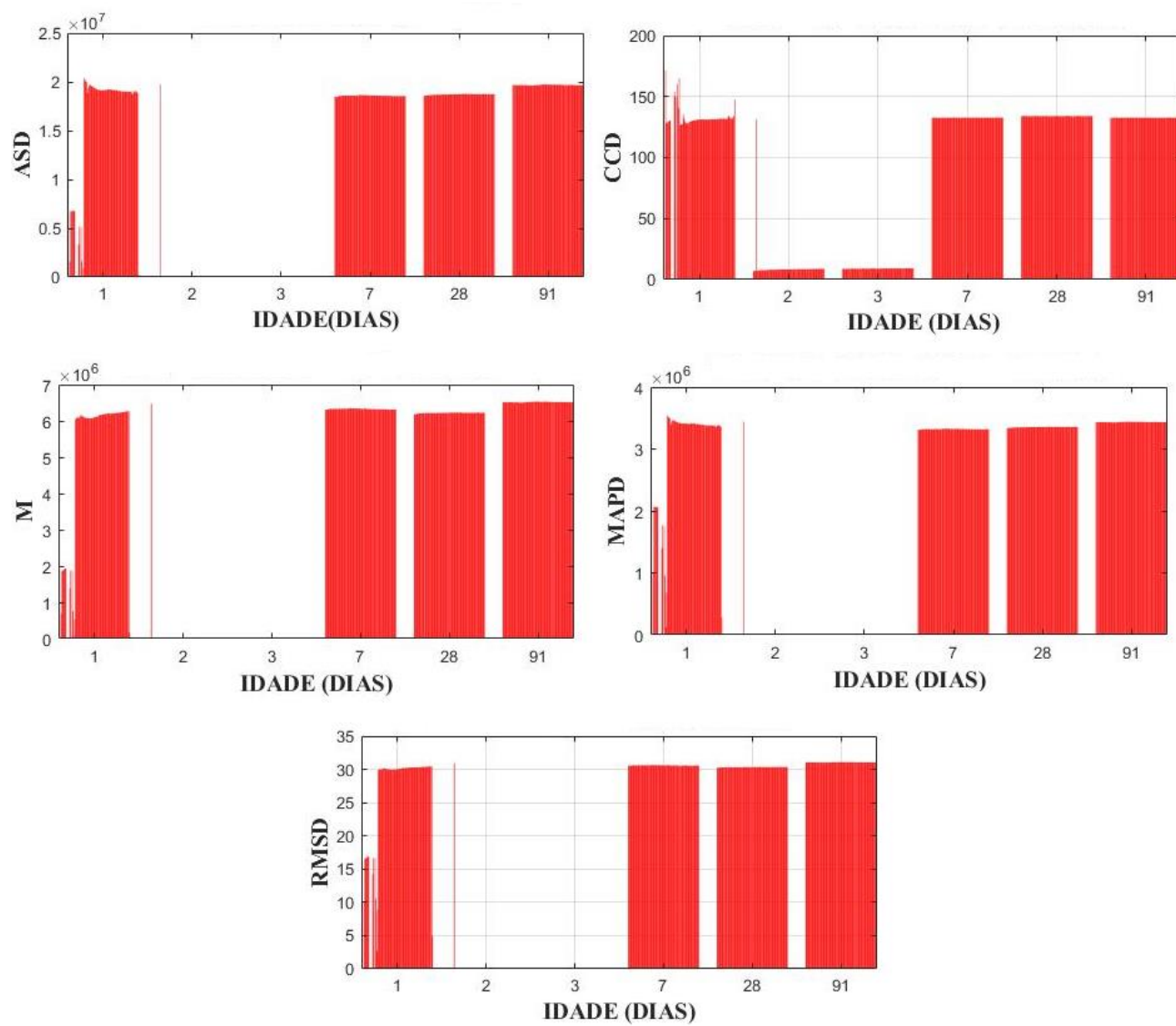


Trço B – CP III – PZTv

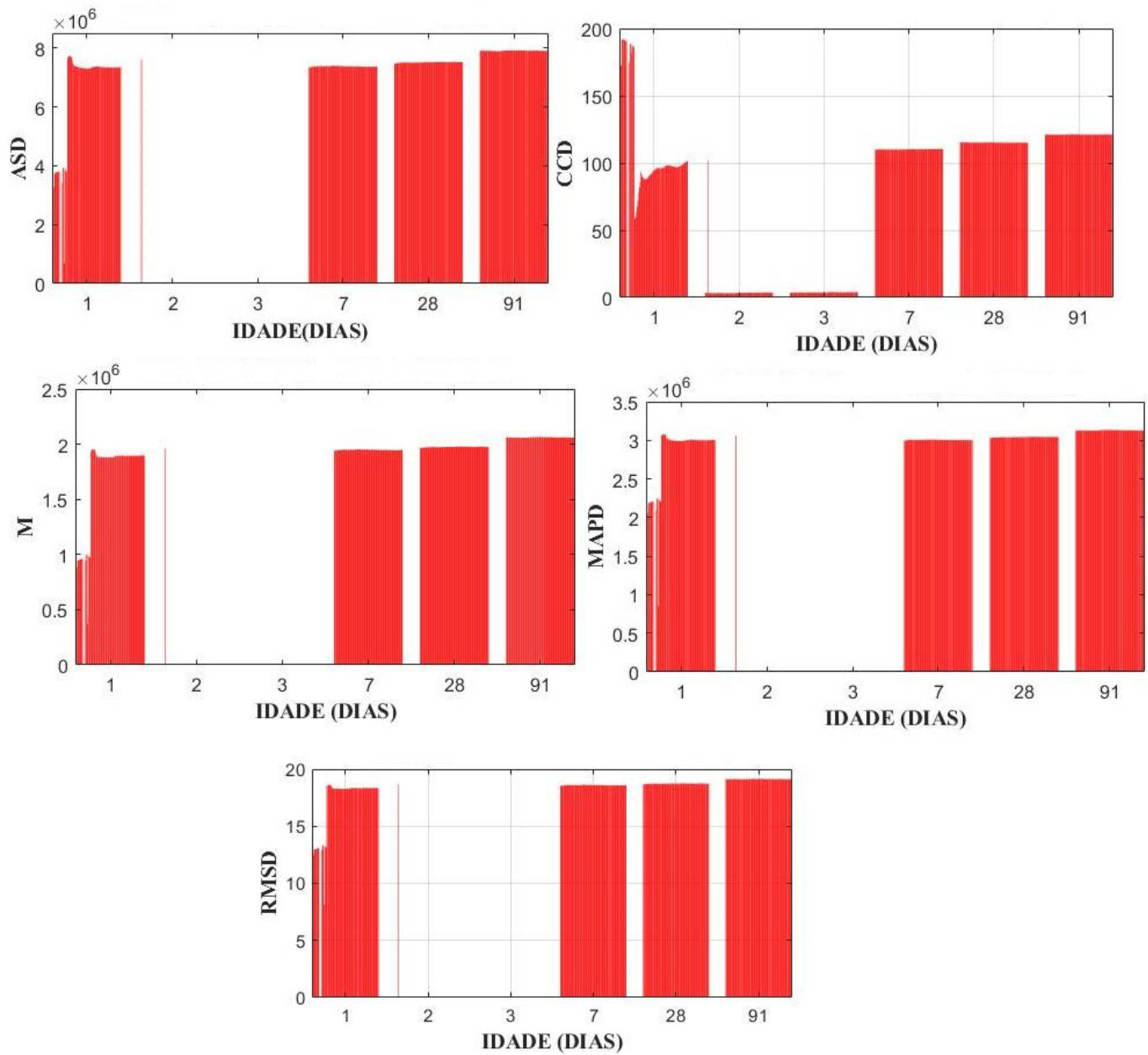
Faixa 1: 50 a 180 kHz



Faixa 2: 180 a 300 kHz

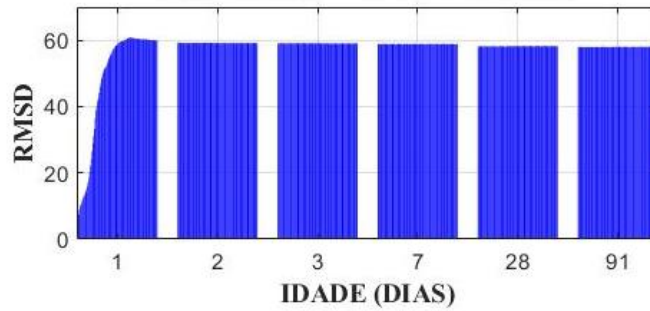
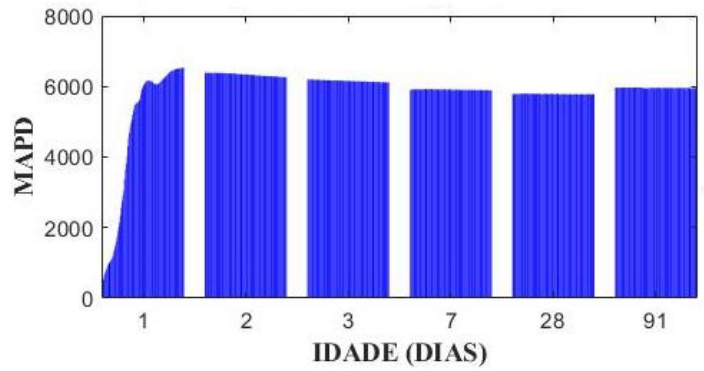
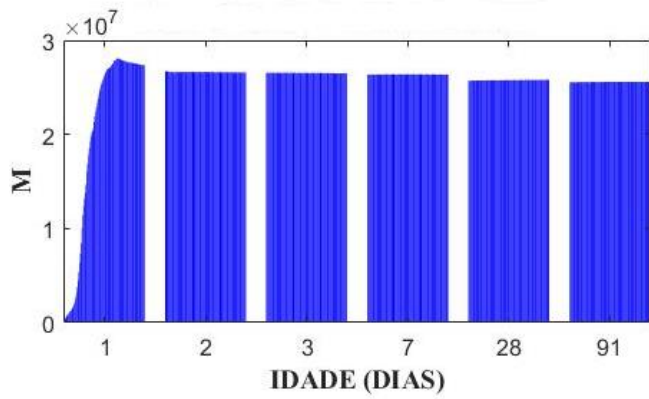
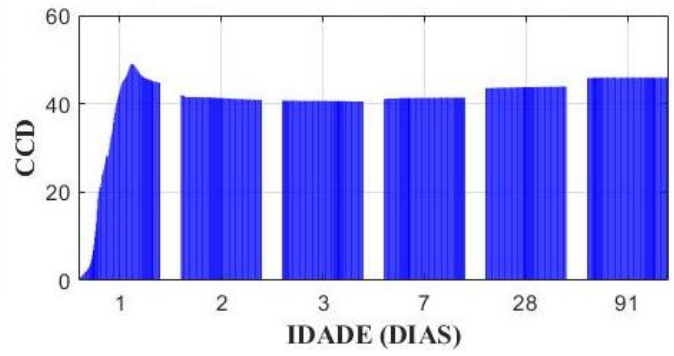
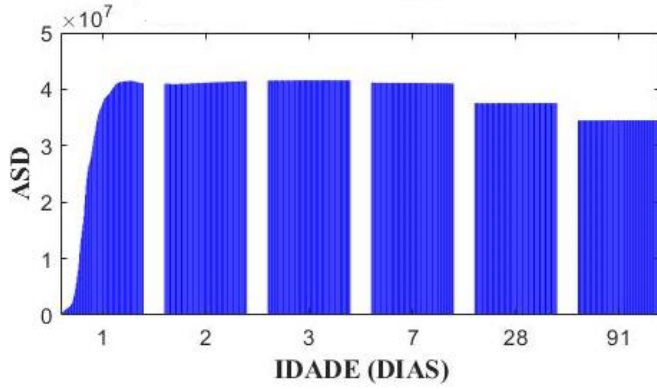


Faixa 3: 300 a 400 kHz

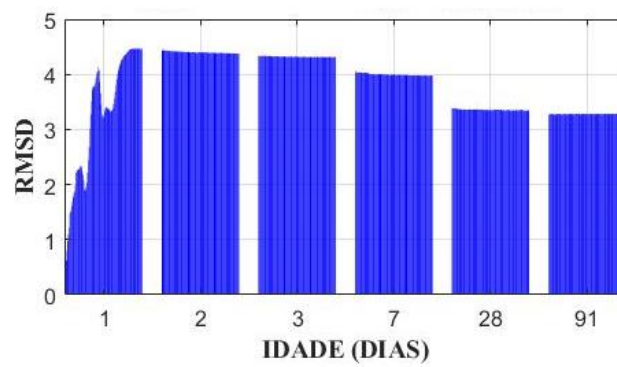
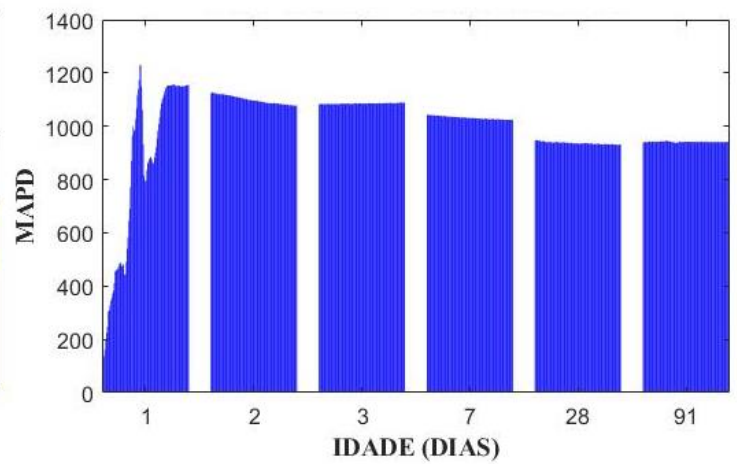
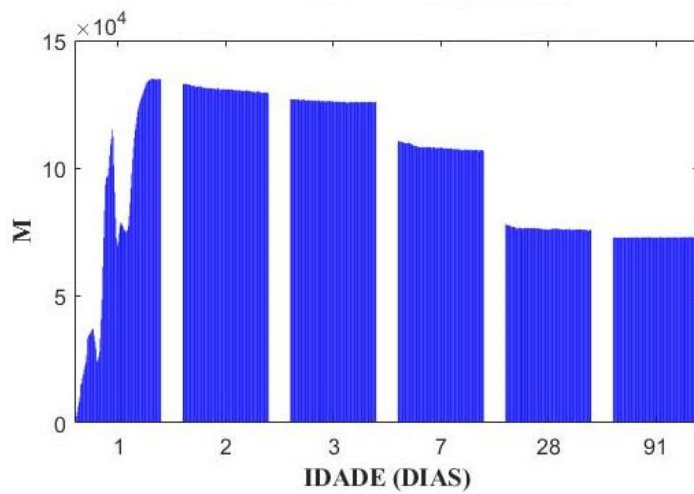
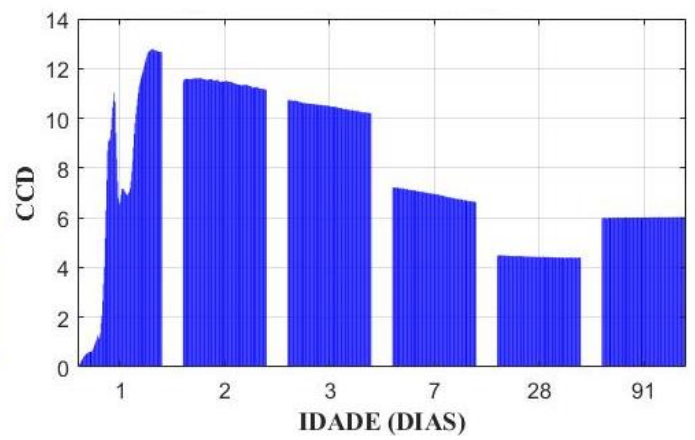
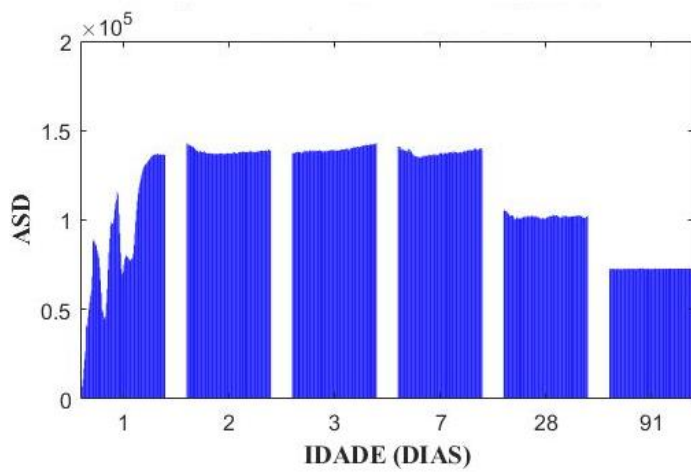


Trço B – CP V – PZTh

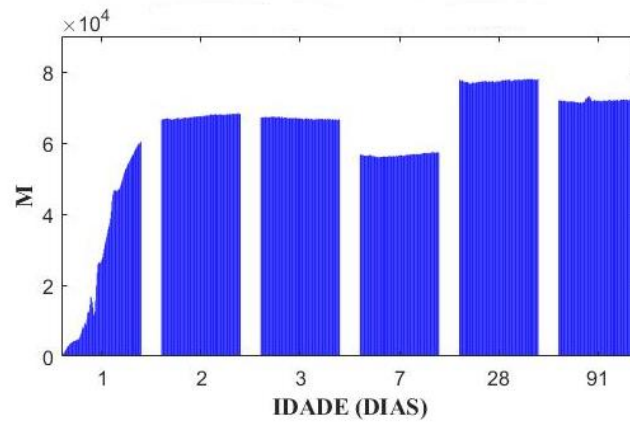
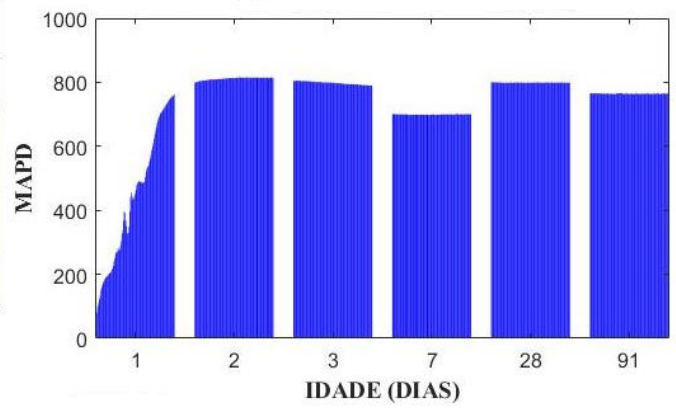
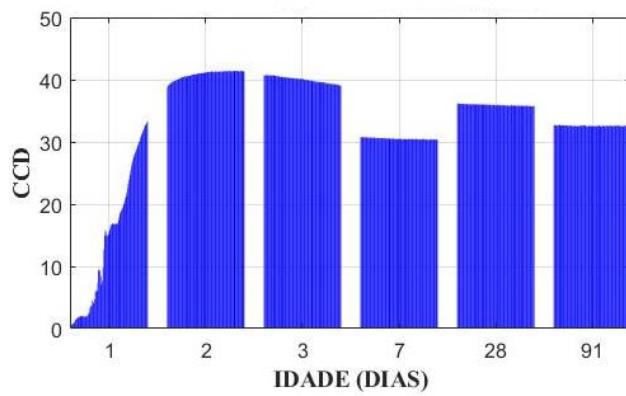
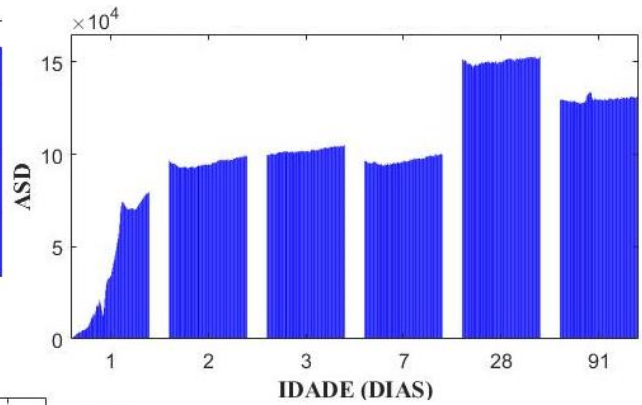
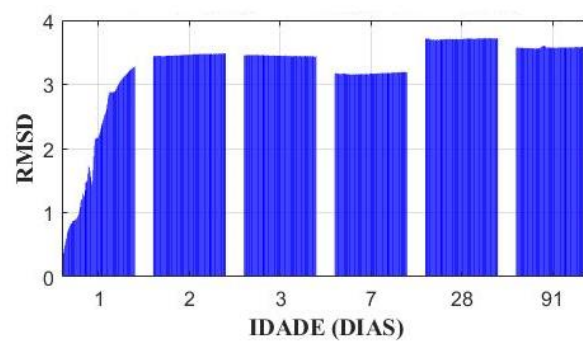
Faixa 1: 50 a 180 kHz



Faixa 2: 180 a 300 kHz

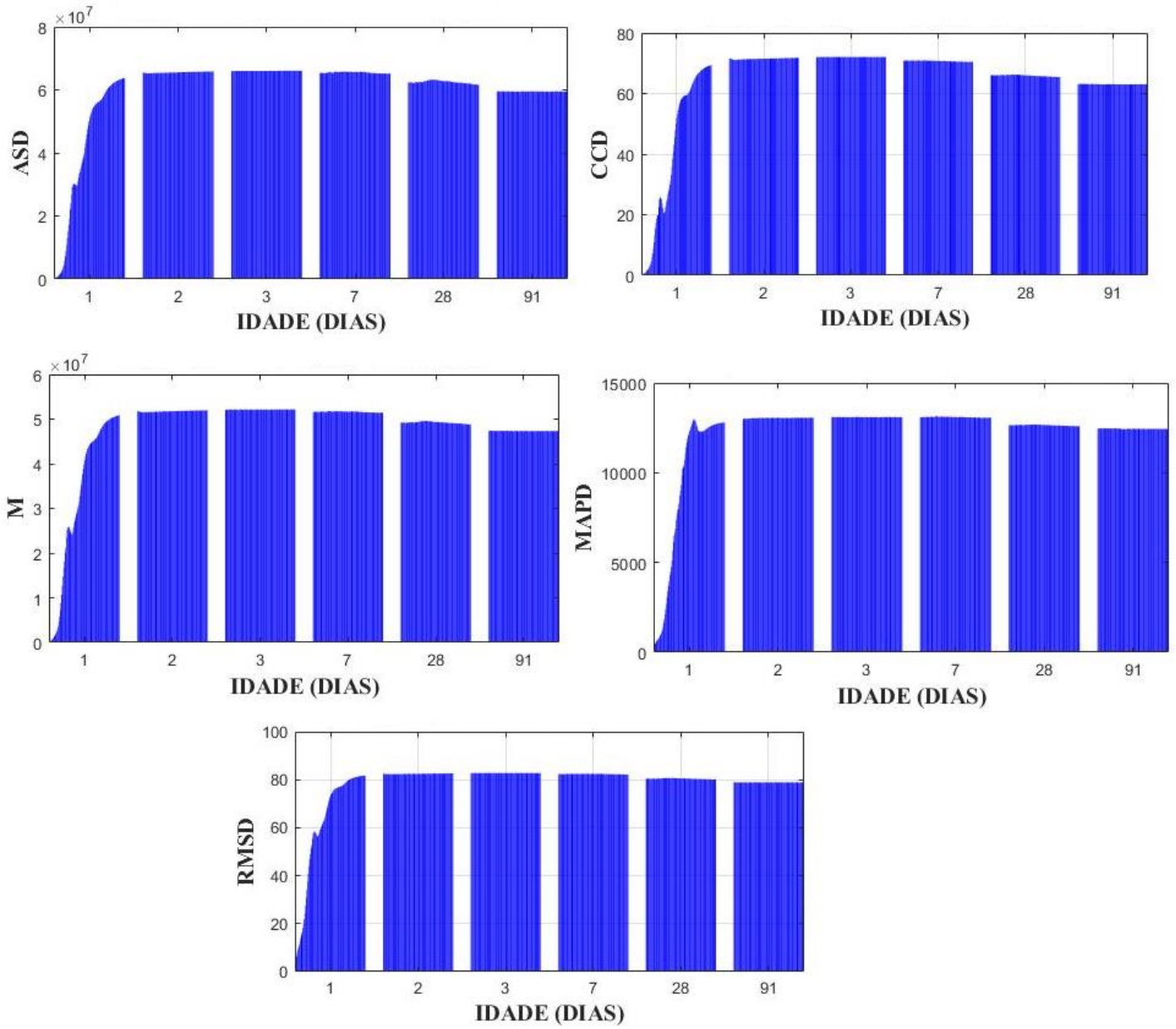


Faixa 3: 300 a 400 kHz

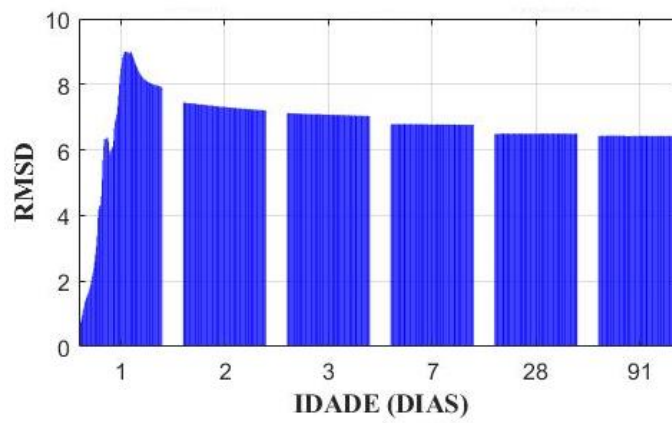
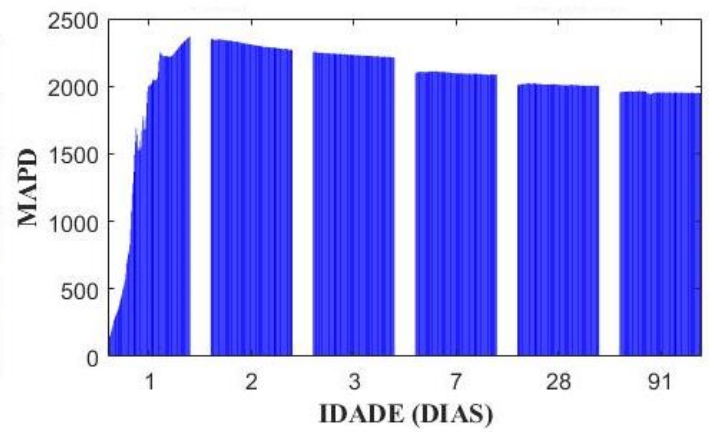
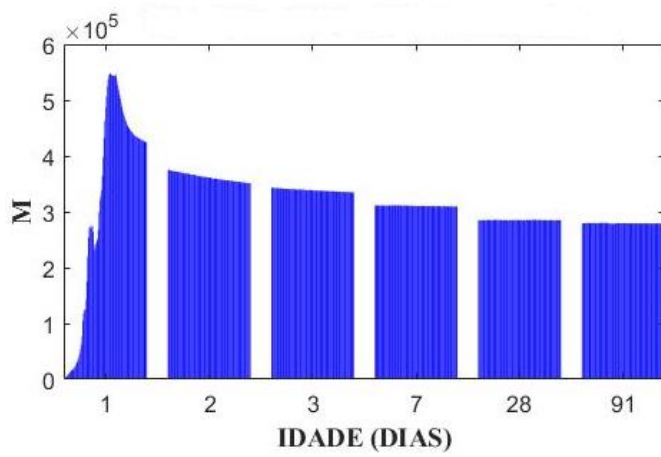
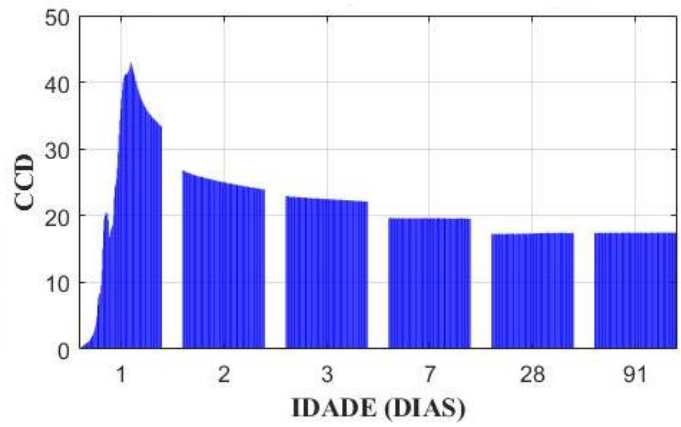
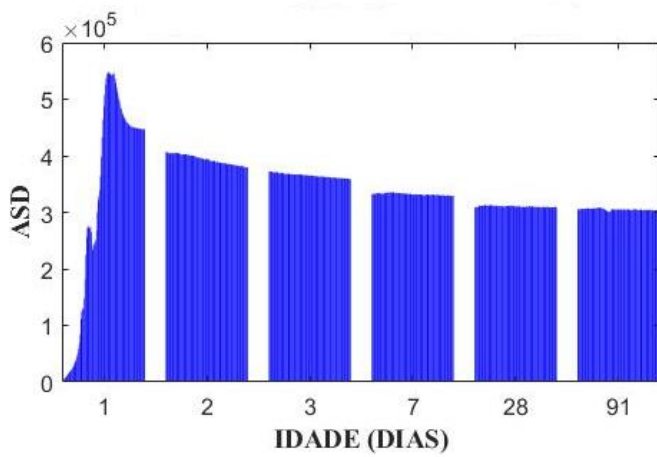


Trço B – CP V – PZTv

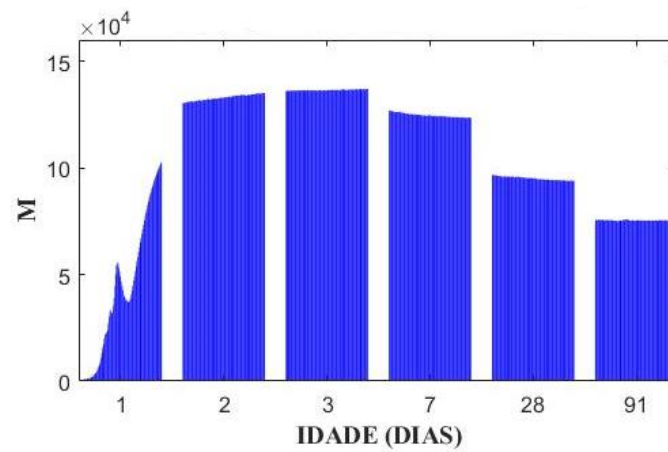
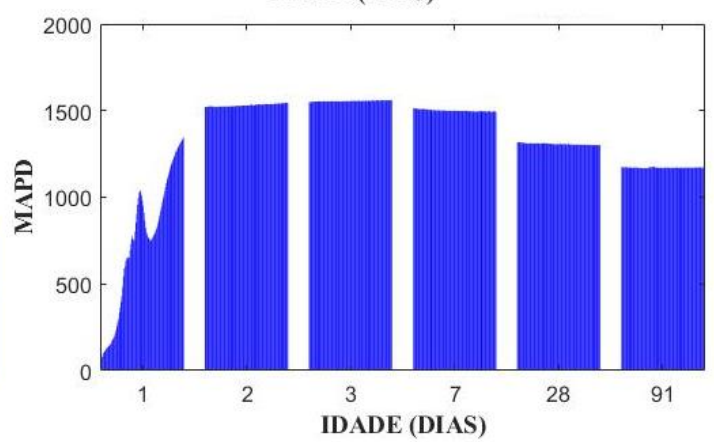
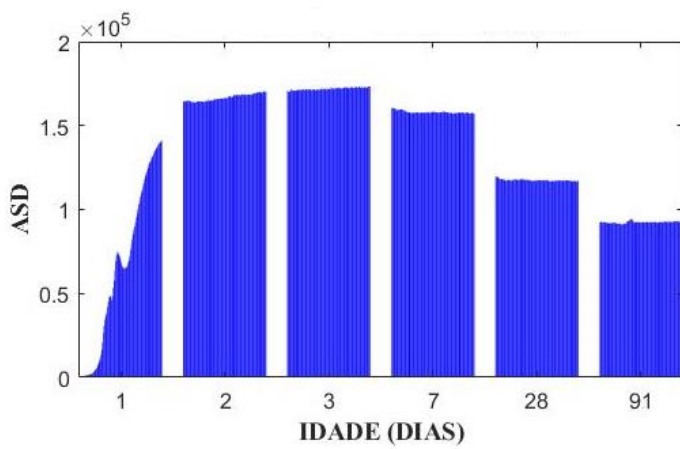
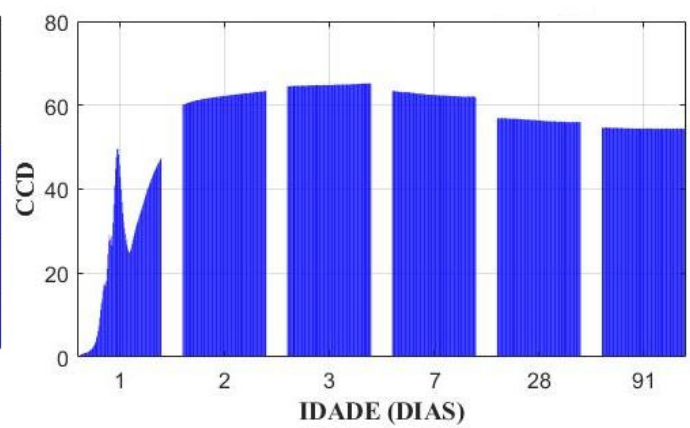
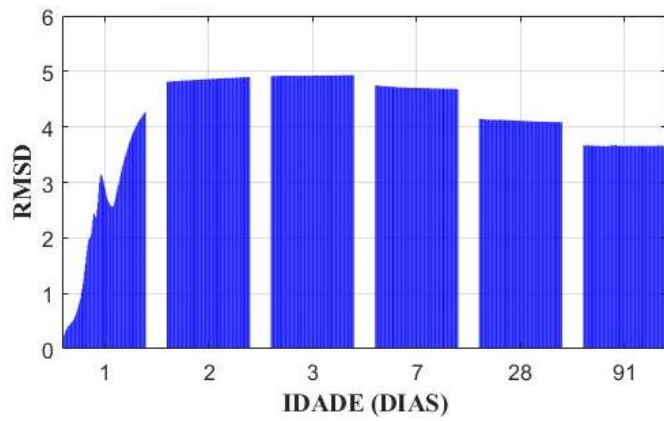
Faixa 1: 50 a 180 kHz



Faixa 2: 180 a 300 kHz



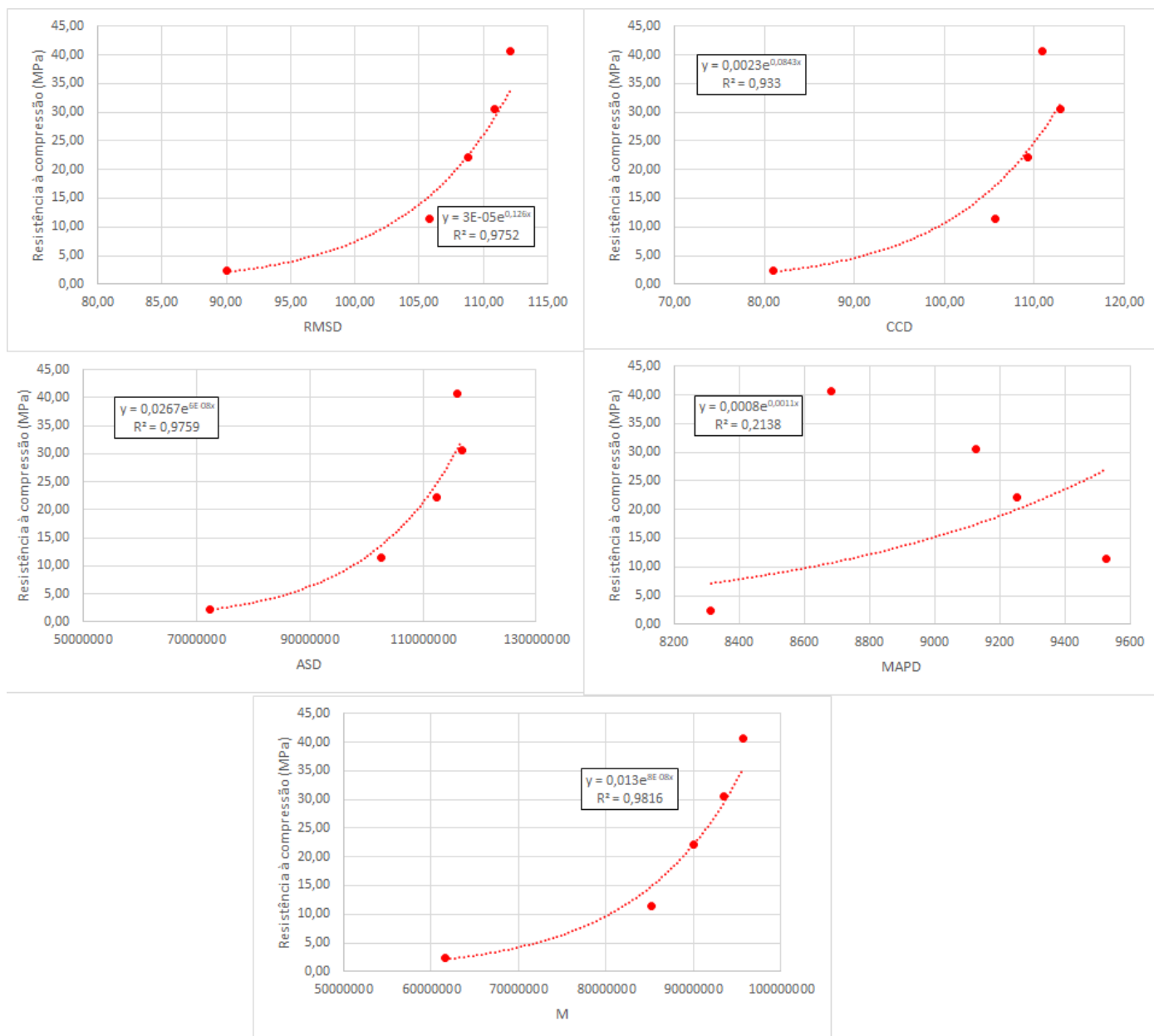
Faixa 3: 300 a 400 kHz



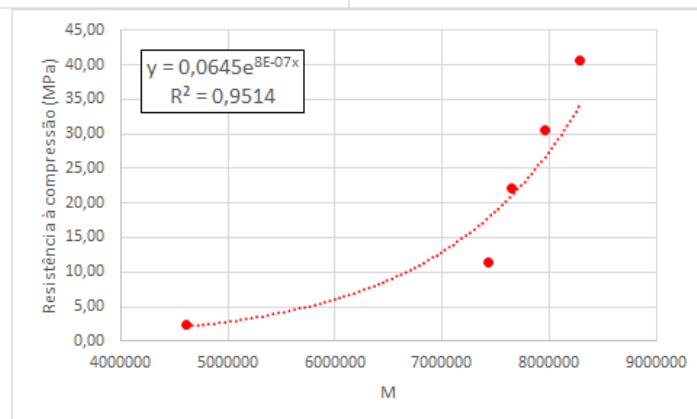
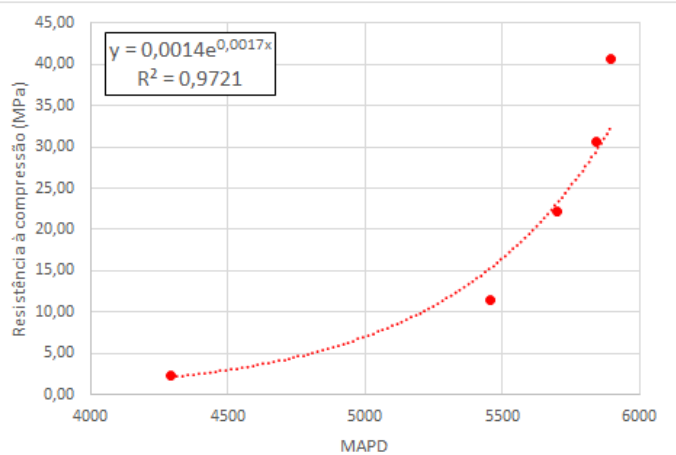
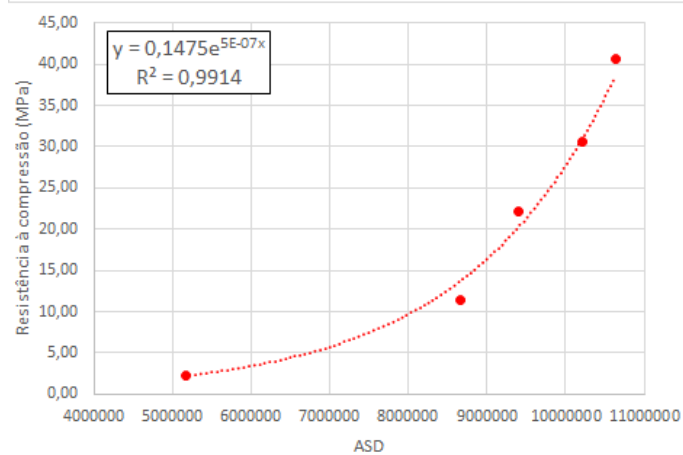
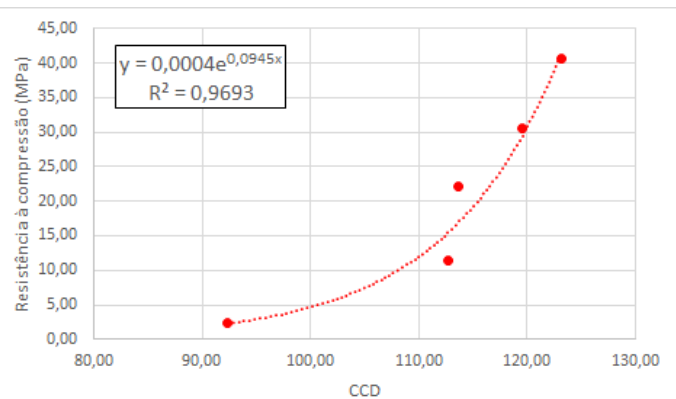
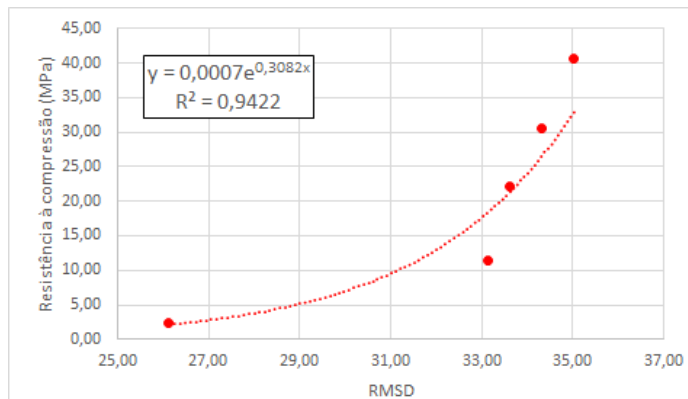
APÊNDICE E – CURVAS DE CORRELAÇÃO

Traço A – CP III – PZTh

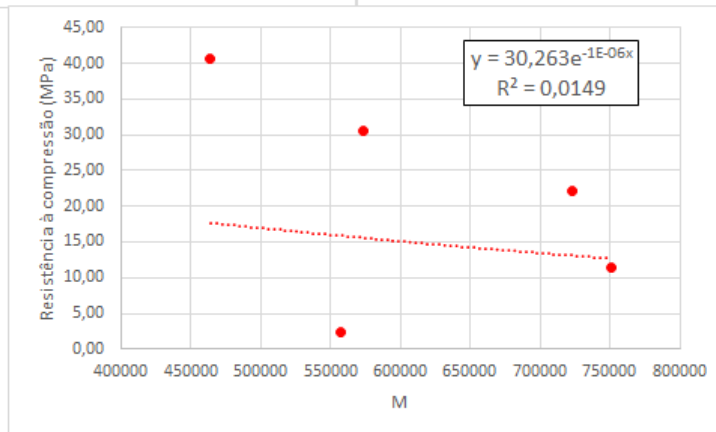
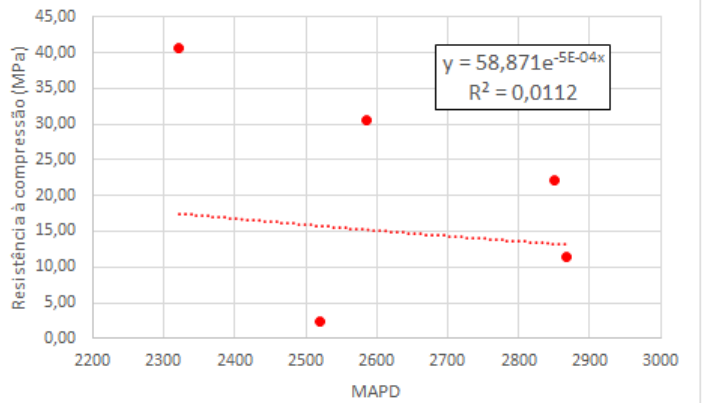
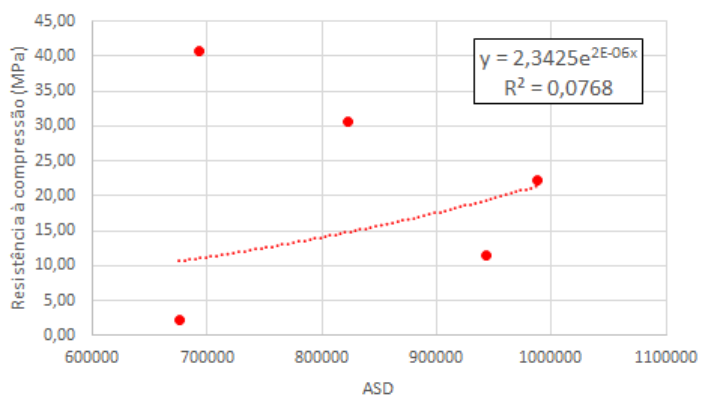
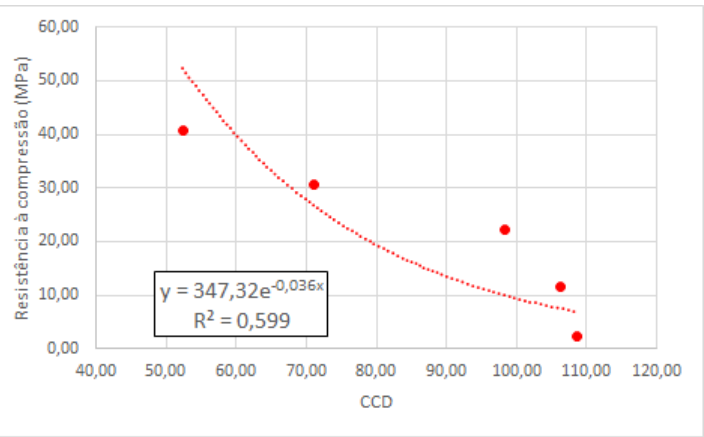
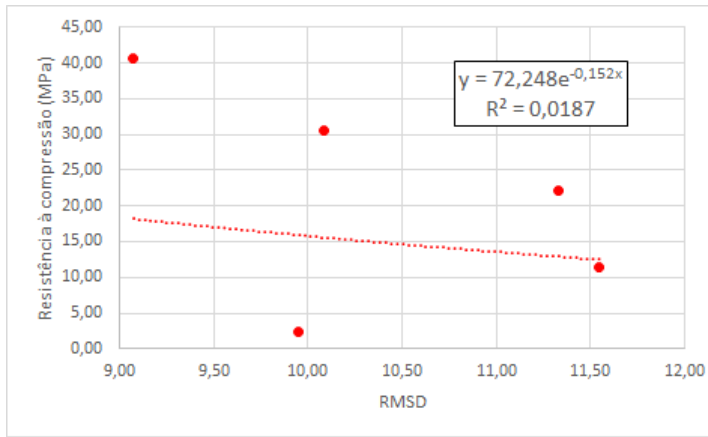
Faixa 1: 50 a 180 kHz



Faixa 2: 180 a 300 kHz

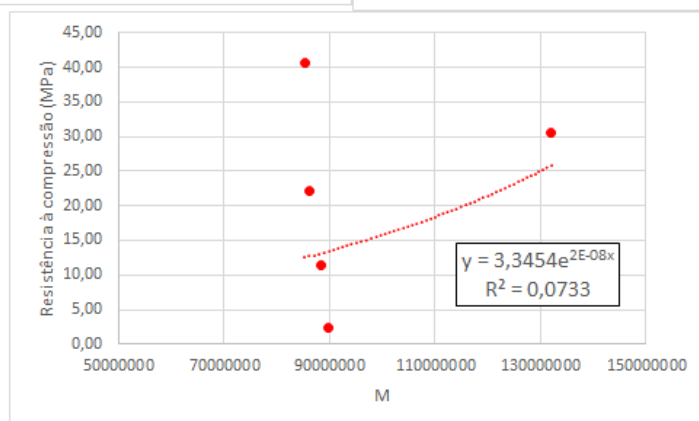
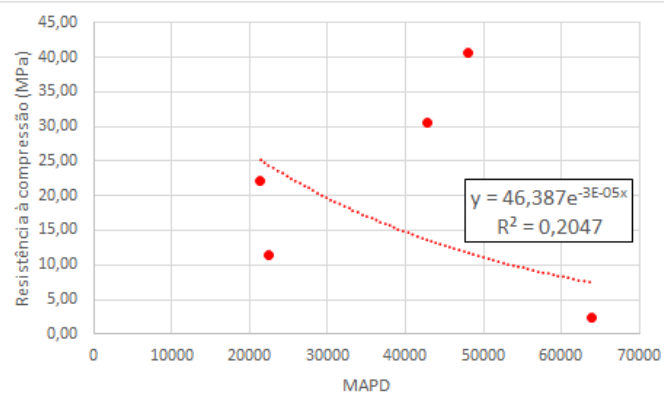
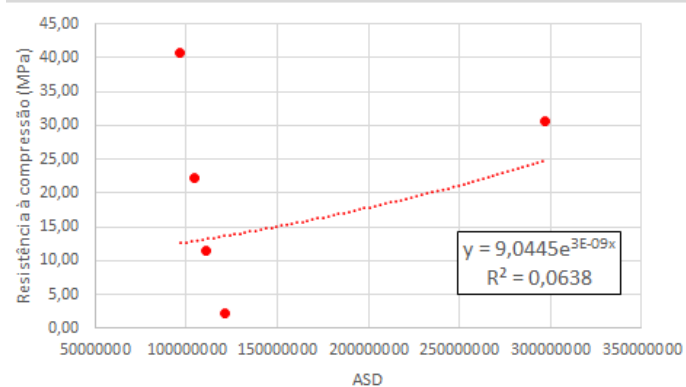
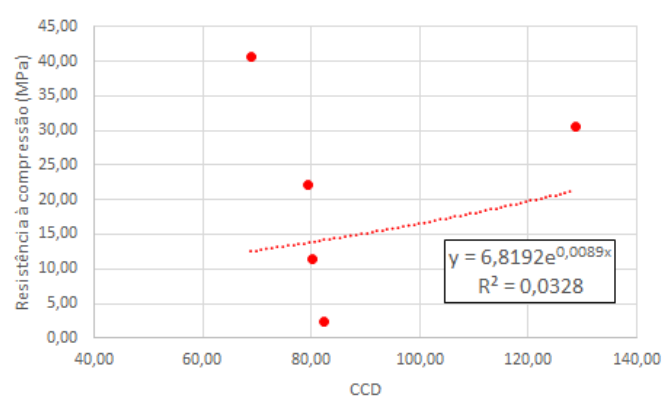
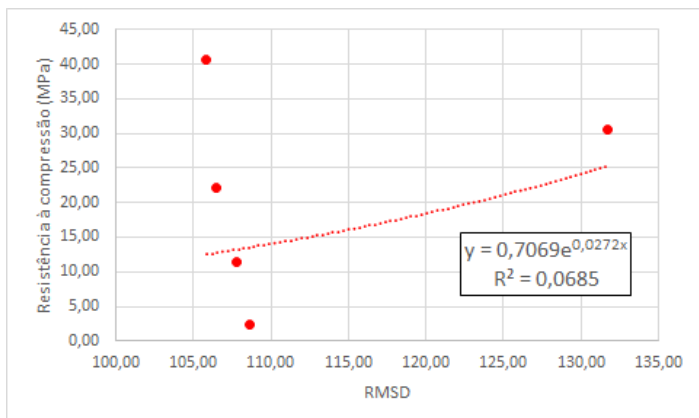


Faixa 3: 300 a 400 kHz

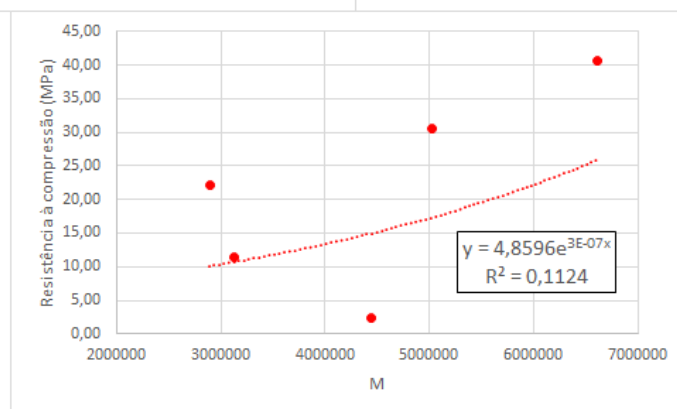
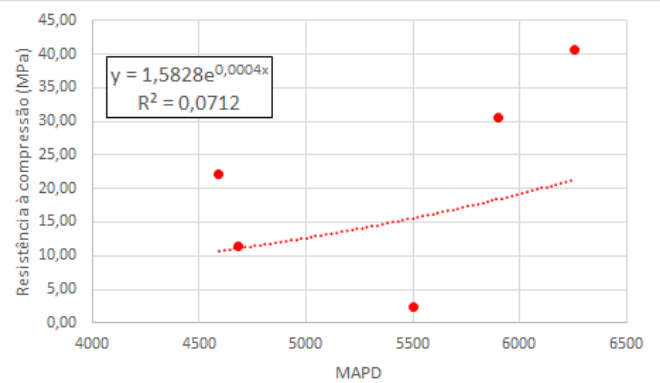
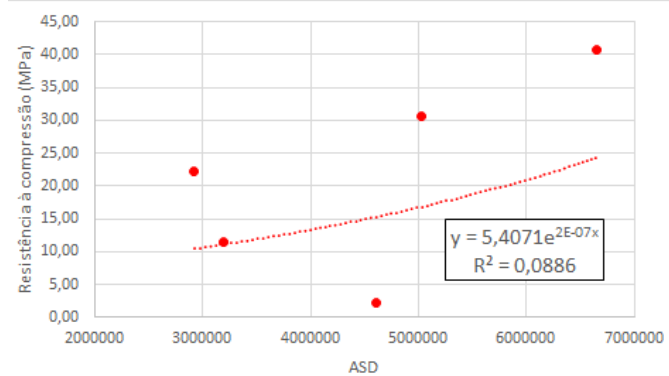
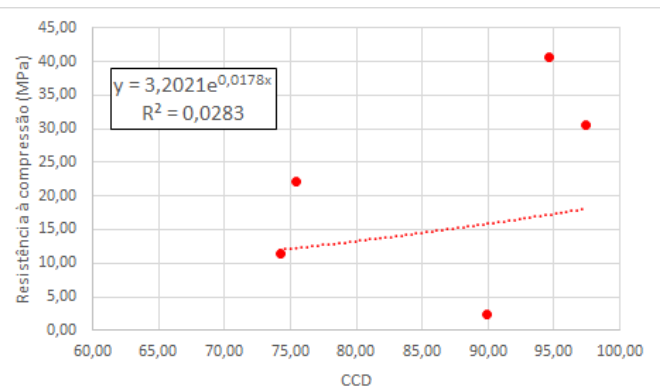
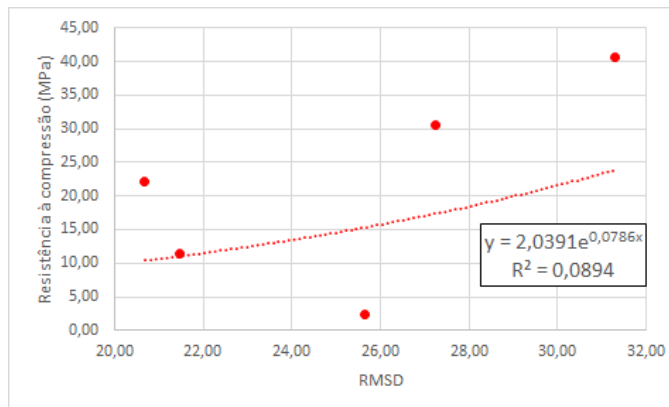


Traço A – CP III – PZTv

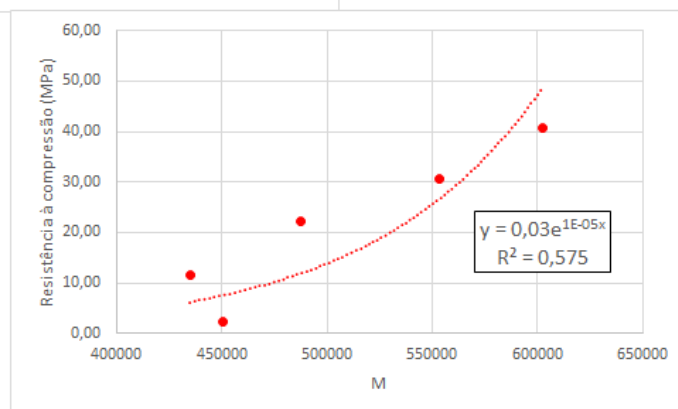
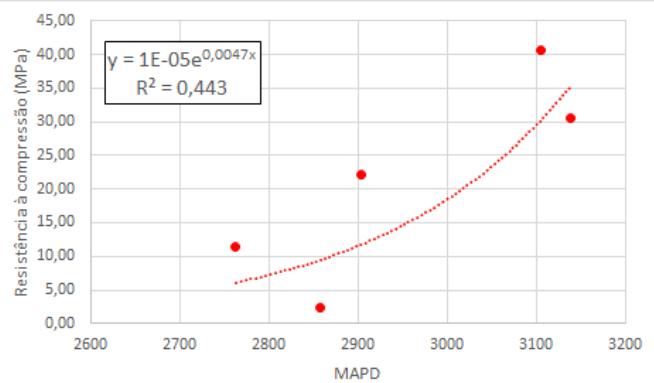
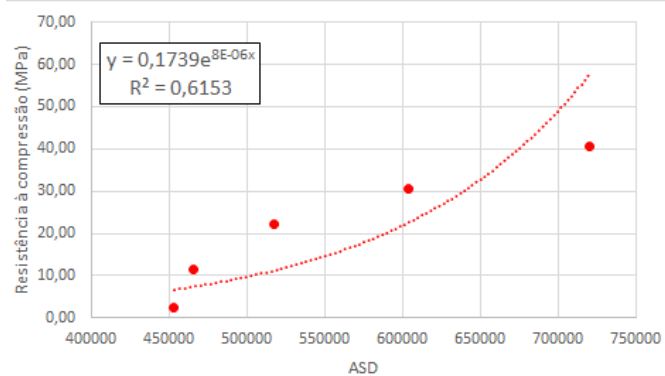
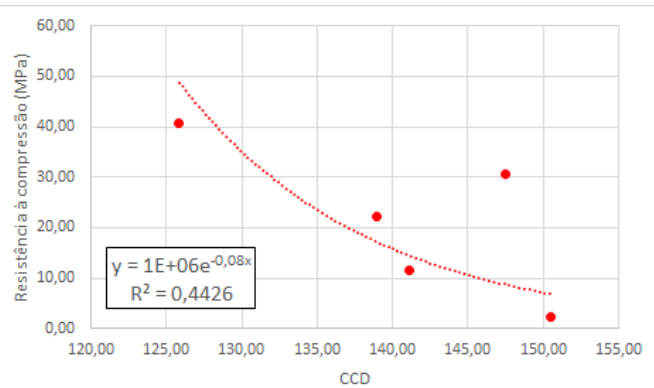
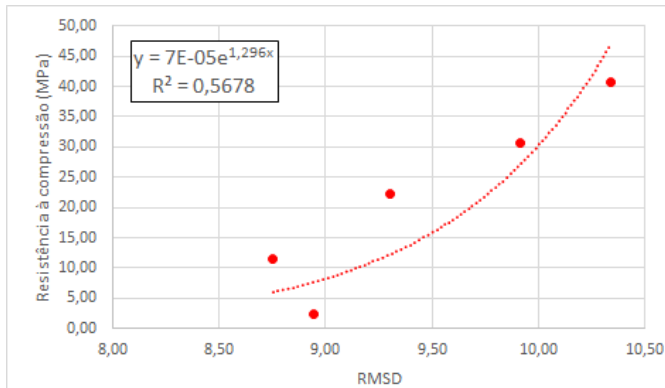
Faixa 1: 50 a 180 kHz



Faixa 2: 180 a 300 kHz

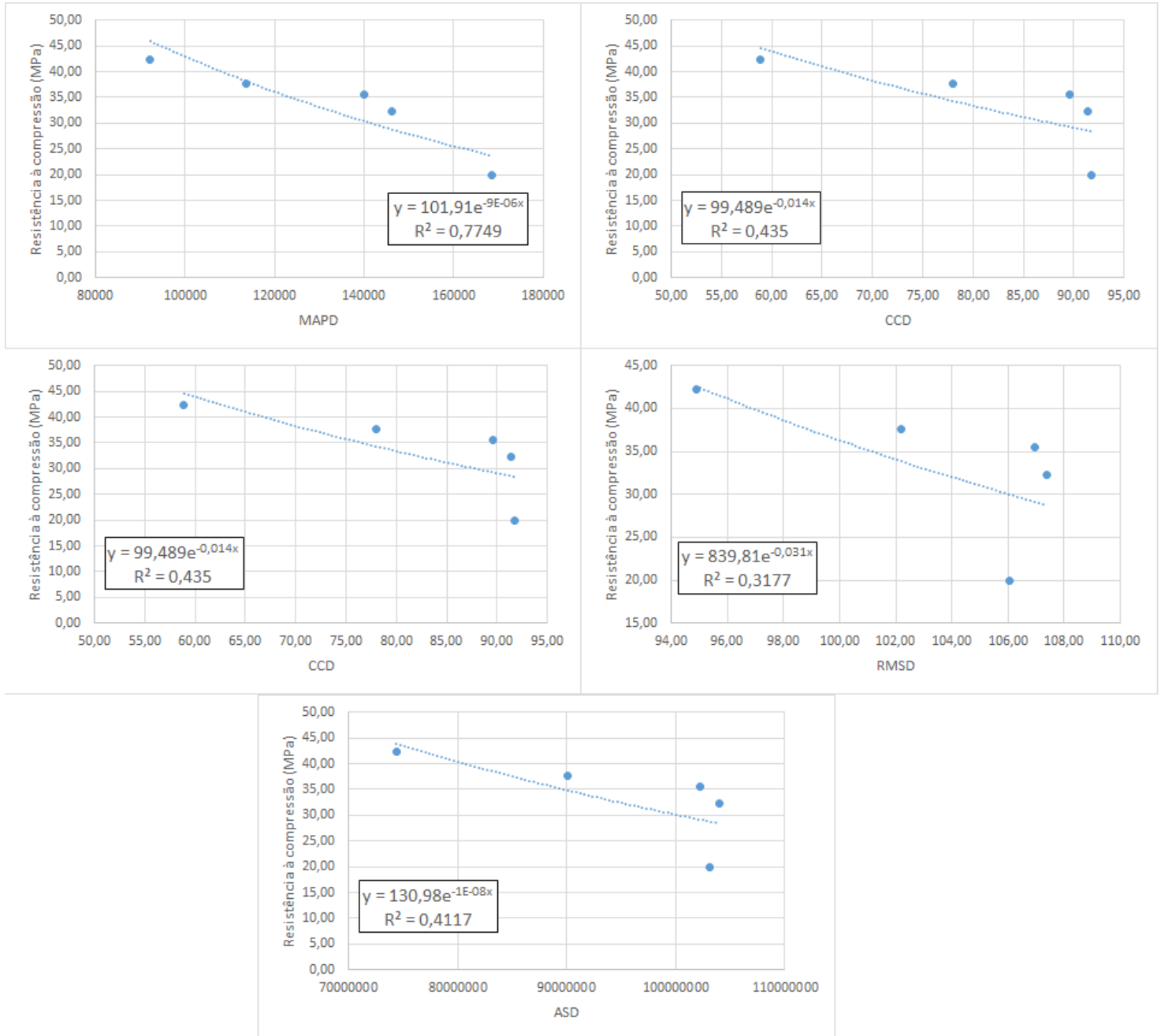


Faixa 3: 300 a 400 kHz

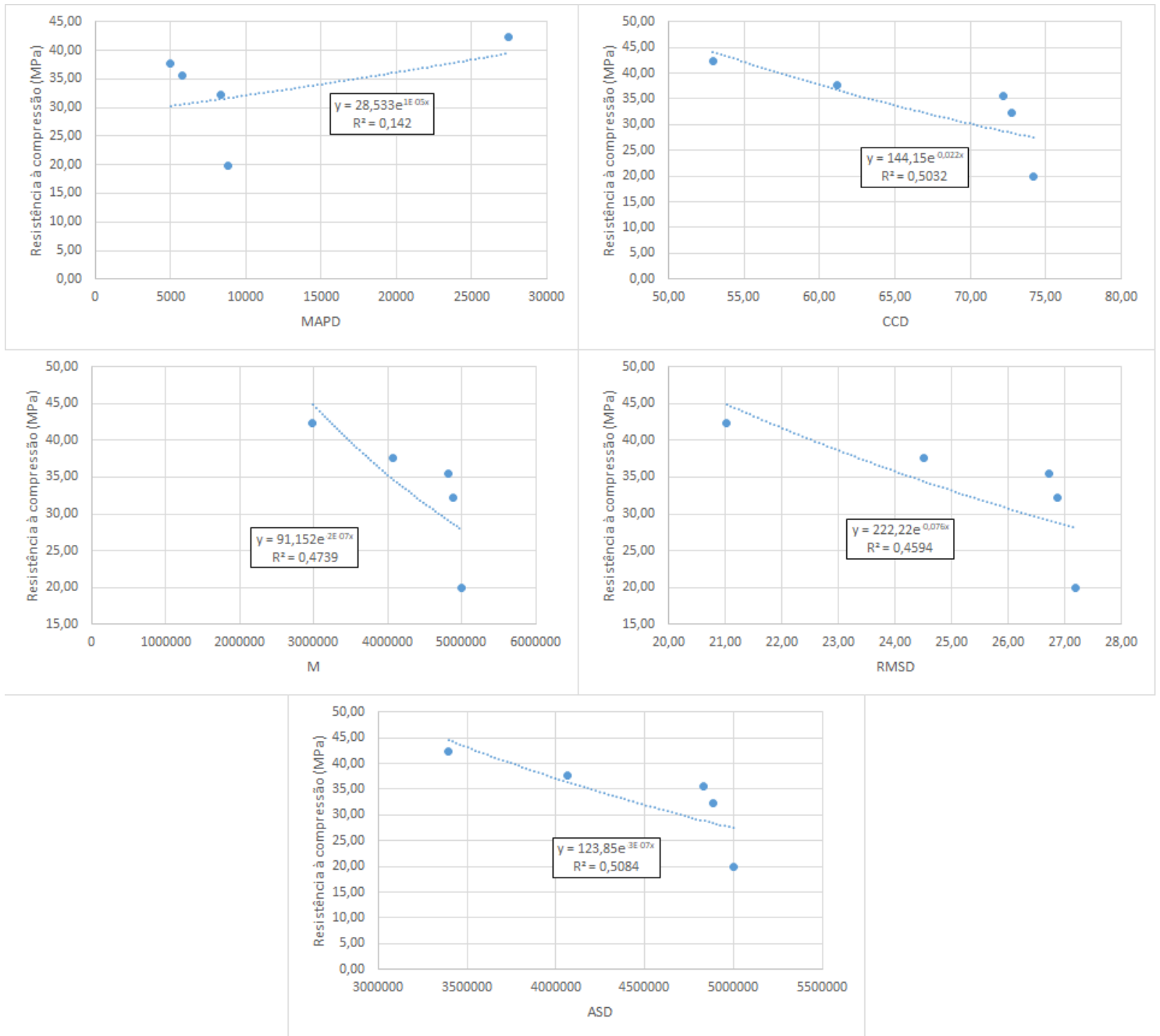


Traço A – CP V – PZTh

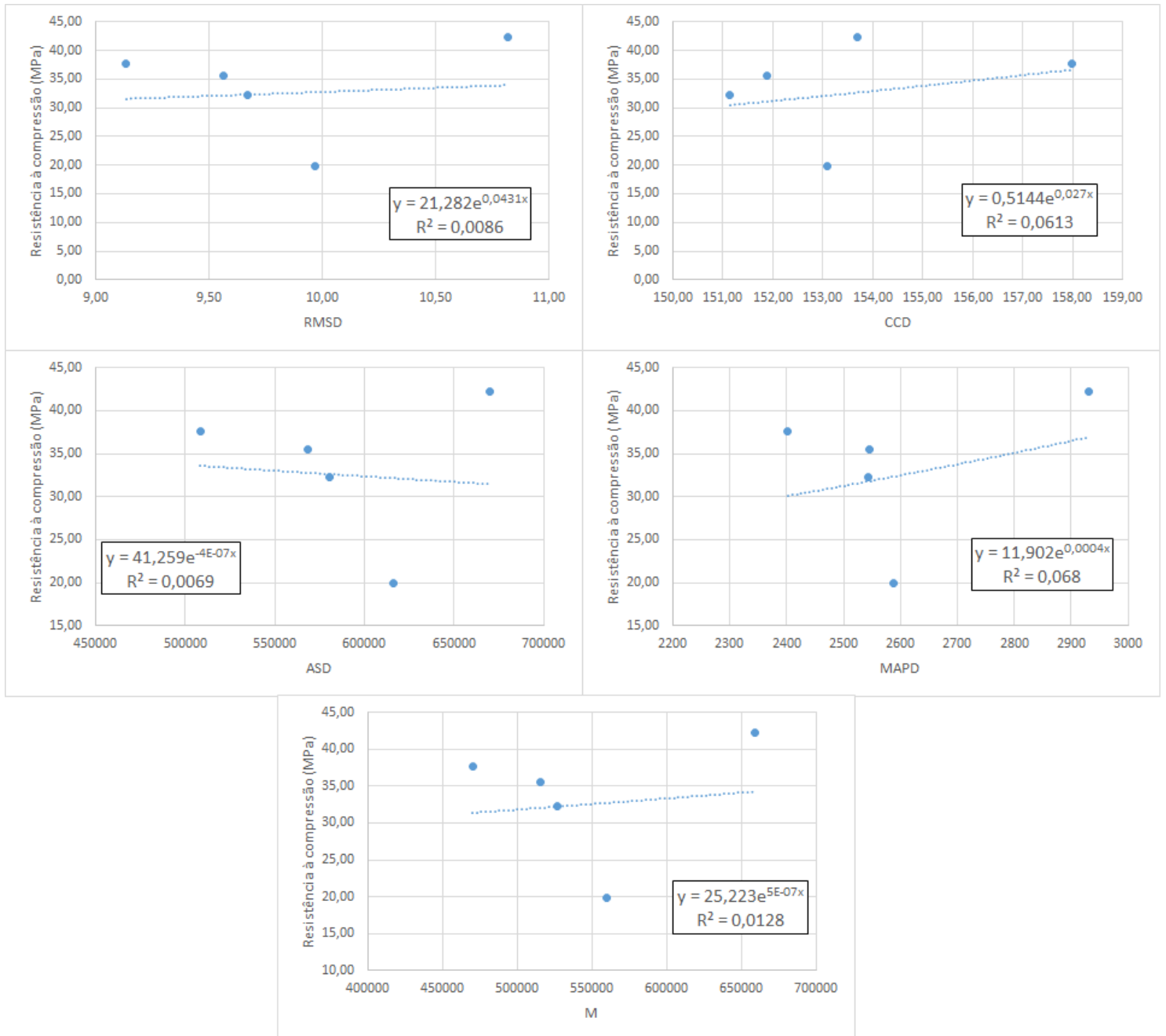
Faixa 1: 50 a 180 kHz



Faixa 2: 180 a 300 kHz

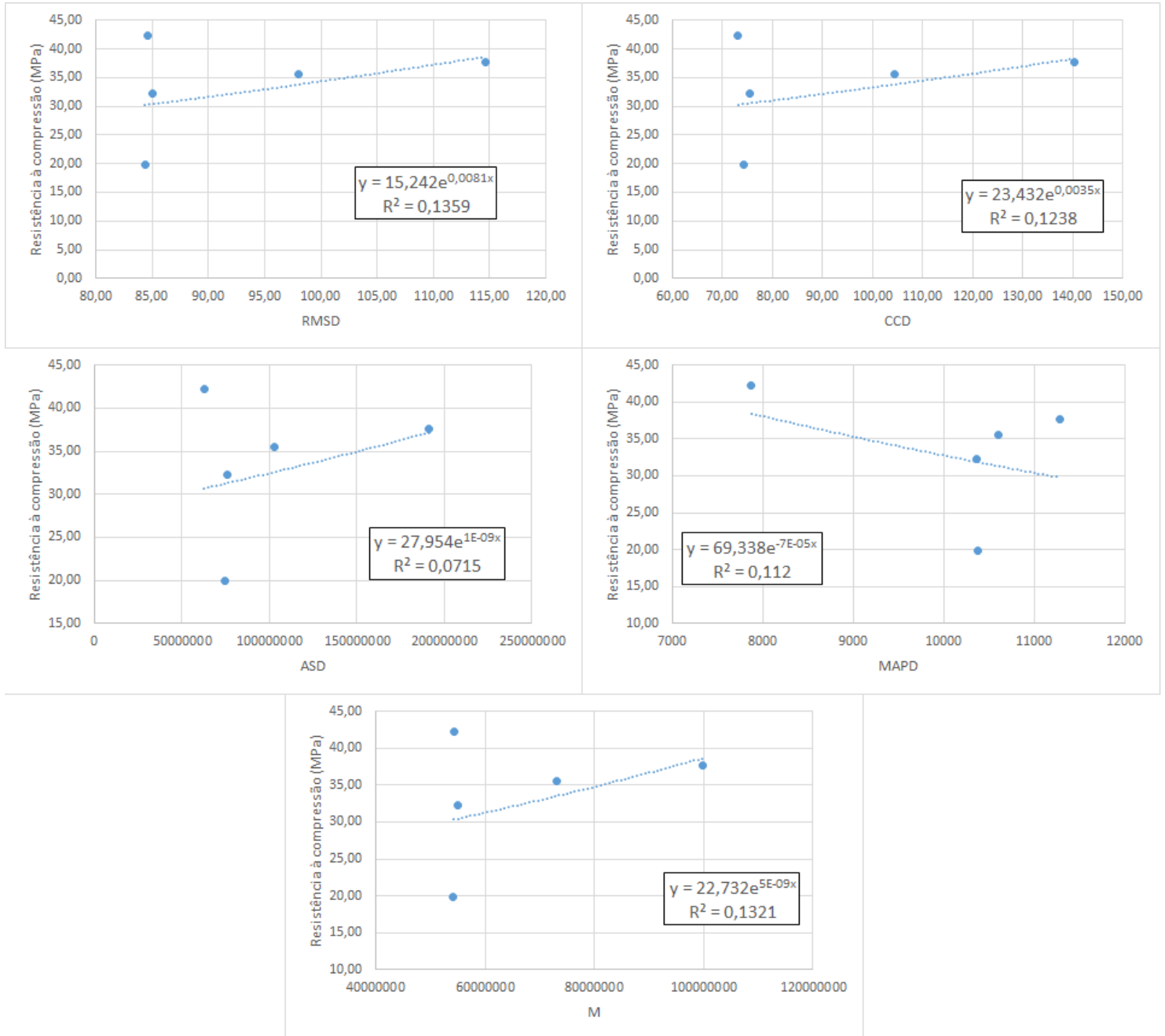


Faixa 3: 300 a 400 kHz

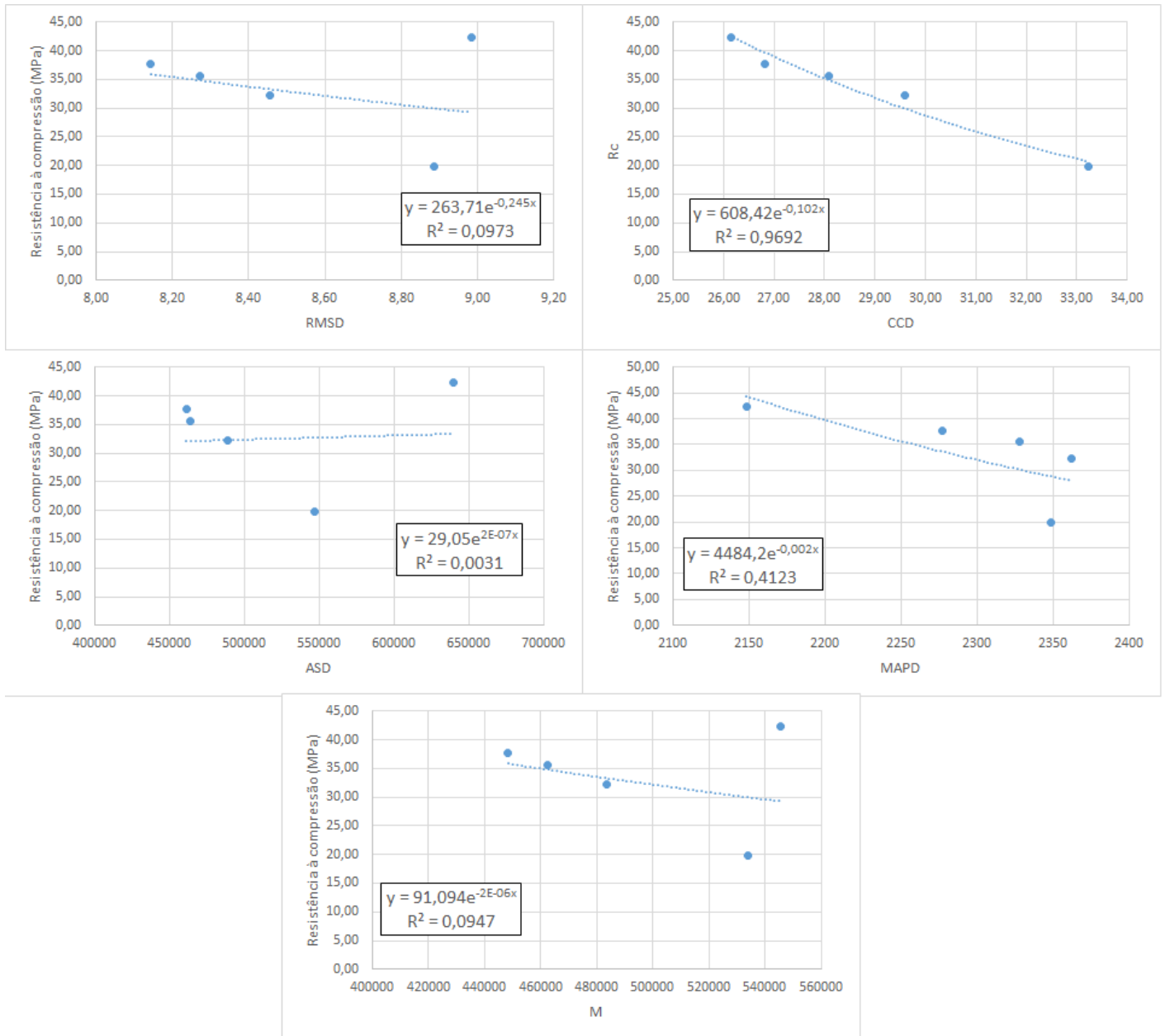


Traço A – CP V – PZTv

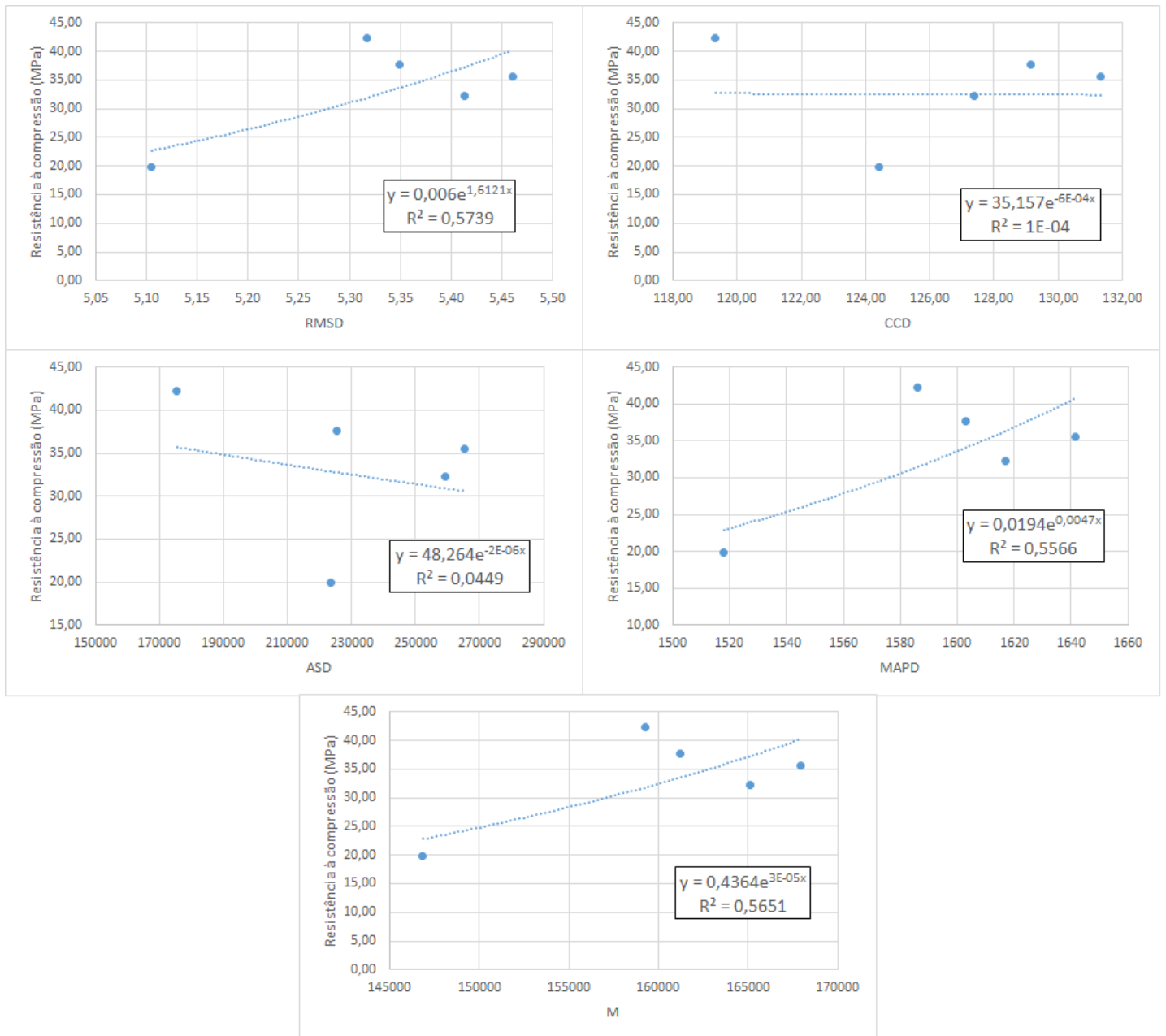
Faixa 1: 50 a 180 kHz



Faixa 2: 180 a 300 kHz

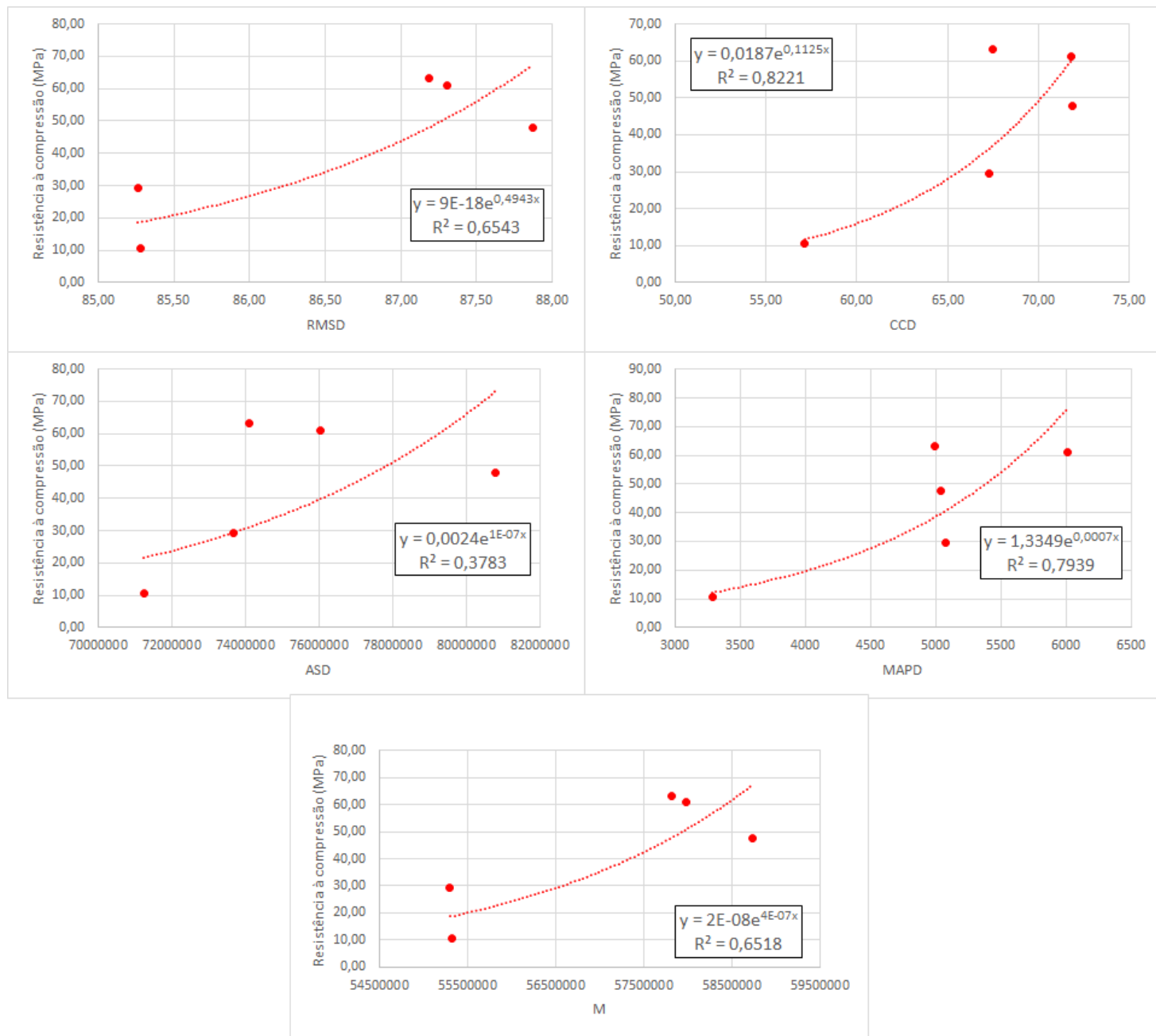


Faixa 3: 300 a 400 kHz

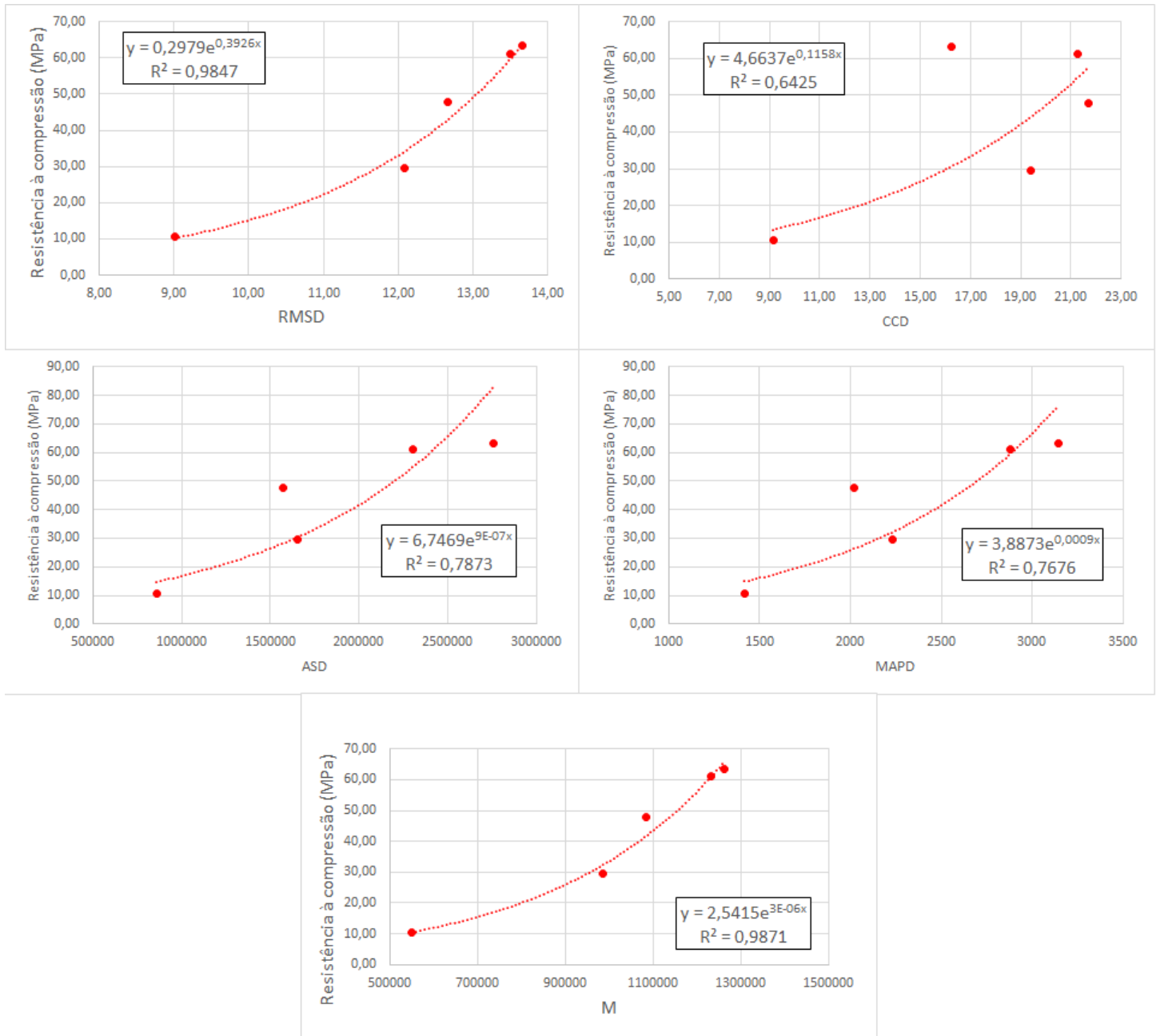


Traço B – CP III – PZTh

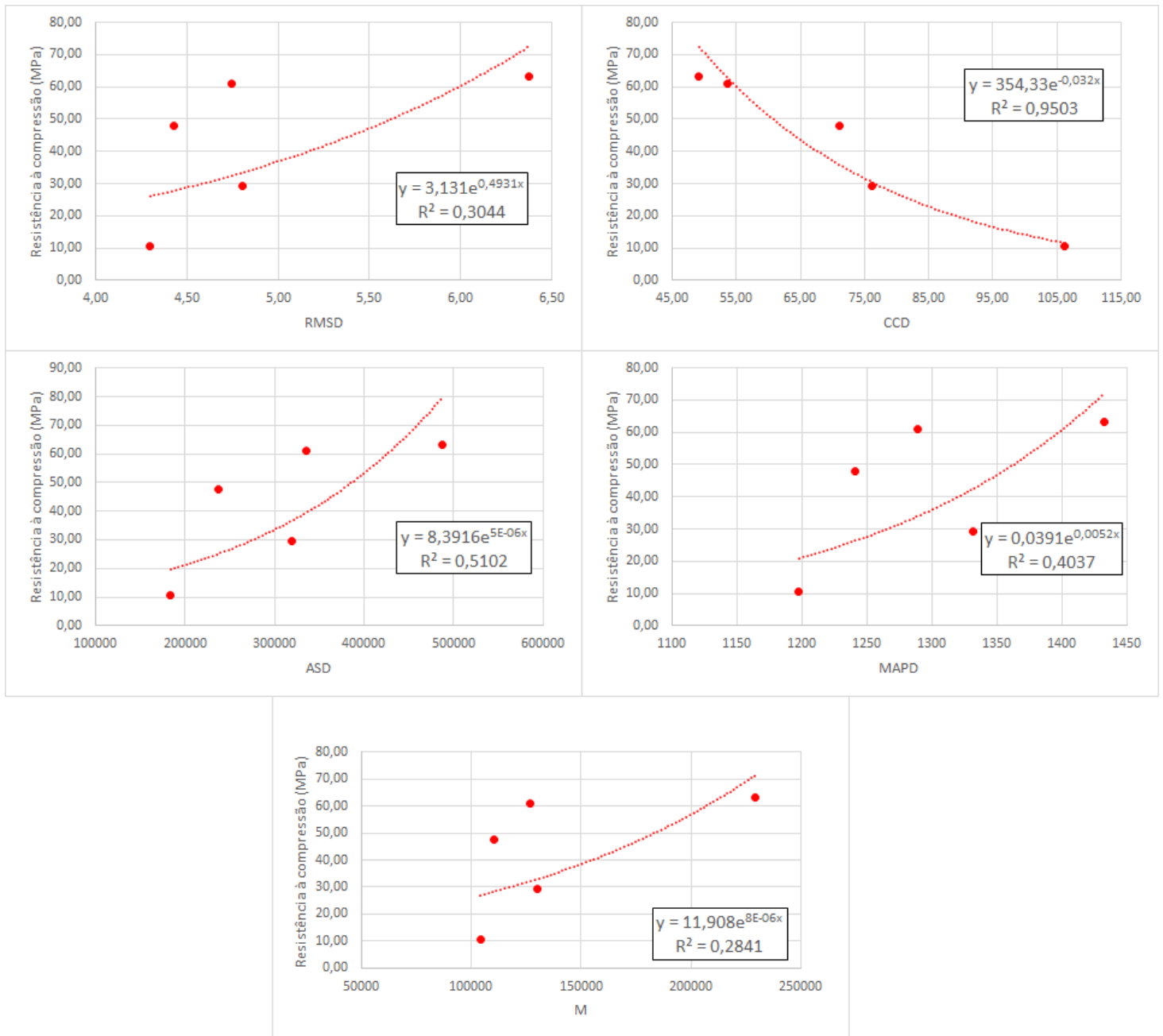
Faixa 1: 50 a 180 kHz



Faixa 2: 180 a 300 kHz

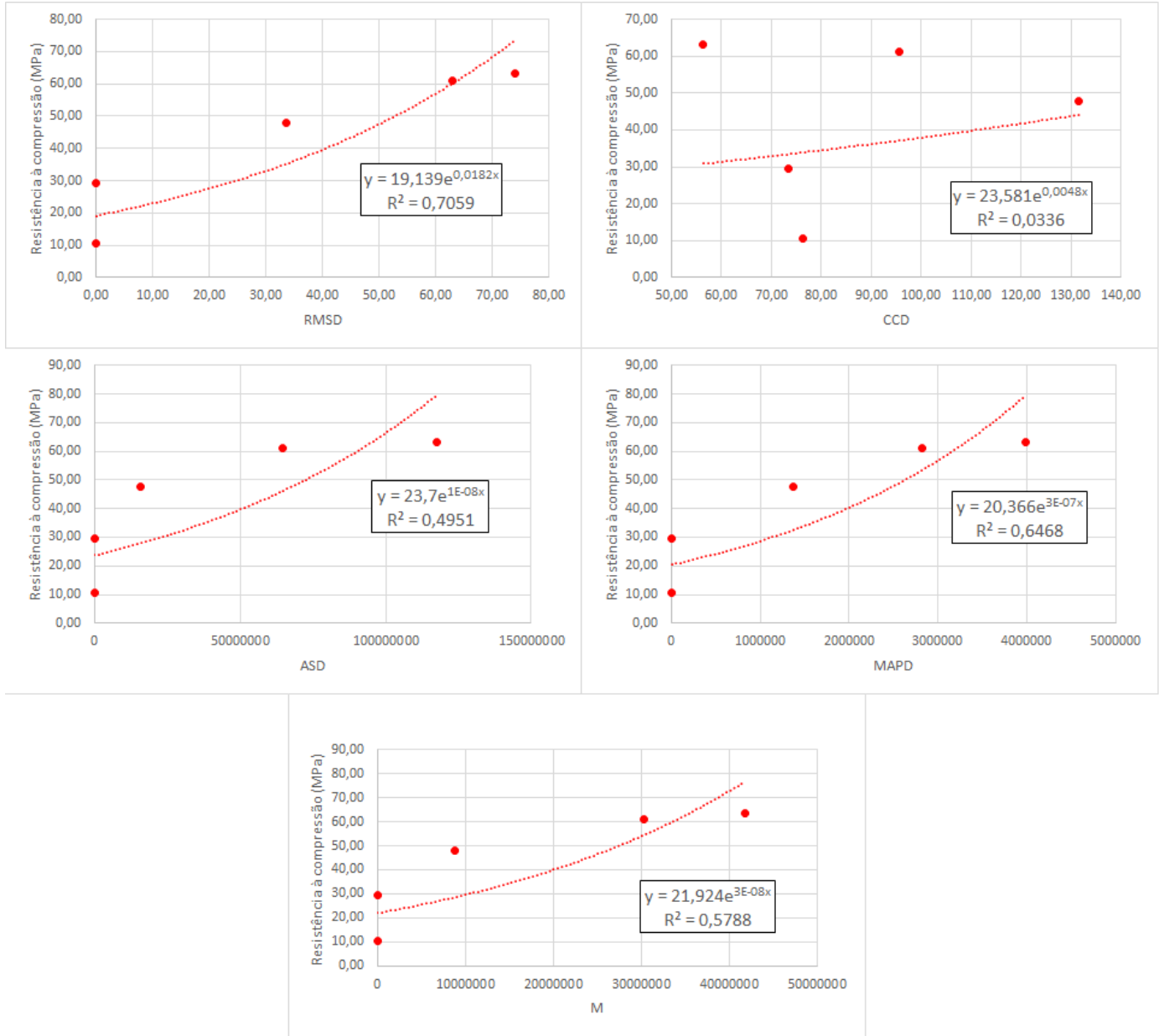


Faixa 3: 300 a 400 kHz

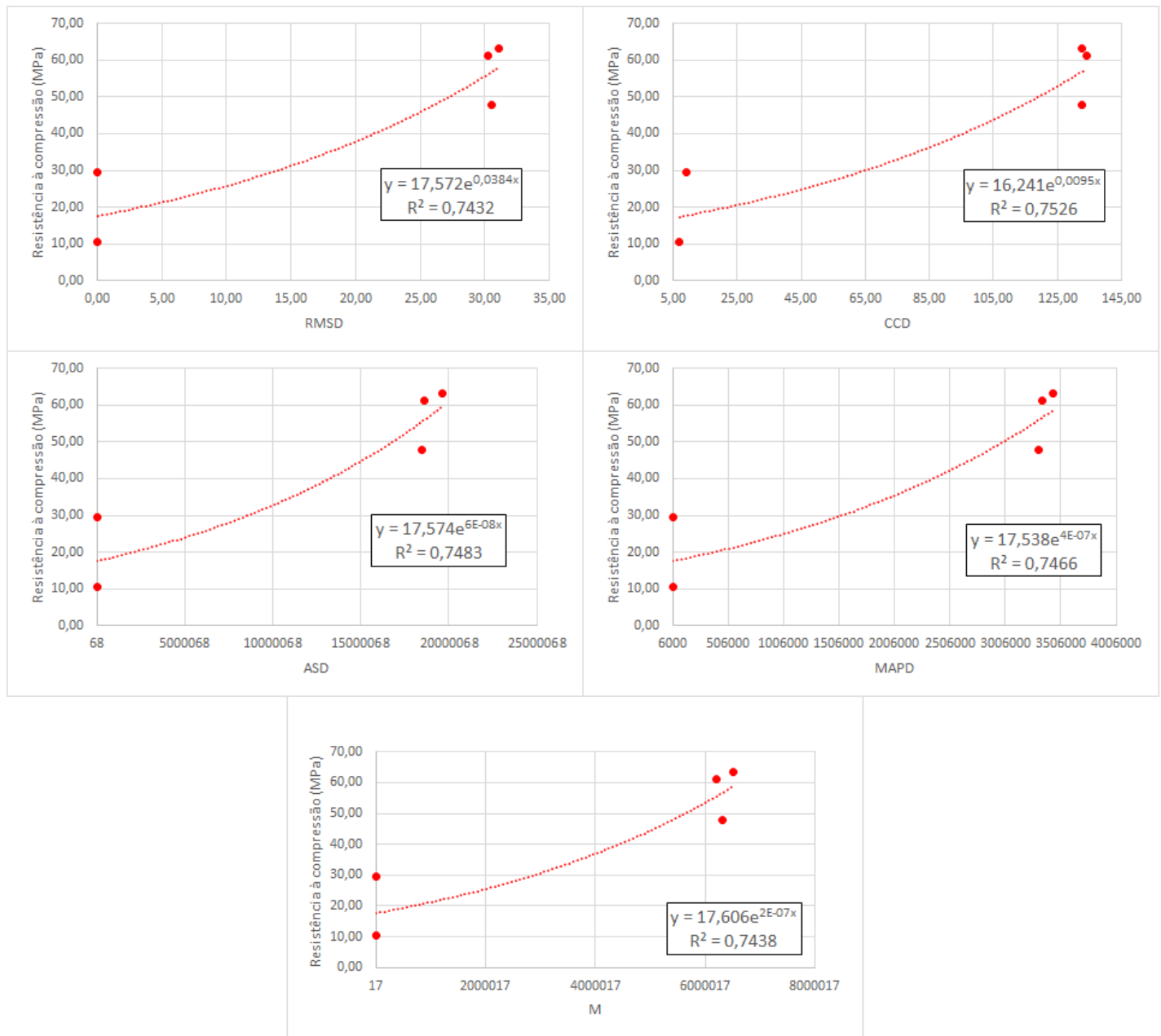


Traço B – CP III – PZTv

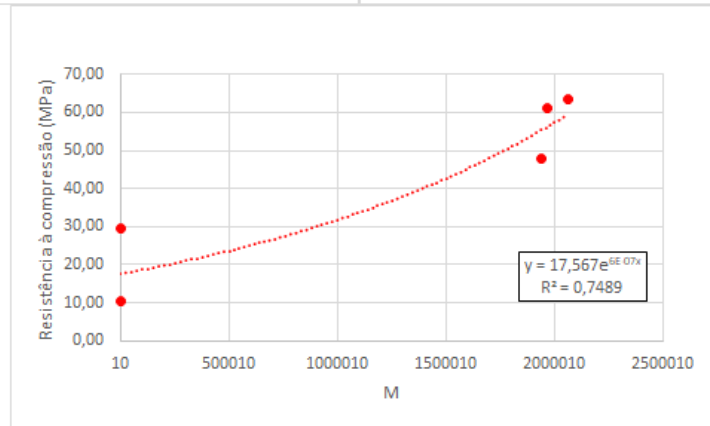
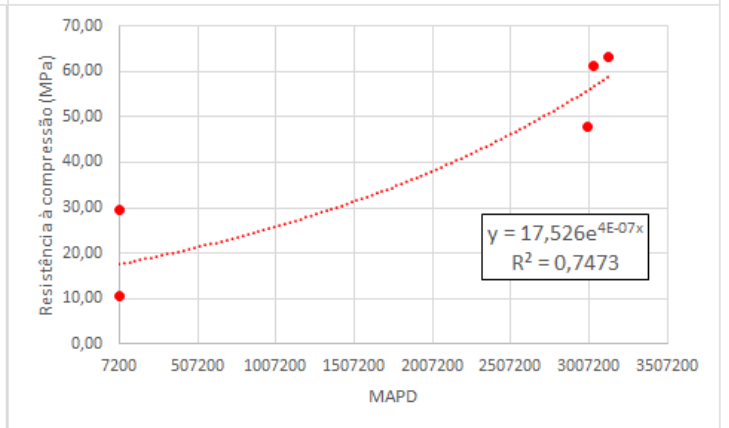
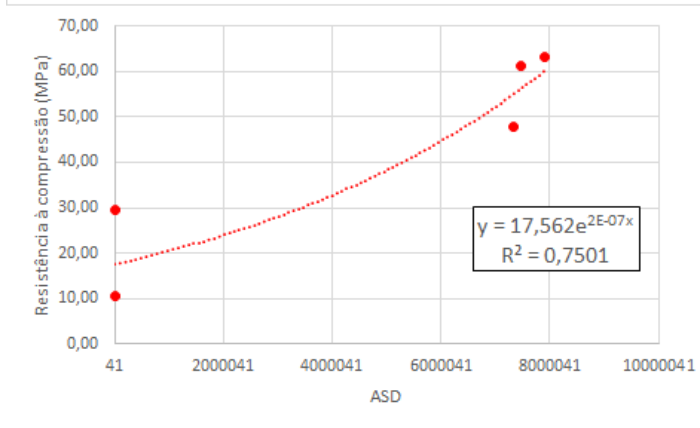
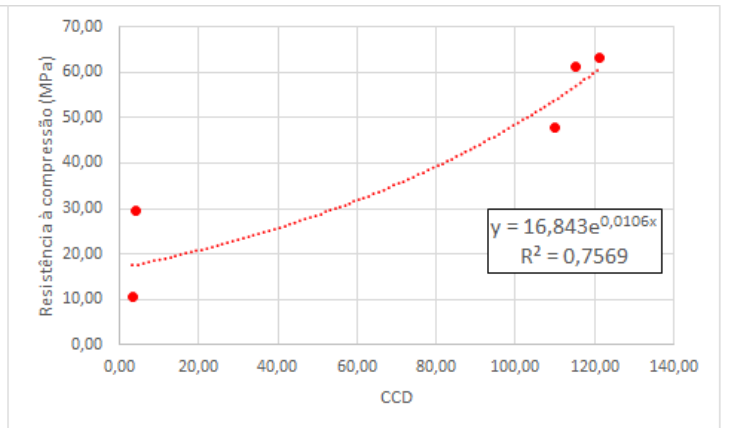
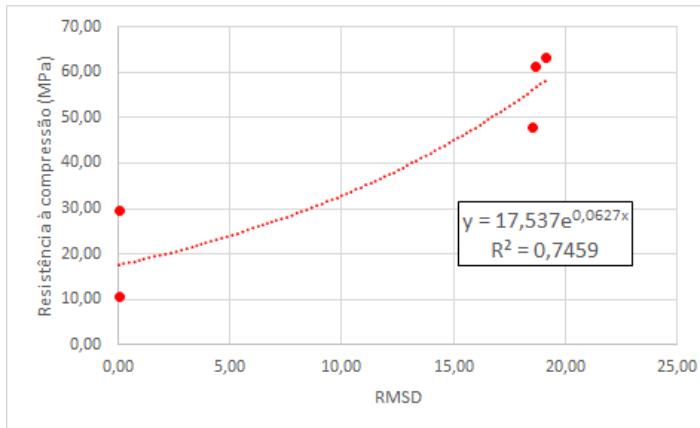
Faixa 1: 50 a 180 kHz



Faixa 2: 180 a 300 kHz

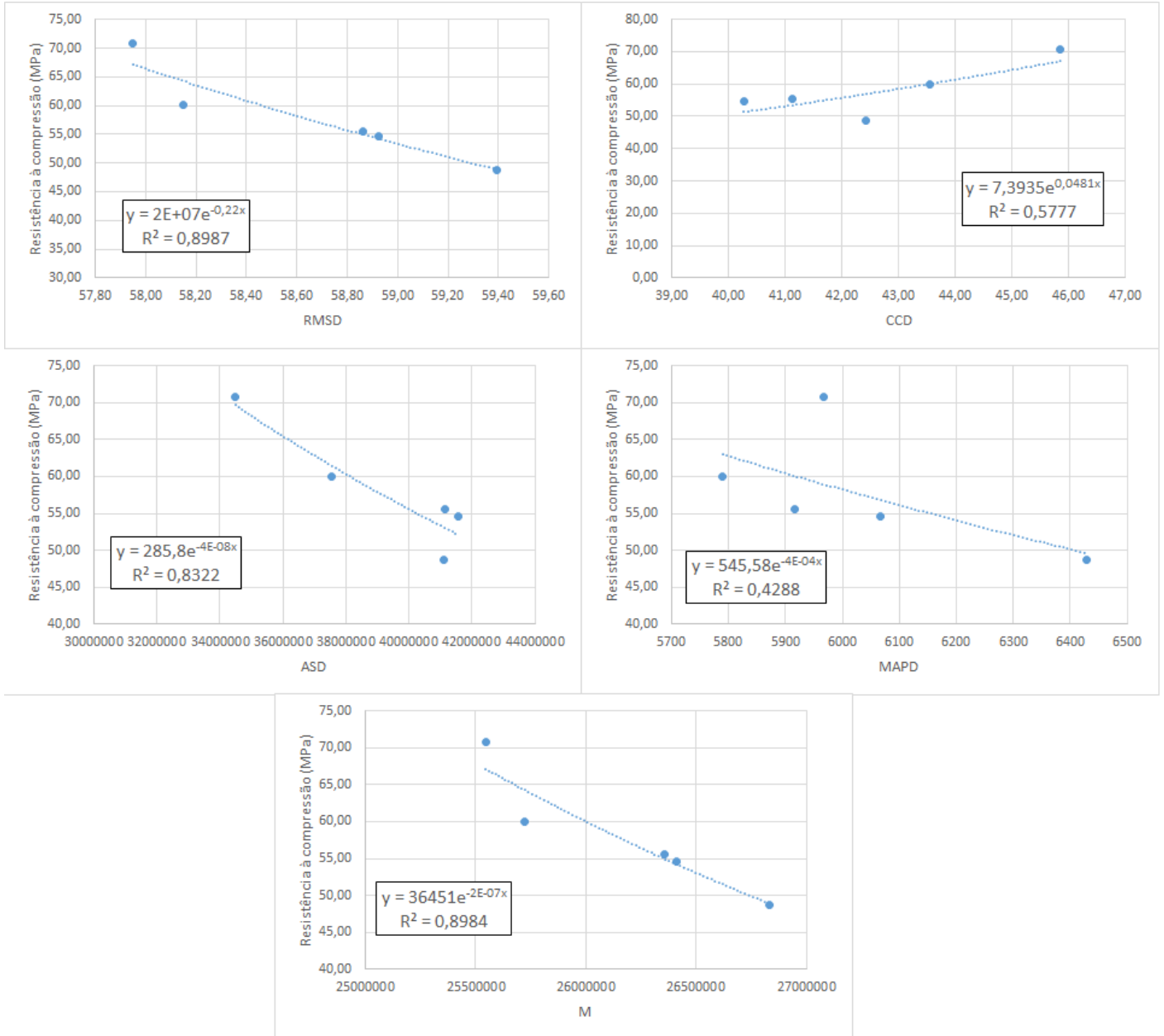


Faixa 3: 300 a 400 kHz

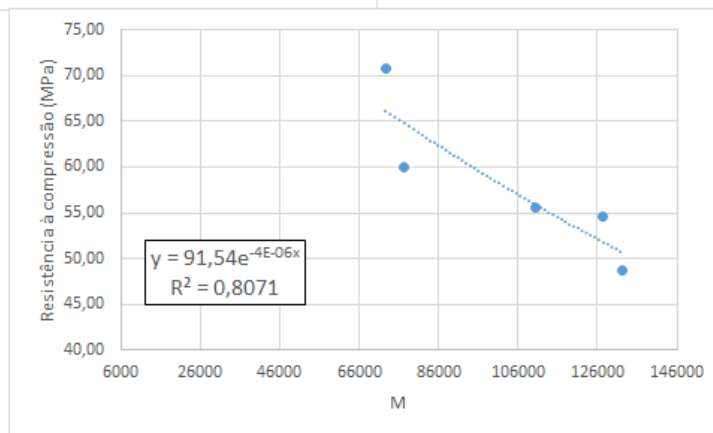
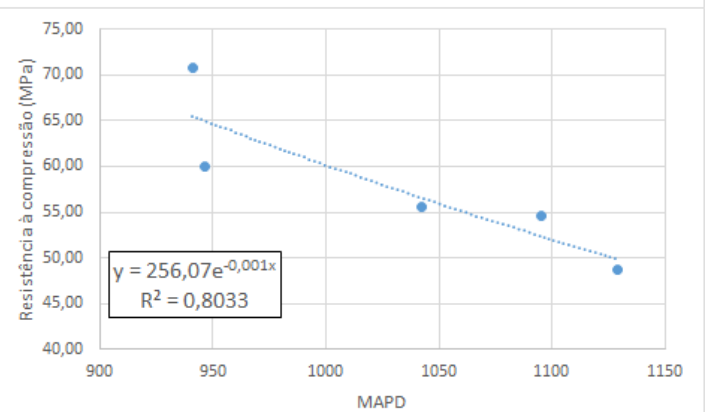
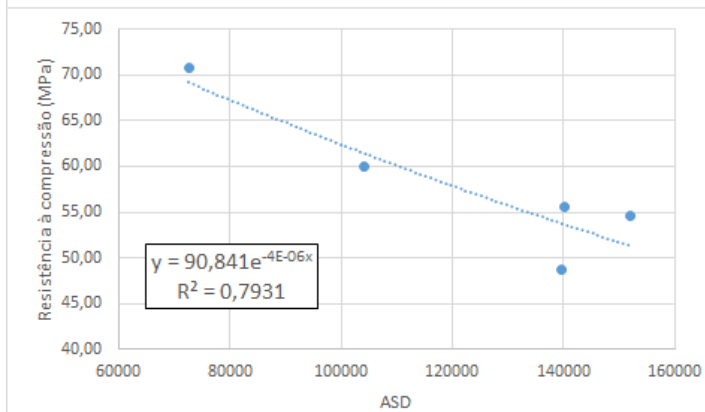
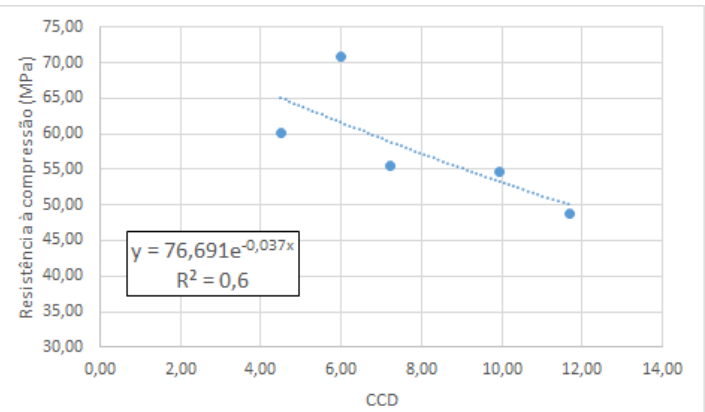
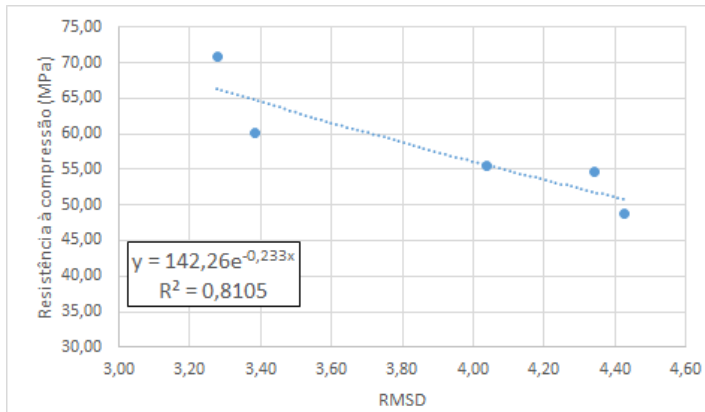


Trço B – CP V – PZTh

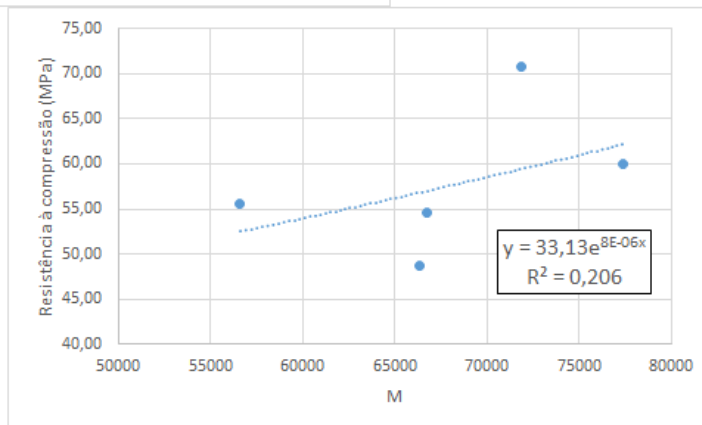
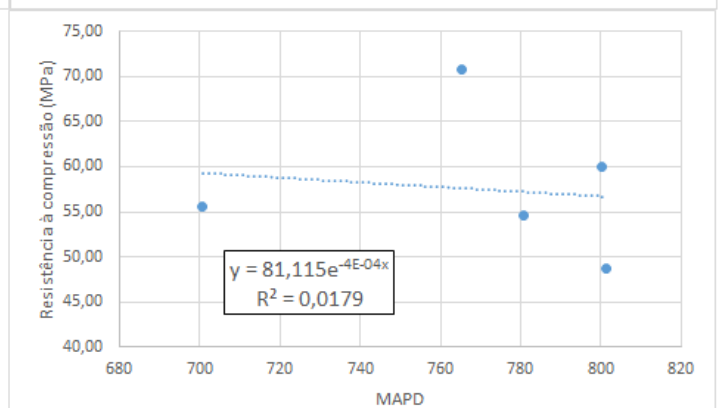
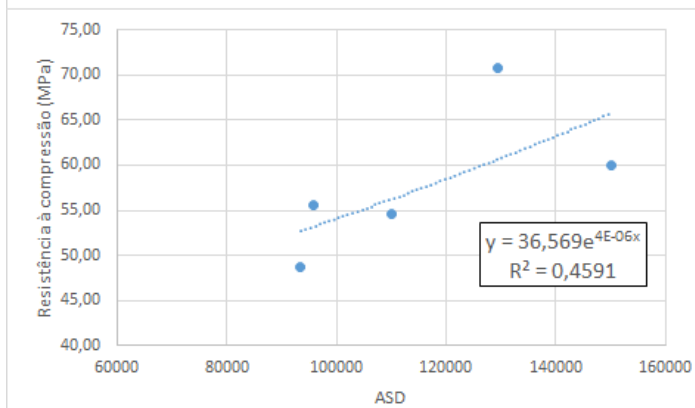
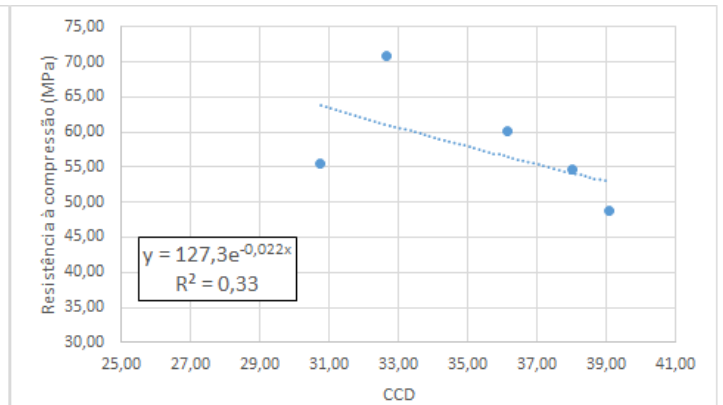
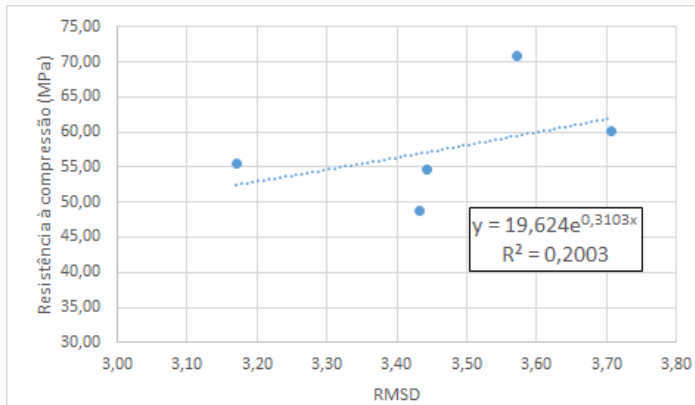
Faixa 1: 50 a 180 kHz



Faixa 2: 180 a 300 kHz

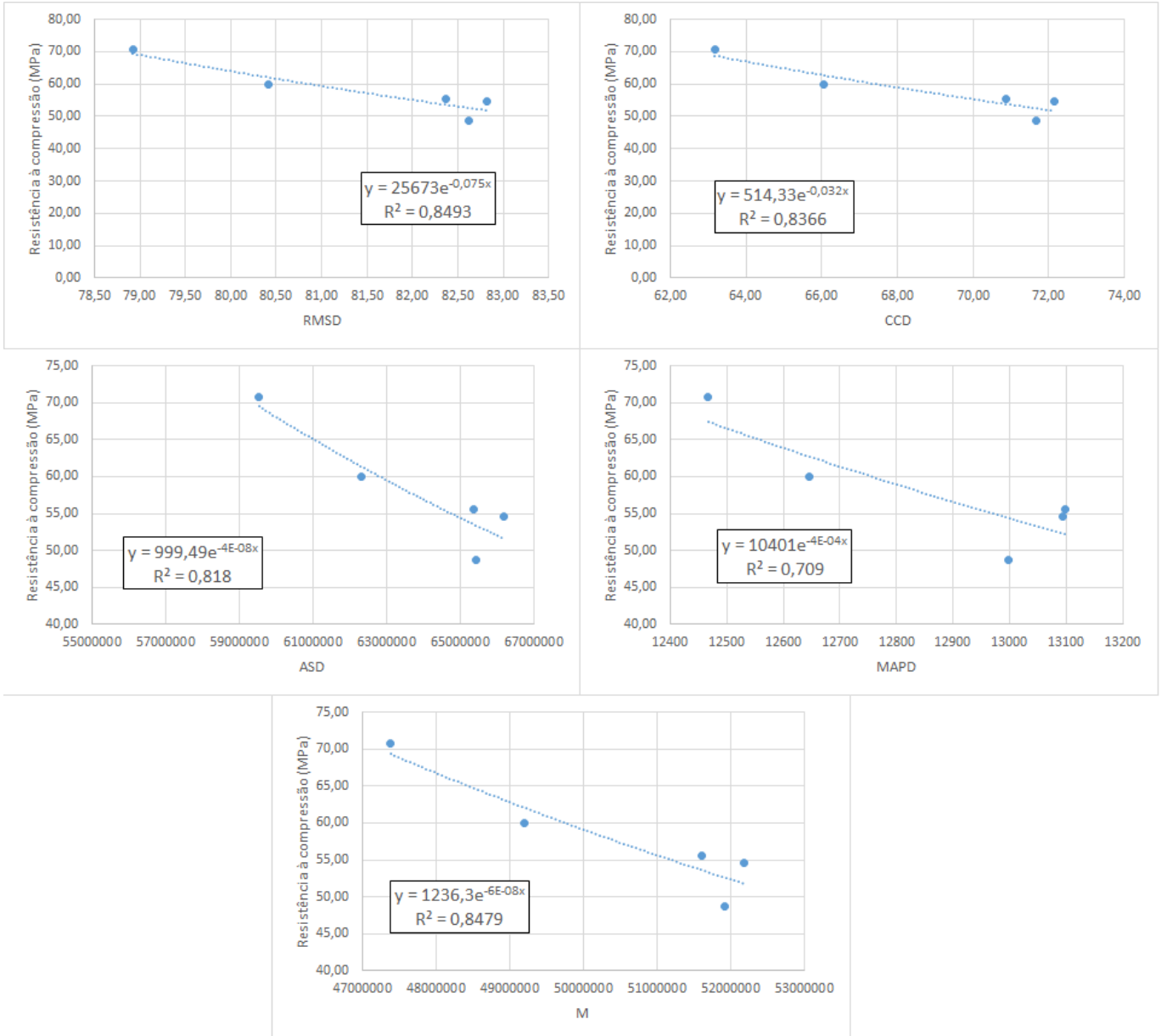


Faixa 3: 300 a 400 kHz

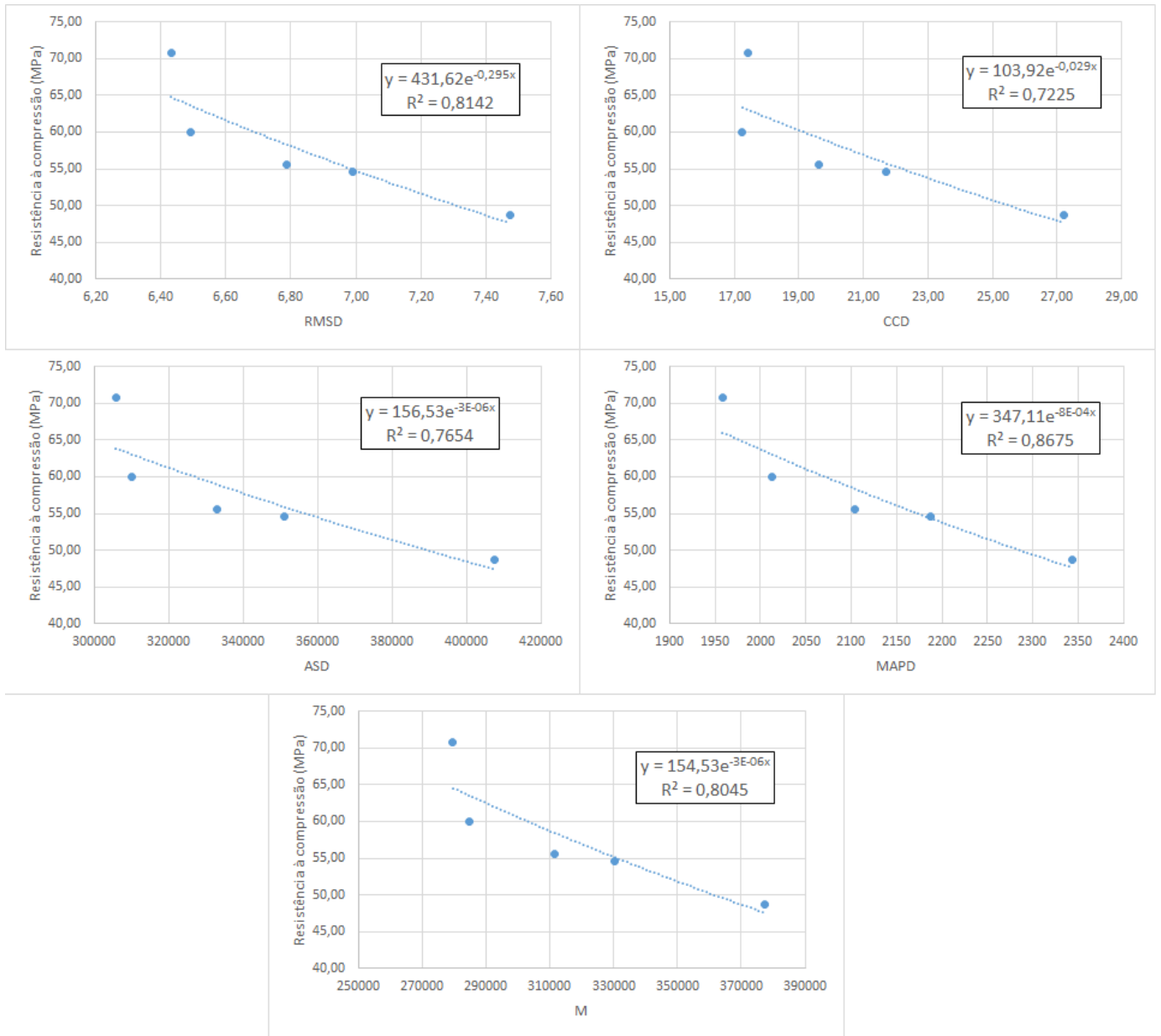


Trço B – CP V – PZTv

Faixa 1: 50 a 180 kHz



Faixa 2: 180 a 300 kHz



Faixa 3: 300 a 400 kHz

