

RAQUEL NAIARA FERNANDES SILVA

**MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE
ESTRUTURAL UTILIZANDO A TÉCNICA DA
IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA APLICADA EM
ESTRUTURAS DE CONCRETO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

RAQUEL NAIARA FERNANDES SILVA

**MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE
ESTRUTURAL UTILIZANDO A TÉCNICA DA
IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA APLICADA EM
ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações

Orientador: Prof. Dr. Valder Steffen Jr.

UBERLÂNDIA – MG

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S586m Silva, Raquel Naiara Fernandes, 1986-
2017 Monitoramento de integridade estrutural utilizando a técnica da
impedância eletromecânica aplicada em estruturas de concreto / Raquel
Naiara Fernandes Silva. - 2017.
146 f. : il.

Orientador: Valder Steffen Junior.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Concreto armado - Teses. 3.
Transdutores piezoeletricos - Teses. 4. Monitoramento de integridade
estrutural - Teses. I. Steffen Junior, Valder. II. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

CDU: 621



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



ALUNA: Raquel Naiara Fernandes Silva

NÚMERO DE MATRÍCULA: 11423EMC012

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Mecânica dos Sólidos e Vibrações

LINHA DE PESQUISA: Dinâmica de Sistemas Mecânicos

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL DOUTORADO

TÍTULO DA TESE:

“Monitoramento de Integridade Estrutural utilizando a Técnica da Impedância Eletromecânica aplicada em Estruturas de Concreto”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Valder Steffen Junior

A Tese foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro do MFLab do Bloco 5P, Campus Santa Mônica, em 28 de novembro de 2017, às 14:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME	ASSINATURA
Prof. Dr. Valder Steffen Júnior (orientador)	UFU
Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Júnior	UFU
Profa. Dra. Maria Cristina Vidigal de Lima	UFU
Prof. Dr. José dos Reis Vieira de Moura Júnior	UFG
Prof. Dr. Lázaro Valentim Donadon	UFMG

Uberlândia, 28 de novembro de 2017

*Dedico este trabalho aos meus pais José Geraldo Silva (in memoriam)
e Ângela Maria Fernandes C. Silva por me ensinarem que basta
acreditar, lutar e desfrutar do que a vida nos reserva.*

“ O segredo da sabedoria, do poder e do conhecimento é a humildade. ”
(Ernest Hemingway)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todas as bênçãos alcançadas e por me ajudar a evoluir com todas as experiências vividas.

À minha mãe Ângela pelas calorosas orações e pelos valiosos conselhos diários. Ao meu pai José Geraldo (*in memoriam*) pelo incentivo e confiança no momento que foi necessário sair de casa aos 17 anos e lutar pelos meus sonhos. Aos meus irmãos Ricardo e Romênia pela eterna parceria. Ao tio Walter Soares (*in memoriam*), pelo amor e apoio incondicional. Vocês me incentivaram veemente a optar pela carreira acadêmica e seguramente, me ajudaram a chegar até aqui.

Aos demais familiares e amigos pelo apoio incondicional.

Ao meu noivo amado, Frederico, pelo companheirismo, compreensão, tolerância e confiança. Pelas palavras de motivação nos vários momentos de dificuldade e cansaço. Você é meu porto seguro diário.

Ao meu orientador Dr. Valder Steffen Jr., pela constante ajuda, orientação e dedicação. Tive o privilégio de conviver com o senhor durante esses três anos e sou imensamente grata. Levarei todos os ensinamentos para minha vida profissional e pessoal.

Aos colegas do LMest, que convivi diariamente. Em especial à Karina Tsuruta, Lauren Gonçalves, Diogo Rabelo, Lucas Rocha, Paula Vitor, Vinícius Sandovani, Cristiane Pires, Luciene Perini, Reinaldo, Quirino, prof.^a Érica Neiro, prof. Carlos Faria, prof. Antônio Carlos, prof. Núbia, prof. Aldemir e prof. Finzi pela indispensável ajuda e amizade. Aos demais professores e técnicos da FEMEC e da FECIV, com quem tive o prazer de trabalhar neste período.

À Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Mecânica e à Faculdade de Engenharia Civil pela oportunidade concedida para realização do curso.

Aos órgãos de fomento CNPq e CAPES através do INCT que forneceu o contexto científico na qual esta pesquisa foi desenvolvida.

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

RESUMO

O mau funcionamento de uma estrutura civil pode levar a uma considerável perda econômica, além de um grande transtorno na vida da população que a utiliza. Nesse sentido, estudos e experimentos devem ser conduzidos a fim de fornecer meios para uma avaliação confiável a respeito de seu estado, permitindo assim estabelecer critérios para garantir sua utilização dentro de padrões de segurança. Em vista disto, torna-se interessante e necessário realizar o monitoramento contínuo da saúde estrutural e, eventualmente, estudar como aumentar sua vida útil. Os métodos não destrutivos facilitam essas análises por não serem invasivos e, também, por não interferir no funcionamento das estruturas. Esta Tese de Doutorado pretende avaliar a aplicação do método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica para a detecção de danos em estruturas de concreto, o que se caracteriza como uma metodologia que se enquadra na categoria apresentada anteriormente. Para isso, a técnica da impedância eletromecânica foi explorada e testada para esse tipo de composto (concreto) levando em consideração alguns parâmetros que podem influenciar no diagnóstico do dano, como por exemplo a temperatura e a umidade. Aplicações da técnica da impedância eletromecânica foram realizadas em diferentes elementos estruturais de concreto, tais como corpos de prova prismático e cilíndrico, além de uma laje, com o intuito de compreender adequadamente o processo de monitoramento, como também refinar a metodologia proposta. Essa técnica utiliza transdutores piezelétricos (inteligentes) que atuam simultaneamente como sensor e atuador acoplados à estrutura analisada, ou incorporados a ela. Como estes materiais inteligentes são frágeis, foi desenvolvida uma Cápsula Inteligente para incorporar o sensor à estrutura base. Esta cápsula consiste de um transdutor piezelétrico revestido com resina epóxi, visando a proteção e integridade do sensor/atuador durante o monitoramento. Implementou-se técnicas de compensação de temperatura a fim de evitar diagnósticos falsos, como também foi utilizado um modelo estatístico para estabelecer índices de *threshold* (limiar de dano) de acordo com um nível de confiança previamente definido. Ao analisar os resultados obtidos, constata-se que esta pesquisa permitiu verificar que a técnica da impedância eletromecânica na detecção de danos é plenamente satisfatória, dada sua eficiência e robustez. Finalmente, esta Tese de Doutorado oferece importantes contribuições com destaque no domínio e aprimoramento da metodologia proposta, tornando-a promissora na aplicação em estruturas civis de grande porte, conjuntamente com as técnicas de monitoramento e controle estrutural já consagradas.

Palavras chave: Monitoramento da Integridade Estrutural, Impedância Eletromecânica, Estruturas de Concreto, Estruturas Inteligentes, Compensação da Temperatura.

SILVA, R. N. F. **Electromechanical Impedance Based Structural Health Monitoring Technique Applied on Concrete Structures.** 146 f. 2017. PhD Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

The malfunctioning of a civilian structure can lead to considerable economic loss, as well as a great inconvenience in the everyday life of the population that uses it. In this sense, studies and experiments should be conducted in order to provide a mean for a reliable evaluation of their condition, thus allowing establishing criteria to guarantee their use within safety standards. In this context, it is interesting and necessary to carry out a continuous monitoring of the structural health and, eventually, to study how to increase its useful life. Non-destructive methods facilitate such analyzes as they are not invasive, and they do not interfere on the functioning of the structure. This PhD thesis intends to evaluate the application of the method of monitoring the structural integrity of the structure as based on the electromechanical impedance technique for the detection of damage in concrete structures. This approach is a non-destructive technique. For this aim, the electromechanical impedance technique was explored and tested for this type of composite structure taking into account parameters that can influence the diagnostics, such as temperature and humidity. Applications of the electromechanical impedance technique were performed on different concrete structural elements, such as prismatic and cylindrical concrete specimens, and a concrete slab, in order to adequately understand the monitoring process, as well as to refine the proposed methodology. This technique uses piezoelectric transducers (intelligent) acting simultaneously as sensor and actuator coupled to the host structure. Since these smart materials are brittle, a so-called Smart Capsule was developed to incorporate the sensor to the host structure. This capsule consists of a piezoelectric transducer coated with epoxy resin, aiming at protecting the integrity of the transducer during the monitoring process. Temperature compensation techniques were implemented in order to avoid false diagnoses. Furthermore, a statistical model to establish threshold indices according to a defined level of confidence was utilized. When analyzing the obtained results, one can verify that this research reached a satisfactory evaluation of the electromechanical impedance technique in the detection of damage in concrete structures. Finally, this PhD thesis offers important contributions with emphasis on the expertise and improvement of the proposed methodology, making it promissory regarding its application in large civil engineering structures, together with conventional techniques.

Keywords: Structural Health Monitoring, Electromechanical Impedance, Concrete Structure, Smart Structures, Temperature Compensation.

Lista de símbolos

a/c	Relação água-cimento
C	Coeficiente de amortecimento
$CC_{Z_1Z_2}$	Coeficiente de correlação
D	Vetor deslocamento elétrico
d	Tensor das constantes piezelétricas em deformação
d_{3x}^2	Constante de acoplamento piezelétrico
d_{\max}	Desvio máximo
E	Vetor campo elétrico
f	Fase da corrente elétrica
f_{ck}	Resistência à compressão
F_F	Fração volumétrica das fibras
F_M	Fração volumétrica da matriz
j	Unidade imaginária $\sqrt{-1}$
k	Rigidez
k_t	Curtose
l_a	Comprimento do PZT
m	Massa
M	Diferença média entre os sinais
n	Número de pontos de medição
$Re(\bar{Z}_1) e Re(\bar{Z}_2)$	Médias das medições para as duas condições analisadas
$Re(Z_{1,i})$	Parte real da impedância da medição sem danos em uma frequência i
$Re(Z_{2,i})$	Parte real da impedância da medição de teste em uma frequência i
S	Desvio padrão das amostras
S_{Z_1}	Desvio padrão do sinal de impedância da referência
S_{Z_2}	Desvio padrão do sinal de impedância a ser comparado
S_k	Simetria da distribuição de probabilidade
t	Instante de tempo
T	Vetor das tensões
V	Amplitude

$V_{f,crit}$	Volume crítico de fibras
V_f	Volumes de fibras
$V_i(\omega)$	Tensão elétrica de entrada do atuador PZT
w_a	Largura do PZT
$Y(\omega)$	Admitância elétrica do PZT
$Z_a(\omega)$	Impedância mecânica do atuador
$Z_s(\omega)$	Impedância mecânica da estrutura
δ	Diferença das médias de cada um dos sinais
δ	Fator de perda dielétrica do PZT
Δ_v	Deslocamento vertical
Δf	Deslocamento de frequência
ε_{33}^{-T}	Constante dielétrica do PZT com tensão mecânica nula
$\varepsilon_e(t)$	Deformação instantânea
$\varepsilon_{cr}(t)$	Deformação por fluência
ε_{sh}	Deformação por retração
ε_T	Deformação por temperatura
ε	Permissividade elétrica
η	Fator de perda mecânica do PZT
i	Corrente elétrica de saída
I	Amplitude da corrente elétrica
v	Tensão senoidal
σ_{cc}	Tensão de fissuração
σ_{pc}	Tensão máxima pós-fissuração
σ_{c0}	Tensão aplicada no instante τ_0
τ_0	Instante de tempo
τ_d	Instante de tempo
ω	Frequência angular

Lista de siglas

ACI	American Concrete Institute
ASD	Diferença média quadrada
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCD	Desvio do Coeficiente de Correlação
CEP	Controle Estatístico de Processo
CFRP	<i>Carbon fiber reinforced Polymer</i>
CP	Corpo de prova
CRFA	Concreto reforçado com fibras de aço
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
DOF	Graus de Liberdade
E/M	Eletromecânica
END	Ensaaios não destrutivos
EUA	Estados Unidos da América
FECIV	Faculdade de Engenharia Civil
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
INCT	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
JB	<i>Jarque-Bera</i>
LabEST	Laboratório de Estruturas
LCS	Limite de Controle Superior
LCI	Limite de Controle Inferior
LMEst	Laboratório de Mecânica de Estruturas – Prof. José Eduardo Tannús Reis
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
NBR	Norma Brasileira de Referência
pH	Potencial Hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
PROARTE	Programa de Reabilitação de Obras de Arte Especiais
PZT	Titonato Zirconato de Chumbo
RMSD	Desvio Médio da Raiz Quadrada
SMH	Structural Health Monitoring

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
Introdução	1
1.1. Contextualização e Justificativa	1
1.2. Objetivos.....	8
1.3. Organização da tese	9
 CAPÍTULO II	 11
Compostos de Matriz Cimentícia	11
2.1. Materiais Compostos	11
2.2. Concreto Reforçado com Fibras de Aço.....	17
2.3. Propriedades do Concreto no Estado Endurecido	22
2.3.1. <i>Tenacidade</i>	23
2.3.2. <i>Porosidade e Permeabilidade</i>	28
2.4. Deterioração do Concreto	30
2.4.1. <i>Causas Físicas da Deterioração do Concreto</i>	32
2.4.1.1. <i>Congelamento e Degelo</i>	32
2.4.1.2. <i>Deformações: Retração e Fluência</i>	34
2.4.1.3. <i>Dilatação Térmica</i>	36
2.4.2. <i>Deterioração do Concreto por Reações Químicas</i>	39
2.5. Ensaio Não Destrutivos.....	41
2.5.1. <i>Métodos de dureza superficial</i>	42
2.5.2. <i>Técnicas de resistência à penetração</i>	43
2.5.3. <i>Métodos eletromagnéticos: Pacometria</i>	44
2.5.4. <i>Métodos de velocidade de pulso ultrassônico</i>	45

2.6. Punção em lajes lisas	48
CAPÍTULO III	51
Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado na Impedância Eletromecânica	51
3.1. Método de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado na Impedância Eletromecânica	51
3.2. Efeitos da Temperatura.....	58
3.2.1. Método do Deslocamento Efetivo em Frequência por Análise de Correlação	59
3.2.2. Técnica de Otimização Híbrida	61
3.3. Análise Estatística dos Dados.....	62
3.3.1. Determinação de Threshold com Controle Estatístico de Processos e Intervalos de Confiança	62
3.4. Estado da Arte no Contexto da Engenharia Civil.....	64
CAPÍTULO IV.....	73
Monitoramento de Estrutura de Concreto com Sensores Acoplados à Superfície.....	73
4.1 Descrição do Procedimento Experimental	73
4.3. Detecção de Danos	78
4.3. Compensação do Efeito da Temperatura: Método do Deslocamento Efetivo.....	82
CAPÍTULO V	84
Monitoramento de Estruturas Inteligentes de Concreto	84
5.1. Cápsulas Inteligentes	84
5.2. Avaliação da Funcionalidade da Cápsula Inteligente: Viga de Alumínio.....	86
5.3. Aplicações em Elementos Estruturais de Concreto	91
5.3.1. Aplicação Experimental I: Corpo de Prova Cilíndrico	91

5.3.2. <i>Aplicação Experimental II: Corpo de Prova Prismático</i>	95
5.3.3. <i>Aplicação Experimental III: Laje de Concreto Armado</i>	108
5.3.4. <i>Aplicação experimental IV: Fatores ambientais adversos</i>	117
5.3.4.1. <i>Variações Bruscas de Temperaturas</i>	117
5.3.4.2. <i>Umidade</i>	123
 CAPÍTULO VI	 128
Considerações finais	128
6.1. <i>Conclusões</i>	128
6.2. <i>Perspectivas futuras</i>	133
 REFERÊNCIAS	 134

CAPÍTULO I

Introdução

Este capítulo traz a contextualização do tema desta pesquisa, sua justificativa, objetivos e contribuições. Para auxiliar no entendimento do assunto, inclui-se também nesse capítulo algumas informações sobre o composto utilizado nas estruturas estudadas: o concreto. Ressalta-se que nesta Tese o termo *concreto* se refere ao concreto de cimento Portland. Por fim, exhibe-se a organização desta Tese.

1.1. Contextualização e Justificativa

Em 1824, o construtor e químico inglês Joseph Aspdin queimou pedras calcárias e argila conjuntamente, transformando-as em um fino pó. Percebeu que resultou uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano com o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (BRUNAUER; COPELAND, 1964).

No Brasil houveram várias pesquisas desde o ano de 1888 para aplicar os conhecimentos relacionados à fabricação do cimento Portland. Porém, não passaram de meras tentativas que culminaram, em 1926, com a implantação de uma fábrica em Perus, estado de São Paulo, pela Companhia Brasileira de Cimento Portland, cuja construção pode ser considerada como o marco da implantação da indústria brasileira de cimento. A produção nacional foi gradativamente elevada com a implantação de novas fábricas e a participação de produtos importados oscilou durante as décadas seguintes até praticamente desaparecer nos dias de hoje (BATTAGIN, 2017).

Em vista disto, o concreto é considerado um material composto formado por três componentes principais, a saber, pasta de cimento, agregados e água. Em função da natureza e proporção desses componentes, esse composto é capaz de oferecer uma grande variação em suas propriedades (BENTUR; MINDES, 2007).

O Brasil atravessou nos últimos anos (entre 1994 e 2013) uma grande fase de crescimento econômico, com um grande reflexo na quantidade e dimensão das obras civis. A construção foi um dos suportes do crescimento brasileiro, criando condições para um grau de desenvolvimento inédito no país. O crescimento deste setor na última década foi de 52,10 %, o que representa um crescimento médio anual de 4,28 %. Considerando os últimos 20 anos, o avanço médio anual foi de 2,82 %. Entre 1994 e 2013, a construção civil brasileira cresceu 74,25 %, sendo que o auge do desenvolvimento neste período foi registrado no ano de 2010, quando o PIB brasileiro da construção civil teve alta de 11,6% (SINDUSCON-MG, 2014). Há cerca de três anos, o Brasil enfrenta uma crise política e econômica e, neste contexto, o setor de engenharia e construção foi um dos mais afetados. Isto porque, na medida em que a economia não vai bem, há corte nos investimentos, que são os principais geradores de oportunidades de trabalho para empresas que atuam nesses segmentos (OLIVEIRA, 2017).

Como exemplo da excelência técnica da engenharia brasileira, cita-se a seguir três das maiores e mais complexas obras civis no país. O projeto da hidrelétrica de Itaipu, com custo estimado de 18 bilhões e meio de dólares, inclui uma barragem de gravidade de concreto que possui 7919 metros de extensão e 196 metros de altura no Rio Paraná, na fronteira do Brasil com o Paraguai (Fig. 1.1). Um volume de 12,3 milhões de metros cúbicos de concreto foi utilizado na construção da barragem principal e de vertedouros, além de vigas pré-moldadas, lajes e outros elementos estruturais para a casa de força. A hidrelétrica Itaipu Binacional começou a operar em maio de 1984 (ITAIPU BINACIONAL, 2010).



Figura 1.1 – Barragem de Itaipu Binacional (SHUTTERSTOCK, 2017).

Destaca-se também um dos mais importantes e emblemáticos edifícios da cidade de São Paulo, o Copan (Fig. 1.2). Oscar Niemeyer o projetou em 1951, com formas sinuosas principalmente para se adaptar ao terreno irregular, localizado num dos pontos mais movimentados do centro da capital paulista. Com seis blocos, 35 andares e 1160 apartamentos, o edifício possui cinco mil moradores de diferentes classes sociais, sendo considerado como o maior edifício residencial da América Latina. É considerada também, por muitos críticos e profissionais da área, a maior estrutura de concreto armado do Brasil (COPAN, 2008).



Figura 1.2 – Edifício Copan, São Paulo (SOUZA, 2014).

Aponta-se, por fim, a ponte Rio-Niterói que liga a cidade do Rio de Janeiro a Niterói, na baía da Guanabara. A obra é um marco da engenharia nacional e possui recordes importantes como, por exemplo, possuir o maior vão em viga contínua do mundo e ser uma das maiores pontes do mundo em volume espacial (área construída). Oficialmente conhecida como Ponte Presidente Costa e Silva, foi inaugurada em 4 de março de 1974. É uma das maiores pontes rodoviárias do mundo, constituída estruturalmente em concreto armado, possuindo aproximadamente 13 km de extensão, com nove quilômetros sobre a água e 72 m de altura em seu ponto mais alto (Fig. 1.3). Engenheiros apontaram os nove quilômetros erguidos sobre o mar como a parte mais complexa de toda a construção, por envolver perfuração do subsolo oceânico na busca por um terreno rochoso que suportasse a estrutura da ponte (IPT, 2015).



Figura 1.3 – Ponte Rio-Niterói (SHUTTERSTOCK, 2017).

Porém, apesar do concreto oferecer uma excelente durabilidade, muitas dessas estruturas estão sujeitas a ambientes ou condições deletérias, que rapidamente prejudicam seu desempenho afetando diretamente sua integridade. Fatores como a ocorrência de falhas de projeto, o uso de dosagens incorretas, o emprego de processos inadequados de mistura, transporte, lançamento, adensamento, cura e descimbramento (retirada das fôrmas) do concreto, utilização incorreta, além do avanço da vida útil das estruturas de concreto têm levado ao surgimento de manifestações patológicas, muitas vezes precoces e com elevados custos de reparação (FIGUEIREDO, 2005).

Nas últimas décadas, a aplicação de ensaios não destrutivos (END) na engenharia civil vem se tornando um tema de relevância em diversos países (BEUTEL et al., 2006). Acompanhando a tendência mundial, Cho (2003) assegura que no Brasil a aplicação desse tipo de controle vem crescendo em vários setores. A engenharia civil ainda é um campo no qual a utilização de END pode se desenvolver muito, configurando-se como uma importante ferramenta para auxiliar os profissionais envolvidos no controle de obras. O uso de métodos não destrutivos viabiliza a inspeção e avaliação do estado de conservação de construções civis, de forma econômica e eficiente. Dada sua natureza predominantemente não invasiva, esses ensaios se constituem em uma das principais ferramentas de controle da qualidade de materiais e produtos e já são amplamente utilizados em diversas atividades da indústria aeroespacial, no ramo automobilístico, elétrico, construção naval, dentre outros.

A necessidade de monitorar uma determinada estrutura, aumenta à medida que a idade da mesma avança, provocando desgastes. Nos últimos anos, os monitoramentos manuais convencionais estão se tornando menos viáveis para a maioria dos projetos, pois consomem tempo e recursos financeiros. Estruturas de concreto, assim como outros tipos de estruturas, requerem um acompanhamento contínuo devido à possibilidade de falhas que podem conduzir a resultados desastrosos (CHO, 2003).

Apesar de existirem várias técnicas de END para avaliação de estruturas de concreto, tais como emissão acústica, método de eco impactos, análise de campo magnético, radiografia, ultrassom, inspeção visual, etc., a maioria delas exige equipamentos volumosos com mão de obra especializada, limitando assim a aplicação prática do monitoramento da integridade de estruturas civis. Estudos sobre diagnóstico e monitoramento de danos em estruturas de concreto podem ser consultados em Cavalcanti (2010), Evangelista (2002), Sahuinco (2011), Chies (2014), dentre outros.

Nesta Tese avalia-se um método para a detecção de danos em estruturas de concreto, que representa uma metodologia que se enquadra na categoria apresentada anteriormente. Propõe-se o Monitoramento de Integridade Estrutural (*Structural Health Monitoring* – SHM) com base na técnica da impedância eletromecânica, com possibilidades de redução de custos, como também redução ou auxílio do uso de métodos convencionais de monitoramento estrutural. Trata-se de uma técnica que utiliza transdutores piezelétricos atuando simultaneamente como sensor e atuador, com potencial de eliminar os problemas ou limitações mencionadas anteriormente a respeito dos END.

As vantagens dos sensores piezelétricos utilizados na técnica da impedância eletromecânica incluem seu baixo custo, baixo consumo de energia, o fato de operarem em uma faixa de alta frequência (acima de 30 kHz, tipicamente) e também proporcionam alta sensibilidade. É importante lembrar que operar com sinais de alta frequência também promove uma redução da área de sensibilidade dos sensores (RAGHAVAN; CESNIK, 2005). Essa técnica monitora as variações localizadas na impedância eletromecânica utilizando um sensor piezelétrico fixado ou introduzido na estrutura estudada. Geralmente, emprega-se a parte real da impedância, uma vez que a parte imaginária correspondente à parte capacitiva do sensor, sendo esta mais sensível às variações da temperatura (PARK et al., 2008).

Uma grande desvantagem dos sistemas de SHM que usam transdutores piezelétricos está relacionada com a influência da temperatura nos sensores. Uma variação de temperatura pode levar o sistema a fornecer diagnósticos falsos-positivos, ou seja, indicações positivas em casos onde nenhum dano mecânico existe, de fato, na estrutura monitorada (PALOMINO et al., 2012). Portanto, a compensação da temperatura é indispensável para alcançar um diagnóstico confiável da integridade estrutural (SUN et al., 1995).

No processo de tomada de decisão a estatística é uma aliada fundamental para o resultado bem sucedido do monitoramento. Enquanto a técnica da impedância eletromecânica é tipicamente utilizada para identificar danos estruturais, várias pesquisas como Park e Inman (2005), Tsuruta (2008), Palomino e Steffen Jr. (2009), Annamdas et al. (2014); Rabelo (2014), Silva et al. (2016) e Rocha (2017) usaram modelos estatísticos para estabelecer o limiar de dano adequado para a situação considerada, aumentando a confiabilidade do diagnóstico.

Portanto, esta pesquisa possuiu como principal objetivo estudar o monitoramento de integridade estrutural, baseado na técnica de impedância eletromecânica, com vistas a sua aplicação em estruturas de concreto, levando-se em consideração alguns parâmetros que podem influenciar no diagnóstico do dano, tais como a temperatura e a umidade. Além disso, propõe-se também conhecer e compensar tais parâmetros através do tratamento matemático das assinaturas de impedância. Para isso, a técnica de impedância eletromecânica foi aplicada em diferentes elementos estruturais de concreto, tais como prisma, cilindro e laje, a fim de compreender adequadamente o processo de monitoramento, além de refinar a metodologia. O acoplamento do sensor-atuador piezelétrico foi realizado tanto na superfície da estrutura monitorada quanto no interior dela (incorporado ou embutido), a fim de verificar o desempenho do método proposto. Para incorporar o sensor à estrutura foi necessário desenvolver uma proteção, a fim de garantir a integridade do mesmo, aqui denominada como “*Cápsula*

Inteligente”. Para assegurar a confiabilidade no diagnóstico e evitar falsos positivos, implementou-se algoritmos dedicados, tendo em vista fatores como a tomada de decisões com base em reconhecimento de padrões, técnicas estatísticas, otimização, bem como regras de análise e interpretação dos resultados.

Os resultados obtidos nesta pesquisa são encorajadores, pois foi possível alcançar o domínio e aprimoramento da metodologia proposta, tornando mais promissora a possibilidade de sua aplicação em estruturas civis de grande porte, tais como pontes, edifícios, viadutos e hidrelétricas.

Percebe-se que são várias as contribuições científicas que esta pesquisa oferece e, portanto, pode-se destacar: aplicação de uma metodologia inovadora no monitoramento de estruturas de concreto, agregando valor à tecnologia de SHM; compensação dos efeitos advindos da variação de parâmetros que podem influenciar neste tipo de monitoramento; desenvolvimento da chamada *Cápsula Inteligente* e, consequentemente, de estruturas inteligentes; e implementação de rotinas computacionais que garantem confiabilidade na análise dos resultados.

Os elementos estruturais envolvidos nesta pesquisa foram produzidos no Laboratório de Estruturas (LabEST) da Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) da Universidade Federal de Uberlândia. Ressalta-se que neste estudo foi aplicado um material composto de matriz cimentícia reforçado com fibras de aço em todos os elementos estruturais envolvidos nesta Tese. Nenhum relato foi encontrado disponível sobre a aplicação da metodologia proposta para esse tipo de composto, o que contribui para que esta proposta tenha um caráter inovador na área da Dinâmica de Sistemas Mecânicos. Detalhes sobre as características e propriedade desse material serão expostos ao longo do trabalho.

Toda a pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof. José Eduardo Tannús Reis (LMEst) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e se sustenta sobre uma extensa experiência do grupo de pesquisa, conforme caracterizada por dissertações de mestrado e teses de doutorado anteriores, sendo iniciado por Moura (2004, 2008), seguida dos trabalhos de Palomino (2008, 2012), Tsuruta (2008), Leucas (2009), Rabelo (2014), Rocha (2017) e Rabelo (2017), conforme o histórico e síntese das pesquisas exibidos na Fig. 1.4, aqui restritos às dissertações e teses. Tais pesquisas geraram várias publicações em nível nacional e internacional, embasando solidamente esta Tese.

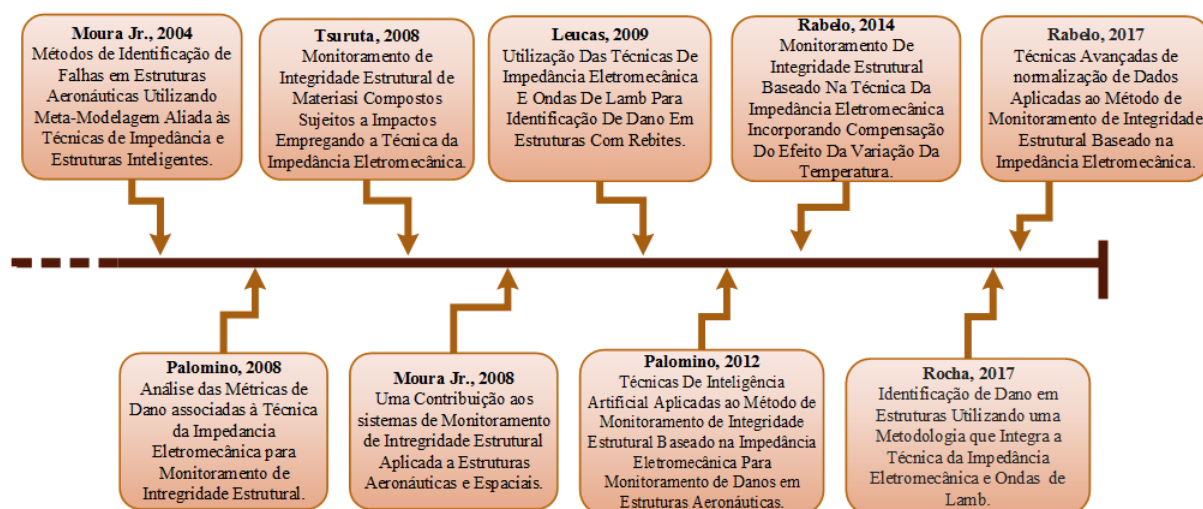


Figura 1.4 – Histórico e síntese dos trabalhos sobre SHM no âmbito da FEMEC-UFU (Adaptado de ROCHA, 2017).

É evidente o destaque da técnica da impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural de estruturas mecânicas de uma maneira geral, como também se observa uma certa carência e necessidade de refinamento da técnica no que diz respeito a aplicações em estruturas de concreto.

1.2. Objetivos

Baseado na argumentação prévia, torna-se claro que o objetivo geral desta Tese é o estudo do monitoramento de integridade estrutural baseada na técnica da impedância eletromecânica visando aplicações em estruturas de concreto. Assim sendo, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Estudar a técnica da impedância eletromecânica de forma particular e, em seguida, enfatizá-la para as estruturas de concreto;
- Investigar o material propício para proteger o sensor incorporado ao concreto;
- Realizar aplicações experimentais da técnica descrita em diferentes elementos estruturais de concreto, tais como como prisma, cilindro e laje;
- Aplicar técnicas de compensação da temperatura;

- e) Implementar algoritmos de processamento de dados, tendo em vista fatores como a tomada de decisões com base em reconhecimento de padrões, técnicas estatísticas, regras de análise e interpretação dos resultados.

1.3. Organização da tese

Esta Tese de Doutorado foi dividida em capítulos, de forma a facilitar uma melhor compreensão do assunto pesquisado. Além deste Capítulo I, que apresenta a contextualização, as motivações para realização do trabalho, contribuições e também os objetivos traçados, o trabalho conta com outros 6 capítulos, além das referências bibliográficas. Todos estão organizados da forma que segue.

O Capítulo II aborda os principais conceitos relativos aos materiais compostos e, em sequência, ao concreto reforçado com fibras de aço. Apresenta-se ainda o funcionamento da interação entre a fibra e a matriz cimentícia. As causas físicas da deterioração do concreto, com ênfase nos processos ligados a gradientes normais de temperatura são exibidas e a deterioração por reações químicas é conceituada brevemente. Alguns ensaios não destrutivos aplicados para manutenção e/ou recuperação de estruturas de concreto e o ensaio por punção em lajes lisas também são apresentados.

O Capítulo III exibe um breve embasamento teórico sobre o método de monitoramento de integridade estrutural com base na técnica da impedância eletromecânica. Em seguida, apresenta-se os métodos de compensação de temperatura utilizados nessa pesquisa, assim como os tratamentos estatísticos realizados nas análises dos dados. Para finalizar, exibe-se o estado da arte com sua abordagem para uso na engenharia civil.

O Capítulo IV trata da aplicação do SHM baseado na impedância eletromecânica em um corpo de prova prismático de concreto reforçado com fibras de aço. Aqui, acopla-se o transdutor na superfície da estrutura estudada. Este capítulo, além de apresentar detalhes das partes que compõem o ensaio experimental (material utilizado na confecção do corpo de prova, sensores, dispositivo de análise de impedância eletromecânica, câmara térmica, máquina de ensaios de materiais (MTS), entre outros), mostra os sinais de impedância eletromecânica, bem como os índices de dano, a influência da temperatura e o resultado da compensação da mesma.

O Capítulo V compreende o desenvolvimento da aplicação da técnica da impedância eletromecânica em estruturas inteligentes de concreto, ou seja, em estruturas com sensores nelas

embutidos. Investiga-se inicialmente o tipo de material propício para a proteção do sensor e, em seguida, a *Cápsula Inteligente* é produzida e testada. A validação experimental inicial envolve uma viga de alumínio, para na sequência realizar a moldagem de corpos de prova cilíndricos e prismáticos, sendo apresentados os detalhes e resultados desse procedimento. Além disso, apresenta-se o monitoramento de uma laje, de forma detalhada, os resultados obtidos e por fim, é realizada uma análise referente à influência de fatores ambientes adversos na técnica da impedância E/M.

O Capítulo VI encerra o trabalho, delineando as principais ideias e conclusões obtidas. Apresenta-se também as perspectivas futuras para este campo de atuação.

CAPÍTULO II

Compostos de Matriz Cimentícia

Como esta Tese trata do monitoramento de integridade estrutural baseado na técnica da impedância eletromecânica aplicada em compostos cimentícios reforçados com fibras de aço, considera-se necessário inicialmente abordar os principais conceitos relativos aos materiais compostos e, em sequência, ao concreto reforçado com fibras de aço. Em seguida, apresenta-se o funcionamento da interação entre a fibra e a matriz cimentícia, assim como a avaliação de quanto as características de cada um destes elementos afetam as propriedades, particularmente a tenacidade, do composto resultante. As causas físicas da deterioração do concreto com ênfase nos processos ligados a gradientes normais de temperatura serão exibidas e a deterioração por reações químicas será conceituada brevemente. Por fim, para fins de ilustração, alguns ensaios não destrutivos aplicados para manutenção e/ou recuperação de estruturas de concreto serão apresentados finalizando este capítulo.

2.1. Materiais Compostos

Muitas conquistas tecnológicas recentes, principalmente aquelas com aplicações nas áreas da engenharia mecânica, aeronáutica, aeroespacial, petroquímica, naval, construção civil, dentre outras, tornaram-se viáveis a partir da chegada dos compostos estruturais. Esse tipo de material compõe uma classe ampla e abrangente, compreendendo desde os polímeros reforçados com fibras, os materiais híbridos metal/composto e os concretos estruturais, até outros compostos que incorporam matriz metálica ou matriz cerâmica. Assim, a característica básica dos compostos é combinar, em nível macroscópico, pelo menos duas fases distintas denominadas matriz e reforço (SAVEGE, 1993).

Observa-se pelas citações do Livro de Êxodo 5, 6 -7, das *Escrituras Sagradas*, que a utilização dos compostos na construção civil é milenar: "Naquele mesmo dia o Faraó deu esta ordem aos inspetores do povo e aos capatazes: não continueis a fornecer palha ao povo, como antes, para o fabrico dos tijolos". Na Fig. 2.1 é apresentada uma casa construída com adobe reforçado com palha.

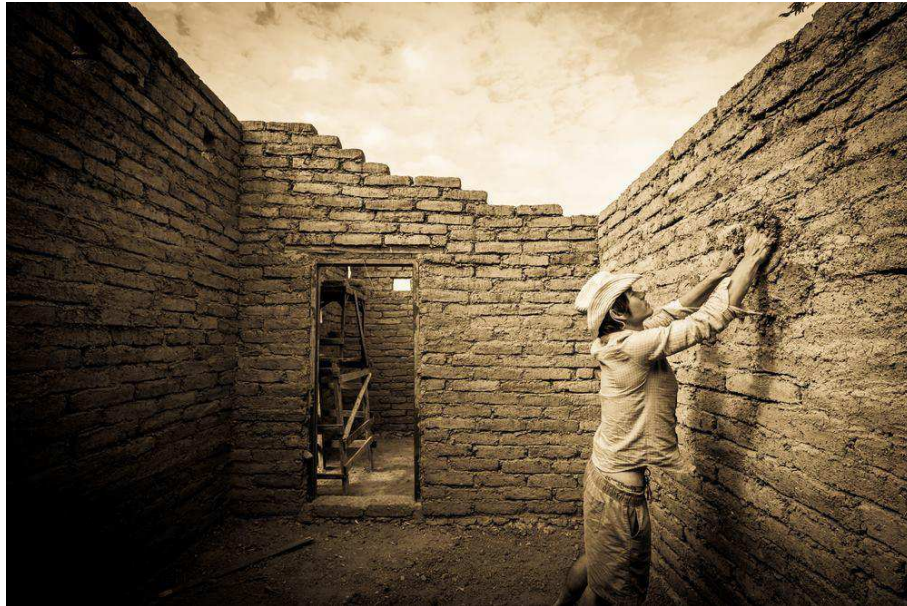


Figura 2.1 – Casa construída com adobe reforçado com palha (SHUTTERSTOCK, 2017).

Segundo Mazumdar (2002) o material é classificado como um composto quando sua constituição envolve alguma combinação de dois ou mais materiais, buscando obter um material resultante com propriedades mecânicas superiores a qualquer um deles isoladamente. Estes materiais resultam de combinações entre metais, cerâmicas e polímeros.

O material composto está associado a dois ou mais componentes, reforço e matriz, que devem ser compatíveis entre si e se consolidarem mecanicamente. As propriedades resultantes são determinadas pelas propriedades das fases constituintes, de suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa (CALLISTER Jr, 2002).

Segundo Matthews e Rawlings (1999), os materiais compostos são definidos como materiais heterogêneos, constituídos por duas fases, sendo uma fase contínua representada pela matriz e outra descontínua dada pelo elemento de reforço (Fig. 2.2).

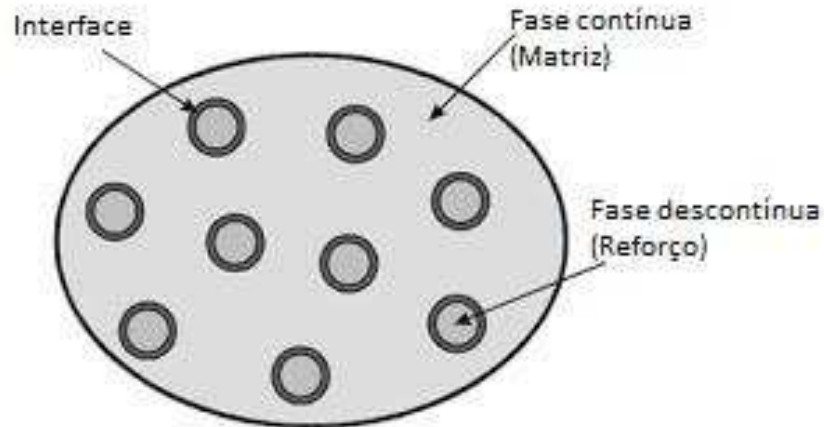


Figura 2.2 – Fases de um material composto (MATTHEWS; RAWLINGS, 1999).

A finalidade da matriz é transmitir para o reforço as solicitações aplicadas ao material por meio da aderência e conectar os elementos de reforço. É fundamental observar algumas características dos compostos, principalmente o módulo de elasticidade que representa uma função sensível do elemento de reforço e a resistência da interface entre a matriz e o reforço (SHACKELFORD, 2008).

De acordo com Matthews e Rawlings (1999), os compostos são classificados em função do tipo de matriz, da natureza e geometria do elemento de reforço. Em relação ao componente matricial, este pode ser classificado como polimérica, cerâmica ou metálica. Em função do elemento de reforço, os compostos podem ser classificados como reforçados por partículas ou por fibras (Fig. 2.3).

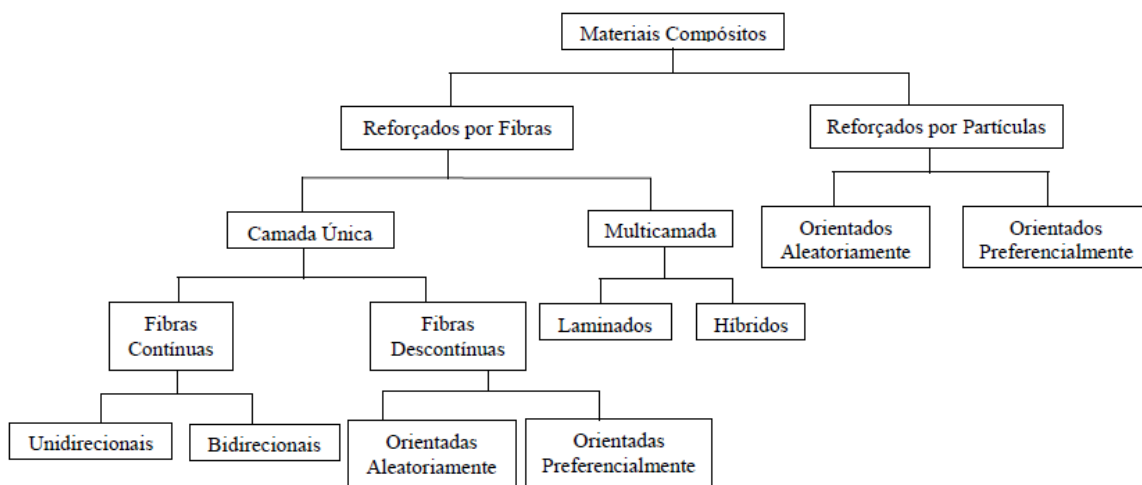


Figura 2.3 – Classificação hierárquica proposta para compostos sintéticos e naturais (MATTHEWS; RAWLINGS, 1999).

Os materiais empregados como agentes de reforço na preparação de compostos de matriz polimérica podem ser classificados como reforço particulado ou reforço fibroso. No primeiro caso pode não ocorrer mudança significativa nas propriedades do material final, quando comparado à matriz polimérica. O material particulado atua mais como enchimento, com a finalidade de diminuir o custo de produção do composto, do que como um material de reforço. Por outro lado, a utilização do reforço fibroso normalmente promove aumento significativo da resistência mecânica e da rigidez das matrizes poliméricas. Os compostos reforçados com materiais fibrosos normalmente são preparados a partir de fibras de alto módulo de elasticidade e resistência mecânica, embutidas ou ligadas na matriz com interfaces distintas entre elas. Em geral, as fibras são os principais membros de solicitação mecânica, enquanto a vizinhança da matriz as mantém na localização e direção desejada, agindo como um transportador médio de carga e protegendo as fibras de danos ambientais. Assim, fibras e matriz conservam suas identidades química e física, produzindo uma combinação de propriedades que não podem ser conseguidas com um dos componentes individuais (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Segundo Shackelford (2008), a distribuição do reforço pode apresentar configurações diferentes, podendo ser contínuo unidirecional, cortado aleatoriamente, ou tramado em um tecido que é laminado com a matriz. A Fig. 2.4 esquematiza alguns exemplos de configurações de compostos reforçados por partículas e por fibras.

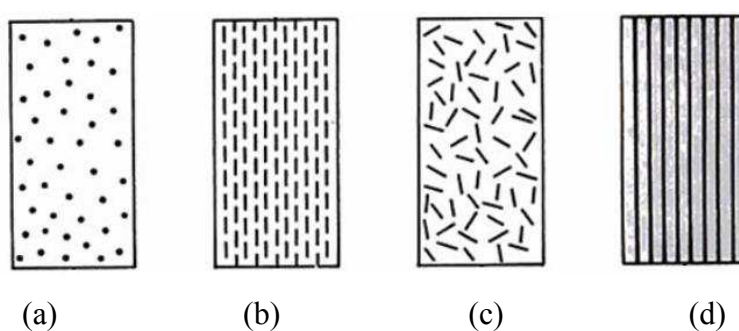


Figura 2.4 – Exemplos de compostos reforçados com: a) partículas aleatórias; b) fibras descontínuas unidirecionais; c) fibras descontínuas aleatórias; d) fibras contínuas unidirecionais (MATTHEWS; RAWLINGS, 1994).

De acordo com Mendonça (2005), normalmente as partículas não possuem uma dimensão predominante como no caso das fibras e geralmente a sua presença não é tão efetiva

no incremento da resistência da matriz. A presença de partículas muito rígidas imersas em matriz frágil pode até mesmo reduzir a resistência do composto em virtude da concentração de tensões no material da matriz adjacente. Entretanto, o uso de partículas permite o incremento de outras propriedades, como:

- Condutividade ou isolamento térmico ou elétrico;
- Resistência a altas temperaturas;
- Redução de atrito;
- Resistência ao desgaste superficial;
- Melhoria da usinabilidade;
- Aumento da dureza superficial;
- Redução de custos.

A Fig. 2.5(a) exhibe um composto reforçado por partículas, cujas fases são compostas por materiais cerâmicos, cimento, areia e brita. Já na Fig.2.5(b) apresenta a metalografia de um material composto constituído de carbetto cementado de WC-Co. Este tipo de material é amplamente utilizado na confecção de ferramentas de corte para aços endurecidos, proporcionando as mesmas alta dureza e tenacidade, pois as duras partículas de carbetto, que são extremamente frágeis e capazes de suportar as tensões de corte, são unidas com uma matriz metálica, no caso o cobalto, que possui uma alta tenacidade (CALLISTER Jr., 2002).

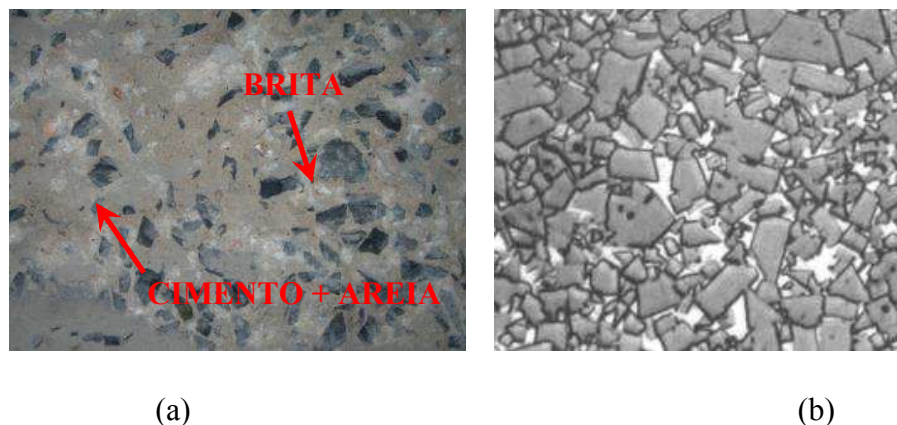


Figura 2.5 – Compostos reforçados com partículas: (a) Concreto; (b) Fotomicrografia de um carbetto cementado WC-Co. As áreas claras são as matrizes de Cobalto e as áreas escuras são as partículas de carbetto de tungstênio. Ampliação de 100 vezes. (Adaptado de CALLISTER Jr., 2002).

Outro fator determinante no desempenho de um composto, frente aos mais diversos tipos de solicitações, são as frações volumétricas das fibras (F_F), da matriz (F_M) e dos vazios (F_V). Esses parâmetros são utilizados para quantificar os volumes percentuais de cada componente em relação ao volume total de um composto. Os valores de F_F e F_M são determinados pelo processo de fabricação adotado, para qualquer tipo de composto. Segundo Mathews e Rawlings (1999) é possível obter compostos com valores de F_F de até 70% e deseja-se que os valores de F_V sejam menores que 1%, pois esses são prejudiciais ao desempenho mecânico dos compostos.

Os materiais compostos apresentam características distintas e consequentemente proporcionam diferentes aplicações. Essas aplicações dependem do desempenho estrutural, da disponibilidade e do preço da matéria prima, do processo de fabricação, dentre outros. Embora as características dos compostos possam variar em função do tipo de aplicação, muitos aspectos são comuns a inúmeros tipos de compostos. As relações entre tensões e deformações, apresentam algumas peculiaridades que são típicas de cada classe de material (GÓIS, 2010).

Os materiais que apresentam comportamento elástico linear oferecem tensão como função linear da deformação e, após a remoção das forças atuantes, esses materiais voltam a sua forma original, ou seja, o material é considerado perfeitamente elástico e as deformações aparecem ou desaparecem imediatamente com a aplicação ou remoção de tensões. Por semelhança de outros materiais estruturais, o concreto é admitido como elástico até um certo limite, sob uma tensão permanente (SHACKELFORD, 2008).

O módulo de elasticidade avalia a resistência do material à deformação elástica. Pode-se considerar como uma medida da sua rigidez. Materiais com baixo módulo de elasticidade deformam muito elasticamente quando sujeitos a solicitações mecânicas e alguns desses materiais são indicados para estruturas previamente projetadas para sofrerem deformação apenas transitórias. No entanto, na maioria das aplicações não se deseja a ocorrência de deflexões, ou seja, os materiais devem apresentar alto módulo de elasticidade. A avaliação da rigidez do material é extremamente importante tanto durante o processo de montagem ou fabricação, quanto durante sua vida útil através de monitoramentos, para que, assim, se tenha controle da estabilidade dimensional do componente. No caso de materiais perfeitamente elásticos, a determinação do módulo de elasticidade exige alguns cuidados. Porém, quando a relação linear entre tensão e deformação não é obedecida, ou no caso dos materiais compostos, a determinação dessa propriedade apresenta algumas particularidades (MATHEWS;

RAWLINGS, 1999). Este é o caso do concreto e, portanto, seu módulo de elasticidade varia em função das matérias primas utilizadas como também de sua resistência mecânica.

2.2. Concreto Reforçado com Fibras de Aço

O concreto de cimento Portland é o material de construção mais utilizado no mundo e pode ser visto como um composto formado por três componentes principais: pasta de cimento, agregados e água. Em função da natureza desses componentes principais e suas proporções, assim como a utilização ou não de aditivos e adições, o composto é capaz de oferecer uma grande variação de suas propriedades (NEVILLE, 1997).

O bom comportamento da matriz cimentícia fica comprometido por sua limitada resistência à tração. Antes mesmo de ser submetido a tensões externas, o concreto normalmente possui microfissuras na zona de transição entre a matriz e os agregados graúdos, consequentemente, pouca energia é necessária para que aconteça o aumento dessas fissuras, justificando a ruptura frágil do material (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ao analisar o problema do ponto de vista microestrutural, quando o concreto é submetido à tração ou à flexão, a energia se concentra rapidamente nas extremidades das microfissuras existentes, causando um crescimento descontrolado. Como provável consequência, esse fenômeno causa uma ruína frágil do material. Uma das soluções mais comuns aplicadas para aprimorar o desempenho à tração de matrizes frágeis, consiste na adição de fibras às mesmas. Essas fibras agem como pontes de transferências de tensões, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das fissuras (Fig. 2.6).

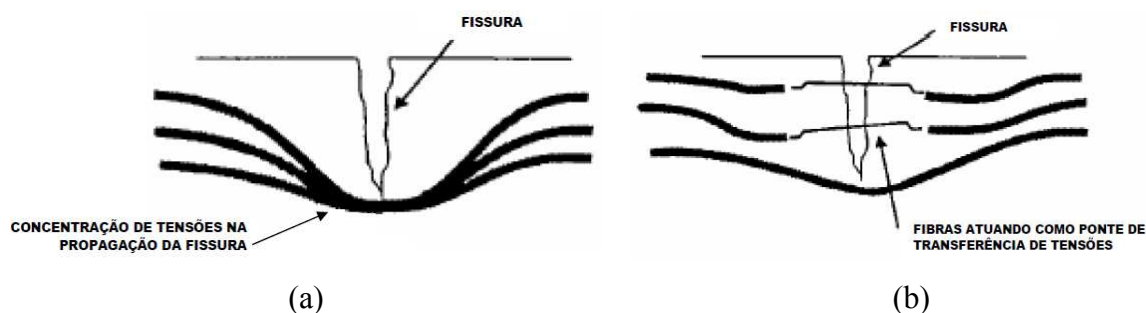


Figura 2.6 – (a) Mecanismo de concentração de tensões na tração no extremo das microfissuras. (b) Mecanismo de reforço das fibras atuando como ponte de transferência de tensões (NUNES; AGOPYAN, 1998).

Existem variados tipos de fibras disponíveis para uso comercial. De acordo com a terminologia adotada pelo *American Concrete Institute* (ACI) existem quatro categorias de concreto reforçado com fibras: concreto reforçado com fibras de aço, de vidro, sintéticas e naturais.

A escolha de um determinado tipo de fibra depende das características que se deseja no composto. O módulo de elasticidade e a resistência mecânica são as duas propriedades mecânicas mais importantes na definição da capacidade de reforço que a fibra pode oferecer ao concreto (FIGUEIREDO, 2011).

As fibras com módulo de elasticidade baixo e alongamento maior que as matrizes cimentícias, como as fibras de polipropileno e polietileno por exemplo, são capazes de absorver mais energia, com elevada tenacidade e grande resistência ao impacto, porém não contribuem tanto para o aumento da resistência do composto. As fibras com alto módulo de elasticidade e alta resistência, como as fibras de aço, de vidro e de carbono, produzem compostos com elevada resistência à tração, rigidez e capacidade de resistir a cargas dinâmicas (OLIVEIRA JR, 2012).

Para se obter um produto final com uma durabilidade e qualidade satisfatória, a compatibilidade entre a fibra e a matriz torna-se fundamental. Segundo Bentur e Mindess (2007) existe uma variedade de tipos de fibras que podem ser utilizadas em matriz cimentícia ou polimérica, como é o caso das fibras de aço, vidro, amianto, celulose, madeira e sisal. As características de algumas fibras podem ser observadas na Tab. 2.1.

Uma característica importante das fibras é a relação entre seu comprimento e seu diâmetro equivalente, chamada de relação de aspecto ou fator de forma. Quanto maior for o fator de forma, melhor será a aderência entre a fibra e a matriz.

As fibras de aço são fabricadas com base em fios de aço trefilados, que são cortadas e comercializadas em diversos comprimentos e diâmetros. Sua resistência à tração varia entre 500 MPa e 2600 MPa, enquanto seu módulo de elasticidade fica em torno de 210 GPa. Esse tipo de fibra destinada ao reforço do concreto possui um comprimento que varia de 12,7 mm a 63,5 mm e fator de forma entre 30 e 100, suficientemente curtas para se dispersarem aleatoriamente na mistura fresca do concreto.

O Brasil conta com a ABNT NBR 15530: 2007 que estabelece parâmetros para a classificação das fibras de aço com baixo teor de carbono e dispõem sobre os requisitos mínimos de forma geométrica, tolerâncias, defeitos de fabricação, resistência à tração e dobramento. Com isso, procura-se garantir que o produto fornecido em conformidade com esses requisitos apresente potencial para proporcionar um desempenho adequado ao concreto

reforçado com fibras de aço, desde que sejam observados os cuidados com a dosagem e controle do material.

Tabela 2.1 –Tipos e propriedades de fibras (Adaptado de BENTUR; MINDES, 2007).

Fibra	Massa específica (g/cm³)	Diâmetro (µm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Deformação específica na ruptura (%)
Aço	7,8	100-1000	500-2600	210000	0,5-3,5
Vidro					
E	2,54	8-15	2000-4000	72000	3,0-4,8
AR	2,70	12-20	1500-3700	80000	2,5-3,6
Sintéticas					
Acrílico	1,18	5-17	200-1000	17000-19000	28-50
Aramida	1,44	10-12	2000-3100	62000-	2,0-3,5
Carbono	1,9	8-10	1800-2600	120000	0,5-1,5
Nylon	1,14	23	1000	230000-	20
Poliéster	1,38	10-80	280-1200	380000	10-50
Polietileno	0,96	25-1000	80-600	5200	12-100
Polipropileno	0,9	20-200	450-700	10000-18000	6-15
				5000	
				3500-5200	
Naturais					
Celulose	1,5	25-125	350-2000	10000-40000	3,5
Sisal	-	-	280-600	13000-25000	3,0
Bambu	1,15	50-400	350-500	33000-40000	-
Matriz de cimento (Para comparação)	2,5	-	3-7	10000-45000	0,02

Essa norma traz várias contribuições, tais como a determinação de uma tipologia e classificação de fibras de aço. Na norma são previstos três tipos básicos de fibras em função de sua conformação geométrica:

Tipo A: fibra de aço com ancoragens nas extremidades;

Tipo C: fibra de aço corrugada;

Tipo R: fibra de aço reta.

Além dos tipos estabelecidos, três classes foram previstas para fibras de aço associado ao tipo de aço que deu origem à fibra:

Classe I: fibra originária de arame trefilado a frio;

Classe II: fibra originária de chapa laminada cortada a frio;

Classe III: fibra originária de arame trefilado e escarificado.

Na Fig. 2.7 observa-se a configuração geométrica dos tipos e classes de fibras previstas pela norma. Esta classificação permitiu estabelecer os requisitos e tolerâncias específicas desse material.

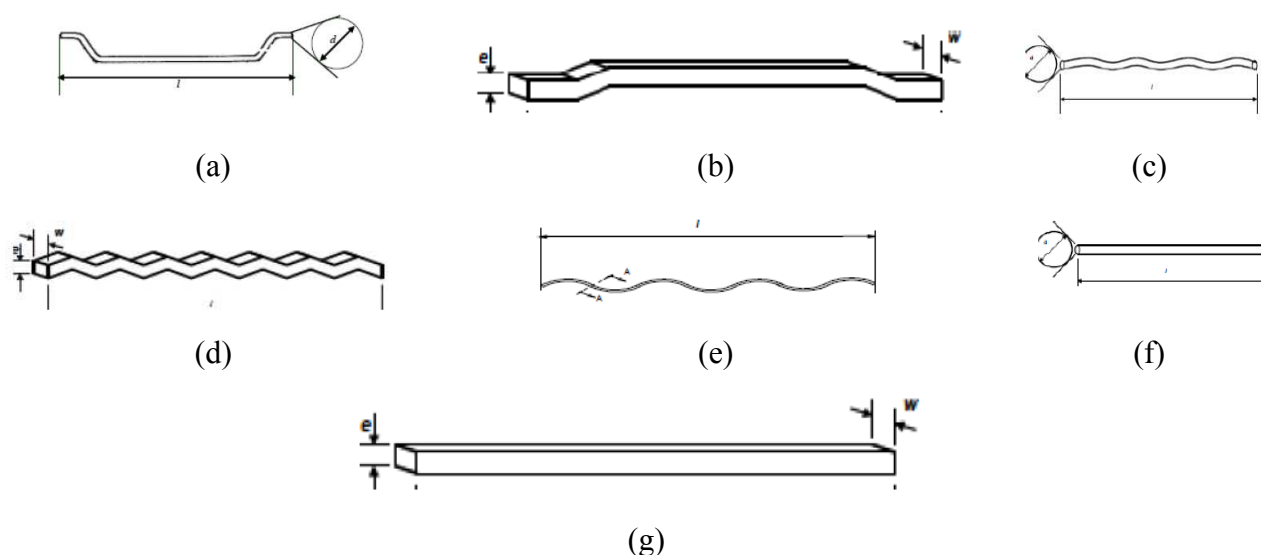


Figura 2.7 - Tipos e classes das fibras de aço: (a) AI; (b) AII; (c) CI; (d) CII; (e) CIII; (f) RI; (g) RII (ABNT NBR 15530: 2007).

Nesta pesquisa utilizou-se fibras de aço classificadas como Tipo A e Classe I como reforço no concreto. Segundo as especificações do fabricante elas possuem um fator de forma de 65, comprimento de 60 mm, diâmetro de 0,90 mm, resistência à tração de 1160 MPa e módulo de elasticidade de 210 GPa (Fig. 2.8).



Figura 2.8 – Fibras de aço.

O primeiro uso estrutural do concreto reforçado com fibras de aço se deu em 1971, em Londres, na produção de painéis desmontáveis para um estacionamento do aeroporto Heathrow. O concreto continha 3% em peso de fibras de aço com 0,25 mm de diâmetro e 25,0 mm de

comprimento. Na inspeção, após cinco anos de uso, as lajes não apresentaram sinais de fissuras (METHA; MONTEIRO, 2008).

Entre os métodos normativos, somente a FIB (2012) permite a substituição da armadura de cisalhamento pelo concreto reforçado com fibras de aço. Para Barros (2000), a utilização de CRFA apresentaria inúmeras vantagens em relação ao esforço convencional utilizando barras de aço, com destaque na redução do tempo com mão de obra para corte e dobra de armadura por exemplo, afetando diretamente no tempo total de execução da estrutura de concreto.

Alguns cuidados devem ser tomados durante o preparo do CRFA, de modo a evitar que ocorra a aglomeração das fibras, formando os denominados *ouriços*. Esse acúmulo promove a redução na trabalhabilidade, desempenho mecânico e da durabilidade do concreto (MORAES NETO, 2013). Vale ressaltar que o controle da trabalhabilidade desse tipo de concreto é fundamental para a definição do seu comportamento mecânico. Concretos mal adensados causam perda de homogeneidade na distribuição das fibras, o que faz com que as fibras não atuem de maneira otimizada como ponte de transferência de tensões ao longo da fissura (FIGUEIREDO, 2011).

As fibras inibem o início e a propagação das fissuras, ou melhor, elas aumentam a tensão que corresponde à primeira fissura da matriz. Porém, é no estado de pós fissuração inicial que as fibras exercem sua principal função, qual seja a de atrelar e interceptar a progressão das microfissuras, impedindo assim a ruptura brusca. Como consequência disso, a abertura e o comprimento das fissuras na matriz endurecida são menores, melhorando consideravelmente a impermeabilidade e a durabilidade dos compostos expostos ao ambiente (BASTOS, 1999).

Segundo Figueiredo (2000), o funcionamento do CRFA compreende na distribuição de esforços após a formação de fissuras, mesma quando o teor de fibras é baixo. No concreto convencional, ao ocorrer uma fissura, esta torna-se uma barreira para a propagação das tensões, levando à concentração de tensões na extremidade da fissura. Já no CRFA, as fibras funcionam como ponte de transferência, minimizando a concentração de tensões nessa região. A distribuição de tensões para o concreto convencional e reforçado com fibras de aço são mostradas nas Fig. 2.9 e Fig. 2.10, respectivamente.

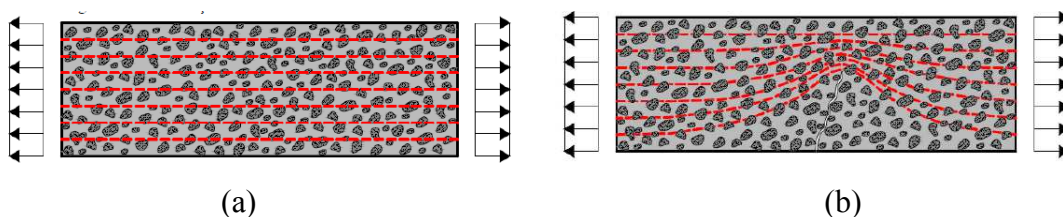


Figura 2.9 – Distribuição de tensões no concreto sem fibras. (a) antes da fissuração; (b) após a fissuração (FIGUEIREDO; 2000).

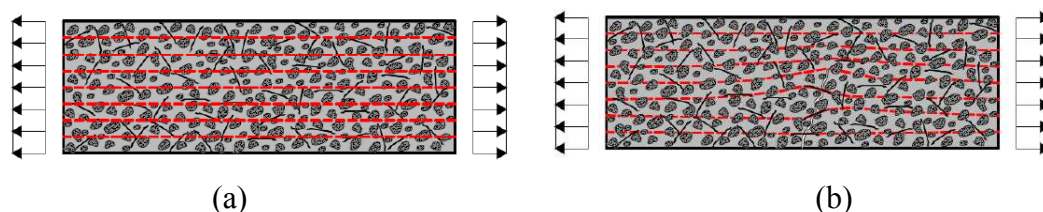


Figura 2.10 – Distribuição das tensões no CRFA. (a) antes da fissuração. (b) após a fissuração (FIGUEIREDO, 2000).

As fibras são, portanto, adicionadas ao concreto com o objetivo de modificar o regime de ruptura do material, conferindo uma resposta mais dúctil no regime pós-pico do carregamento e restringindo a abertura e a propagação de fissuras. Pelo fato de estarem distribuídas por todo o volume do material, geram um composto mais rígido e resistente (GARCEZ, 2005). Para Bentur e Mindes (2007) a adição de fibras de aço ao concreto influencia certas características mecânicas do material em maior ou menor grau dependendo de vários fatores como: fibras (tipo, geometria, volume, orientação e distribuição), matriz (resistência e diâmetro máximo do agregado) e as características do corpo de prova (tamanho, geometria, método de preparação e taxa de carregamento).

2.3. Propriedades do Concreto no Estado Endurecido

As propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido compõem a base para o dimensionamento de uma estrutura de concreto. Essas propriedades são verificadas e avaliadas por meio de experimentos em laboratórios reproduzindo o mais integralmente possível as condições de serviço, desde a natureza e duração das cargas aplicadas até as condições ambientais. Nesta Tese serão expostas somente as propriedades que são pertinentes nesta pesquisa: tenacidade, porosidade e permeabilidade.

2.3.1. Tenacidade

Sabe-se que o concreto é um material frágil, que se rompe com pequenas deformações. A adição de fibras de aço ao concreto altera seu comportamento mecânico melhorando sua capacidade de absorção de energia, ou seja, a tenacidade.

Segundo Figueiredo (2011), tenacidade do CRFA é definida pela energia absorvida pelo composto quando carregado, abrangendo a energia absorvida antes e após a fissuração da matriz, quando as fibras passam a atuar de maneira mais efetiva.

A ruptura das estruturas de concreto é usualmente causada pela propagação de fissuras de tração. Ao basear nessa propagação de fissuras, a curva Tensão *versus* Deformação do concreto simples pode ser dividida em quatro estágios (Fig. 2.11).

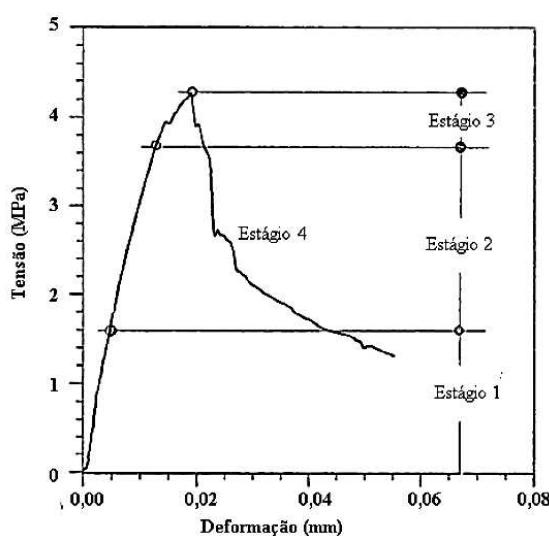


Figura 2.11 – Estágios da fissuração do concreto (NAAMAN; REINHARDT, 1995).

De acordo com Naaman e Reinhardt (1995), teoricamente o concreto é considerado não fissurado correspondendo ao Estágio 1 de fissuração com até 30% da tensão de pico. No Estágio 2, cerca de 80% da carga de ruptura, a resistência da matriz é alcançada e são desenvolvidas microfissuras internas que se propagam. Para esse segundo estágio, as microfissuras são isoladas e distribuídas aleatoriamente no elemento de concreto. Durante o Estágio 3, as fissuras internas começam a se localizar em uma grande fissura que se propaga com o aumento da carga. O comprimento dessa grande fissura, para a carga de pico, é chamado de comprimento crítico de fissura. O Estágio 4 ocorre, por fim, após a tensão de pico, onde uma grande fissura se propaga de maneira frágil, ou seja, mesmo que não haja o aumento da tensão.

A adição de fibras de aço ao concreto não influencia o Estágio 1, uma vez que teoricamente essa matriz não se encontra fissurada. Nesse estágio inicial, tanto o concreto simples como o CRFA tendem a responder linearmente até o primeiro ponto de fratura (Fig. 2.12).

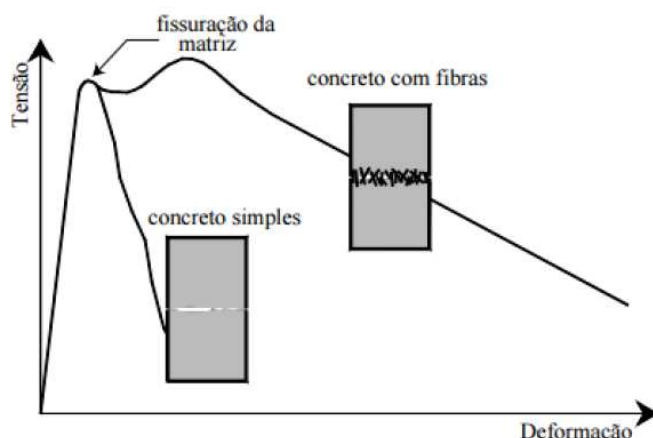


Figura 2.12 – Comportamento de matrizes cimentícias sem a adição de fibras e com adição de fibras de aço (FERRARI, 2007).

De acordo com a Fig. 2.12, após a fissuração da matriz, a capacidade de carga do concreto não reforçado diminui rapidamente, já o CRFA apresenta uma tenacidade considerável. A presença das fibras retarda a abertura das fissuras até que haja o arrancamento ou a ruptura da fibra que a intercepta.

A típica resposta tensão-alongamento do CRFA indica duas propriedades de interesse, a saber, a tensão de fissuração (σ_{cc}) e a tensão máxima pós-fissuração (σ_{pc}). A resistência à fissuração do composto é primariamente influenciada pela resistência da matriz, enquanto a resistência pós-fissuração depende dos parâmetros de reforço proporcionados pelas fibras.

Na grande maioria dos CRFA, a σ_{pc} é menor que a σ_{cc} e a ruptura se desenvolve por meio da abertura de uma única macrofissura com consequente redução da tenacidade (METHA; MONTEIRO, 2008). Para essa classe de compostos é detectado o comportamento *strain-softening* à tração ou *deflection-softenig* na flexão, representado graficamente na Fig. 2.12(a). Quando a σ_{pc} é maior que a resistência à primeira fissura, ocorre um endurecimento à tração causado pela formação de múltiplas fissuras e aumento da tenacidade. Neste caso detecta-se o

comportamento *strain-hardening* à tração ou *deflection-hardening* à flexão e também são chamados de HFRCC (*High Performance Fiber Cement Composites*) (NAAMAN, 2003). Ambos os comportamentos são representados nas Figs. 2.13(a) e 2.13(b).

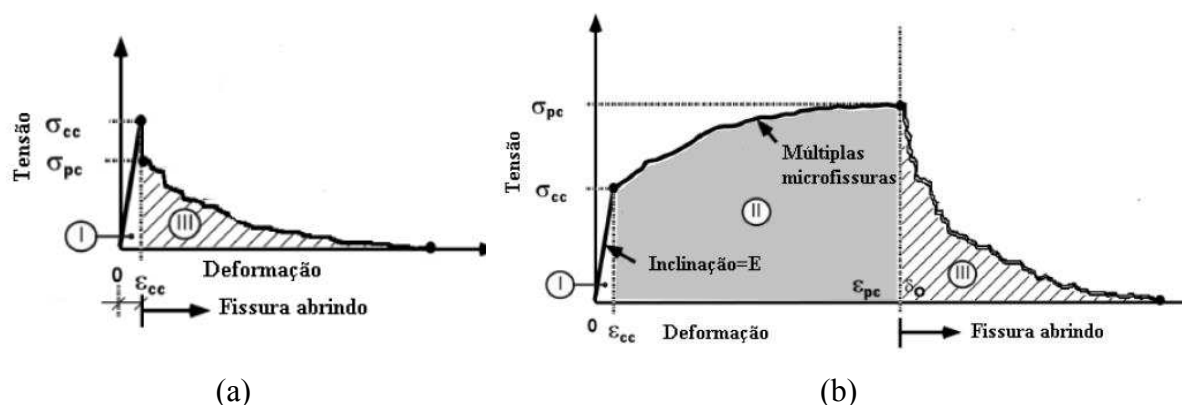


Figura 2.13 – Resposta típica tensão-deformação do CRFA: (a) comportamento *strain-softening* – CRFA convencional; (b) comportamento *strain-hardening* – HFRCC (NAAMAN, 2003).

Na Fig. 2.13 os estágios de fissuração no CRFA são indicados. No estágio I a matriz não se encontra fissurada. Quando σ_{pc} é maior que σ_{cc} identifica-se o estágio II onde microfissuras são desenvolvidas. Por fim, na situação onde σ_{pc} é maior que σ_{cc} , o segundo estágio desaparece e a resposta tensão-deformação do composto fica reduzida aos estágios I e III. Esse processo de deformação de múltiplas fissuras continua até que o carregamento alcance a resistência ao arrancamento das fibras que costuram a fissura crítica. Neste ponto, inicia-se o estágio III. Em alguns casos, o arrancamento das fibras pode ser precedido pela sua ruptura, sendo este mecanismo de colapso menos desejável devido sua natureza frágil (NAAMAN, 2003).

Além dos estágios, a curva representada na Fig. 2.13(a) é típica de CRFA dosados com baixos volumes de fibras (V_f). O princípio básico para a obtenção de um comportamento do CRFA *strain-hardening* à tração é a concepção de um composto com o volume de fibras excedente ao volume crítico de fibras ($V_{f,crit}$) (NAAMAN, 2003; METHA; MONTEIRO, 2008).

Concretos dosados com V_f inferiores ao $V_{f,crit}$ oferecem redução na resistência após a fissuração da matriz apresentando o comportamento *strain-softening*. Caso contrário, o concreto apresenta, consequentemente, o comportamento *strain-hardening* (Fig. 2.14).

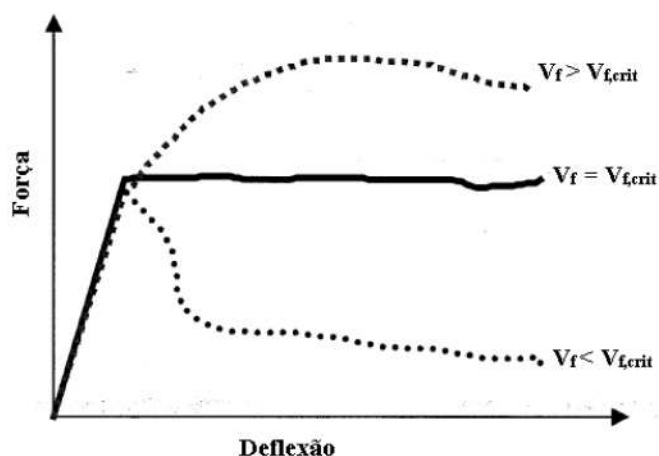


Figura 2.14 – CRFA relacionando V_f e $V_{f,crit}$ (FIGUEIREDO, 2000).

A Fig. 2.15 mostra a faixa de microfissuração do CRFA com o primeiro comportamento. Observa-se que macrofissuras são substituídas por um denso sistema de microfissuras favoráveis, tanto para a segurança como para a durabilidade (BRANDT, 2008).

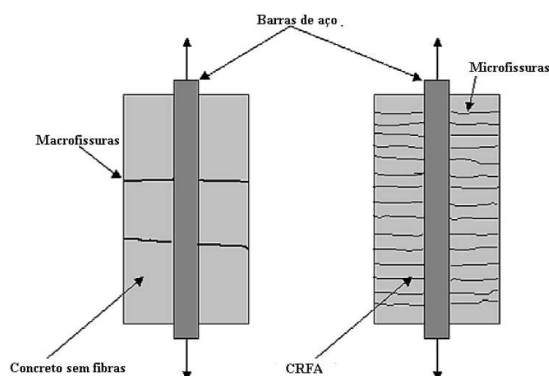


Figura 2.15 – Padrão de fissuração no concreto armado e no CRFA submetidos à tração; (BRANDT, 2008).

A magnitude da melhora na tenacidade no CRFA é influenciada pela concentração, tipo, geometria e orientação das fibras, pela aderência fibra-matriz e pelas características da matriz. Como esse não é o foco desta Tese, todos esses fatores podem ser consultados de forma completa e detalhada em Bastos (1999); Figueiredo (2000); Song e Hwang (2004); Garcez (2005); Brandt (2008); Ferreira (2002); Góis (2010); Metha e Monteiro (2008); Zhang et al. (2014); Vitor (2017) e Alves (2017).

Zhang et al. (2014) avaliaram a tenacidade de concretos de alto desempenho reforçados com fibras de aço e observam um aumento desse índice com a elevação da concentração de fibras até um determinado percentual (Fig. 2.16).

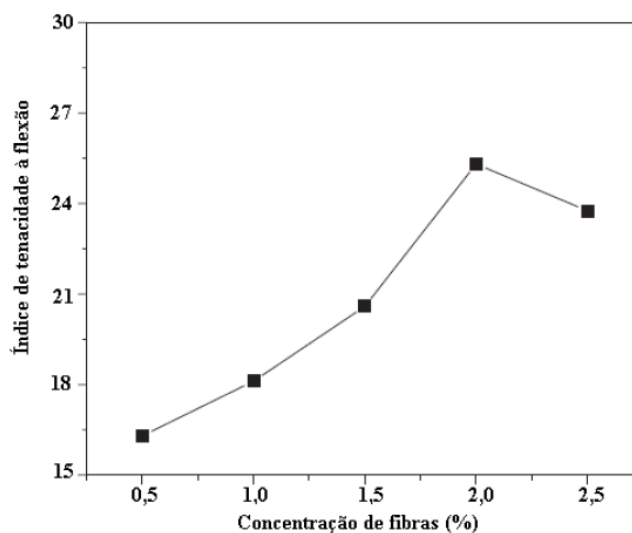


Figura 2.16 – Tenacidade versus Concentração de fibras (Adaptado de ZHANG et al.; 2014).

A tenacidade é caracterizada como índice de tenacidade à flexão conforme orientação do método ASTM C1609 (2012). Conforme representado na Fig. 2.16, valores de V_f entre 2% e 5% por volume de concreto (157 kg/m^3 e 196 kg/m^3) apresentaram queda da tenacidade à flexão. Ainda segundo Zhang et al. (2014), essas regras de variação indicam que a contribuição das fibras de aço para esse índice do concreto ocorre somente quando o V_f não ultrapassa o valor de 2%.

Marar, Eren e Yitmen (2011) observaram um aumento significativo na tenacidade do concreto para concentrações de fibras entre 0 e 2% por volume. Observaram uma elevação do ramo descendente da curva tensão *versus* deformação em todas as curvas com adição de fibras de aço ao comparar com a curva sem adição de fibras, indicando o aumento da tenacidade (Fig. 2.17).

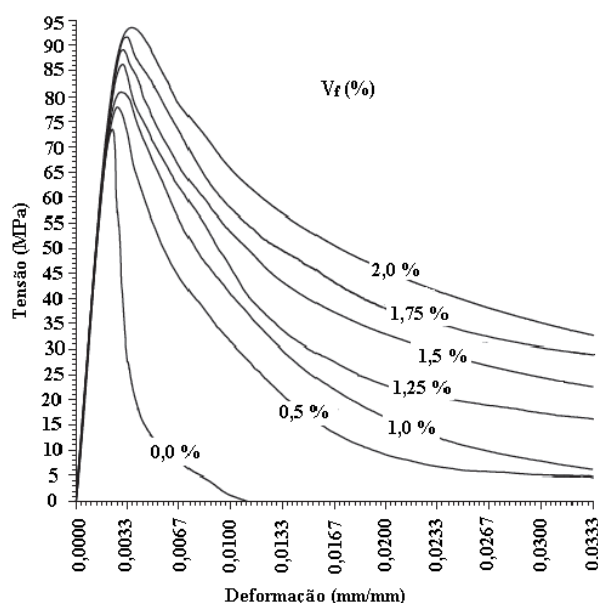


Figura 2.17 – Curva Tensão versus Deformação com variações no V_f em concreto com a/c de 0,55 (MARAR, EREN; YITMEN; 2011).

A tenacidade pode ser estimada a partir do valor da área sob a curva tensão-deformação ou força-deslocamento produzida por ensaios de tração uniaxial direta ou ensaios de flexão (ACI 544.4R, 2009). Devido às dificuldades encontradas nos ensaios de tração uniaxial, ensaios à flexão de elementos prismáticos de concreto são mais utilizados para a determinação da tenacidade.

Acréscimos na tenacidade também podem estar relacionados com a proporção adequada dos agregados, da relação água/cimento, aditivos, pois as características e dosagem das fibras não são os únicos responsáveis pelo melhor desempenho desse composto. Sendo assim, é necessário considerar as características da matriz na metodologia de dosagem, tanto no que se refere à trabalhabilidade como à resistência mecânica (FIGUEIREDO, 2011).

2.3.2. Porosidade e Permeabilidade

A porosidade é a medida da proporção do volume total do concreto ocupada pelos poros, comumente expressa em porcentagem. A estrutura de uma pasta endurecida de concreto não é homogênea. Com isso, não é a porosidade total que influencia efetivamente a resistência, a

permeabilidade e as variações de volume em uma pasta de cimento endurecida, e sim a distribuição do tamanho dos poros. Essa distribuição do tamanho dos poros é afetada pela relação água-cimento (a/c) e pela idade de hidratação do cimento. Os poros grandes influenciam principalmente a resistência à compressão e a permeabilidade, enquanto os poros pequenos a retração por secagem e a fluência (BARBAR, 2016).

A permeabilidade, que representa a facilidade com que um fluido pode escoar através de um sólido, é definida pelo tamanho e continuidade dos poros na estrutura desse sólido. A permeabilidade será alta se a porosidade for grande e os poros estiverem interligados, pois, contribuirão para o deslocamento de fluidos através do concreto. O tamanho e a continuidade dos poros na pasta de cimento endurecida, em qualquer estágio durante o processo de hidratação do cimento, determinarão o coeficiente de permeabilidade do concreto (SUN et al., 2014).

Os vazios no concreto constituem as entradas e os meios de condução de água e demais agentes agressivos que desencadearão processos deteriorantes em seu interior. Permeabilidade e absorção estão relacionadas diretamente à porosidade, à conectividade e tamanho dos poros (SUN et al., 2014).

Helene e Terzian (1992) propuseram uma classificação dos concretos sem aditivos de acordo com a porosidade e a absorção de água que pode ser verificado na Tabela 2.2. Mas de acordo com Neville (1997), são considerados bons concretos aqueles que possuem absorção menor que 10% em massa.

Tabela 2.2 – Classificação dos concretos de acordo com a porosidade e absorção de água (HELENE; TERZIAN, 1992).

Qualidade do concreto	Propriedade	
	Porosidade	Absorção de água
Duráveis	< 10%	<4,2%
Normais	10% a 15%	4,2% a 6,3%
Deficientes	>15%	>6,3%

Ao considerar que o agregado no concreto geralmente é admitido como impermeável e que o ar incorporado aumenta a porosidade do concreto, mas de certa forma diminui sua permeabilidade, a incorporação de ar está diretamente relacionada à durabilidade do concreto (HELENE; TERZIAN, 1992).

2.4. Deterioração do Concreto

O conhecimento dos principais mecanismos de deterioração do concreto pode auxiliar no diagnóstico da maior parte dos problemas patológicos das estruturas. As causas da deterioração do concreto são consequências da ação de agentes naturais no qual ele interage, provocando seu envelhecimento, ou seja, a perda progressiva de desempenho estético, funcional ou estrutural.

A umidade relativa, orientação de chuvas e ventos, concentração de substâncias presentes, temperatura, além das características dos materiais constituintes do concreto e seus poros, são fatores importantes na interação entre meio ambiente e concreto (NEPOMUCENO, 2005). A água está sempre envolvida no processo de deterioração do concreto, em quase todos os mecanismos de sua degradação.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) as causas da deterioração do concreto, são induzidas por vários agentes envolvendo diversas ações mecânicas, físicas, químicas, físico-químicas e até biológicas. Essas atuam principalmente em meios agressivos de forma simultânea e progressiva, tornando difícil a determinação da contribuição das diversas causas atuantes.

É indispensável o conhecimento das causas do desgaste ou deterioração do concreto, não apenas para proceder ao controle e reparos exigidos, como também para garantir que, após o reparo, a estrutura não volte a se deteriorar e mantenha sua vida útil integralmente (SOUZA; RIPPER, 1998).

De modo geral, a maioria dos mecanismos de deterioração desenvolvem-se no tempo, segundo um modelo de duas etapas de envelhecimento (Fig. 2.18). Observa-se a existência de duas fases distintas, denominadas Fase de Iniciação e Fase de propagação (CEB-FIB 1990).

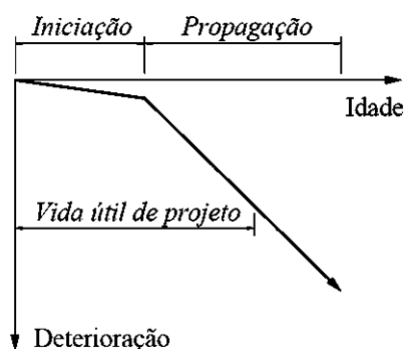


Figura 2.18 – Desenvolvimento da deterioração no concreto com o tempo (CEB-FIB 1990).

Durante a Fase de Iniciação, não há sinais visíveis de degradação, nem perda significativa da resistência dos materiais ou da função da estrutura, mas algumas barreiras de proteção são vencidas pela agressividade do ambiente. Já na Fase de Propagação, a degradação evolui ativamente, em muitos casos de forma rápida, deixando-se de perceber geralmente por sinais externos (CEB-FIB 1990).

Há situações particulares em que acontecem irregularidades na fase de execução das obras, acarretando assim um desgaste prematuro dessas estruturas. Em Londrina, por exemplo, houveram irregularidades na execução das obras do viaduto da Avenida Dez de Dezembro com a rodovia PR-445 (Fig. 2.19). A Justiça determinou a suspensão temporária das obras desse viaduto após comprovação de que as rachaduras que apareceram na obra ofereciam riscos à população (G1-PR, 2016).



Figura 2.19 – Rachaduras do viaduto da Avenida Dez de Dezembro com a PR-445, em Londrina (G1-PR, 2016).

Com isso, percebe-se que construir obras com qualidade e durabilidade adequadas, reduzindo a possibilidade de existência de problemas patológicos, constitui-se numa ação indispensável para a redução dos gastos com reparos (AZEVEDO, 2011).

Grande parte do conhecimento sobre os processos físico-químicos responsáveis pela deterioração do concreto deriva do histórico de casos de estruturas, em campo. Na prática, a deterioração do concreto raramente se deve a uma única causa. Normalmente, para um estágio avançado de deterioração desse composto, há mais que um fenômeno deletério agindo. De forma geral, as causas físicas e químicas da deterioração estão tão interligadas e mutualmente

se reforçando, que separar as causas dos seus efeitos torna-se muitas vezes impossível. Diante disso, uma classificação dos processos de deterioração do concreto em nítidas e separadas categorias deve ser vista com certa cautela. O propósito de tal classificação é apenas explicar os diferentes fenômenos individualmente. No entanto, não se deve negligenciar as interações que ocorrem quando muitos fenômenos estão presentes simultaneamente (METHA; MONTEIRO, 2008).

2.4.1. Causas Físicas da Deterioração do Concreto

As causas físicas intrínsecas ao processo de deterioração da estrutura são resultantes da variação extrema da temperatura, ação do vento, água (sob a forma de chuva, gelo e umidade) e do fogo (SOUZA; RIPPER, 1998). Mehta et al. (1982) agruparam as causas físicas em duas categorias: (a) desgaste superficial ou perda de massa devido à abrasão, erosão e cavitação; (b) fissuração devido a gradientes normais de temperatura e umidade, cristalização de sais nos poros, carregamento estrutural e exposição a variações bruscas de temperaturas, como congelamento ou fogo.

Nesta Tese serão enfatizados somente os processos ligados a variações de temperatura e umidade. Para maiores esclarecimentos das demais categorias, recomenda-se consultar Neville (1997), ACI 201.2R (2001), Gilbert e Ranzi, (2011); Souza (2013), dentre outros.

2.4.1.1. Congelamento e Degelo

A deterioração causada pelo congelamento e degelo está restrita à países de clima frio. A aplicação mais importante de aditivos incorporadores de ar é em misturas de concretos dosados para resistir a esses ciclos de congelamento e descongelamento. O que ocorre é o congelamento da água presente nos poros capilares do concreto, aumentando seu volume em 9% aproximadamente (ANDRADE, 2005). Caso não haja espaço suficiente para acomodar esse volume, as paredes dos poros capilares sofrerão tensões de tração e, conseqüentemente, expansão ocasionada pela água. No congelamento quando há a expansão da água, espera-se que o excesso de água consiga escapar para os vazios ocupados com ar (NEVILLE, 1997).

Em situações contrárias ao congelamento, o concreto sob a ação de temperaturas elevadas perde progressivamente seu desempenho mecânico, devido a uma série de transformações químicas e físicas no seu interior. Durante o aquecimento do concreto, ocorre a

vaporização gradativa da água livre nos poros capilares maiores e, em seguida, da água absorvida, existente nos poros. O vapor d'água formado nos poros não consegue migrar e sair do concreto com a mesma velocidade que foram formados, ocasionando pressões internas. Essas pressões são proporcionais à taxa de aquecimento e à umidade do concreto, e inversamente proporcional à permeabilidade da pasta (METHA; MONTEIRO, 2008).

Concretos convencionais contêm em seu interior, mesmo sem uso de aditivos incorporados de ar, teores entre 1% e 3 % de seu volume na forma de ar aprisionado. Nos casos de concretos produzidos em centrais e transportados por caminhões betoneira este percentual pode chegar à ordem de 4%. No entanto, esse ar aprisionado consiste em cavidades microscópicas de forma irregulares, absolutamente ineficazes se comparadas com o ar incorporado sob a forma de microbolhas esféricas de diâmetros entre 100 μm e 500 μm (AGNESINI, 1988).

O uso de ar incorporado por meio de aditivos foi descoberto acidentalmente e utilizado como artifício para se obter um concreto mais durável frente aos efeitos do gelo e degelo (NEVILLE, 1997). A dimensão, o espaçamento e número de microbolhas dispersas no concreto são parâmetros que regulam a resistência do concreto ao gelo. Os aditivos incorporadores de ar reduzem a tensão superficial da água, favorecendo a formação de pequenas bolhas esféricas e evitando coalescência de bolhas dispersas (METHA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Martin (2005), o ar é deliberadamente incorporado produzindo um número elevado de bolhas de ar, quase, quase esféricas, estáveis, separadas entre si e distribuídas uniformemente (Fig. 2.20).

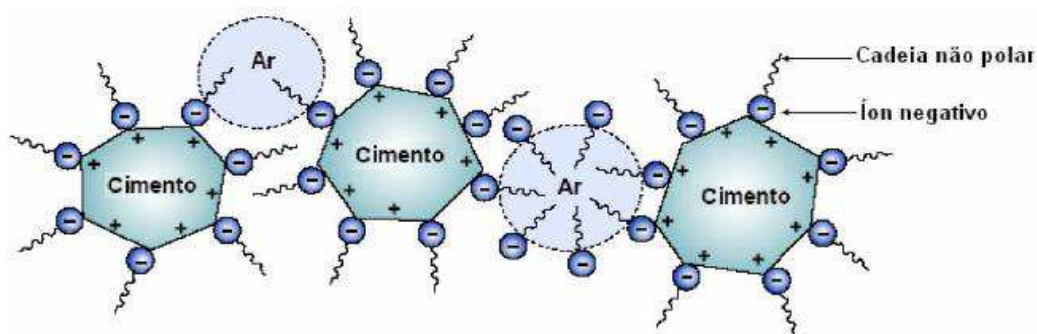


Figura 2.20 – Mecanismo de incorporação de ar (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Na solidificação da água no concreto (congelamento), o aumento de seu volume provoca um acréscimo na pressão da água não congelada, resultando em microfissuras na pasta cimentícia. As microbolhas de ar próximas aos poros capilares onde se encontra a água que está congelando, alivia essa pressão hidráulica devido ao transporte da água dos poros capilares para as microbolhas, evitando a formação das microfissuras. O teor adequado de aditivo incorporador de ar em concretos porosos favorece a compactação e uniformização da mistura, melhorando a durabilidade do concreto frente às ações de congelamento e descongelamento (WU et al., 2016).

2.4.1.2. Deformações: Retração e Fluência

A resposta de um elemento de concreto submetido a um carregamento qualquer possui duas parcelas, uma imediata e outra em função do tempo. Com relação aos fenômenos reológicos, uma vez que este elemento esteja submetido a um carregamento prolongado, a resposta em função do tempo se dará com uma deformação gradual causada pela fluência e pela retração do concreto (SOUZA, 2013).

A deformação por fluência está associada ao estado de tensões do concreto, enquanto que a deformação por retração é um fenômeno independente ao carregamento aplicado.

Em um instante de tempo t , a deformação total de um ponto da estrutura submetida a um carregamento é composta por quatro parcelas:

- Deformação instantânea – *elastic strain*: $\varepsilon_e(t)$;
- Deformação por fluência – *creep strain*: $\varepsilon_{cr}(t)$;
- Deformação por retração – *shrinkage strain*: $\varepsilon_{sh}(t)$;
- Deformação por temperatura – *temperature strain*: $\varepsilon_T(t)$.

A deformação total no instante de tempo t de um ponto, em um elemento de concreto submetido à temperatura constante e a uma tensão σ_{c0} aplicada no instante de tempo τ_0 , é igual à soma das parcelas de deformação instantânea, de fluência e de retração (GILBERT; RANZI, 2011). Na Fig. 2.21 são apresentados gráficos de deformação *versus* tempo e tensão *versus* tempo para facilitar a visualização, como também exibir o comportamento de tais deformações.

Verifica-se que a deformação por retração se inicia imediatamente após a cura do concreto ($t = \tau_d$), antes da aplicação do carregamento ($t < \tau_0$), o que evidencia que essa propriedade é independente do estado de tensões imposto pelo carregamento externo aplicado

ao elemento analisado. No momento de aplicação do carregamento ($t = \tau_0$), há um salto na parcela instantânea da deformação $\varepsilon_e(t)$. A última componente, a deformação por fluência, se inicia no instante seguinte ao da aplicação do carregamento ($t > \tau_0$), o que confirma que essa propriedade é função do estado de tensões do elemento. Ressalta-se ainda que a curva de cada componente de deformação tende a uma assíntota horizontal quando o tempo de análise tende ao infinito. Assim, a deformação em elementos de concreto, proveniente das propriedades reológicas, possui um valor limite quando o horizonte de projeto é de longo prazo.

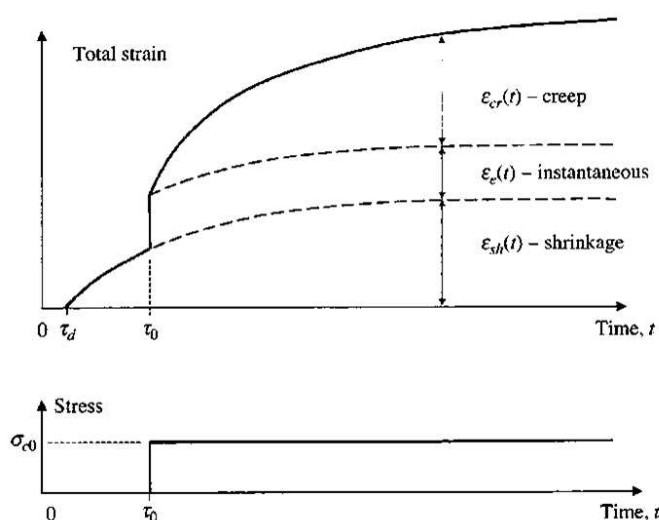


Figura 2.21 – Componentes de deformação produzida por um carregamento prolongado (GILBERT; RANZI, 2011).

O efeito físico da retração está associado a uma contração volumétrica da pasta de cimento, decorrentes de fenômenos de diferentes naturezas (autógena, química, por carbonatação), mas principalmente pela perda de água (RODRIGUES, 2010). É importante ressaltar que a deformação por retração é independente do estado de tensões submetido ao concreto como é mostrado na Fig. 2.21, sendo a pasta de cimento hidratada, de acordo com Metha e Monteiro (2014), a principal causa de deformações relativas à umidade do concreto.

De acordo com Metha e Monteiro (2014), a fluência é o nome do fenômeno onde ocorre o aumento gradual da deformação de um elemento de concreto quando este é submetido a um estado de tensões constante ao longo do tempo. A taxa de crescimento da deformação por fluência é alta nos períodos imediatamente superiores à aplicação do carregamento, diminuindo com o passar do tempo até estabilizar em um valor máximo limite.

Em virtude dos efeitos do envelhecimento, a fluência do concreto depende, além da duração do carregamento, da idade de aplicação das cargas. O comportamento do material também é influenciado pela troca de água com o meio ambiente. Quanto mais seco o meio externo, maiores serão a fluência e a retração. Uma vez que a troca de água é facilitada em elemento estrutural “esbelto”, a fluência e a retração serão maiores quanto menores forem as dimensões do elemento (RODRIGUES, 2010).

A temperatura ambiente é outro fator que afeta as deformações do material. A elevação da temperatura acelera o processo de envelhecimento como também o fenômeno da fluência. Para temperaturas abaixo de 5 °C a fluência praticamente cessa. Dentre outros fatores que afetam o comportamento reológico do concreto são incluídos o tipo de cimento, os aditivos e as propriedades elásticas dos agregados.

Após as etapas de mistura e lançamento, o concreto encontra-se submetido a intensas alterações internas devido a gradientes de origem térmicas e higrotérmicas. Ao mesmo tempo, encontra-se afetado por condições externas que dependem, principalmente, dos efeitos do meio ambiente no qual as estruturas encontram-se inseridas. A junção dos efeitos ocasionados pelas ações internas e externas sobre o concreto pode levar a deformações autógenas e térmicas, além de retração por secagem e fluência. Quando as deformações apresentadas pelo elemento estrutural de concreto excedem sua capacidade de deformação por tração, ocorre a formação de fissuras. A abertura, número e quantidade dessas fissuras podem limitar a capacidade de serviço da estrutura de concreto e exercer um efeito crucial sobre sua durabilidade frente à ação de agentes prejudiciais (RODRIGUES, 2010).

2.4.1.3. Dilatação Térmica

O concreto endurecido, assim como a maioria dos materiais, sofre variação volumétrica quando submetido à variação da temperatura ambiente. Um aumento na temperatura faz a estrutura sofrer uma expansão. Paralelamente, a estrutura sofre contração quando a temperatura cai (EMMONS, 1993).

Caso as contrações e expansões sejam localizadas ocorrerão, eventualmente, fissuras na estrutura (Fig. 2.22).

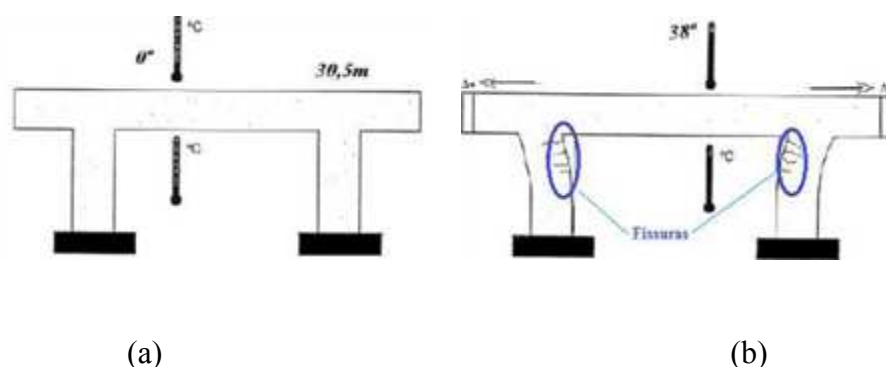


Figura 2.22 – Fissuração por restrição à dilatação térmica do concreto endurecido com uma variação de 38°C (Adaptado de EMMONS, 1993).

A variação da temperatura ambiente não se transmite instantaneamente ao concreto. Segundo a ABNT NBR 6118: 2014, o coeficiente de dilatação térmica para o concreto armado é considerado igual a $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, salvo quando determinado especificamente para o concreto a ser usado (NEVILLE, 1997).

Supondo que uma laje específica tenha um vão de 30,5 m, sujeita a uma variação da temperatura de 38° C, calcula-se a dilatação térmica da laje de concreto. Nesse caso, a dilatação térmica da laje de concreto em questão seria de 10,42 mm.

Bauer (2008) cita que as principais causas de fissuras associadas às movimentações térmicas são devido ao gradiente de temperatura ao longo de um componente, ligação de materiais que possuam coeficientes de dilatação térmica distintos, bem como a exposição de elementos próximos a diferentes solicitações térmicas.

As fissuras por variação de temperatura ocorrem geralmente no último pavimento, na região de contato entre a alvenaria e a laje de cobertura por exemplo, pois está exposta a radiações solares, apresentando assim maiores variações dimensionais diárias.

Segundo Vieira (2008), a dilatação em lajes obedece um comportamento radial, provocando dois padrões de fissuras na alvenaria. As paredes perpendiculares à maior movimentação da laje apresentam fissuras aproximadamente horizontais e radiais na extremidade (Fig. 2.23).

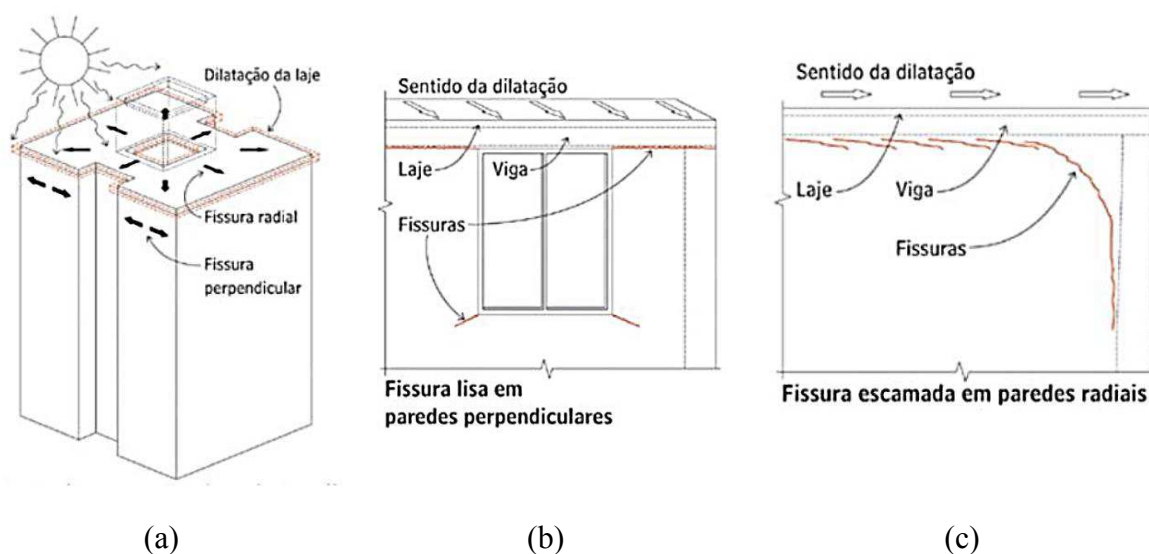


Figura 2.23 – (a) Deformação nas lajes de cobertura devido a insolação; (b) e (c) Fissuras devido a dilatação térmica da laje de cobertura (VIEIRA, 2008).

Nos casos de pisos e pavimentos rodoviários de concreto, se as contrações e expansões térmicas forem restringidas, ocorrerá o empenamento das peças de concreto, caso não existam juntas de dilatação entre as mesmas. Os pilares também podem sofrer danos devido a movimentação térmica das vigas de concreto armado (Fig. 2.24).

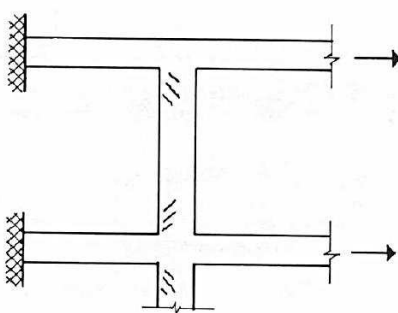


Figura 2.24 – Pilar fissurado devido à movimentação térmica das vigas (EMMONS, 1993).

Para o conhecimento do comportamento da estrutura é necessário conhecer o meio ambiente onde ela estará inserida. Esse meio, dependendo do seu grau de agressividade, pode reduzir a vida útil esperada de uma estrutura de concreto, trazendo sérios problemas de durabilidade e afetando seu desempenho global.

Segundo Vieira (2008), os principais fatores que influenciam a retração térmica são as condições climáticas e de exposição da estrutura durante a construção, as variações sazonais da temperatura ambiente, dentre outras. Como as edificações construídas no Brasil sofrem com as elevadas amplitudes térmicas, as fissuras originadas devidas à retração térmica têm grande importância no desempenho da edificação.

As fissuras de origem térmica possuem evolução cíclica, ou seja, apresentam variação da sua abertura ao longo do dia. Esse fato, associado com a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica da estrutura e do revestimento e vedação, ocasiona o surgimento de fissuras no revestimento da edificação, além da fissuração típica nos elementos estruturais. A fissuração visível no revestimento muitas vezes ocorre nas zonas de interface entre a estrutura e a alvenaria, pelas diferenças de comportamento térmico entre esses dois elementos (SANTOS; BITTENCOURT; GRAÇA; 2005).

A ação do fogo é outro fator que colabora na degradação das estruturas de concreto, porém esse assunto afasta-se do escopo desta Tese. Aos interessados no comportamento dos componentes do concreto em situações de incêndio, indica-se Cánovas (1988), Costa e Silva (2002), Marcelli (2007) e Bauer (2008), dentre outros estudos.

2.4.2. Deterioração do Concreto por Reações Químicas

Segundo Metha e Monteiro (2008), os processos de deterioração no concreto desencadeados por reações químicas em geral, mas não necessariamente, envolvem interações químicas entre os agentes agressivos do ambiente e os constituintes da pasta de cimento. As exceções incluem as reações álcali-agregados, que ocorrem entre os álcalis presentes na pasta de cimento e certos minerais reativos no agregado, e a hidratação tardia do CaO e MgO cristalinos, quando presentes em quantidades excessivas no cimento Portland.

Teoricamente, qualquer ambiente com pH menor que 12,5 pode ser considerado agressivo, pois uma redução da alcalinidade da solução dos poros levará à desestabilização dos produtos de hidratação dos materiais cimentícios. Isso significa que a maioria das águas industriais e naturais será agressiva ao concreto. Porém, a taxa de ataque químico será função do pH do fluido agressivo e da permeabilidade do concreto (AGUIAR, 2006).

É válido observar ainda que os ataques químicos no concreto se manifestam através de efeitos físicos nocivos, como o aumento da porosidade e da permeabilidade, diminuição da

resistência, fissuração e lascamento. As Figs. 2.25 e 2.26 exibem a aparência de estruturas deterioradas por diferentes tipos de ataques químicos.

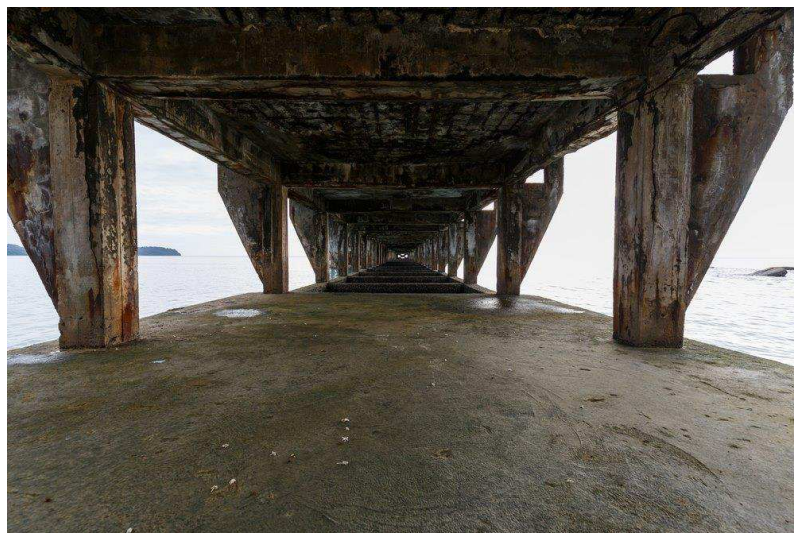


Figura 2.25 – Estrutura de concreto deteriorado pelo ataque de sulfatos (SHUTTERSTOCK, 2017).



Figura 2.26 – Corrosão das armaduras de concreto armado por ataque de cloretos (SHUTTERSTOCK, 2017).

Na prática, vários processos químicos e físicos da deterioração ocorrem ao mesmo tempo e podem até se reforçar mutuamente. São vários os tipos de reações químicas responsáveis pela degradação do concreto. Portanto, não serão descritos nesta Tese.

2.5. Ensaios Não Destrutivos

Muitos países direcionam uma parte considerável do orçamento de construção para restaurações, reparos e manutenção de estruturas antigas, ao invés de novas construções. Em 1991, o Departamento de Transportes dos Estados Unidos expôs que 90 bilhões de dólares foram gastos na recuperação e reforma do sistema de infraestrutura rodoviária. Até 1997, esses custos subiram para 212 bilhões de dólares. O impacto econômico previsto para uma ampla recuperação dessa infraestrutura tem levado a um interesse crescente pelo aperfeiçoamento de métodos de END para avaliar estruturas de concreto (METHA; MONTEIRO, 2008).

No Brasil, o governo anunciou que vai investir R\$ 5,8 bilhões até 2018 em um programa de recuperação de 2500 pontes e viadutos em rodovias federais. O Programa de Reabilitação de Obras de Arte Especiais (PROARTE) partiu da constatação de que 10% das estruturas deste tipo (ou 500 pontes e viadutos) estão em péssimo estado de conservação e demandam reparos imediatos (DNIT, 2015).

Nos EUA a situação é parecida. Um programa semelhante só foi lançado depois que uma ponte desabou, com vítimas fatais, em 2007, em Minneapolis. Em 2003, a sociedade americana dos engenheiros da construção civil já havia alertado que 27% das pontes americanas apresentavam falhas estruturais ou corrosão. Seria necessário investir US\$ 9,4 bilhões por ano durante vinte anos para eliminar todas as falhas. Estudos da década de 1970 nos EUA estimavam os custos da corrosão naquele país em cerca de 4% do PIB, o que hoje chega a quase US\$ 600 bilhões. Um quinto da produção mundial de aço é destinado a repor perdas causadas pela corrosão. Boa parte desses gastos poderia ser economizada se melhores práticas de manutenção fossem adotadas. Mas essa também não é a regra na maior economia do mundo. No Brasil, apesar da criação do PROARTE, o problema maior é a falta de base de dados informatizada e única, o que dificulta a sua real avaliação (DCI, 2011).

Ao comparar outros tipos de materiais estruturais, o progresso quanto ao desenvolvimento de métodos de END avançados em estruturas de concreto tem sido lento. Técnicas bem-sucedidas para detecção de fissuras, falhas, imperfeições e danos em materiais homogêneos podem ser limitadas quando aplicadas ao concreto, devido a sua heterogeneidade existente em várias escalas. No entanto, avanços na aquisição e manipulação de dados computadorizados e no desenvolvimento de teorias complexas para meios heterogêneos resultaram em novos métodos que têm sido satisfatoriamente testados em campo.

Projetistas estão começando a perceber a importância da execução de estruturas com elevada vida útil e para auxiliar na identificação de patologias, destacam-se os END. Eles permitem a coleta de informações como tamanho, profundidade, localização e estado da armadura, além de condições físicas e parâmetros que estão associados aos processos de deterioração ou risco de danos à estrutura. Ressalta-se que tudo isso acontece causando pouco ou nenhum prejuízo ao elemento. São inúmeros os END, sendo que alguns são realizados durante a fabricação da estrutura e outros após sua conclusão. Esses testes vão desde uma inspeção visual para detecção de trincas em estruturas antigas até a realização de radiografia para confirmar a existência de vazios no concreto em elementos pré-fabricados (VALLUZI et al., 2009). Tratam-se de ferramentas de controle de processo e averiguação de eventuais problemas ou danos e é possível realizá-los em conjunto com os ensaios destrutivos que retiram amostras da estrutura para avaliação da resistência mecânica do elemento analisado. Além disso, os END auxiliam para determinar antecipadamente a necessidade de manutenções corretivas (KUMAR; SANTHANAM, 2006).

De modo geral, dentre os métodos de ensaios não destrutivos para aplicação em estruturas de concreto destacam-se aqueles utilizados para estimar a resistência do material, tais como ensaio de dureza superficial (esclerometria), resistência à penetração e método da maturidade. Há também métodos que mensuram outras características e defeitos internos do concreto através da propagação de ondas e termografia infravermelha. Além desses métodos, existem ainda outros que fornecem informações sobre a localização de armaduras, especificando seu diâmetro e quantificando seu estado de corrosão. Serão destacados nesta Tese somente alguns desses métodos de forma sucinta e ressalta-se ainda que o método para a detecção de falhas em estruturas de concreto, proposto nesta pesquisa, representa uma metodologia dessa categoria relatada, sendo altamente promissora.

2.5.1. Métodos de dureza superficial

O método do esclerômetro de reflexão de *Schmidt* é considerado como sendo o método de avaliação da dureza superficial mais comumente empregado na estimativa da resistência *in loco* do concreto. Este ensaio baseia-se na realização de impactos na superfície do concreto endurecido, de modo padronizado, utilizando uma massa de energia conhecida para, por fim, medir então o valor do ricochete (índice esclerométrico ou índice de reflexão). Parte dessa energia é absorvida no impacto e está relacionada à dureza superficial do concreto. A resistência

do concreto é então estimada através de correlações usando curvas que relacionam o índice esclerométrico com a resistência à compressão do concreto (ACI 228.1R, 2002). Esse índice depende da rigidez da mola e da massa selecionada. O procedimento que avalia a dureza superficial por esclerometria de reflexão é descrito no Brasil, pela ABNT NBR 7584: 1995. Um diagrama esquemático exibindo a operação do esclerômetro de Schmidt é apresentado na Fig. 2.27.

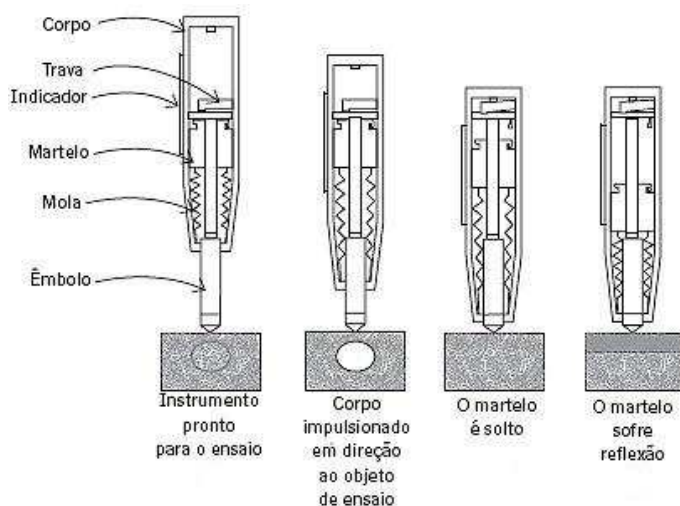


Figura 2.27 – Esquema ilustrativo com a operação do esclerômetro de *Schmidt* (ACI 228.1R, 2002).

Por se tratar de um ensaio de resistência superficial, os valores obtidos são apenas representativos para uma camada de até 5 cm de profundidade. No entanto, o ensaio é útil para avaliar a homogeneidade do concreto, verificar se há um determinado nível mínimo de resistência e decidir sobre a necessidade de realizar ensaios mais complexos (EVANGELISTA, 2002).

2.5.2. Técnicas de resistência à penetração

O equipamento utilizado para determinar a resistência do concreto à penetração consiste em um dispositivo à base de pólvora. Um aparato atualmente usual, conhecido como penetrômetro Windsor, emprega um dispositivo ativado à base de pólvora para disparar um pino constituído de uma liga de elevada dureza contra o concreto. O sistema guia um pino de aço no interior da superfície do concreto onde as partículas dos agregados estão fissuradas e

comprimidas (Fig. 2.28). A zona e profundidade de penetração são correlacionadas com a resistência à compressão do concreto (CHIES, 2014). O procedimento de ensaio normalizado é descrito pela ASTM C 803 (1992).

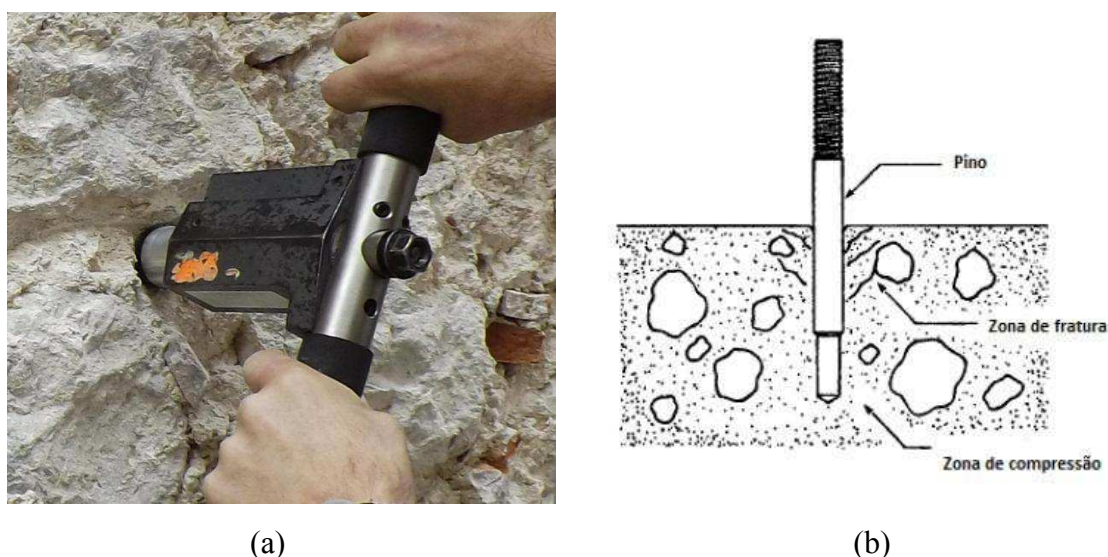


Figura 2.28 – (a) Penetrômetro Windsor determinando a resistência do concreto à penetração; (b) falha típica de um concreto durante o ensaio de penetração (CHIES, 2014).

Esse método é excelente para medir a taxa relativa de desenvolvimento da resistência do concreto nas primeiras idades, especialmente para se determinar o momento adequado de retirar as fôrmas (METHA; MONTEIRO, 2008).

2.5.3. Métodos eletromagnéticos: Pacometria

Pacômetro é um termo genérico para o equipamento utilizado para localizar a barra de aço da armadura como também para estimar a espessura do cobrimento de concreto sobre a armadura. Diferentemente do concreto, as barras de aço interagem fortemente com ondas eletromagnéticas de baixa frequência aplicadas na superfície do concreto, tornando fácil identificar sua localização (SANTOS, 2008).

Um dos principais métodos usados com base nos pacômetros comerciais consiste em usar uma bobina estimulada para gerar um fluxo magnético. O fluxo se desloca através do concreto e sua intensidade é medida por uma bobina sensora. O circuito todo é fechado pela

presença de um núcleo ferromagnético. Ressalta-se ainda que o concreto não é um bom condutor de fluxo magnético e quando o detector se move para uma posição próxima à armadura essa bobina começa a indicar um aumento no fluxo magnético, pois o aço é um ótimo condutor (Fig.2.29). A intensidade da corrente medida na bobina é muito influenciada pela profundidade do cobrimento. Sendo assim, com uma calibração adequada, torna-se possível estimar a profundidade do cobrimento do concreto, em campo (METHA; MONTEIRO, 2008).



Figura 2.29 – Execução do ensaio de pacometria (PROCEQ, 2017).

2.5.4. Métodos de velocidade de pulso ultrassônico

O método de velocidade de pulso ultrassônico consiste em medir o tempo de percurso das ondas longitudinais de pulso ultrassônico passando através do concreto. As ondas longitudinais com frequências que variam de 20 kHz a 150 kHz são normalmente usadas. Os tempos de percurso entre a partida inicial e recepção do pulso são medidos eletronicamente. A relação entre os transdutores e o tempo de percurso da onda resulta na velocidade média de propagação da onda. Esse ensaio é normalizado pela ASTM C 597-97 (2002) e pela NBR 8802 (1994).

Segundo Bungey et al. (2006), um bom acoplamento acústico entre a superfície do concreto e dos transdutores é crítico para obtenção de medidas confiáveis. O arranjo dos transdutores apresenta diferentes configurações: podem ser colocados em faces opostas,

originando uma transmissão direta; colocadas na mesma face, acarretando uma transmissão indireta; ou posicionados em duas faces perpendiculares, gerando uma transmissão semidireta. Um método eficaz utilizado para verificar a homogeneidade de um componente é alocar uma série de receptores ao longo da superfície de um elemento espesso de concreto (Fig. 2.30).

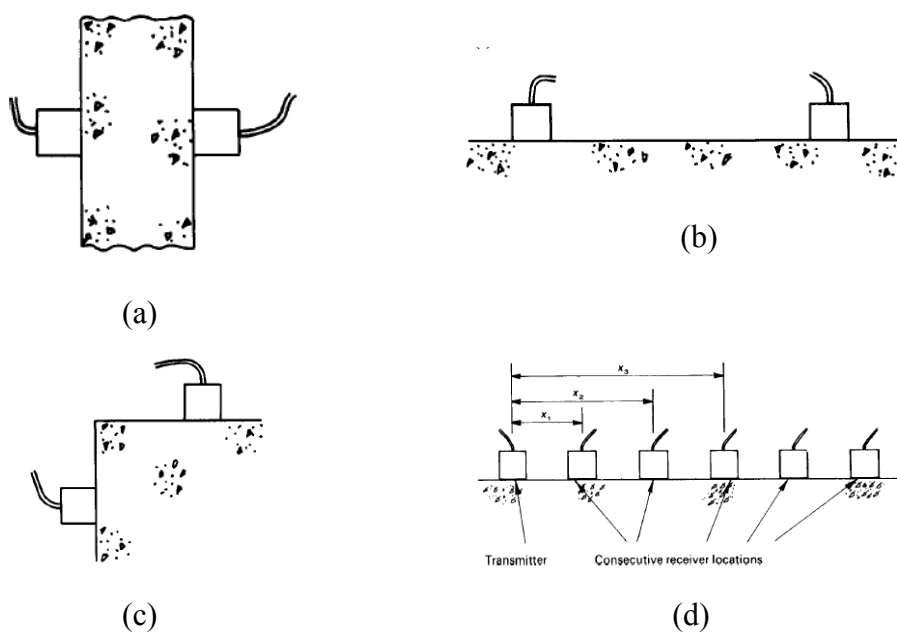


Figura 2.30 – Tipos de transmissões: (a) direta; (b) indireta; (c) semidireta; (d) arranjo de transdutores com transmissão indireta (BUNGEY et al.; 2006).

A transmissão envia o pulso, sendo que cada ponto em uma frente de onda se comporta como uma fonte isolada para geração de ondas esféricas secundárias, criando assim uma série de frentes de ondas (Fig. 2.31).



Figura 2.31 – Ensaio de Ultrassom em estrutura de concreto (PROCEQ, 2017).

Caso o material seja uniforme, uma única linha reta é obtida na representação gráfica de tempo *versus* distância. Se grandes heterogeneidades se apresentarem, a representação gráfica se desviará desta linha reta. Sturup et al. (1984) investigaram a relação entre velocidade e resistência à compressão para o concreto com os seguintes tipos de agregados: brita e seixo (agregados convencionais), cinza volante sintetizada (agregado leve) e ilmenita (agregado pesado). Verificaram que, para uma determinada resistência à compressão, houve uma diferença entre a velocidade de propagação de onda (V) para esses tipos de concreto (Fig.2.32).

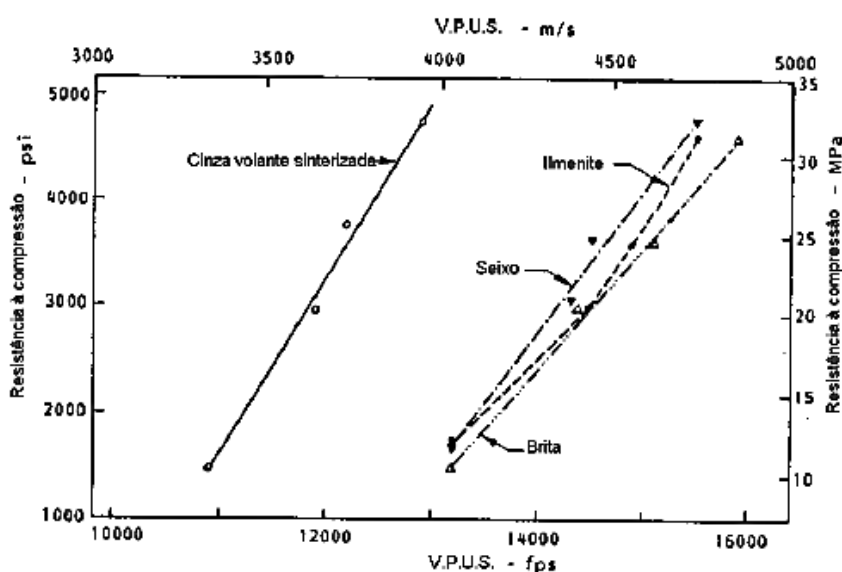


Figura 2.32 – Influência do tipo de agregado na relação da velocidade de propagação da onda e a resistência de compressão do concreto (STURRUP et al., 1984).

O método pode ser estendido para camadas múltiplas e mais profundas. Para essas finalidades, as velocidades das ondas no concreto são afetadas por diversas variáveis (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM; 2006). São elas:

- Idade: à medida que continua a hidratação do cimento, a porosidade diminui e as ondas se propagam mais rapidamente no meio sólido. Essa propriedade pode ser usada em laboratório para estudar alterações no processo de hidratação por exemplo, conforme haja influência por diferentes aditivos e, em campo para monitorar a evolução da hidratação, conforme seja influenciado pelas condições de temperatura e umidade.

- Condições de umidade: As velocidades das ondas no concreto aumentam em condições saturadas.
- Quantidade e tipo de agregado: As rochas normalmente utilizadas como agregado no concreto possuem velocidades de onda mais altas que a pasta de cimento. Portanto, aumentando-se a quantidade de agregado para uma determinada matriz, também se aumenta a velocidade média da onda do composto.
- Microfissuração: As microfissuras formam-se quando o elemento de concreto fica exposto à tensão maior que 50% que sua resistência à compressão. Também podem se formar se o concreto estiver exposto a condições ambientais agressivas. As microfissuras reduzem o módulo de elasticidade do concreto e, por consequência, reduzem a velocidade de propagação da onda no seu interior.
- Presença de armadura: a presença de armadura deve ser evitada ao se medir a velocidade de onda no concreto, pois a velocidade de onda aparente é aumentada.

Portanto, ressalta-se que o ultrassom se apresenta como um método completamente não destrutivo, que pode avaliar o concreto em toda a espessura do elemento estrutural, porém a interpretação dos resultados pode ser crucial para uma conclusão segura.

2.6. Punção em lajes lisas

Para um melhor entendimento do ensaio por punção que será desenvolvido e relatado no Capítulo 5, alguns conceitos serão descritos brevemente nesta Seção.

Lajes lisas, denominadas pela ABNT NBR 6118: 2014, são estruturas laminares planas, horizontais, apoiadas diretamente sobre pilares. É um sistema estrutural que aparece como alternativa para o sistema convencional, onde as lajes são apoiadas em vigas. A ausência de vigas apresenta algumas vantagens como por exemplo economia de fôrmas, diminuição do pé direito, possível aumento do número de andares para prédios com limitação de cota e uma maior flexibilidade para o arranjo arquitetônico.

Segundo Oliveira (2011) a adoção de lajes lisas também possibilita uma maior velocidade de execução dos painéis de lajes, o que as tornam mais econômicas ao comparar com o sistema convencional. Essa maior velocidade pode ser alcançada pela simplicidade construtiva, ao destacar facilidade na execução de fôrmas, com redução de recorte devido à ausência de vigas; no corte e no posicionamento das armaduras; e por fim na concretagem.

Wight et al. (2011) destaca a desvantagem das lajes lisas no que diz respeito à ruptura por puncionamento ou por punção, para uma carga menor que a carga de ruptura de flexão.

As lajes lisas podem representar ruptura por cisalhamento por dois mecanismos distintos: cisalhamento em uma direção ou cisalhamento nas duas direções. Os modos de ruptura por cisalhamento em lajes são exibidos na Fig. 2.33.

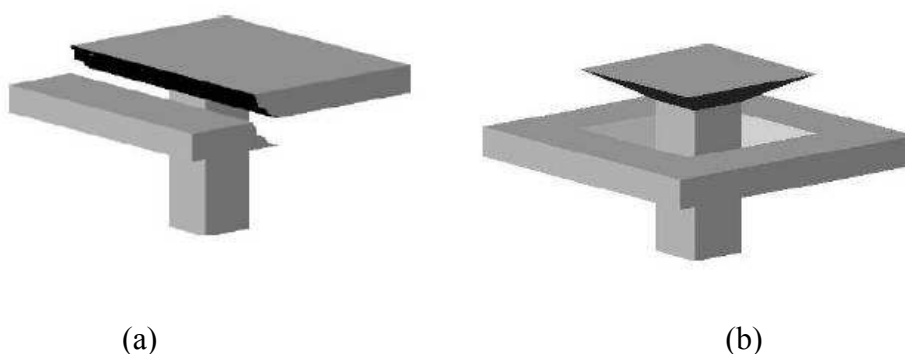


Figura 2.33 – Tipos de ruptura por cisalhamento em lajes lisas: (a) Ruptura em uma direção; (b) Ruptura por punção (WIGHT et al., 2011).

A ruptura por punção é um fenômeno de natureza frágil, devido a um esforço concentrado em uma pequena área, gerando elevadas tensões de cisalhamento nesta região. Ele ocorre repentinamente, com pequeno ou nenhum aviso, praticamente sem apresentar ductilidade, podendo chegar ao colapso progressivo. De acordo com Leonhardt e Monning (1979), inicialmente as deformações tangenciais são maiores que as deformações circunferenciais, surgindo primeiramente as fissuras radiais. Somente para elevados estágios de carga aparecem fissuras circunferenciais, desenvolvendo-se a superfície de ruptura por cisalhamento, com inclinação da ordem de 25° a 40° em relação à horizontal (Fig. 2.34).

Apesar desse sistema estrutural ser amplamente utilizado, o estudo da punção ainda é um assunto indefinido teoricamente. Os códigos internacionais e o nacional existentes (ABNT NBR 6118:2014; CEB-FIB/MC:1990; ACI/318:2005) sobre o assunto de punção são baseados em trabalhos empíricos e os critérios adotados para o dimensionamento são diferentes.

Várias pesquisas foram realizadas abordando o estudo do efeito de punção em lajes lisas de concreto e pode ser consultado em Leonhardt e Mönning (1979), Tan e Paramasivam (1994),

Zambrana (1997), Azevedo (1999), Musse (2004), Melo (2005), Trautwein (2006), Barbán (2008), Ferreira (2010), Nugyen-Minh et al. (2011), Maya (2012), Moraes Neto (2014), Sagaseta (2014) e Alves (2017).

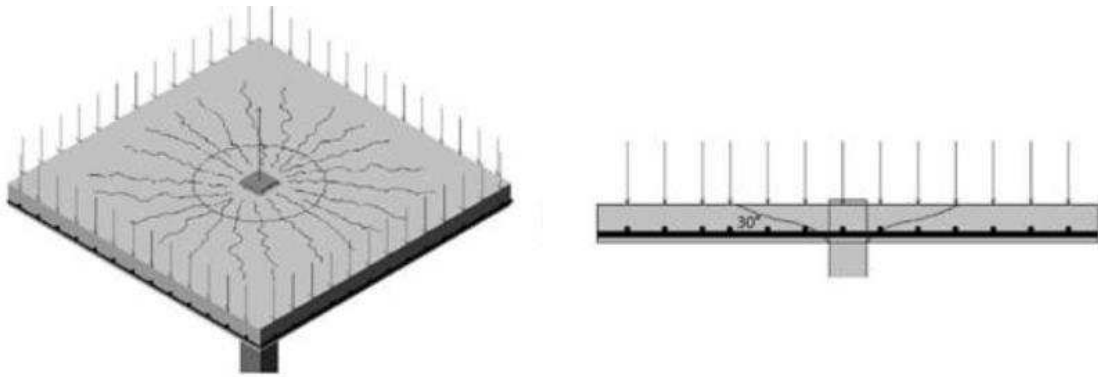


Figura 2.34 – Distribuição das fissuras e ruínas por punção em lajes lisas (LEONHARDT; MONNING, 1979).

CAPÍTULO III

Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado na Impedância Eletromecânica

Este capítulo exhibe um breve embasamento teórico sobre o método de monitoramento de integridade estrutural com base na técnica da impedância eletromecânica (E/M). Na sequência os métodos de compensação de temperatura são expostos e, por fim, apresenta-se o estado da arte, com enfoque na engenharia civil. Ao considerar a técnica de impedância eletromecânica aplicada em compostos cimentícios, são apresentados alguns trabalhos científicos que envolvem a aplicação desta técnica para esse tipo de material. Ressalta-se que este capítulo conta com prévios trabalhos de pesquisa que além de ampararem o desenvolvimento desta Tese de Doutorado, também auxiliaram na busca de concisão. Assim, foram citados somente os trabalhos considerados importantes e coerentes com a presente pesquisa.

3.1. Método de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado na Impedância Eletromecânica

A técnica de monitoramento da integridade estrutural baseado na impedância E/M utiliza a propriedade piezelétrica de certos materiais, sendo classificada como um método de avaliação não destrutivo. O conceito básico desta técnica é o monitoramento da variação da impedância mecânica da estrutura causada pela presença de danos (PARK et al., 2003). Como a medição direta da impedância mecânica da estrutura pode ser considerada como uma tarefa complexa, o método utiliza materiais piezelétricos fixados ou incorporados à estrutura, permitindo medir a impedância elétrica. Esta, por sua vez, se relaciona com a impedância

mecânica da estrutura que é afetada pela presença do dano. Considera-se que o material piezelétrico, capaz de funcionar simultaneamente como sensor e atuador, utilizado para medição da impedância elétrica, permaneça íntegro durante o monitoramento.

Neste caso são utilizados sensores para monitorar as mudanças na rigidez, amortecimento e massa da estrutura. Este sensor consiste em uma pequena pastilha piezelétrica (pastilhas de zirconato-titanato de chumbo, PZT), utilizada para medir diretamente a resposta dinâmica local. Comumente, as pastilhas utilizadas possuem dimensões menores que 25,0mm x 25,0mm x 1,0mm.

Segundo Park et al. (2003), os materiais piezelétricos atuam produzindo uma mudança na voltagem elétrica quando sofrem uma deformação mecânica (efeito sensor, ou efeito piezelétrico direto). Inversamente, ao aplicar um campo elétrico uma deformação mecânica é produzida (efeito atuador, ou efeito piezelétrico inverso). O método de monitoramento baseado na impedância E/M utiliza simultaneamente ambos os efeitos desse material, direto e inverso, para obter medições de impedância.

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. Esse tipo de material, que faz parte da classe dos dielétricos (isolantes), apresentam acoplamento eletromecânico. As relações que descrevem o acoplamento entre as variáveis elétricas e mecânicas são descritas pelas Eq. (3.1) e (3.2), as quais representam, respectivamente, o efeito inverso e direto deste material (CRAWLEY et al., 1983).

$$S_i = s_i^E + d_m E_m \quad (3.1)$$

$$D_m = d_m T_j + \varepsilon_{mk}^T E \quad (3.2)$$

onde:

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.

O modelo que quantifica e descreve o processo de medição pode ser observado na Fig. 3.1 para um sistema de 1 grau de liberdade. A pastilha de PZT colada à estrutura (ou incorporada a ela) pode ser considerada como uma barra fina em vibração axial devido a aplicação de uma voltagem alternada. Uma extremidade da barra é considerada fixa, enquanto a outra extremidade é conectada à estrutura.

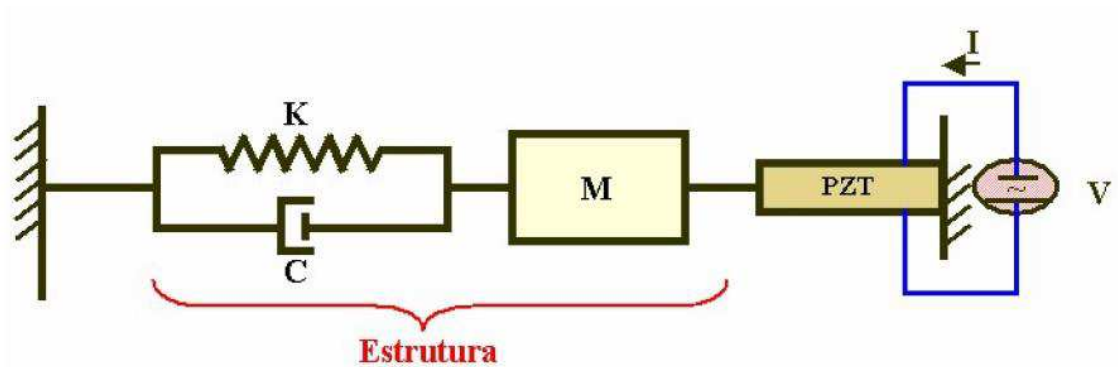


Figura 3.1 – Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico utilizado pela técnica da impedância eletromecânica (MOURA JR., 2008).

Como já foi mencionado, as propriedades dinâmicas da estrutura monitorada são as seguintes: M , a massa; k , o coeficiente de rigidez; e o C , o coeficiente de amortecimento. O transdutor é excitado por uma fonte de tensão V . Pelo efeito atuador, o transdutor aplica uma força à estrutura que, em resposta, sofre uma deformação induzida. Pelo efeito sensor, esta deformação induzida produz uma corrente de saída I . Considerando que as propriedades do transdutor sejam invariáveis no tempo, qualquer mudança na estrutura afetará o valor da impedância do sistema. A impedância mecânica da estrutura monitorada é dada pela razão entre a força aplicada na estrutura e a velocidade segundo esta se desloca. Analogamente, em um circuito elétrico a força corresponde à tensão elétrica e a velocidade à corrente de saída, resultando assim na impedância elétrica correspondente. Vale ressaltar que a impedância elétrica deve ser medida por um dispositivo de medição apropriado.

Ao considerar que as propriedades mecânicas da pastilha PZT não variam ao longo do tempo em que esta é utilizada para o monitoramento estrutural, Liang; Sun; Rogers (1994)

demonstraram que a admitância $Y(\omega)$ do atuador PZT é dada por uma função combinada da impedância mecânica do atuador $Z_a(\omega)$, e da estrutura $Z_s(\omega)$, conforme a Eq. 3.3. Eventuais danos ocasionam mudanças da impedância mecânica da estrutura, modificando as características dinâmicas locais. Por isso, os sinais de impedância elétrica do PZT são utilizados para o monitoramento da integridade estrutural do sistema representado pela impedância mecânica da estrutura.

$$Y(\omega) = \frac{I_0(\omega)}{V_i(\omega)} = j\omega \frac{w_a l_a}{h_a} \left[\frac{-T}{\varepsilon_{33}} (1 - j\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \bar{Y}_{22}^E (1 + j\eta) \right] \quad (3.3)$$

onde:

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

$Z_s(\omega)$: impedância mecânica da estrutura;

$Z_a(\omega)$: 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 admitância elétrica é basicamente capacitiva, mostrando que a parte imaginária é o termo dominante. Este termo imaginário é mais sensível à variação de temperatura que a parte real. Com isso, a parte real do sinal é geralmente utilizada na maioria das aplicações (RAJU, 1997). Observa-se, no entanto, que alguns trabalhos mais recentes utilizam ambas as partes, real e imaginária, do sinal para fins de monitoramento.

Assim, a impedância é representada por uma função complexa da frequência e sua aquisição é feita com o auxílio de equipamento experimental apropriado, denominado analisador de impedância ou impedancímetro. Este aparelho gera o sinal de excitação, adquire

o sinal de resposta e processa numericamente os dois sinais para a obtenção da função de impedância na faixa de frequências de interesse.

No entanto, os analisadores de impedância convencionais não são portáteis e são caros, oferecendo uma certa dificuldade no que diz respeito à pesquisa da técnica propriamente dita em condições de laboratório. Para minimizar esse problema, o grupo de pesquisa de SHM do LMEst, da FEMEC – UFU implementou um impedancímetro com uma tecnologia inovadora, com baixo custo, versátil e de rápido processamento dos dados, “batizado” como impedancímetro SySHM (FINZI NETO et al., 2011). Esse trabalho foi fruto de um projeto realizado em parceria com uma empresa do setor aeronáutico.

Esse impedancímetro, utilizado pela equipe do LMEst é adequado para realizar um número maior de medidas para o cálculo de médias em um tempo total menor, ao se comparar com um analisador de impedância convencional. Trata-se de um sistema capaz de gerar sinais com taxa de até 2,86 MS/s e adquirir com uma taxa de até 1,25 MS/s. A magnitude dos sinais de excitação e resposta são medidas e calculadas diretamente através do *hardware*, a partir de simples manipulações matemáticas (FINZI NETO et al., 2011).

Outro parâmetro que define a sensibilidade desta técnica está relacionado à banda de frequência selecionada. Um pequeno dano na estrutura não provoca mudanças significativas nas propriedades de rigidez, massa e amortecimento da estrutura. Logo, é necessário um comprimento de onda de excitação suficientemente pequeno, de forma a permitir a detecção do dano. Essa faixa de frequência é determinada, geralmente, por um método de tentativa e erro. Tipicamente, segundo a literatura, essa faixa usual para o método de impedância varia de 30 kHz a 250 kHz.

No que se refere à região sensível para identificação de mudanças, Park et al. (2003) afirmaram que para uma única pastilha de PZT, pode-se identificar uma falha localizada em um raio de até 0,4 m em estruturas compósitas e até 2,0 m em estruturas de barra de um único metal.

As assinaturas de impedância fornecem uma informação apenas qualitativa acerca da integridade estrutural e, para quantificar a diferença entre um sinal de referência e outro, utiliza-se as chamadas métricas de dano. A fim de quantificar as alterações estruturais estudadas, deve-se estabelecer uma referência para a métrica de dano, correspondente à estrutura sem falha. Assim, é possível realizar comparações envolvendo os valores da métrica para a estrutura considerada com e sem danos. Espera-se que estas comparações sejam capazes de apontar se há dano na estrutura ou não. O principal objetivo da métrica de dano é então quantificar a

diferença entre medições da impedância ao compará-las com dados obtidos para a estrutura sem dano (sinal de referência, ou *baseline*).

Neste trabalho foram utilizadas as métricas de dano conhecidas como RMSD (Desvio Médio da Raiz Quadrada) e CCD (Desvio do Coeficiente de Correlação), por serem as mais utilizadas na literatura e por apresentarem resultados considerados bons, especialmente no que diz respeito à influência da variação de temperatura na técnica da impedância. Porém, em alguns aplicações apresenta-se outras métricas como ASD e M.

Assim, a métrica mais utilizada na literatura é o RMSD, descrito pela Eq. (3.4):

$$RMSD = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i})]^2}{n} \right\}} \quad (3.4)$$

onde:

$Re(Z_{1,i})$: parte real da impedância da medição sem danos em uma frequência i ;

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

n : número total de pontos de frequências utilizados na medição.

Esse cálculo é realizado na faixa de frequência antecipadamente definida. A métrica RMSD mede a variação da impedância em cada ponto frequencial e posteriormente realiza a soma do resultado.

As variantes dessa métrica apresentam-se como: RMSD1, RMSD2, RMSD3, RMSD4 e RMSD5 e suas definições podem ser consultadas em Palomino (2008).

Outra métrica 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, Eq. (3.5), envolve a diferença entre um coeficiente de correlação de uma dada medição e a referência (GIURGIUTIU; ZAGRAI, 2005).

$$CCD = 1 - CC \quad (3.5)$$

onde CCD é o desvio do coeficiente de correlação e CC é o coeficiente de correlação dado pela Eq. (3.6).

$$CC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Re(Z_{1,i}) - Re(\bar{Z}_1))(Re(Z_{2,i}) - Re(\bar{Z}_2))}{S_{Z_1} S_{Z_2}} \quad (3.6)$$

onde S_{Z_1} é o desvio padrão do sinal de impedância da referência e S_{Z_2} é o desvio padrão do sinal de impedância a ser comparado. Quando o coeficiente de correlação for igual a 1,0 os sinais possuem total correlação (NAIDU; SOH, 2004).

Outra métrica utilizada pelo método da impedância para quantificar o dano é a diferença média quadrada (ASD), dada pela Eq. (3.7).

$$ASD = \sum_{i=1}^n [Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i}) - \delta]^2 \quad (3.7)$$

onde δ é a diferença das médias de cada um dos sinais (Eq. 3.8).

$$\delta = Re(\bar{Z}_1) - Re(\bar{Z}_2) \quad (3.8)$$

Com o uso dessa métrica, busca-se também eliminar o efeito das variações da amplitude devidas a mudanças no ambiente (PALOMINO, 2008).

Por fim, tem-se a métrica que é dada pela simples somatória da diferença média entre os sinais. Essa métrica de dano é implementada de acordo com a Eq. 3.9.

$$M = \sum_{i=1}^n (Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i}))^2 \quad (3.9)$$

Ao realizar a análise das métricas de dano, recomenda-se testar todas as métricas e identificar as mais sensíveis para o tipo de dano que está em investigação. Segundo Rabelo (2014), influências externas como a variação da temperatura, por exemplo, são frequentes tornando imprescindível a implementação de técnicas de compensação e, ao realizá-la, espera-se um procedimento mais robusto e confiável.

3.2. Efeitos da Temperatura

Os efeitos da variação da temperatura são citados como um dos problemas práticos mais críticos e desafiadores da técnica de SHM baseada na impedância eletromecânica. Por isso, há a necessidade de se criar um método com o intuito de compensar esses efeitos para obter sistemas de SHM mais robustos, ou seja, capazes de emitir diagnósticos mais precisos e confiáveis (RABELO, 2014).

Segundo Park et al. (1999) a parte real da impedância elétrica é mais reativa ao dano estrutural e a variação de temperatura é pequena, ao se comparar com parte imaginária. Com isso, a parte real da impedância (impedância resistiva) é, de forma geral, a mais utilizada na detecção de danos. A Figura 3.2 mostra a mudança da parte real da impedância resistiva de uma pastilha de PZT devido à alteração de temperatura. Assim, como as alterações na parte real da impedância são menos sensíveis às variações de temperatura, o método de SHM baseado em impedância E/M utiliza a impedância resistiva para detectar danos, minimizando os efeitos da temperatura nos sinais medidos.

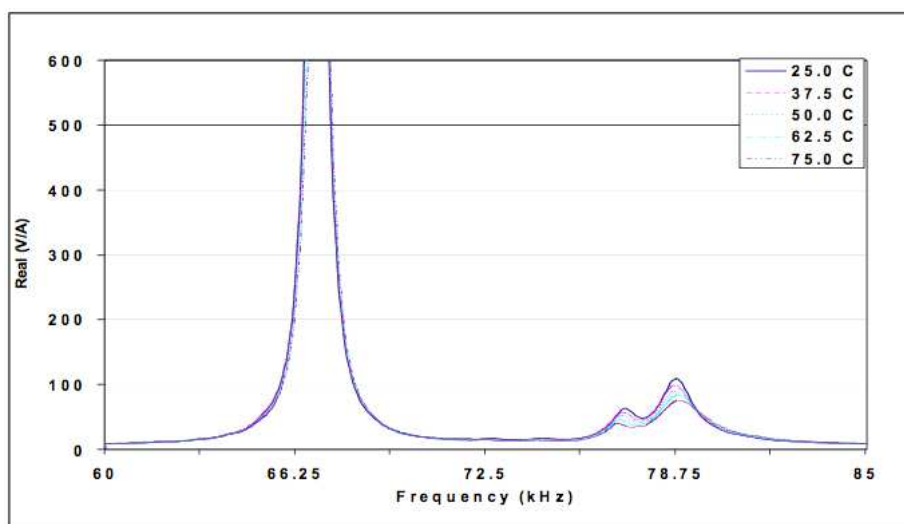


Figura 3.2 – Mudança de magnitude na impedância resistiva com o aumento da temperatura (PARK et al.; 1999).

Conforme acima, ao acoplar as cerâmicas de PZT à estrutura em monitoramento, sua impedância elétrica estará sujeita a mudanças devido a variações na temperatura. Com a mudança na temperatura, as propriedades físicas da estrutura, da camada de cola e da cerâmica de PZT também serão modificadas (RABELO, 2014). O módulo de Young da estrutura, e

consequentemente a impedância da estrutura (partes real e imaginária), varia ligeiramente com a temperatura e a expansão térmica do material induzirá tensões nas estruturas restritas.

No que se refere à camada de cola, trata-se da única interface para transferência de deformação entre a pastilha de PZT e a estrutura. A variação da temperatura gera uma alteração da rigidez da camada de cola. Caso a espessura da camada de cola seja mais fina que um terço da espessura da pastilha seu efeito pode ser desprezado. Além disso, caso a camada de cola não obedeça a esse critério, frequências de excitação devem ser menores que 100 kHz (YANG; LIM; SOH, 2008).

A variação de temperatura pode resultar em valores de métricas de dano da mesma ordem de grandeza daquelas provocadas por uma alteração proveniente de um dano estrutural. Esse deslocamento térmico pode levar a conclusões falsas em relação à integridade estrutural (RABELO, 2014).

Sun et al. (1995) afirmam que existe uma diferença importante entre o efeito causado pela variação da temperatura e o efeito ocasionado por um dano estrutural na impedância. Mudanças na temperatura causam, ao mesmo tempo, um deslocamento na direção do eixo das frequências, assim como um deslocamento vertical na assinatura da impedância. Além disso, há uma variação nas amplitudes dos picos de ressonância. Vale ressaltar que a variação na impedância decorrente de um dano estrutural é perceptível, modificando as características da assinatura. Este aspecto permite isolar e reduzir o efeito da temperatura, a partir de modificações nos roteiros de pós processamento.

Segundo Rabelo (2014) é importante avaliar a aplicação do método de compensação em estruturas complexas, bem como avaliar outros parâmetros importantes, tais como: a introdução de um dano estrutural e a capacidade de discriminação do sistema SHM, ou seja, separando o possível dano da existência de variação nas condições externas, como a temperatura.

Dois métodos de compensação da temperatura foram aplicados nesta pesquisa, a saber, o método do deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação e a técnica de otimização híbrida. Ambos podem ser consultados de forma mais detalhada em Rabelo (2017).

3.2.1. Método do Deslocamento Efetivo em Frequência por Análise de Correlação

Os deslocamentos causados pela variação da temperatura podem ser considerados uniformes para uma banda de frequência determinada e limitada. As alterações devido a danos estruturais não seguem a mesma tendência. Esse recurso permite a mitigação de efeitos de

variação de temperatura através de um procedimento de normalização de dados (RABELO et al., 2014).

Inicialmente, o desvio vertical pode ser corrigido pela diferença no valor médio global da linha de base e o padrão de assinatura de teste (Eq. 3.10):

$$\Delta_v = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \text{Re}(Z_{i,2}) - \sum_{i=1}^n \text{Re}(Z_{i,1}) \right] \quad (3.10)$$

onde Δ_v é o deslocamento vertical, $\text{Re}(Z_{1,i})$ é a parte real da impedância referente ao *baseline* em uma frequência i , $\text{Re}(Z_{2,i})$ é a parte real da impedância da medição de teste em uma frequência i e n é o número de pontos de medição.

A seguir, determina-se matematicamente a extensão do deslocamento horizontal da assinatura de impedância usando o coeficiente de correlação ($CC_{Z_1Z_2}$), dado pela Eq. 3.11.

$$CC_{Z_1Z_2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_1)][\text{Re}(Z_{2,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_2)]}{S_{Z_1,i} S_{Z_2,i}} \right\} \quad (3.11)$$

onde $\text{Re}(\bar{Z}_1)$ e $\text{Re}(\bar{Z}_2)$ são as médias das medições para as duas condições analisadas; $S_{Z_1,i}$ e $S_{Z_2,i}$ são os desvios-padrão para cada ponto frequencial das medições, também para as duas condições.

Se a medida de teste Z_2 é deslocada de n pontos frequências a partir da referência (*baseline*) Z_1 , então o seu coeficiente de correlação será maximizado. Após este procedimento, ambas as assinaturas devem ser totalmente correlacionadas, exceto a parte associada a danos estruturais. Assim é realizado um procedimento de otimização procurando o valor máximo do coeficiente de correlação em função da mudança de frequência cobrindo n pontos frequências (atrasados ou avançados). Portanto, esta técnica busca o deslocamento de frequência Δf ótimo e a assinatura de impedância corrigida é escrita a partir da Eq. 3.12.

$$\text{Re}(Z_{corr,i}) = \text{Re}(Z_{medida,i \pm \Delta f}) + \Delta_v \quad (3.12)$$

onde $Re(Z_{corr,i})$ é a parte real da impedância corrigida em uma frequência i e $Re(Z_{medida,i\pm\Delta f})$ refere-se à parte real da impedância medida deslocada de Δf pontos de referência.

Assim, finalmente a métrica de dano é calculada a partir da assinatura de impedância corrigida. Os valores ótimos de Δv e Δf que minimizam o efeito da temperatura podem ser calculados. No eixo de frequência, o deslocamento será aplicado para a direita se a temperatura de medição do teste for maior que a temperatura da *baseline*; caso contrário, a mudança será orientada para a esquerda. Por isso, é importante ter leituras de temperatura para todas as medições efetuadas o mais próximo possível dos sensores na estrutura considerada.

3.2.2. Técnica de Otimização Híbrida

A Figura 3.3 exibe um fluxograma que ilustra a metodologia de compensação da temperatura utilizando otimização. O método começa pela obtenção das assinaturas de impedância do sistema analisado saudável ($Imp_{baseline}$; temperatura $T_{baseline}$). As assinaturas de impedância do sistema para uma condição desconhecida ($Imp_{desconhecida}$; temperatura $T_{desconhecida} \neq T_{baseline}$) também são necessárias, de modo que o otimizador é responsável por atualizar a frequência e amplitude da resposta, que operam como variáveis de projeto. As assinaturas de $Imp_{desconhecida}$ são comparadas com as de $Imp_{baseline}$ por meio de uma função objetivo previamente definida, ou seja, usando uma métrica de dano, como apresentado pelas Eq. 3.4 e a Eq. 3.5 ($Imp_{baseline} = Z_1$ e $Imp_{desconhecida} = Z_2$).

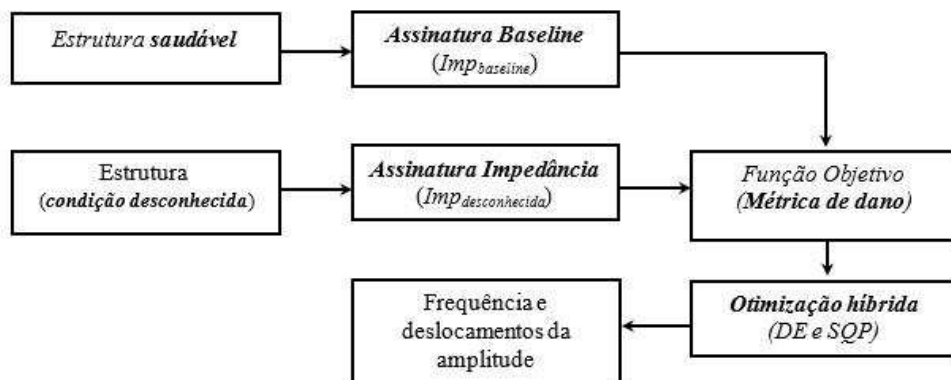


Figura 3.3 – Fluxograma da compensação de temperatura utilizando técnicas de otimização (Adaptado de RABELO et al., 2017).

Se o procedimento converge para um valor mínimo da função objetivo, os efeitos da variação de temperatura são compensados usando os valores das variáveis de mudança de frequência e de deslocamento vertical. Se não for este o caso, o procedimento de otimização continua atualizando os valores de frequência e amplitude. O processo de otimização continua iterativamente até que a convergência seja assegurada, o que pode levar à compensação de temperatura (se o valor final da função objetivo for próximo a zero) ou a uma indicação de dano associada à compensação de temperatura (RABELO et al., 2017).

A técnica de otimização híbrida proposta é dedicada a minimizar as influências das variações de temperatura durante o processo de medição de impedância E/M. A descrição do algoritmo aplicado nesta compensação pode ser consultada em Rabelo et al. (2017).

3.3. Análise Estatística dos Dados

Ao se tratar de métodos de SHM, é desejável que um nível de *threshold* confiável seja estabelecido com base na informação adquirida para a condição saudável da estrutura. Depois que os dados são adquiridos e processados, o próximo passo é a preparar os dados brutos para análise.

3.3.1. Determinação de Threshold com Controle Estatístico de Processos e Intervalos de Confiança

O conceito de Controle Estatístico de Processo (*Statistical Process Control* - SPC) foi utilizado para determinar o Limite de Controle Superior (LCS) e o Limite de Controle Inferior (LCI) dos índices de dano, uma vez que a técnica SPC assume desvios sucessivos de uma função normalmente distribuída.

Como neste trabalho o interesse é apenas no valor limite superior do limiar, apresenta-se a seguir uma metodologia para determina-lo, a partir do conceito de intervalo de confiança.

Um procedimento mais leal para estabelecer parâmetros de variáveis aleatórias envolve a estimativa de um intervalo, ao contrário de um único ponto, que contém o parâmetro que está sendo ponderado com um nível de incerteza conhecido. Para calcular o valor médio, pode-se estabelecer um intervalo de confiança para o valor médio μ_x com base na média da amostra \bar{x} e de acordo com a Eq 3.15.

$$\left[\bar{x} - \frac{\sigma_x Z_{\alpha/2}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{\sigma_x Z_{\alpha/2}}{\sqrt{N}} \right] \quad (3.15)$$

onde μ_x e σ_x são a média da população e o desvio padrão, respectivamente, \bar{x} é a média das amostras, N é o tamanho da amostra, e $Z_{\alpha/2}$ é a variável padronizada dada pela Equação (3.16), associada com a significância de α :

$$z = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (3.16)$$

Como σ_x é desconhecido, os intervalos de confiança para a média μ_x e variância σ_x^2 devem ser determinados. Para uma amostra de tamanho N , considera-se que as Eqs. 3.17 e 3.18 fornecem os intervalos de confiança para as médias e variâncias (CHARLES ANNIS, 2013):

$$\left[\bar{x} - \frac{s t_{v;\alpha/2}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{s t_{v;\alpha/2}}{\sqrt{N}} \right], v = N - 1 \quad (3.17)$$

$$\left[\frac{v S^2}{\chi_{v;\alpha/2}^2} \leq \sigma_x^2 < \frac{v S^2}{\chi_{v;1-\alpha/2}^2} \right], v = N - 1 \quad (3.18)$$

na qual s^2 é a variância da amostra, $t_{v;\alpha/2}$ é uma variável t de *Student* e $\chi_{v;\alpha/2}^2$ é uma variável Qui-Quadrado, considerados v graus de liberdade (DOF).

Portanto, esses intervalos foram então obtidos e o limiar foi determinado de acordo com a Eq. 3.19.

$$PZT_{Threshold} = \mu_{X_{MAX}} + 3\sigma_{X_{MAX}} \quad (3.19)$$

onde $\mu_{X_{MAX}}$ é o limite superior para a média da população e $\sigma_{X_{MAX}}$ é o limite superior para o desvio padrão da população, ambos obtidos a partir da escolha de um nível de significância dado por $\alpha = 5\%$, aplicando as Eqs. 3.17 e 3.18.

Nota-se que a escolha do valor de *threshold* influencia na probabilidade de detectar um falso positivo. Observa-se que o intervalo de confiança dado pela Eq. 3.17 é geralmente mais amplo do que o obtido com a Eq. 3.15, embora essa diferença diminua à medida que o tamanho da amostra aumenta. No entanto, a Eq. 3.15 fornece um intervalo de confiança da média, com o pressuposto de que a variância da amostra é igual à variação da população.

3.4. Estado da Arte no Contexto da Engenharia Civil

O SHM é um processo de implementação de uma estratégia de identificação de danos para a indústria aeroespacial, mecânica, naval, e infraestrutura na Engenharia Civil. O dano pode ser definido como uma alteração no material e/ou nas propriedades geométricas desses sistemas de engenharia, envolvendo inclusive modificações nas condições de contorno e conectividade, que comprometem negativamente seu desempenho. Há uma variedade de ferramentas eficazes para avaliação não destrutiva disponíveis para o monitoramento. Porém, a maioria das pesquisas em SHM desenvolvidas ao longo dos últimos 30 anos vem tentando identificar os danos em estruturas de uma forma mais global. Os últimos 10 anos têm visto um rápido aumento na quantidade de pesquisas relacionadas a SHM, conforme quantificada pelo crescimento significativo de trabalhos publicados sobre este assunto (SOHN, 2005). O aumento do interesse em SHM, associado aos benefícios de segurança e de aumento de vida útil, além de aspectos econômicos, tem motivado muitos estudos recentes.

Soh et al. (2000) apresentaram os resultados de um método de SHM realizado durante o teste de carga destrutiva de um protótipo de uma ponte de concreto armado. A ponte foi feita de concreto reforçado com barras de aço e representa uma classe popular de pontes rodoviárias em que o monitoramento periódico é necessário durante sua vida útil. Foram acoplados superficialmente sensores de PZT à ponte, que foram eletricamente excitados em altas frequências, da ordem de vários kHz, e a parte real da admitância (condutância) foi extraída como uma função dessa frequência. Os resultados demonstram claramente a "inteligência" do PZT na detecção de dano em um estágio muito precoce, abrindo caminhos para a possibilidade

de utilizar sensores de PZT para o monitoramento de integridade estrutural de grandes estruturas civis.

Inman et al. (2005) investigaram uma metodologia de SHM para um modelo de ponte treliçada de aço. Este tipo de ponte consiste de cantoneiras de aço, canais, placas e juntas ligadas por mais de 200 parafusos. Trata-se de uma estrutura com 1,8 m de altura e uma massa de aproximadamente 250 kg. Foram acoplados quatro sensores de PZT nas seções mais críticas da estrutura a fim de monitorar ativamente as condições que oferecem alta resistência estrutural civil. Essa experiência teve como objetivo examinar o efeito das condições de contorno externas relativas à assinatura de impedância. Para isso foram aplicadas três condições de contorno sobre a estrutura a fim de simular variações no sistema. Assim, variou-se o sinal ao longo de um período de tempo; criou-se uma situação similar às vibrações, martelando a estrutura manualmente e adicionando uma carga de 15 kg de massa à estrutura em posição próxima aos sensores. Realizou-se leituras ao longo de três semanas e, após identificar o intervalo das variações da impedância devido à condição limite, foram introduzidos danos através da inserção de parafusos ao longo da estrutura (neste caso, foram feitas modificações estruturais para representar os danos). A maior variação da impedância foi detectada ao introduzir vibrações com as excitações por impacto (martelo), como já se esperava. Consistente com outros resultados científicos, as juntas parafusadas foram os principais responsáveis pela dissipação de energia na estrutura. Um problema importante associado com o monitoramento de estruturas civis em larga escala é que elas possuem baixas frequências naturais e são difíceis de excitar, acarretando dificuldades na detecção de pequenas frequências (FRISWELL E PENNY, 1997 APUD INMAN et al., 2005). Porém, conforme foi demonstrado, a técnica de SHM baseada na impedância E/M pode ser aplicada em grandes estruturas civis utilizando excitações locais de alta frequência.

Park et al. (2006) detectaram fissuras múltiplas em estruturas de concreto utilizando a técnica da impedância. Neste trabalho, realizaram ainda uma comparação entre os dados experimentais e analíticos baseando-se em modelos de elementos finitos. Inicialmente confeccionaram um corpo de prova (CP) prismático de concreto e fixaram uma pastilha de PZT com dimensões de 16,0 mm x 16,0 mm x 0,2 mm à superfície do CP. Os danos foram gerados através de cortes com distâncias progressivas em relação ao sensor. Neste caso a métrica de dano RMSD foi utilizada como um indicador de danos. A assinatura de impedância e a métrica utilizada detectaram a presença do dano e o estudo analítico mostrou uma previsão de dano com uma tendência consistente com as variações da assinatura. Além dessa comparação, uma viga

de concreto armado foi produzida para prosseguir com o estudo. Nessa viga foram fixados nove sensores de PZT em diferentes posições da superfície da estrutura. Um ensaio de cisalhamento e flexão foi realizado originando múltiplas fissuras visíveis, variando a carga de 20 kN até 140 kN. Observaram que a técnica utilizada pode ser confiável na detecção de fissuras em estruturas de concreto e que a sensibilidade para detecção de danos desta técnica está intimamente relacionada com a banda de frequência selecionada.

Yang; Hu; Lu (2008) afirmaram que a técnica da impedância tem sido aplicada no monitoramento da integridade estrutural com sucesso em vários sistemas de engenharia. No entanto, ainda é necessário um trabalho de investigação fundamental sobre a sensibilidade dos sensores piezelétricos para a detecção de danos. Diante disso, foi desenvolvido um experimento com uma estrutura de concreto de dois andares, sujeita a vibrações, com o intuito de simular um abalo sísmico. Uma série de sensores piezelétricos foram fixados à estrutura e conectados ao medidor de impedância. A relação entre o índice de dano e a distância do sensor ao dano foi estudada, concluindo que sensores piezelétricos observados através do índice RMSD com base na parte real da impedância apresentaram sensibilidade adequada. Assim, o procedimento mostrou-se recomendado para esse tipo de monitoramento, mostrando sua capacidade em detectar danos, tanto incipientes como severos, em estruturas de concreto.

Annamdas; Yang; Soh (2010) apresentam um estudo de SHM aplicando a técnica da impedância E/M utilizando transdutores piezelétricos incorporados em amostras de concreto em formato cúbico. Esse trabalho investiga como um sensor incorporado pode ser mais eficaz no monitoramento de áreas cruciais dentro de uma determinada estrutura, além de não interferir na interface externa da mesma. Um método de proteção foi apresentado, por meio do qual o sensor foi protegido por uma camada de epóxi e um invólucro de aço seguido de pasta de cimento. Utilizaram o analisador de impedância Hewlett Packard 4192A a fim de adquirir os sinais reais da admitância, por serem mais confiáveis que a parte imaginária, para as faixas de frequências desejadas. Observaram que o PZT incorporado demonstrou confiabilidade para detectar os danos com distância de até 200 mm, semelhante ao PZT fixado na superfície estudada. Além disso, ressaltaram que a assinatura não apresentou alterações comparando ambas as configurações, até a frequência de 500 kHz. A análise estatística revelou ainda que os valores de RMSD aumentaram com a severidade dos danos, considerando a faixa de frequência de 80 kHz a 100 kHz.

Yang e Divsholi (2010) propuseram uma nova abordagem no SHM baseado na impedância E/M, dividindo a frequência em pequenos intervalos a fim de calcular os valores

do RMSD para uma estrutura de concreto. O RMSD-S, referente aos intervalos das sub-frequências, foi utilizado para estudar a severidade e localização do dano. Para o experimento, cinco pastilhas de PZT com dimensões de 20,0 mm x 20,0 mm x 0,5 mm foram coladas à viga de concreto com dimensões de 2,0 m x 1,5 m x 1,5 m. Utilizou-se um adesivo epóxi para colar os sensores à superfície estudada. Para geração do dano utilizaram uma serra circular produzindo fendas na superfície da viga de concreto em diferentes posições e profundidades. Ao observarem os resultados, concluíram que, em comparação com a abordagem convencional, onde é utilizado o valor RMSD para toda gama de frequências, a técnica proposta neste trabalho é confiável para o monitoramento de estruturas de concreto. A severidade e localização dos danos podem ser estimadas por um único sensor através do RMSD-S. Ressaltou-se que múltiplos sensores podem aumentar a precisão da detecção de danos e proporcionar uma maior área de detecção.

Wang e Zhu (2011) realizaram o monitoramento da resistência à compressão do concreto aplicando a técnica da impedância eletromecânica. Segundo eles, esta técnica surgiu como uma ferramenta eficiente para a detecção de danos em vários tipos de estruturas. Neste estudo foi apresentado brevemente uma alternativa para utilizar sensores incorporados no concreto, empregando uma proteção aos sensores à base de uma solução asfáltica que funciona como uma barreira eficiente contra a umidade. Foram utilizados dois sensores: uma pastilha de PZT com dimensões de 8,0 mm x 8,0 mm x 0,3 mm embutida no cubo de concreto e outra, com dimensões de 26,0 mm x 13,0 mm x 0,5 mm, foi conectada à superfície da estrutura após o processo de cura. Realizaram medições da impedância, da parte real e imaginária, do sensor de PZT incorporado ao concreto do primeiro ao 28º dia após a moldagem do corpo de prova. Os resultados de medições mostraram que, com o aumento da idade do concreto, a frequência de ressonância aumentou gradativamente se concentrando nos sete dias iniciais, indicando um aumento gradual da rigidez do concreto. Os autores observaram ainda, empregando as medições da parte real da impedância combinadas aos índices de dano MAPD e RMSD, foi possível monitorar e avaliar a resistência à compressão do concreto de diferentes idades.

Park et al. (2011) aplicaram a técnica descrita para identificar as condições de descolamento de fibras de carbono, ou tecnicamente de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP), frequentemente utilizados sempre que são necessárias alta relação resistência-peso e rigidez, em estruturas de concreto. Neste estudo foi utilizado um sensor de impedância *wireless* desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia Eletrônica da Coreia para obter as informações dos dois sensores fixados na estrutura de concreto. A parte real da impedância foi

medida para as três condições criadas para o descolamento da fibra, sendo que os resultados experimentais mostraram que essa técnica pode ser usada para diagnosticar a eficiência de técnicas de reforço com a introdução de fibras de carbono.

Quinn; Kelly; Barrett (2012) incorporaram um sensor sem fio em uma estrutura de concreto a fim de monitorar a cura inicial do mesmo e ainda sua integridade estrutural a partir do método de SHM baseado em impedância eletromecânica. Produziram quatro amostras cúbicas contendo cimento Portland, areia e brita. Após depositar o concreto na fôrma, utilizaram um plástico para controlar a umidade do mesmo durante 24 horas. Um sensor piezocerâmico foi submergido no concreto, protegendo-o com uma camada protetora de epóxi. Vale ressaltar que a resistência à compressão da camada protetora foi maior que do concreto, assegurando que o sensor não causaria uma falha prematura no interior do corpo de prova. O sistema de medição completo consistiu dos seguintes equipamentos: um analisador de impedância *Agilent HP4192A17*, o sensor revestido e um computador. Os autores utilizaram o *software* LabVIEW para controlar o analisador de impedância e a faixa de frequência de varredura foi de 50 kHz a 150 kHz. Obtiveram três leituras e, posteriormente, suas respectivas médias. A primeira varredura foi executada imediatamente após a moldagem do concreto já descrito, caracterizando assim a *baseline*. A partir daí, executaram varreduras a cada hora para os dez primeiros dias e em seguida reduziram para cada seis horas. Cada amostra apresentava uma mistura diferente e, conseqüentemente, uma resistência à compressão diferente. Como a remoção das fôrmas impõe novas tensões que o concreto deve suportar, foi essencial realizar a desforma em um momento em que o risco de dano devido a desvios e fluências fossem mínimos. Por isso, a retirada da fôrma aconteceu em diferentes fases: após 48 horas e oito dias de cura. Realizaram leituras antes e depois desse evento a fim de determinar se o método seria suficientemente sensível para detectar a remoção da fôrma e se seria possível determinar um estágio ideal para isso. Foi possível ainda exibir o desenvolvimento da magnitude da impedância em diferentes estágios do concreto, destacando que a mudança no pico da curva de resistência é causada pelas mudanças na rigidez da estrutura, enquanto a mudança na largura de banda está relacionada com o amortecimento da estrutura.

Na e Lee (2012) propuseram uma técnica para melhorar a capacidade de detecção de danos através da técnica da impedância em estruturas de concreto. Para isso, uma amostra de concreto com resistência de 24 MPa, dimensão de 500 mm x 300 mm x 50 mm, constituído de água, cimento, areia fina e grossa foi construída e reservada 90 dias para a cura. O analisador de impedância convencional foi substituído por um sistema de baixo custo, onde uma das

principais vantagens se dá no controle da tensão de entrada, ao contrário do analisador convencional onde essa tensão é fixada em 0,5 V. Embora 0,5 V seja suficiente para realizar a técnica de SHM em estruturas metálicas, pode não proporcionar um alcance de detecção suficiente para materiais não homogêneos como, por exemplo, o concreto. Uma vez que a tensão de entrada pode ter um efeito sobre o alcance da detecção, ao aumentar a tensão de entrada pode-se ter um importante fator diferencial ao aplicar a técnica de SHM em estruturas de concreto, a fim de assegurar uma grande área de detecção. Utilizaram material de cerâmica de PZT com espessura de 0,3 mm e um adesivo epóxi comercial. Após a colagem, deixaram em repouso durante 48h à temperatura ambiente para assegurar a cura do adesivo. Utilizaram quatro sensores, sendo que em dois deles foi aplicada a técnica proposta no trabalho: criação de uma ressonância numa gama de frequências para detecção de danos, região onde a técnica de SHM é altamente sensível. Isso foi atingido através da fixação de uma camada metálica, entre o sensor e a estrutura estudada, que possui uma frequência de ressonância dentro do intervalo de varredura antes da fixação do PZT. Discos circulares de metal comercialmente disponíveis, de 25,0 mm de diâmetro e duas espessuras distintas de 2,0 mm e 5,0 mm foram utilizados nesse estudo. As assinaturas de impedância dos quatro sensores foram medidas usando o sistema de aquisição de dados de baixo custo para mostrar os efeitos da técnica proposta. Para simular os danos realizaram cortes com 5,0 mm de profundidade e 5,0 mm de largura utilizando um disco de fresa, de forma gradativa em relação à distância dano-PZT. Concluíram que, com o aumento da faixa de frequência, houve uma redução na área de detecção até a situação em que a sensibilidade da assinatura de impedância é dominada pela camada metálica. Tal estudo indicou que a aplicação da técnica proposta é mais eficaz em regiões de baixas frequências.

Hu; Zhu; Wang (2014) confeccionaram uma placa de concreto armado com dimensões de 600,0 mm x 300,0 mm x 40,0 mm, com resistência de 20 MPa; utilizaram aço do tipo HPB235 e fixaram na superfície do corpo de prova quatro cerâmicas piezelétricas com dimensões de 10,0 mm x 10,0 mm x 0,5 mm. Para medir a impedância usaram um analisador de impedância modelo 4294A Agilent. A superfície da laje foi dividida em quatro partes, onde cada uma recebeu uma cerâmica piezelétrica a uma determinada distância dos danos provocados a partir de cortes no concreto. Ao testarem a curva de impedância, as bandas de frequência foram divididas em quatro faixas de 50 kHz a 600 kHz, 50 kHz a 150 kHz, 150 kHz a 300 kHz, 300 kHz a 450 kHz e 450 kHz a 600 kHz, onde os resultados mais satisfatórios se encontram na faixa de 150 kHz a 300 kHz. O índice de dano calculado (RMSD) mudou

regularmente em relação à distância entre o PZT e o local do dano, o que é útil para determinar a localização de uma área danificada.

Talakokula; Bhalla; Gupta (2014) propuseram uma nova abordagem para avaliação de corrosão em estruturas de concreto armado com base em parâmetros estruturais equivalentes utilizando a técnica da impedância E/M. Sabe-se que a corrosão é uma das principais causas de danos e patologias prematuras das estruturas de concreto armado, gerando enormes custos para inspeção, manutenção, restauração e substituição da infraestrutura. As abordagens convencionais para detecção desse tipo de patologia estão baseadas em técnicas eletroquímicas, porém não são muito comuns, dado que há certa complexidade e é preciso dispor de equipamentos próprios. O método mais frequente é mesmo realizar o exame visual, o que é válido em alguns casos, porém não há um critério normalizado e isso traz inúmeras dificuldades. Este trabalho apresenta os resultados de uma série de testes de corrosão acelerada executada em cubos de concreto com barras de aço neles embutidas. Sensores piezelétricos com dimensões de 10,0 mm x 10,0 mm x 0,3 mm foram fixados no aço utilizando epóxi, respeitando uma cura de 24 horas. Sinais da condutância foram mensurados para verificar o funcionamento dos sensores nos quatro corpos de prova. A corrosão foi induzida posicionando a estrutura de concreto armado, onde o aço representa o anodo, em uma solução salina na presença de uma haste de cobre (catodo), durante 120 dias. Componentes reais e imaginários dos sinais de condutância foram analisados para diferentes estágios, mostrando que essa técnica pode ser aplicada no monitoramento de corrosão em estruturas reais de concreto armado, onde a determinação real da perda da rigidez do aço é considerada uma tarefa complexa.

Xu et al. (2015) investigaram os efeitos da temperatura e da carga em sensores piezelétricos incorporados em estruturas de concreto. Inicialmente prepararam o sensor piezelétrico protegendo-o com uma mistura de pó de cimento, resina epóxi e agentes de cura na proporção de 1:1:0,25, onde a espessura final da embalagem foi de 5,0 mm. Incorporaram esse sensor protegido no interior de uma amostra de argamassa com dimensões de 40,0 mm x 40,0 mm x 40,0 mm e, após curar por 28 dias, essa amostra foi posicionada no interior de uma câmara térmica (modelo MPC-710) com uma variação de temperatura entre -20 °C e 40 °C. A câmara possui uma taxa de aquecimento de 2 °C/min e tempo de conservação de calor de 1 h a cada 10 °C. Selecionaram três faixas de frequências a partir do analisador de impedância Modelo 4294A Agilent, que também mediu os sinais da impedância. De acordo com a localização dos picos de ressonância, foram selecionados os intervalos de frequências de 0-100 kHz, 100-500 kHz e 600-1500 kHz, respectivamente. O ensaio de compressão foi realizado com uma máquina de ensaio

de compressão com uma carga crescente até a destruição da amostra. Observaram que a variação de temperatura não apenas afeta o *baseline* da assinatura da condutância do sensor, como também a frequência e amplitude dos picos de ressonância.

Chalioris et al. (2016) e Voutetaki et al. (2016) aplicaram a técnica da impedância em vigas de concreto. Um sistema de controle inovador em tempo real, portátil, nomeado Sistema de Monitoramento sem fio de Impedância/Admitância (WiAMS) fez as medidas das respostas em frequência de tensão para um conjunto de transdutores piezelétricos conectados em estruturas de concreto armado em ambos os trabalhos mencionados. Ficou demonstrado, durante os testes, discrepâncias entre a resposta em frequência para a estrutura saudável e danificada. Essas diferenças confirmaram claramente a presença de danos e, para avaliarem quantitativamente esses danos, utilizaram o índice de dano RMSD. Os resultados mostraram que, juntamente com a mudança gradual da resposta em frequência e o aumento dessa métrica, a presença do dano foi confirmada. Essas aplicações forneceram indicações promissoras que as medições do WiAMS para uma série de transdutores piezelétricos podem ajudar a diagnosticar danos em estruturas de concreto armado.

Alguns trabalhos já demonstraram o interesse em buscar uma proteção eficaz para os sensores antes de incorporá-los no interior das estruturas monitoradas. Diversos materiais já foram propostos, como em Khante e Gedam (2016), Zhao et al. (2016), por exemplo, em que ambos propuseram uma proteção de argamassa para o sensor, na proporção de 1:2 (cimento e água). Inicialmente o sensor foi revestido com uma camada à prova d'água (plástico) e, posteriormente, foi envolvido com argamassa utilizando uma forma com 20,0 mm de diâmetro. Em ambos os trabalhos a técnica da impedância foi aplicada em estruturas de concreto, conjuntamente com sensores instalados na superfície. Os autores acreditam que os resultados encontrados fornecerão informações importantes para o desenvolvimento de agregados inteligentes que auxiliarão neste tipo de inspeção estrutural.

Recentemente, Liu et al. (2017) utilizam pastilhas piezelétricas com dimensões de 10,0 mm x 10,0 mm x 2,0 mm para monitorar a integridade do concreto em duas situações distintas: na presença de um dano e em ciclos de congelamento e descongelamento. Inicialmente protegeram os sensores com uma mistura, já descrita em Xu et al. (2015), de pó de cimento, resina epóxi e agentes de cura na proporção de 1:1:0,3, sendo sua espessura final reduzida a 1,0 mm. O congelamento/descongelamento foi efetuado por ciclos com variação de 28 °C. Para a geração do dano, uma fenda artificial com $5,0 \pm 0,5$ mm de largura foi produzida e a profundidade da trinca foi, respectivamente, de 10,0 mm, 30,0 mm e 50,0 mm depois de cada

corte. A resistência dos sensores foi medida e analisada para 6 faixas de frequências, após 25 e 50 ciclos de congelamento/descongelamento respectivamente e para cada profundidade da fenda. Observaram que os valores da resistência, assim como a métrica RMSD aumentaram gradualmente com os ciclos de congelamento/descongelamento e, como era esperado, também aumentaram com o aumento da profundidade da fenda. O intervalo de frequência de 100 kHz a 150 kHz demonstrou uma variação mais clara na curva da resistência como também na métrica calculada.

Observa-se diversas investigações experimentais realizadas com sucesso em estruturas de engenharia civil graças a algumas das vantagens da técnica da impedância E/M como, por exemplo, a capacidade de detecção de danos incipientes e o uso de transdutores não intrusivos e de baixo custo. Porém, trata-se de uma metodologia que ainda requer um refinamento e uma avaliação mais detalhada dos diversos tipos possíveis de diagnóstico que não foram ainda abordados nas pesquisas já publicadas. Nos próximos capítulos desta Tese será apresentado o desenvolvimento experimental realizado em compostos cimentícios reforçados com fibras de aço, buscando o aprimoramento do estado da arte.

CAPÍTULO IV

Monitoramento de Estruturas de Concreto com Sensores Acoplados à Superfície

Este capítulo contempla os detalhes do procedimento experimental onde o método de Monitoramento de Integridade Estrutural com base na técnica da impedância E/M é aplicado na detecção de danos em um corpo de prova prismático de concreto reforçado com fibras de aço. Apresenta-se os detalhes que envolvem o ensaio experimental, ou seja, o material utilizado na confecção do corpo de prova, sensores, dispositivo de análise de impedância, câmara climática e máquina de ensaios dinâmicos (MTS). Neste caso, os sensores piezelétricos foram acoplados superficialmente à estrutura estudada e, para a geração do dano, realizou-se um ensaio de tenacidade à flexão. Por fim, exibe-se os sinais de impedância, assim como os índices de dano, a influência da temperatura e o resultado da compensação desse efeito.

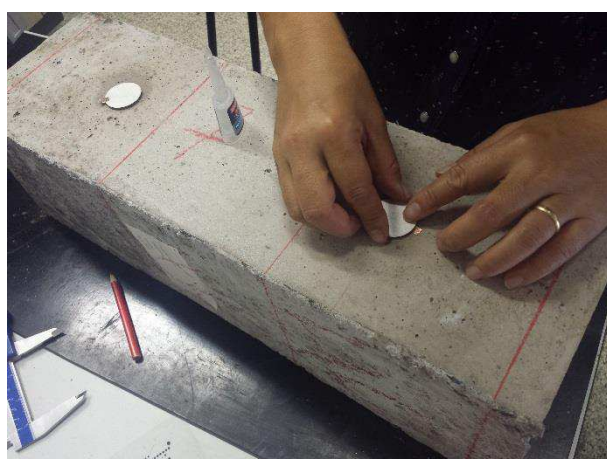
4.1 Descrição do Procedimento Experimental

Inicialmente confeccionou-se um corpo de prova prismático utilizando fôrmas metálicas com uma seção transversal de 150 mm x 150 mm e comprimento de 500 mm. O traço do concreto utilizado foi aquele que levou a uma resistência à compressão (f_{ck}), aos 28 dias de idade, em torno de 40 MPa. O material utilizado nesse traço pode ser observado a partir da Tab. 4.1.

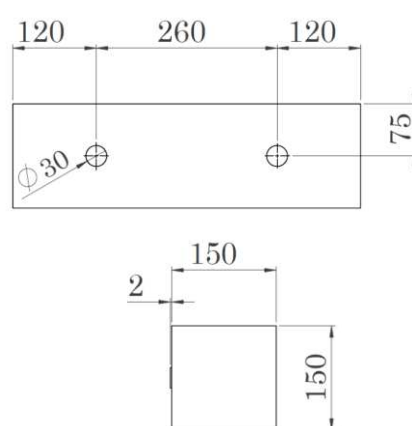
Tabela 4.1 – Consumo de materiais para produção do traço com f_{ck} de 40 MPa (VITOR, 2017).

Materiais	Quantidade
Cimento CP II 40 (kg/m ³)	447,00
Areia fina (kg/m ³)	250,32
Areia média (kg/m ³)	464,88
Brita 0 - dimensão máxima 12,5 mm (kg/m ³)	268,20
Brita 1 - dimensão máxima 19,0 mm (kg/m ³)	804,60
Água (l/m ³)	179,80
Aditivo superplastificante (l/m ³)	2,34
Teor de fibra de aço (kg/m ³)	60,00
Fator a/c	0,40
Traço em massa	1:4

Após a moldagem, adensamento e acabamento, o corpo de prova foi reservado em câmara úmida, durante 48 horas. Posteriormente, a amostra foi descimbrada (retirada da fôrma) e abrigada em cura submersa até a data dos ensaios. Todo o procedimento de moldagem e cura adotado encontra-se normatizado pela ABNT NBR 5738: 2015. Em sequência, realizou-se a fixação de dois sensores nomeados como PZT1 e PZT2, com cianoacrilato líquido, na superfície do corpo de prova e a correspondente soldagem dos sensores piezelétricos (Figs. 4.1 e 4.2).



(a)



(b)

Figura 4.1 – Acoplamento dos sensores: (a) Colagem dos sensores piezelétricos na superfície do corpo de prova; (b) Posição dos sensores (mm).

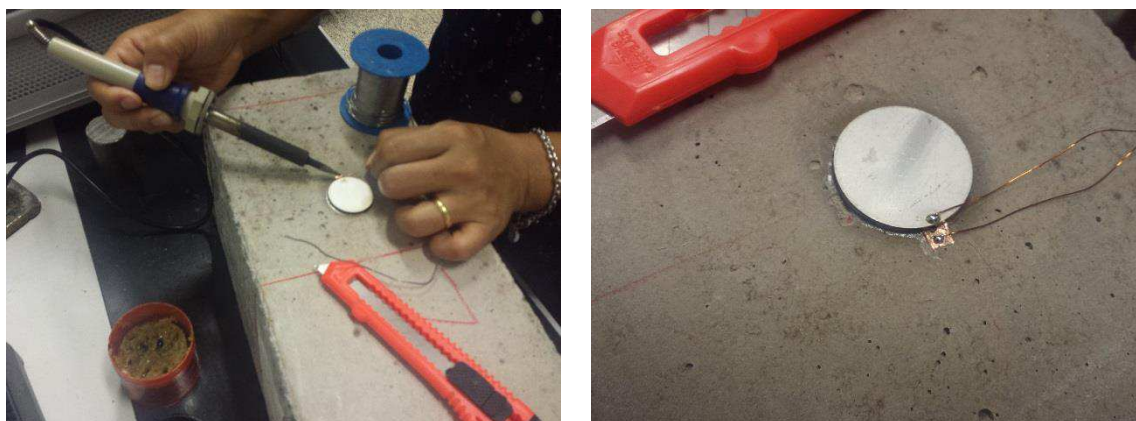


Figura 4.2 – Preparação dos sensores: (a) Soldagem dos sensores piezelétricos; (b) Sensor hábil para realizar medições.

Adotou-se uma disposição estratégica para os sensores levando em consideração a posição aproximada da região a ser danificada (centro do corpo de prova), a partir do ensaio de tenacidade à flexão, por meio da norma americana ASTM C1609 (2012), realizado aos 47 dias de cura da amostra. Para isso, foi utilizada uma máquina de ensaios dinâmicos da marca Landmark®, modelo 370.10, eletromecânica e servo hidráulica (MTS), com capacidade de 100 kN à compressão. O corpo de prova foi devidamente marcado com o intuito de facilitar o alinhamento e posicionamento do mesmo sobre a base da máquina, além de facilitar também a instalação do dispositivo *Yoke* (Fig. 4.3).



Figura 4.3 – Corpo de prova sobre a máquina de ensaio.

As medidas da impedância foram realizadas antes e após a geração do dano utilizando o Analisador de Impedância *Agilent 4294A*. Nas medições foram utilizadas duas faixas de frequências: 10 kHz a 30 kHz e 80 kHz a 120 kHz, 401 pontos, com uma média de 16 pontos e 4 médias por ponto (Fig. 4.4). Esses intervalos de frequências foram selecionados a partir do método de tentativa e erro (buscando áreas do espectro com maior atividade dinâmica, ou seja, com maior densidade de picos no domínio da frequência).

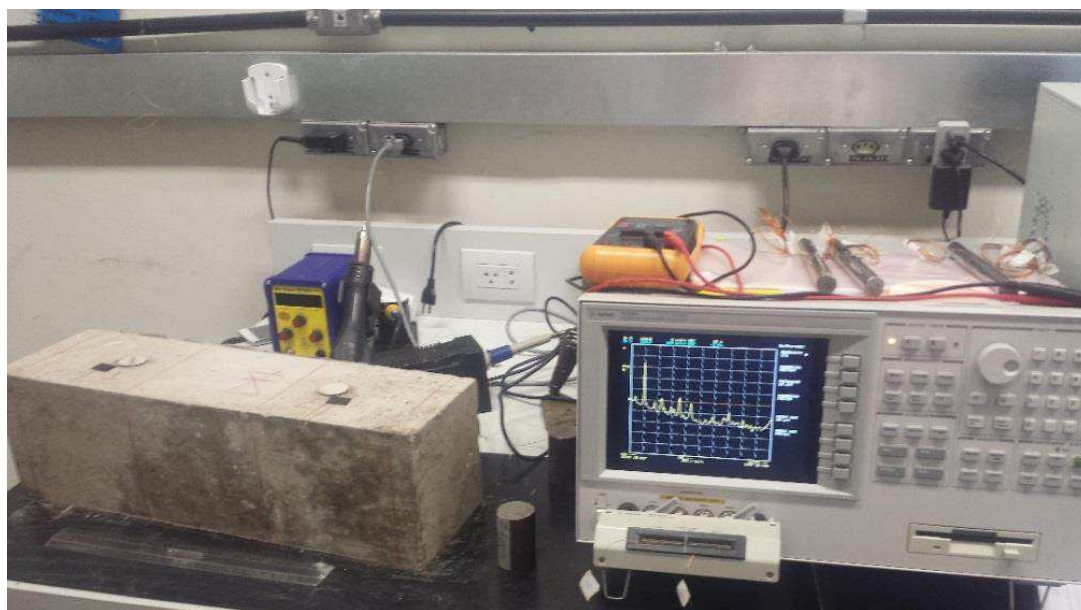


Figura 4.4 – Medições da impedância elétrica.

O ensaio ASTM C1609 (2012) acarretou o rompimento da estrutura estudada, como mostra a Fig. 4.5.

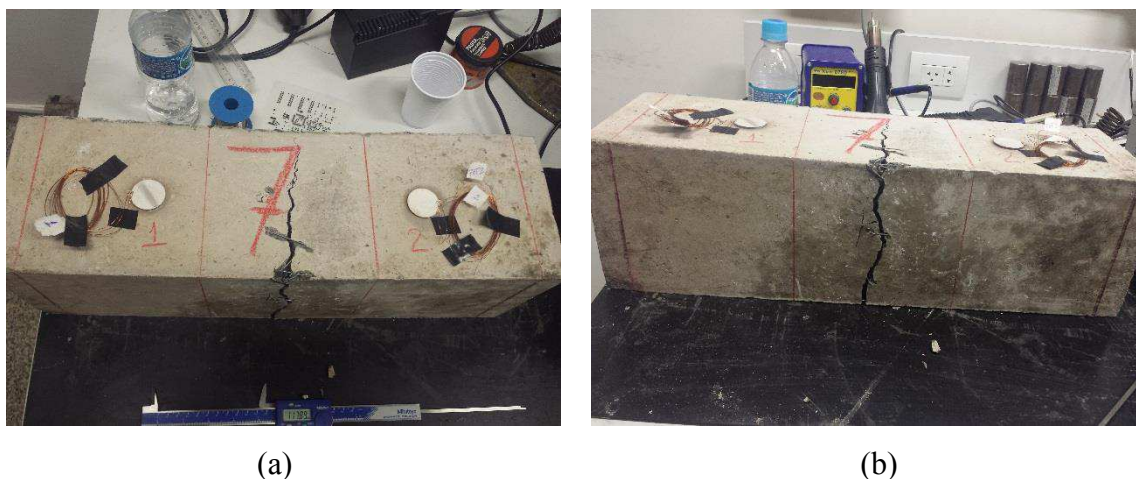


Figura 4.5 – Danos provocados na estrutura de concreto: (a) Vista lateral; (b) Vista inferior.

Para a avaliação do efeito de temperatura, posicionou-se o corpo de prova danificado no interior de uma câmara climática EPL-4H da série *Platinous* (Fig. 4.6).



Figura 4.6 – Corpo de prova de concreto no interior da câmara climática.

A câmara climática EPL-4H emprega um sistema BTHC (*Balanced Temperature and Humidity Control*) para controle de temperatura e umidade. O sistema BTCH regula a temperatura e umidade dentro da câmara para reproduzir as condições desejadas pelo usuário. Isso é feito controlando continuamente a capacidade de um refrigerador (desumidificador) de

alta carga de calor e um aquecedor de umidificação de baixa carga de calor, em tempo real. Assim, a câmara EPL-4H opera com temperaturas no intervalo de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ com uma resolução de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

O intervalo de frequência selecionado na aquisição dos sinais de impedância foi de 80 kHz a 120 kHz; 5000 pontos de resolução de frequência foram adquiridos utilizando o medidor de impedância portátil SySHM descrito no Capítulo 3 desta Tese (Fig. 4.7).



Figura 4.7 – Efeito da temperatura: (a) Câmara climática EPL-4H, (b) Medidor de impedância SySHM.

4.3. Detecção de Danos

Ao analisar os resultados obtidos para o PZT1 na primeira banda de frequência (10 kHz a 30 kHz), observou-se que a parte real do sinal de impedância medida após surgimento do dano modificou significativamente, ao ser comparado com o *baseline* (Fig. 4.8). Para quantificar essas mudanças, os sinais de impedância foram tratados numericamente utilizando as Eqs. 3.4 a 3.9.

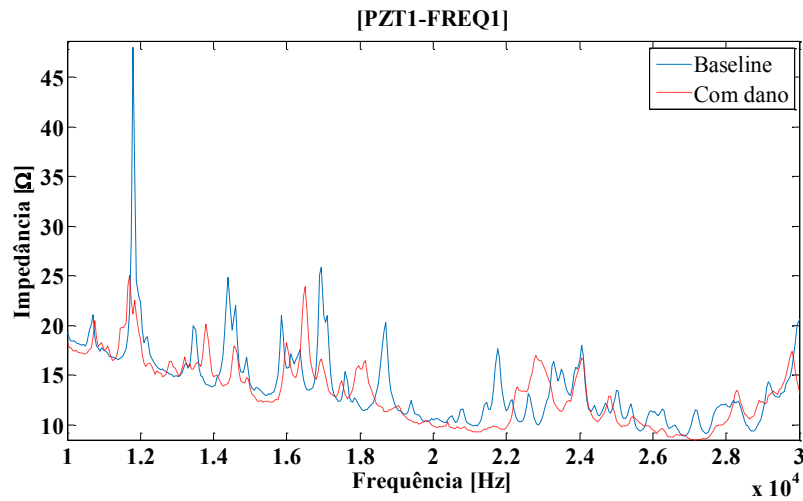
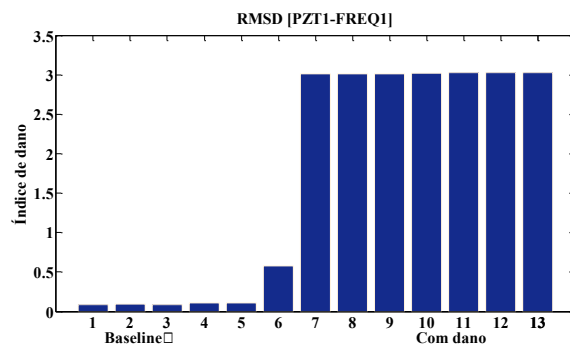
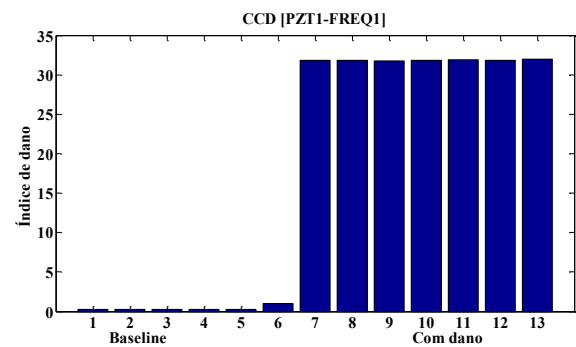


Figura 4.8 – Assinaturas de Impedância para o PZT1 no intervalo de frequência de 10kHz a 30kHz.

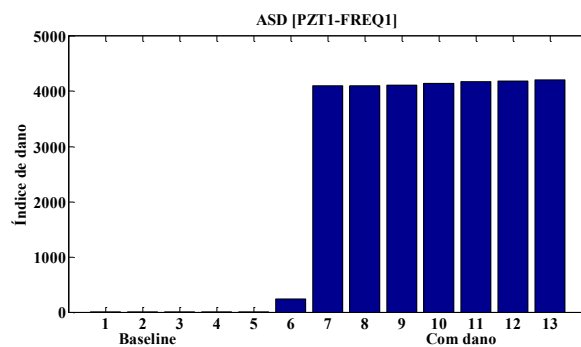
Verifica-se que as assinaturas de impedância modificaram após a geração do dano e, para quantificar essa modificação, foram calculadas as métricas de dano RMSD, CCD, ASD e M, sendo que os resultados confirmaram a presença do dano (Fig. 4.9).



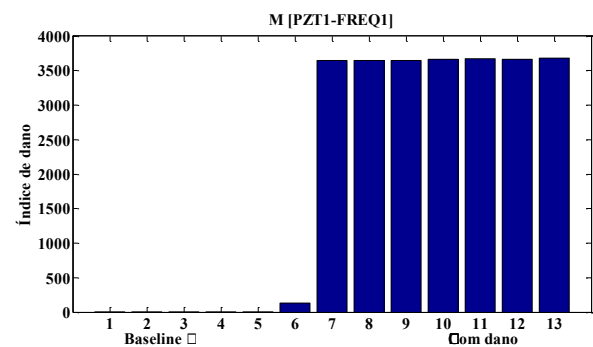
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.9 – PZT1 [10 kHz a 30 kHz]: Métricas de dano (a) RMSD; (b) CCD; (c) ASD; (d) M.

Na Fig. 4.9 os seis primeiros estados referem-se à comparação do sinal *baseline* versus *baseline* e os outros sete estados referem-se ao *baseline* versus o sinal após a geração do dano (estrutura danificada).

Para o PZT2, nesta mesma frequência, obteve-se os seguintes resultados confirmando a presença de dano conforme demonstrado pelo PZT1 (Fig. 4.10). Outras métricas de dano foram calculadas para realizar uma análise quantitativa; no entanto, apresenta-se apenas uma delas, uma vez que os demais resultados conduzem a comportamentos semelhantes (Fig. 4.11).

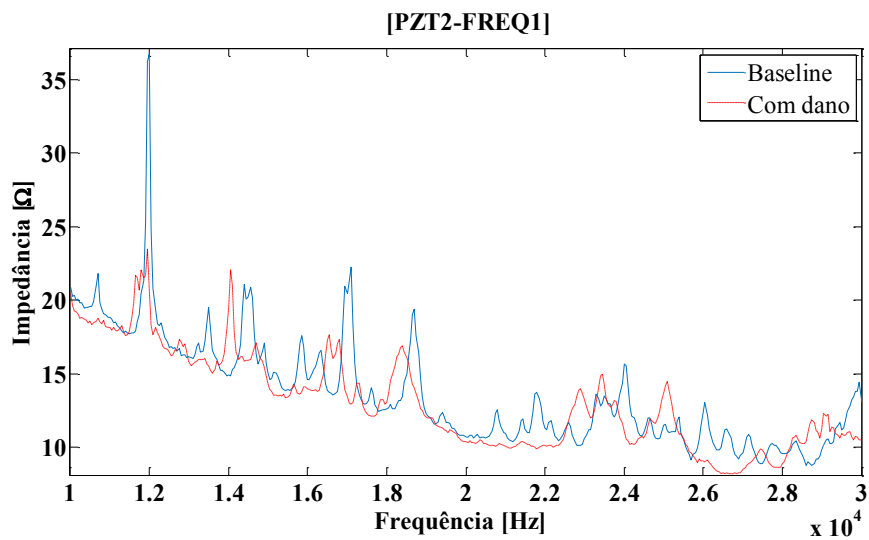


Figura 4.10 – PZT2 [10 kHz a 30 kHz]: Assinaturas de Impedância.

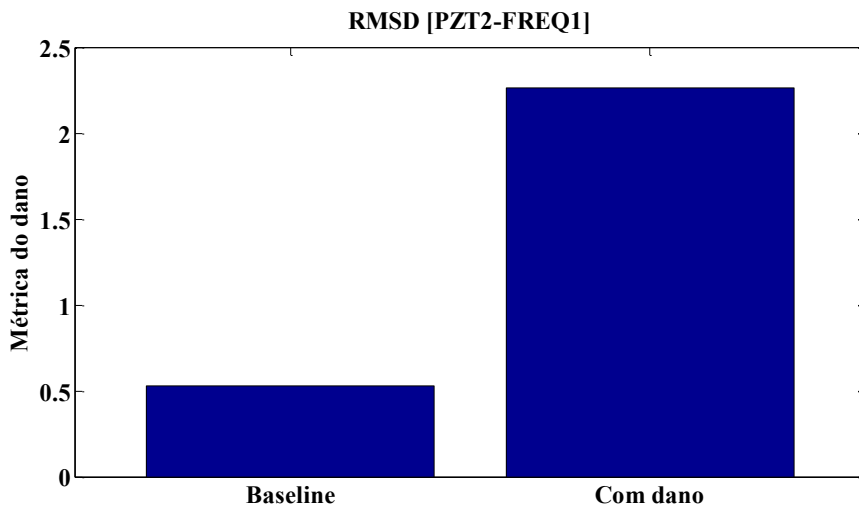


Figura 4.11 – PZT2 [10 kHz a 30 kHz]: Média da métrica de dano RMSD.

Para a faixa de frequência de 80 kHz a 120 kHz nota-se que a técnica proposta foi menos sensível para detectar a presença de dano na estrutura estudada, conforme se percebe pela assinatura de impedância. Apesar disso, a partir das métricas foi possível quantificar o dano existente na estrutura estudada (Fig. 4.12).

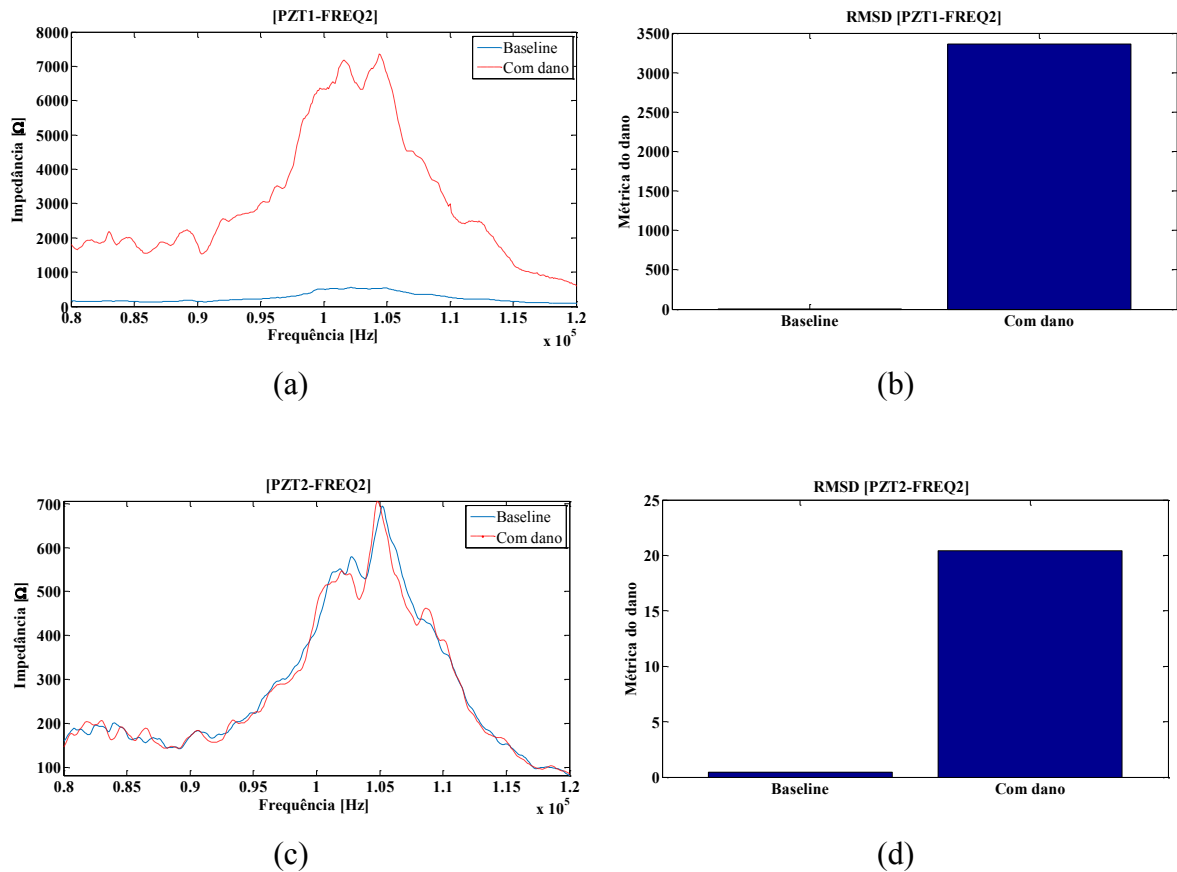


Figura 4.12 – PZT1 [80 kHz a 120 kHz]: (a) Sinal da impedância; (b) Média – RMSD; PZT2 ([80-120] kHz) (c) Sinal da impedância; (d) Média – RMSD.

Para ambos transdutores piezoelétricos, no segundo intervalo de frequência, de 80 kHz a 120 kHz, os sinais da impedância demonstraram a capacidade de detectar os danos. No entanto, os resultados mostraram que essa faixa de frequência é menos sensível. É importante notar que as frequências mais altas são menos sensíveis à detecção de danos em estruturas de concreto.

4.3. Compensação do Efeito da Temperatura: Método do Deslocamento Efetivo

Ao analisar o efeito da temperatura, a Fig. 4.13 exibe uma modificação no sinal da impedância quando a temperatura varia considerando as três diferentes situações, ou seja, 23,6 °C, 25,4 °C e 27,4 °C. Ao ampliar a resposta, é nítido que a curva que representa o sinal apresente deslocamentos vertical e horizontal. Consequentemente, para ajustar a curva e evitar falsos positivos, realizou-se a compensação da temperatura a partir do método do deslocamento efetivo. Após a compensação do efeito da temperatura, o sinal de impedância foi atualizado como é apresentado a seguir.

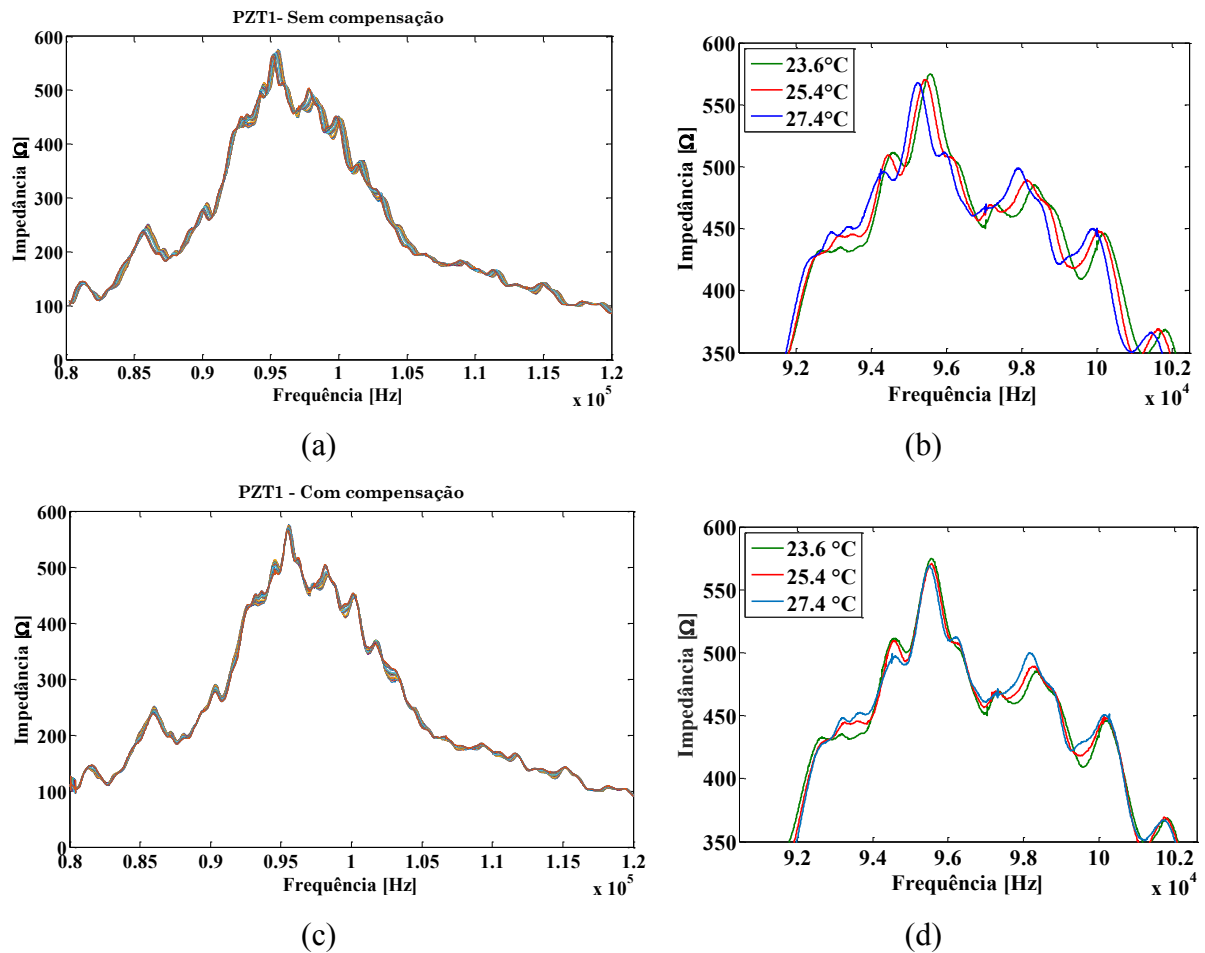


Figura 4.13 – PZT1 [80-120] kHz: (a) Assinatura da Impedância sem compensação de temperatura; (b) Detalhe do sinal de impedância sem compensação da temperatura. (c) Assinatura da Impedância com compensação de temperatura; (d) Detalhe do sinal da impedância com compensação de temperatura.

A Fig. 4.14 apresenta a métrica de dano CCD antes e depois da compensação de temperatura para as três temperaturas analisadas. As nove medidas iniciais representam a métrica de danos a 23,6 °C; as próximas nove medidas representam a métrica de danos a 25,4 °C e, finalmente, as últimas nove medidas correspondem a temperatura de 27,4 °C. Como pode ser visto nos resultados, a compensação da temperatura foi necessária e representa uma maneira viável de obter dados de SHM confiáveis.

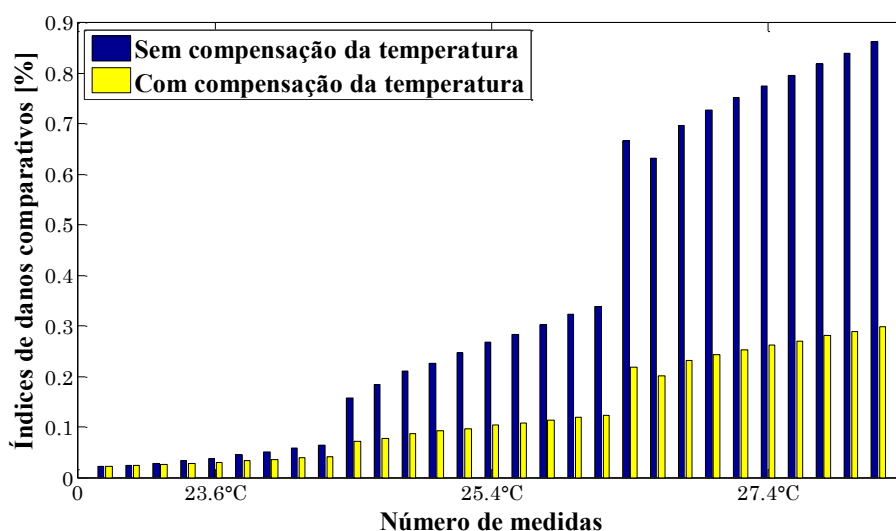


Figura 4.14 – Métrica de dano CCD para o PZT1 na frequência de 80 kHz a 120 kHz, com e sem compensação da temperatura.

Os resultados apresentados permitiram concluir que o método da impedância eletromecânica é uma alternativa real para detectar danos em estruturas de concreto com os sensores acoplados na superfície. Porém, é importante que seja feita a compensação da temperatura para evitar falsos positivos nas análises e diagnósticos, tornando o processo mais confiável.

No próximo capítulo, aplicações experimentais com os sensores embutidos nas estruturas de concreto darão continuidade a esta pesquisa.

CAPÍTULO V

Monitoramento de Estruturas Inteligentes de Concreto

Como visto no Capítulo anterior, destaca-se agora o desenvolvimento da aplicação da técnica da impedância E/M em estruturas inteligentes de concreto, ou seja, em estruturas com sensores embutidos nas mesmas. Inicialmente, investiga-se o tipo de material propício para proteger o sensor e, em sequência, apresenta-se todo o procedimento para produção da Cápsula Inteligente. Ressalta-se que nesta Tese o termo *Cápsula Inteligente* se refere ao sensor piezelétrico protegido por uma camada de resina, desenvolvido durante esta pesquisa. Para realizar a validação do funcionamento dessa cápsula, apresenta-se um teste experimental em uma viga de alumínio. Na sequência, apresenta-se o monitoramento de elementos estruturais cilíndricos e prismáticos de concreto, mostrando os detalhes e resultados desses procedimentos. Ainda na seção de aplicações em estruturas de concreto, o monitoramento de uma laje de concreto é descrito detalhadamente, assim como todos resultados e análises realizadas. Por fim, alguns testes em condições ambientais adversas são apresentados, encerrando este Capítulo.

Para todos procedimentos experimentais desenvolvidos, foi feita a compensação da temperatura utilizando uma técnica de otimização híbrida.

5.1. Cápsulas Inteligentes

Incorporar sensores na estrutura não é uma tarefa simples comparativamente à sua instalação na superfície do corpo de prova. Primeiramente, a estrutura “base” deve ser constituída por materiais que permitam que os sensores sejam incorporados, como por exemplo o concreto, laminados ou polímeros. Além disso, os sensores incorporados devem ser adequadamente isolados e incorporados à estrutura, garantido ainda que o mesmo não altere qualquer propriedade mecânica da estrutura.

O desenvolvimento das Cápsulas Inteligentes foi iniciado a partir de consulta à literatura, onde são encontradas diferentes configurações de proteção para os sensores. Algumas pesquisas já demonstraram o interesse em buscar uma proteção ativa para os sensores antes de incorporá-los na estrutura, como descrito na Seção 3.3 desta Tese. Verifica-se que materiais variados já foram propostos, como por exemplo a argamassa, a borracha, o plástico, a resina epóxi, vários agentes de cura, um invólucro de aço ou alguma combinação entre estes.

Para garantir a confiabilidade durante o carregamento mecânico e elétrico, suportar vibração induzida durante a moldagem do concreto, assim como resistir à pressão associada ao processo de cura, foi utilizado um adesivo à base de resina epóxi para proteger o sensor de um possível colapso no interior do concreto. Trata-se de uma resina com alto poder de adesão para colagem de grandes superfícies lisas, porosas ou irregulares, tais como azulejos, madeira, vidro, concreto, pedras, metais e alguns plásticos rígidos (exceto polietileno, polipropileno, nylon e teflon), capaz de resistir a temperaturas de até 80 °C e que apresenta uma resistência superior à do concreto ($\cong 100$ MPa).

O processo de fabricação da cápsula inicia com a confecção da fôrma com dimensões de 80 mm x 80 mm x 30 mm, utilizando uma impressora 3D modelo Replicator2X da marca *MakerBot* (Fig. 5.1). A seguir, apresenta-se de forma detalhada a metodologia empregada nesse processo.



Figura 5.1 – Impressora *MarkerBot* Replicator2X.

A moldagem da cápsula exige um período de 24 horas de cura, sendo quatro horas para a primeira camada onde se encontra o sensor piezelétrico. Ao final desse processo a Cápsula

Inteligente apresenta um diâmetro final de 40,0 mm, espessura de 4,0 mm e massa de aproximadamente 20,0 g (Fig. 5.2).

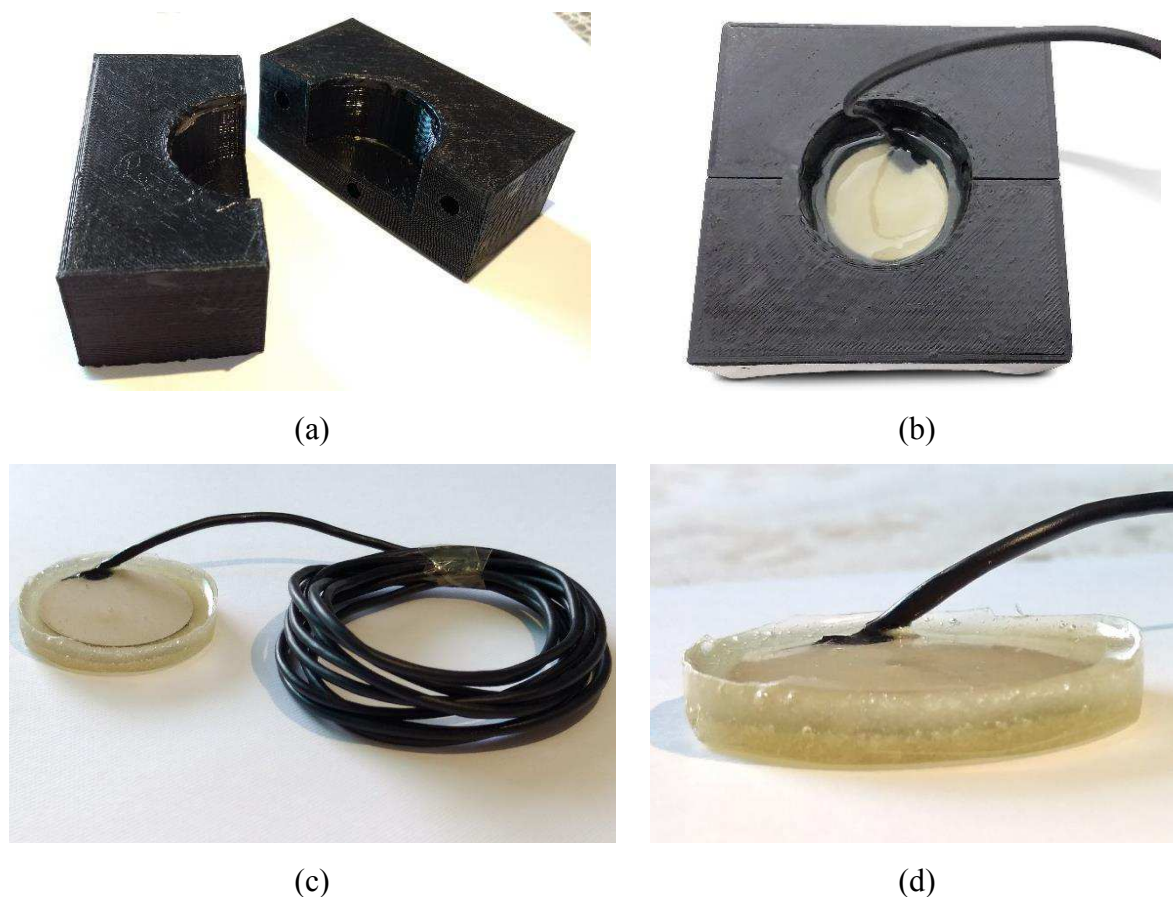


Figura 5.2 – Fabricação da Cápsula Inteligente: (a) fôrma; (b) resina epóxi e sensor no processo de cura; (c) Cápsula Inteligente; (d) vista lateral da cápsula.

Com as cápsulas finalizadas, prosseguiu-se para a avaliação do funcionamento da mesma, conforme descrito na próxima seção desta Tese.

5.2. Avaliação da Funcionalidade da Cápsula Inteligente: Viga de Alumínio

Com o intuito de avaliar o funcionamento da Cápsula Inteligente com o método da impedância eletromecânica, utilizou-se uma viga de alumínio com dimensões de 300 mm x 38 mm x 3 mm. Em um dos lados desta viga, conectou-se uma Cápsula Inteligente e, para

simular dano, um parafuso localizado a uma distância de 185 mm do sensor foi removido (Fig. 5.3).

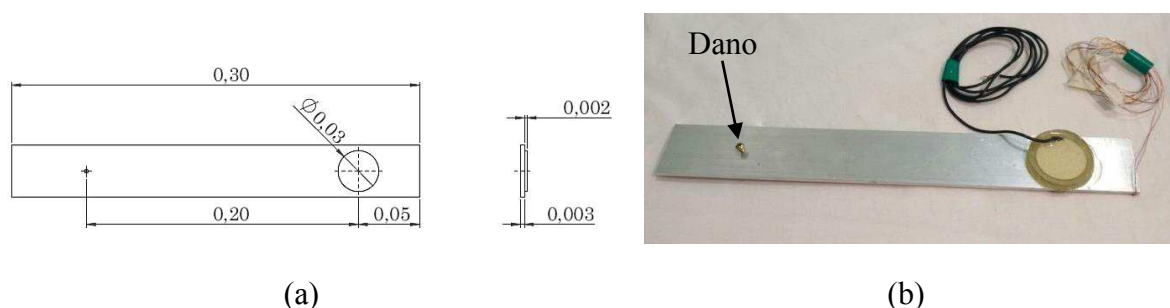


Figura 5.3 – Viga de alumínio: (a) Dimensões principais; (b) Viga com a Cápsula Inteligente e o dano simulado.

O corpo de prova foi posicionado no interior da câmara climática EPL-4H, já descrita na Seção 4.1 desta Tese, para controlar a temperatura durante a aquisição das assinaturas de impedância. Três temperaturas distintas foram consideradas: 15 °C, 25 °C e 35 °C. Selecionou-se um intervalo de frequência de 50 kHz a 90 kHz, com 5000 pontos de resolução de frequência. Para medir a impedância elétrica antes e depois da geração do dano, foi utilizado o medidor de impedância SySHM, este também já descrito no Capítulo anterior.

As Figuras 5.4 e 5.5 exibem o sinal da impedância na condição de referência (*baseline*) para as três temperaturas da Cápsula Inteligente, com e sem compensação de temperatura, respectivamente. O efeito da temperatura foi analisado com o intuito de ajustar as curvas e evitar falsos positivos. Nesse caso, após a compensação da temperatura, o sinal de impedância e as métricas de dano correspondentes foram atualizados e apresentados.

Percebeu-se que a compensação de temperatura nesse caso foi eficiente, chamando atenção para o ajuste das curvas entre as frequências de 60 kHz a 65 kHz. Porém, houveram pequenas alterações nas propriedades do material com a variação da temperatura, conforme indicado pela modificação do sinal. Diante disso, esse comportamento será analisado de acordo com o desempenho das Cápsulas Inteligentes para cada monitoramento realizado ao longo do trabalho.

A Fig. 5.6 exibe as assinaturas de impedância obtidas considerando as condições antes e após o dano na viga de alumínio. Observa-se que o transdutor foi capaz de detectar o dano simulado e que as assinaturas são diferentes para as três temperaturas.

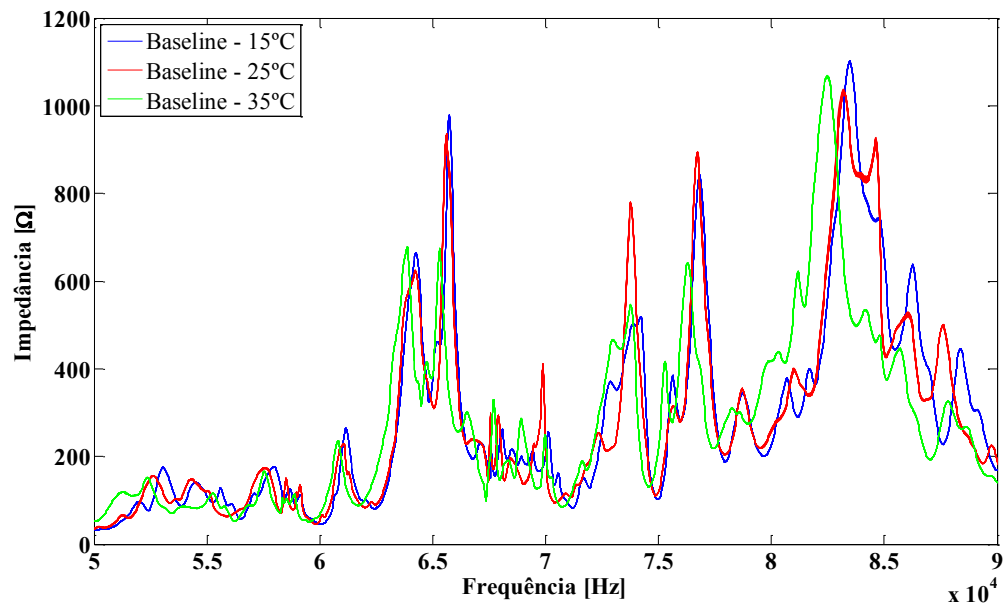


Figura 5.4 – *Baseline* para as três temperaturas sem compensação de temperatura.

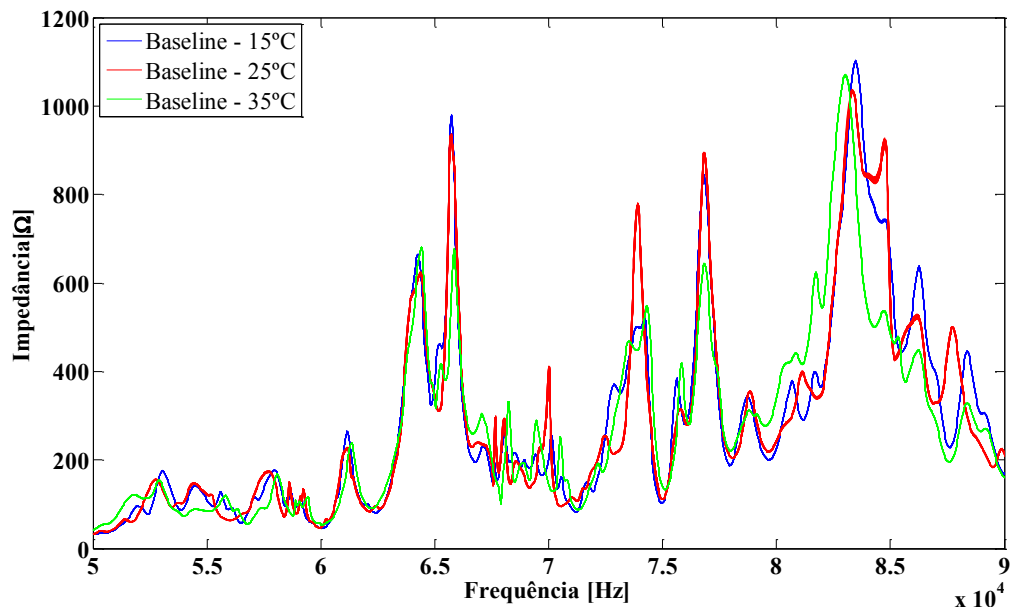


Figura 5.5 – *Baseline* para as três temperaturas com compensação de temperatura.

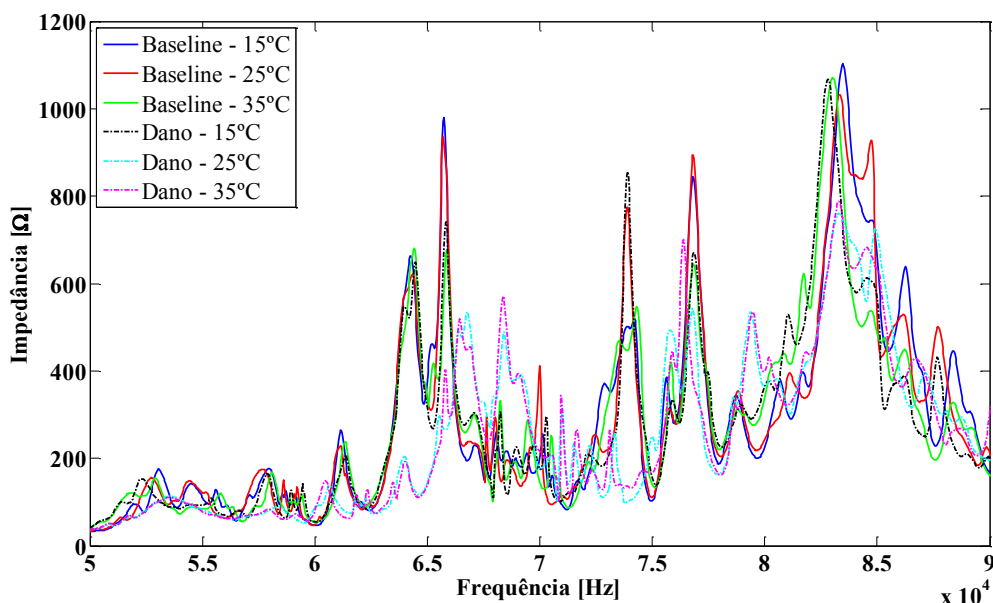


Figura 5.6 – Sinal da impedância (Re) antes e após a geração do dano para as três temperaturas.

Para que se possa observar de forma mais detalhada, exibe-se separadamente as assinaturas da impedância, suas respectivas métricas e o valor limiar (*threshold*) para cada temperatura (Fig. 5.7). Ressalta-se que é apresentada a compensação da temperatura nesses casos.

É importante ressaltar que 60 medidas de impedância foram realizadas para cada temperatura, sendo as que primeiras 30 foram adquiridas para a estrutura íntegra (*baseline*) e as últimas 30 se referem à viga danificada. Nota-se que os valores compensados da métrica de dano RMSD da estrutura danificada são superiores aos valores das métricas da estrutura original, e além disso, verifica-se um nível de *threshold* confiável, garantindo 95% de confiança em relação à probabilidade de detecção de danos. Com isso, conclui-se que o método da impedância E/M é capaz de detectar danos usando a Cápsula Inteligente para a viga de alumínio.

Diante deste resultado, foi possível iniciar o monitoramento de integridade estrutural com base na técnica da impedância E/M, utilizando sensores embutidos nas estruturas de concreto, conforme apresentado na próxima seção deste Capítulo.

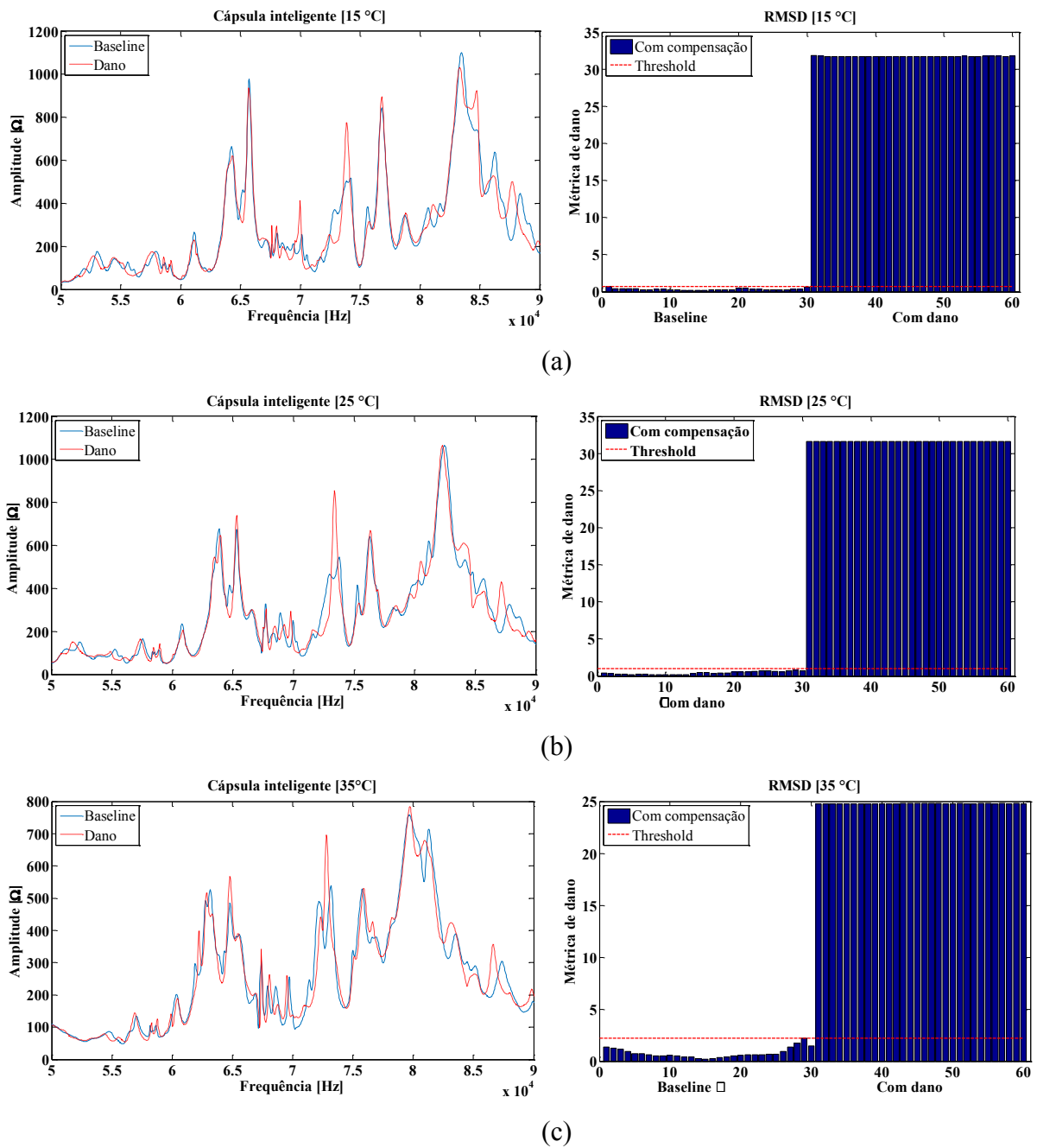


Figura 5.7 – Assinatura da impedância (Re) e métrica de dano RMSD após a compensação de temperatura, respectivamente para as temperaturas: (a) 15 °C; (b) 25 °C; (c) 35 °C.

5.3. Aplicações em Elementos Estruturais de Concreto

O material utilizado (concreto) dos elementos estruturais envolvidos nessa fase da pesquisa é similar ao apresentado no Capítulo 4 desta Tese, mais especificamente na Tab. 4.1. Analogamente, trata-se do composto cimentício reforçado com fibras de aço para todos os casos onde o traço do concreto utilizado foi aquele que apresentou uma resistência à compressão (f_{ck}) aos 28 dias de idade, em torno de 40 MPa.

As aplicações experimentais se desenvolveram em três tipos de elementos estruturais de concreto: cilindro, prisma e laje. Todos os detalhes, desde a disposição das Cápsulas Inteligentes até os resultados do monitoramento, serão apresentados a seguir.

5.3.1. Aplicação Experimental I: Corpo de Prova Cilíndrico

A aplicação da técnica proposta se iniciou com um teste de carga pontual, em um corpo de prova cilíndrico de CRFA. Durante o processo de moldagem, duas cápsulas foram posicionadas durante o lançamento do concreto na fôrma. Trata-se de uma amostra com dimensões de 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro, onde sua moldagem foi baseada em padrões e ordens próprias da ABNT NBR 5738: 2015 (Fig. 5.8).

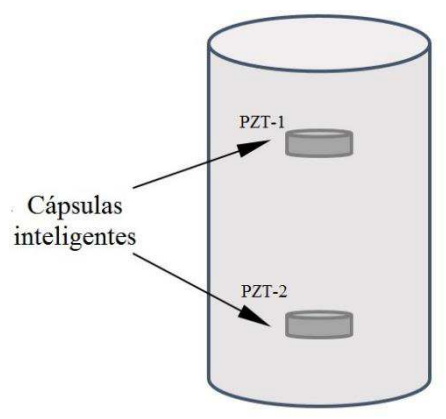


Figura 5.8 – (a) Posição aproximada das Cápsulas Inteligentes; (b) Corpos de prova cilíndricos finalizados.

Para geração de dano nessa amostra, uma máquina universal de ensaios EMIC, modelo 60000, foi utilizada aplicando uma carga de 130 kN conforme observado na Fig. 5.9. Antes e após a caracterização do dano, a amostra foi posicionada no interior da câmara climática EPL-4H e conectada ao impedancímetro SySHM para a realização das leituras da impedância eletromecânica na faixa de 50 kHz a 80 kHz.

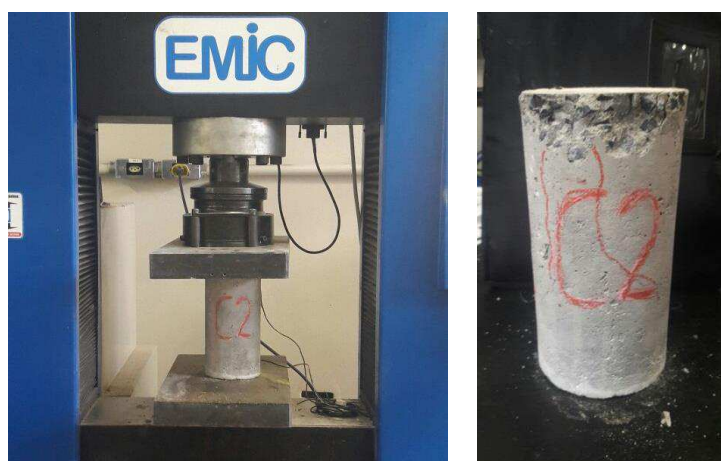


Figura 5.9 – Amostra cilíndrica posicionada na máquina de ensaios; (b) Amostra danificada.

As assinaturas de impedância obtidas para o PZT-1 para uma temperatura de 25 °C podem ser observadas na Fig. 5.10. Observa-se que a parte real do sinal da impedância medida após o dano alterou significativamente, ao se comparar com o sinal de referência (*baseline*). A Fig. 5.11 exibe as métricas de dano RMSD e ASD, onde o dano foi identificado com sucesso e o valor de *threshold* foi apresentado, garantindo 95% de confiança na probabilidade de detecção de danos. Além disso, foi feita a compensação de temperatura utilizando a técnica de otimização híbrida, sendo que os sinais e suas respectivas métricas foram atualizadas, garantindo assim maior confiabilidade nos diagnósticos.

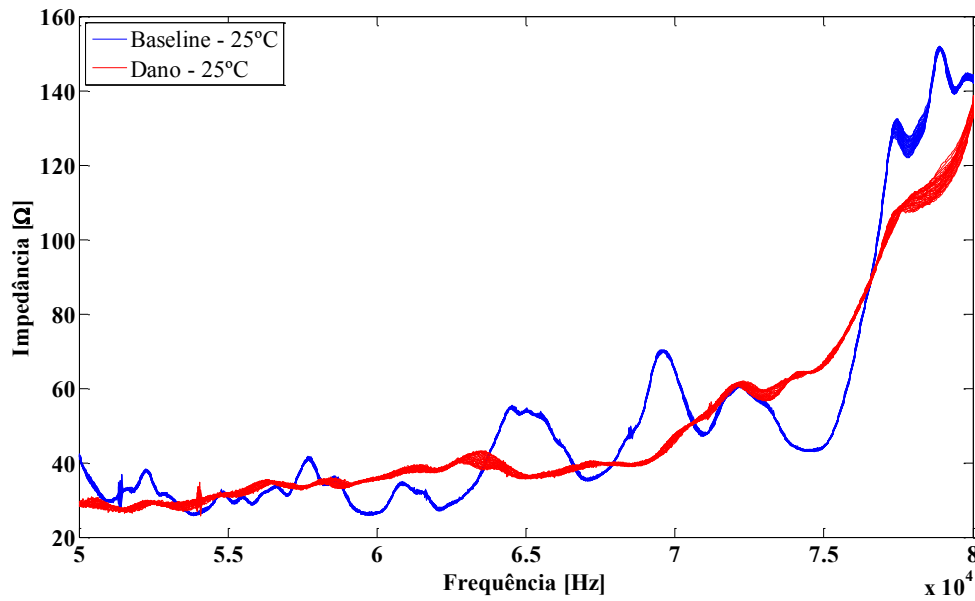


Figura 5.10 – Amostra cilíndrica [PZT-1, 25 °C]: Sinais de impedância (Re) com compensação de temperatura.

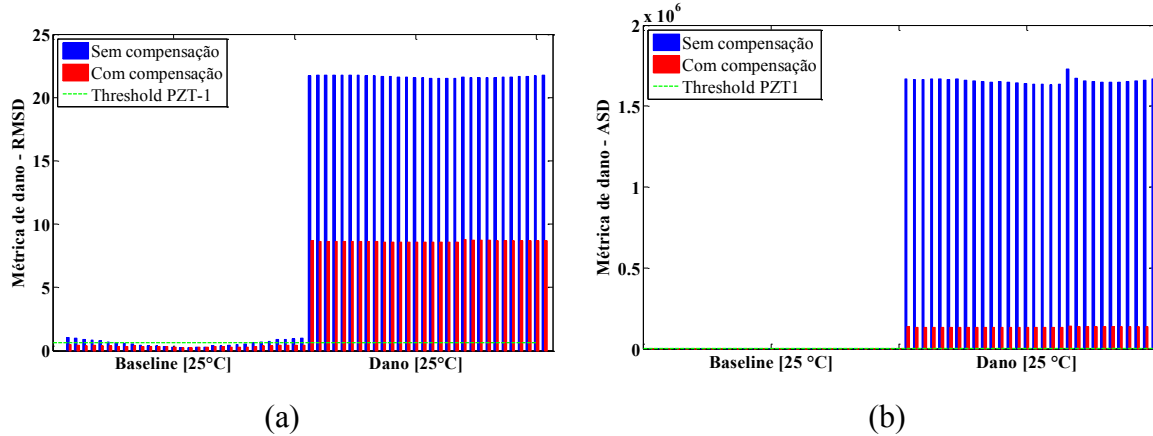


Figura 5.11 – Métricas de dano e *threshold* para o PZT-1 a 25 °C: (a) RMSD; (b) ASD.

Ressalta-se que para ambos os transdutores foram realizadas 30 medidas para a estrutura isenta de danos e 30 medidas após a geração do dano.

Um comportamento semelhante foi encontrado para o PZT-2. As assinaturas de impedância e as métricas de dano são atualizadas após a compensação de temperatura (Fig. 5.12 e Fig. 5.13). Observa-se que o sinal de impedância apresenta menos picos ao se comparar com

o PZT-1. A posição do PZT-2 na amostra cilíndrica pode ter sido um fator que contribuiu para este comportamento.

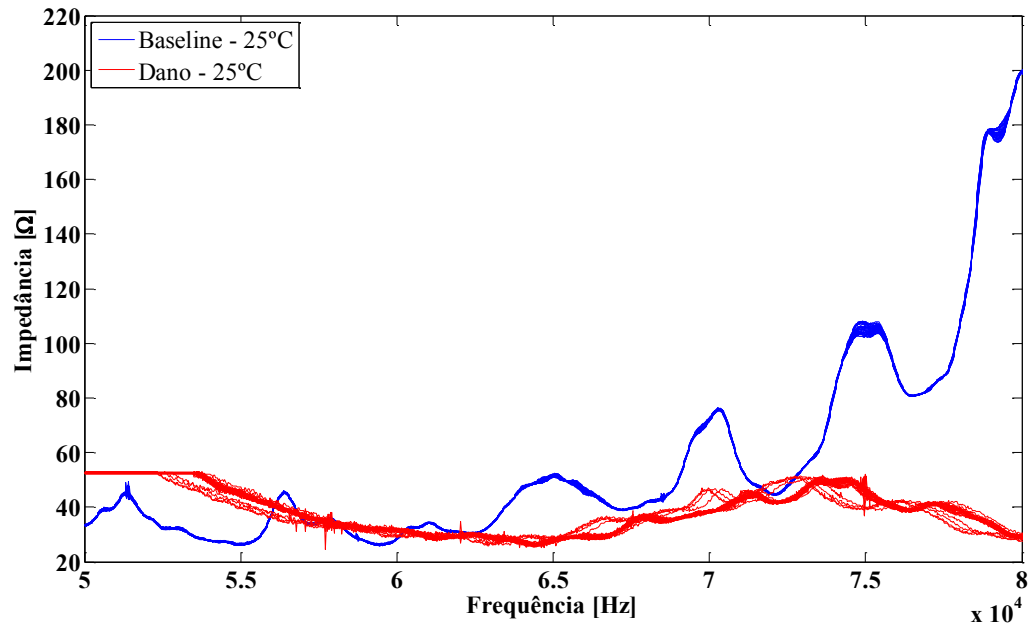


Figura 5.12 - Amostra cilíndrica [PZT-2, 25 °C]: Sinais de impedância (Re) com compensação de temperatura.

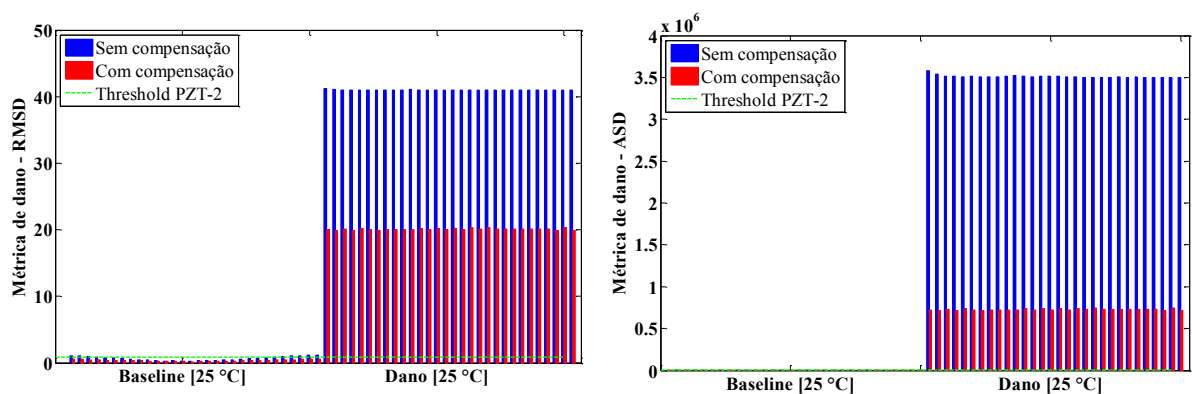


Figura 5.13 – Métricas de dano e *threshold* para o PZT-2 a 25 °C: (a) RMSD; (b) M.

Observa-se que as assinaturas de impedância E/M para ambos os sensores foram sensíveis aos danos, assim como as métricas de dano correspondentes. Esses resultados obtidos

com as Cápsulas Inteligentes embutidas na estrutura de concreto indicam que a técnica da impedância E/M foi eficiente para detectar danos neste tipo de estrutura. Além disso, o método de compensação de temperatura utilizando otimização funcionou adequadamente, permitindo a compensação dos sinais, evitando falsos positivos (ou negativos) no processo de monitoramento.

Diante desses resultados com as Cápsulas Inteligentes embutidas na estrutura de concreto, foi possível evoluir para testes mais complexos como será descrito a seguir.

5.3.2. Aplicação Experimental II: Corpo de Prova Prismático

Nesta aplicação experimental, a técnica da impedância E/M foi aplicada em um corpo de prova prismático de CRFA (500 mm x 150 mm x 150 mm). Duas Cápsulas Inteligentes foram incorporadas na amostra durante a fase de lançamento do concreto nas fôrmas e a posição aproximada destas Cápsulas pode ser vista na Fig. 5.14.

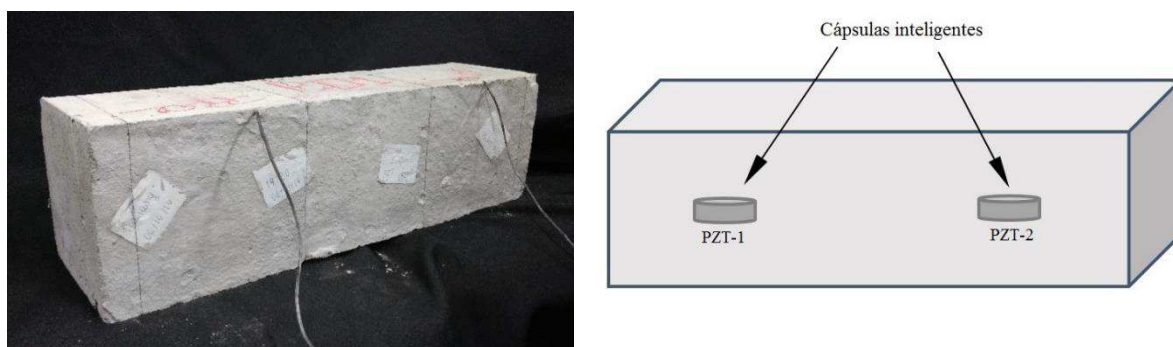


Figura 5.14 – Corpo de prova de concreto com Cápsulas Inteligentes embutidas: (a) amostra prismática utilizada; (b) esquema com a posição aproximada dos sensores.

Pode-se dizer que este experimento foi desenvolvido em duas etapas independentes. Realizou-se o monitoramento de integridade estrutural aplicando a técnica da impedância E/M, antes e após a geração do dano no corpo de prova prismático em um dado momento e em outro momento seguinte, sendo que o monitoramento foi realizado durante todo o ensaio que gerou o dano.

Assim sendo, o dano foi introduzido no corpo de prova prismático a partir de um ensaio de tenacidade à flexão com base no método ASTM C1609, realizado aos 42 dias de cura da amostra. O procedimento foi similar ao apresentado no Capítulo 4 desta Tese, não sendo, portanto, descrito novamente neste momento.

Para avaliar o efeito da temperatura, a estrutura foi posicionada adequadamente no interior da câmara climática EPL-4H. Nesse caso, obteve-se 2000 pontos de frequência utilizando o medidor de impedância SySHM, em uma faixa de frequência de 50 kHz a 80 kHz. Para a primeira etapa delineada anteriormente, os testes foram realizados nas temperaturas de 10 °C, 25 °C e 40 °C. A estrutura danificada e posicionada na câmara pode ser vista na Fig. 5.15.

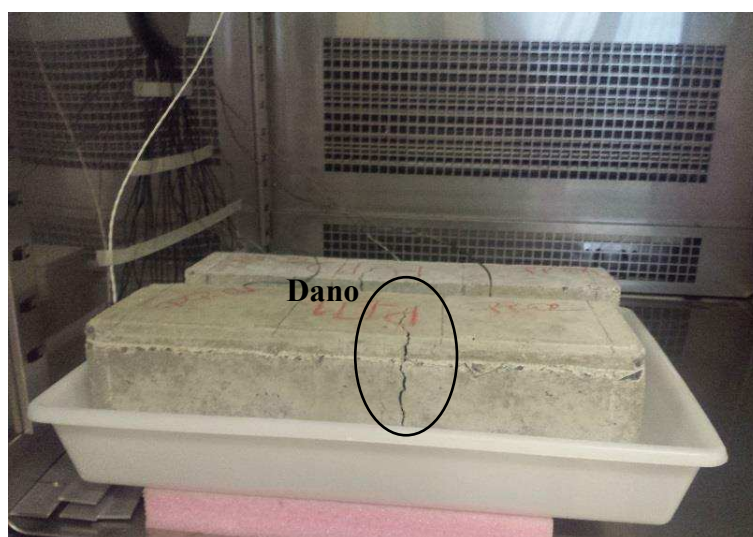


Figura 5.15 – Corpo de prova prismático danificado posicionado no interior da câmara climática.

Para cada condição, foram realizadas 30 medições de impedância com 1024 médias, de tal forma que as assinaturas de impedância obtidas para cada Cápsula Inteligente (denominadas respectivamente como PZT-1 e PZT-2) podem ser observadas nas Fig. 5.16. Ressalta-se que o efeito da temperatura foi compensado e com isso os sinais de impedância foram atualizados para facilitar a análise e comparação. Ressalta-se que os sinais livres da compensação de temperatura são apresentados à esquerda, e aqueles com a compensação de temperatura são exibidos à direita, para cada uma das três temperaturas consideradas.

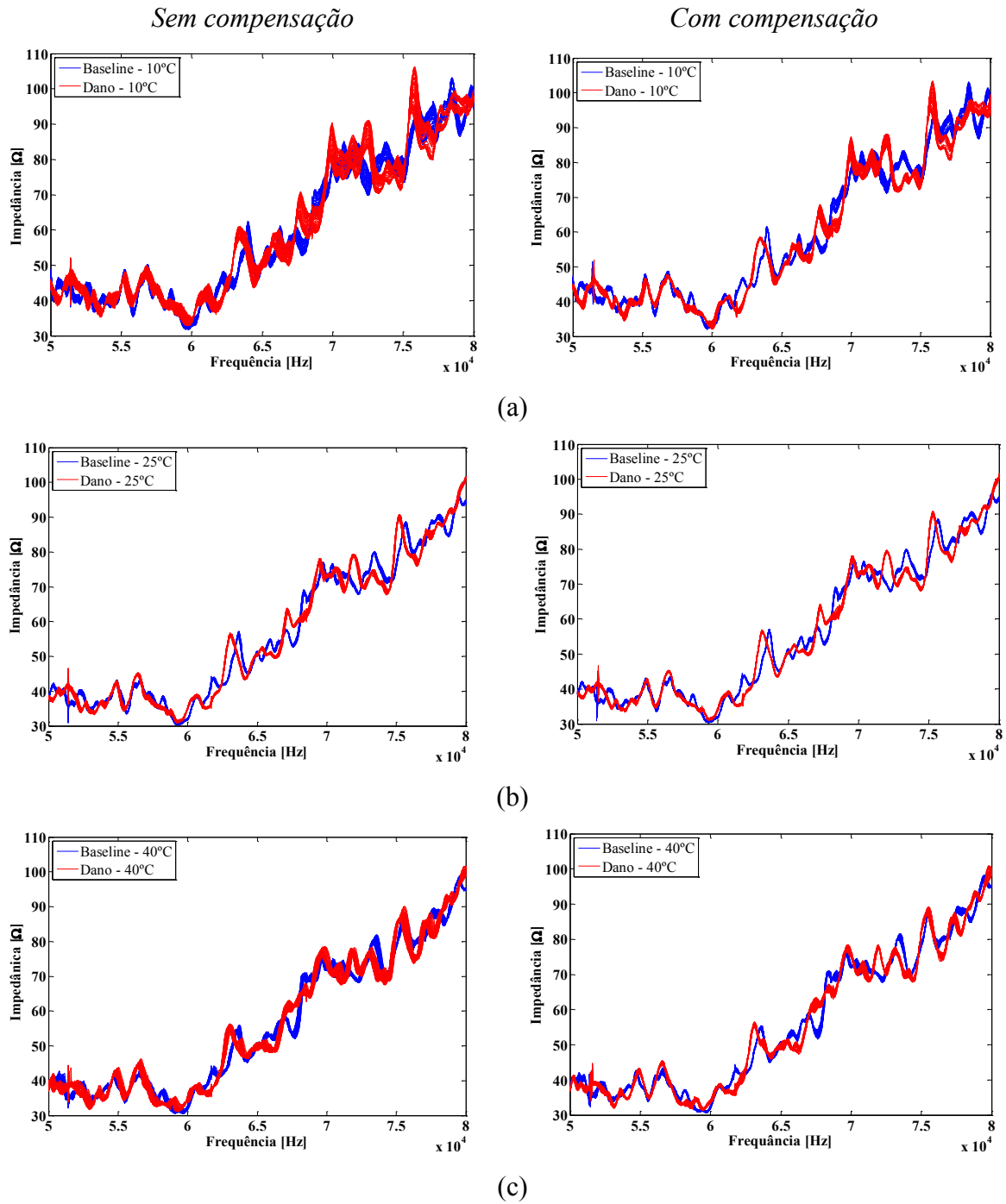


Figura 5.16 – Sinais de impedância (Re) para o PZT-1 com e sem compensação de temperatura, respectivamente para: (a) 10 °C; (b) 25 °C; (c) 40 °C.

Constatou-se também que as assinaturas de impedância obtidas para as Cápsulas Inteligentes na amostra prismática foram modificadas consideravelmente antes e após a geração do dano. A partir daí tais sinais foram tratados numericamente utilizando as métricas de dano RMSD e ASD (Fig.5.17).

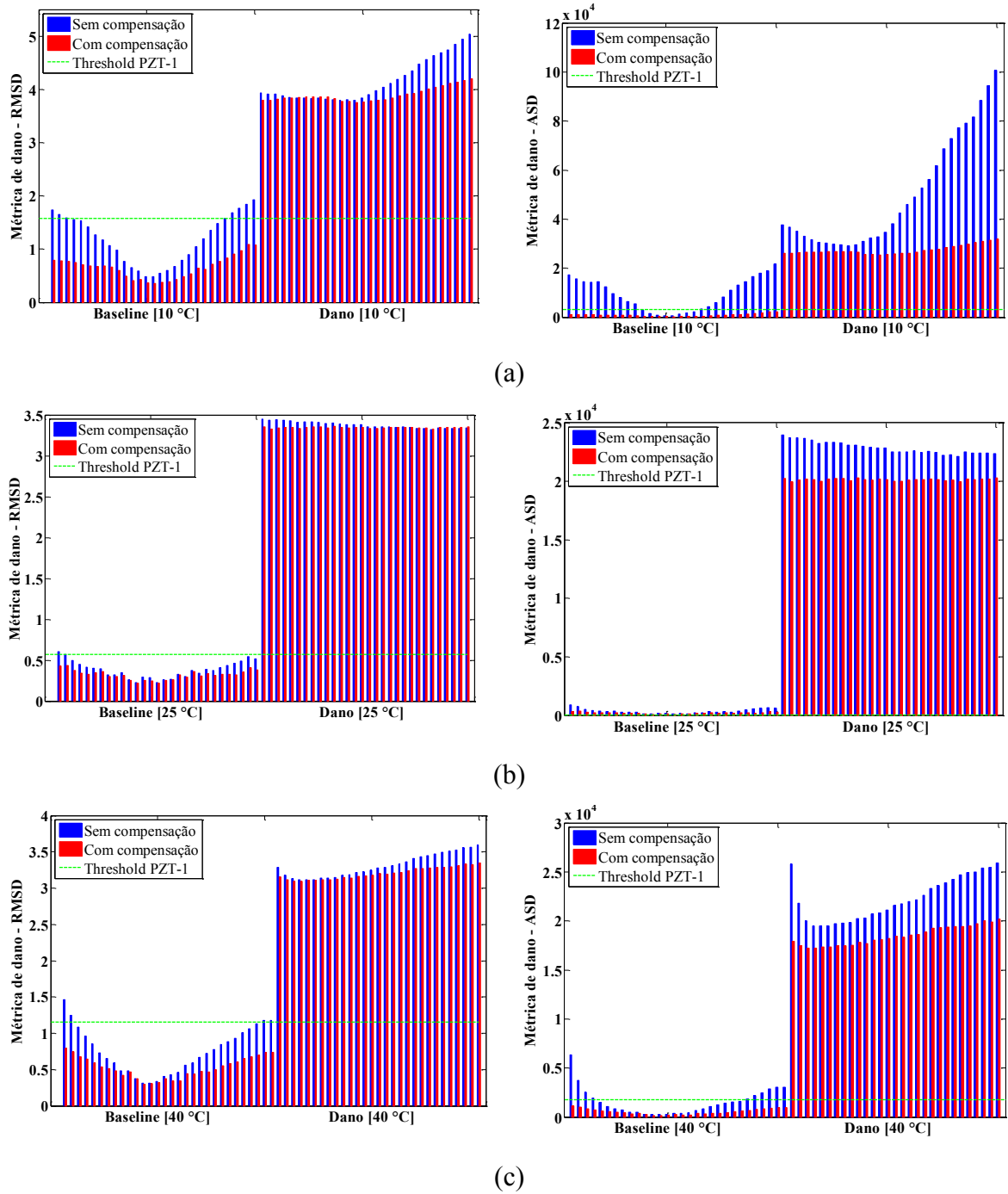


Figura 5.17 – Métricas de dano RMSD e ASD para o PZT-1: (a) 10 °C; (b) 25 °C; (c) 40 °C.

Para o PZT-2 verificou-se um comportamento similar, como pode ser verificado na Fig. 5.18. Mais uma vez a compensação de temperatura foi eficiente, evitando falsos positivos ou falsos negativos durante o diagnóstico.

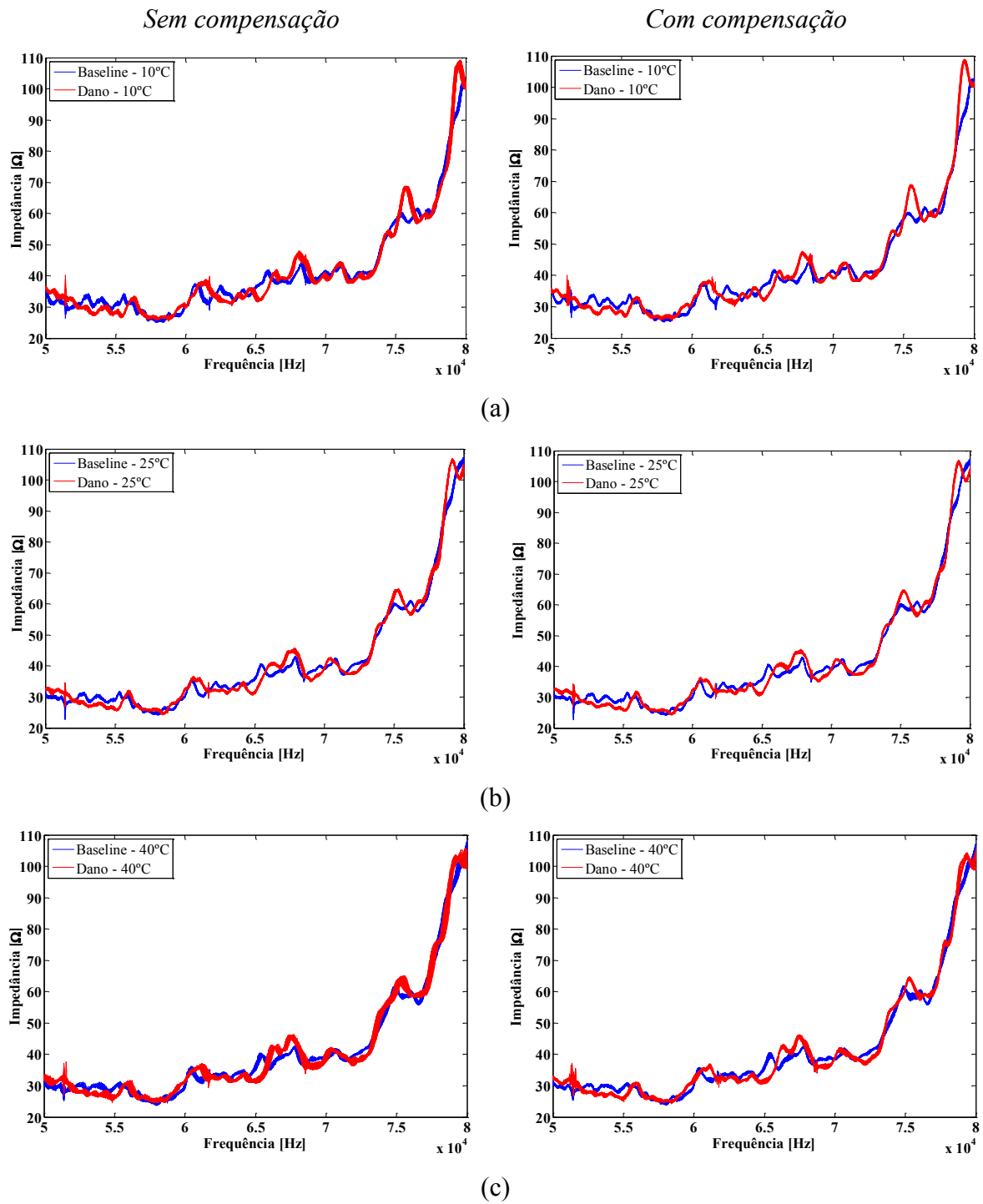


Figura 5.18 – Sinais de impedância (Re) para o PZT-2 com e sem compensação de temperatura, respectivamente para: (a) 10 °C; (b) 25 °C; (c) 40 °C.

Analogamente ao PZT-1, para quantificar os danos detectados a partir da modificação das assinaturas de impedância do PZT-2, as métricas de dano RMSD e ASD foram calculadas para as três temperaturas (Fig. 5.19).

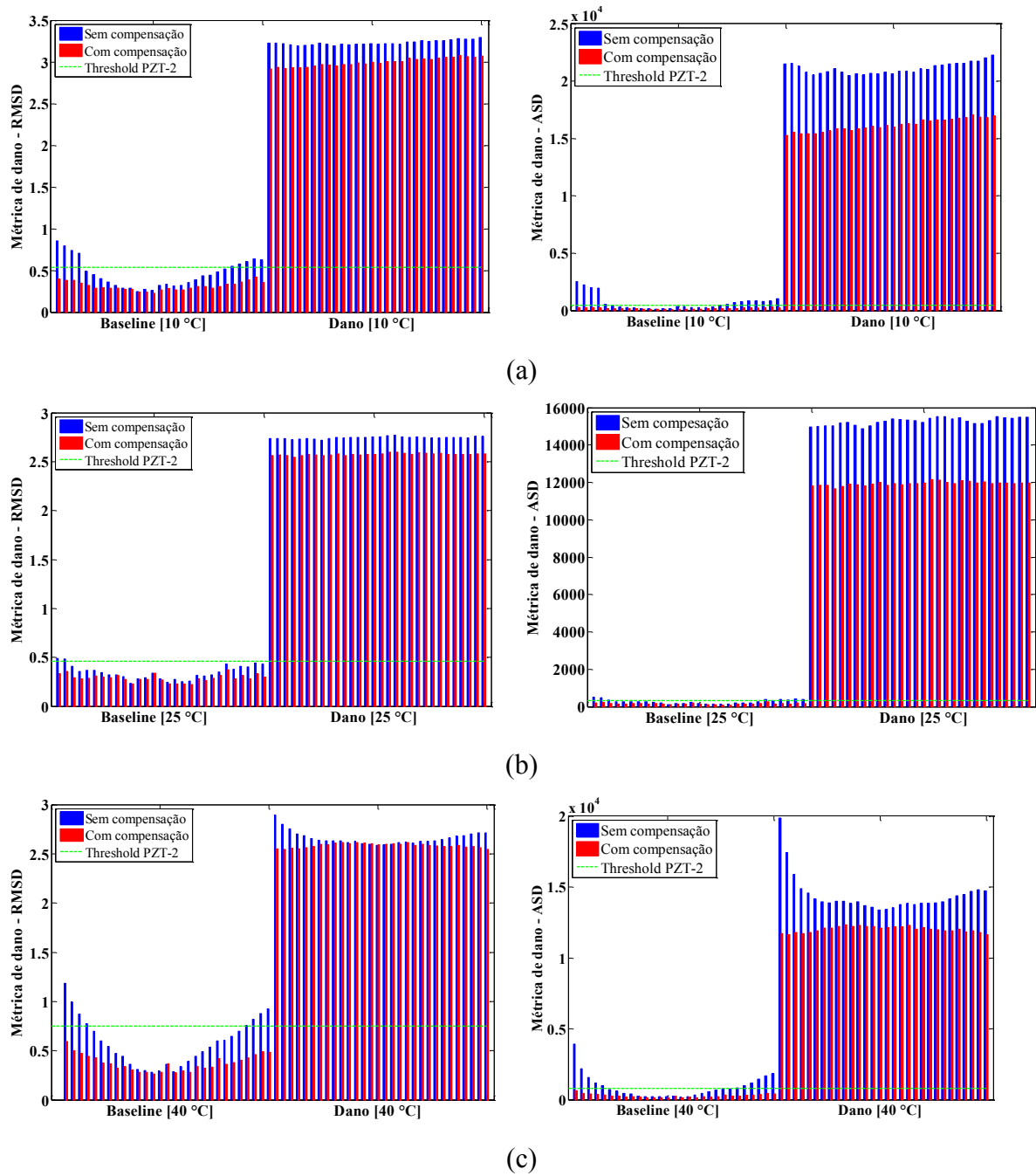


Figura 5.19 – Métricas de dano RMSD e ASD para o PZT-2: (a) 10 °C; (b) 25 °C; (c) 40 °C.

Como foi especificado no início desta seção, a segunda etapa do presente experimento consistiu em medir os sinais de impedância E/M durante o ensaio de tenacidade à flexão que gerou os danos na estrutura estudada. A Fig. 5.20 mostra o corpo de prova posicionado sobre a máquina de ensaio MTS e, paralelamente, o impedancímetro SySHM conectado às Cápsulas Inteligentes.

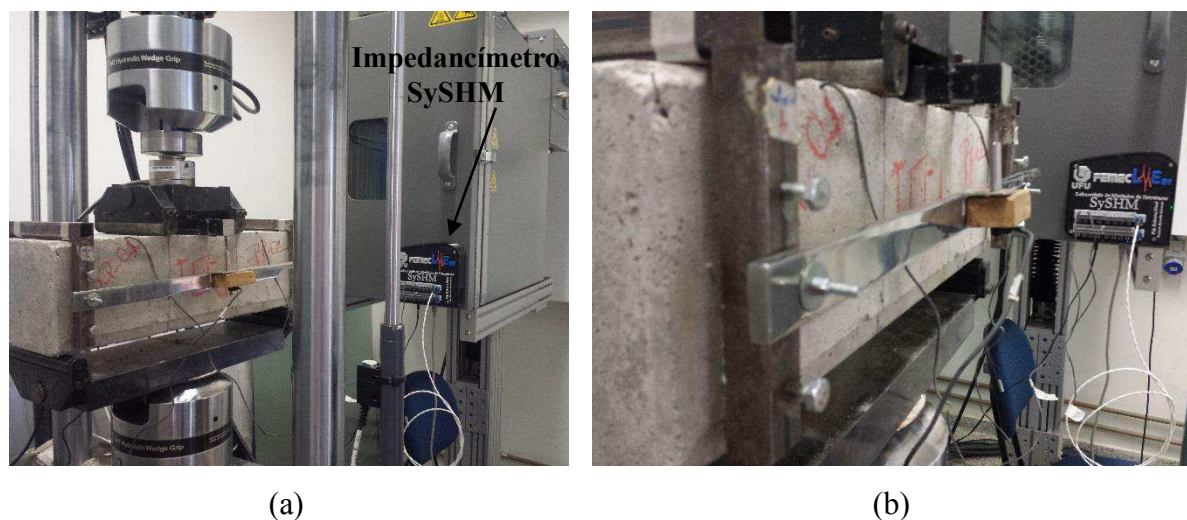


Figura 5.20 – (a) Corpo de prova posicionado sobre a máquina de testes MTS durante o ensaio de tenacidade à flexão; (b) Impedancímetro SySHM conectado às Cápsulas Inteligentes.

Como a estrutura em questão consiste em um composto de CRFA, é importante lembrar que sua tenacidade é definida a partir da energia absorvida pelo composto carregado, compreendendo a energia absorvida antes e após a fissuração da matriz, quando as fibras passam a atuar de maneira mais efetiva. A ruptura da estrutura estudada é usualmente causada pela propagação de fissuras de tração e, com base nessa propagação, a curva força *versus* deslocamento relaciona a dosagem do volume de fibras utilizado, determinando uma redução na resistência após a fissuração da matriz, caracterizando o comportamento *strain-softening* (Fig.5.21).

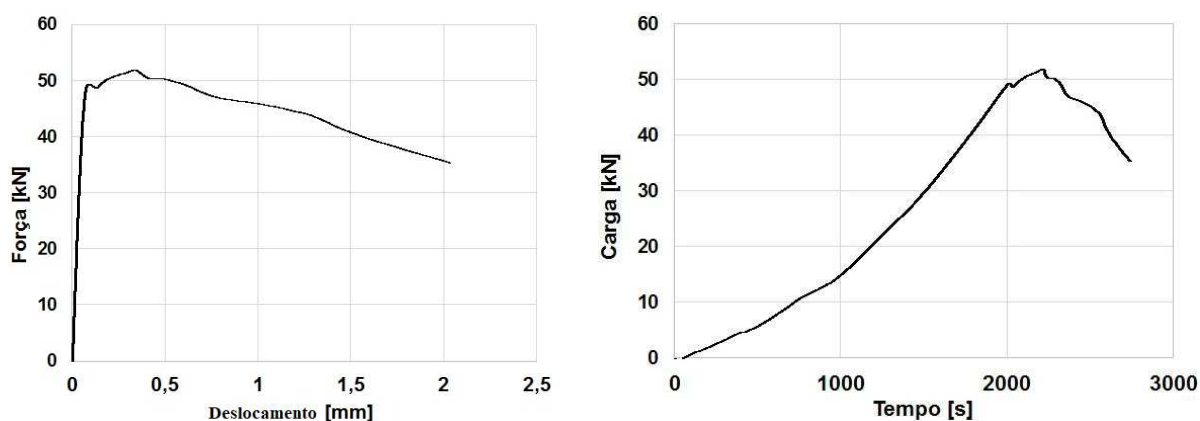


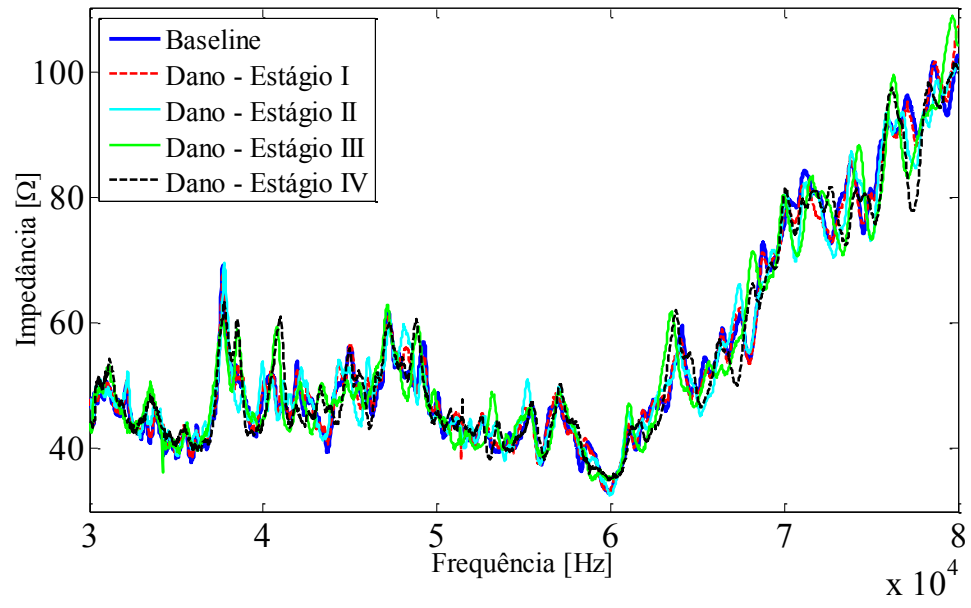
Figura 5.21 – Ensaio ASTM 1609: (a) Carga *versus* deslocamento para o comportamento *strain-softening*; (b) Carga *versus* tempo.

Para evitar o “arrancamento” das fibras e um possível colapso da estrutura, o ensaio foi interrompido com uma deflexão na estrutura de aproximadamente 2,0 mm. Além de garantir a segurança e integridade da máquina de ensaio, a propagação das fissuras no centro do corpo de prova foi considerado suficiente para a proposta do monitoramento.

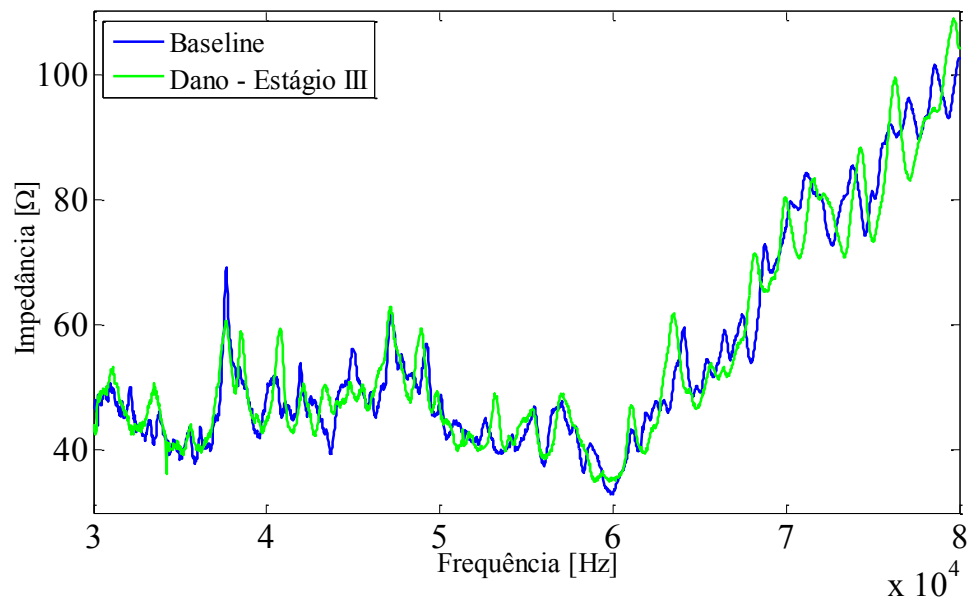
A carga de pico de aproximadamente 54 kN, observada na Fig. 5.21, indica o momento em que a estrutura se rompeu e, a partir desse momento, a carga decresce e consequentemente, a tenacidade da estrutura diminui. O tempo total do ensaio, para essa matriz, foi de aproximadamente 45 minutos.

O impedancímetro SySHM foi configurado para adquirir 2000 pontos e 1024 médias. Antes de iniciar o ensaio realizou-se quatro medidas, caracterizando o sinal de referência (*baseline*) para as análises: 48 medidas aconteceram durante o ensaio, ou seja, durante o carregamento sobre a estrutura e, finalmente, nove medidas foram realizadas após o término do ensaio, totalizando assim 70 médias. Diante das características do composto utilizado, a Fig. 5.22 exibe os sinais reais da impedância E/M apresentados em cinco distintas configurações para o PZT-1, sendo elas:

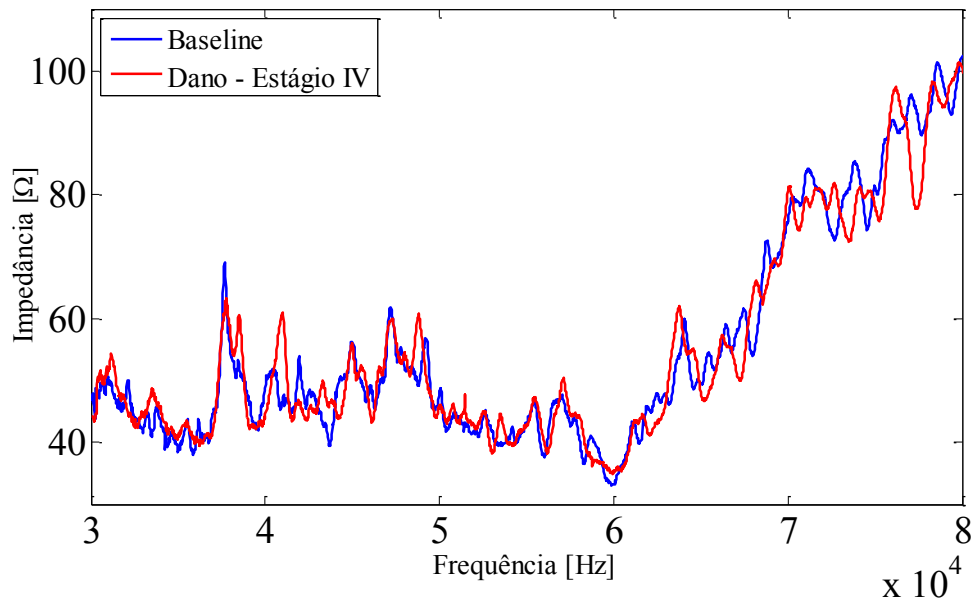
- *Baseline*: sinal de referência, indicativo da estrutura saudável (4 medidas).
- Dano - Estágio I: Início do ensaio, com 16 medidas. Iniciou-se, possivelmente, a formação de múltiplas fissuras e o aumento da tenacidade da estrutura;
- Dano - Estágio II: durante o ensaio, com 20 medidas, onde o teste alcançou a carga de pico (54 kN) resultando no rompimento e tenacidade máxima da estrutura.
- Dano - Estágio III: ainda durante o ensaio, com 21 medidas, após o rompimento da matriz, a capacidade de carga do concreto não diminuiu rapidamente e apresentou uma tenacidade considerável.
- Dano - Estágio IV: Após o fim do ensaio, com 09 medidas, com a estrutura na mesma posição, porém isenta de carregamento.



(a)



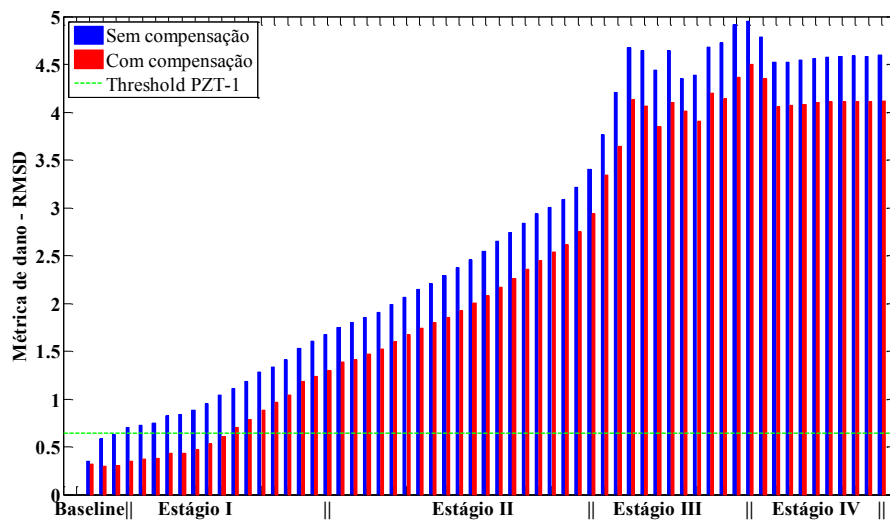
(b)



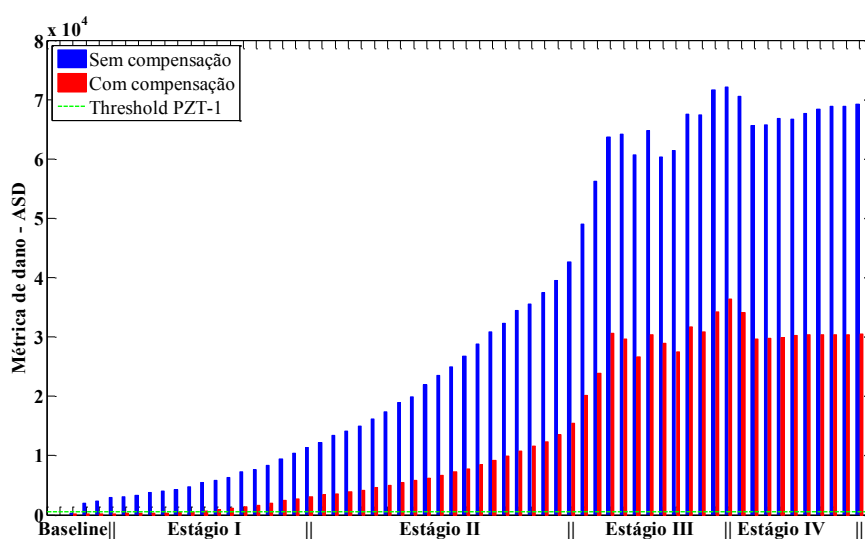
(c)

Figura 5.22 – Assinaturas de impedância (Re) para o PZT-1: (a) referente ao monitoramento em tempo real para os cinco estágios; (b) Baseline e Estágio III; (c) Baseline e Estágio IV.

Houve uma modificação nas assinaturas de impedância em todos os estágios, chamando a atenção da variação entre o *Baseline* e os Estágios III e IV, devido à progressão das fissuras na estrutura. Para quantificar esse dano, as métricas RMSD e ASD são apresentadas a seguir, confirmando a presença do dano (Fig. 5.23).



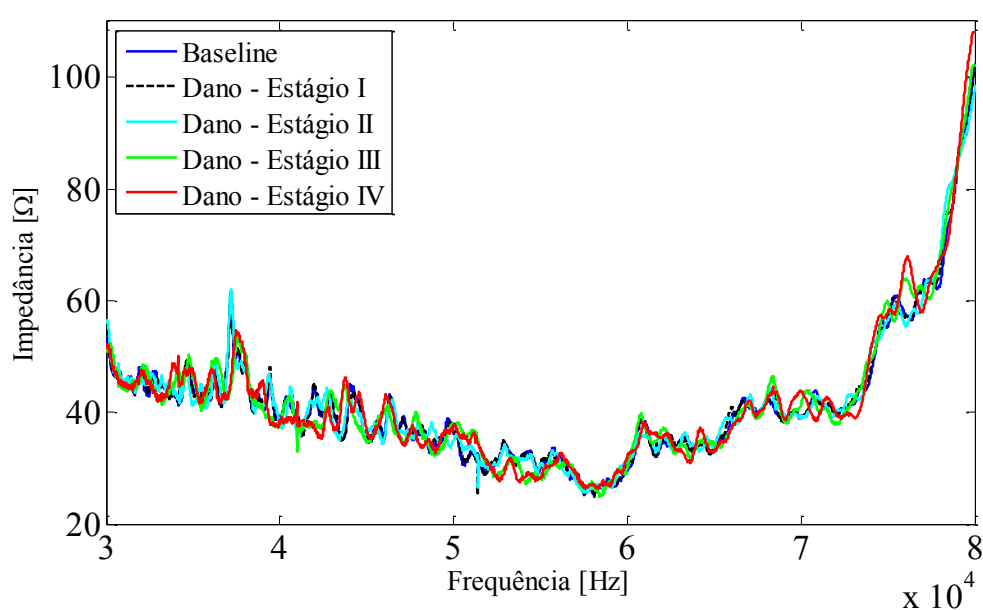
(a)



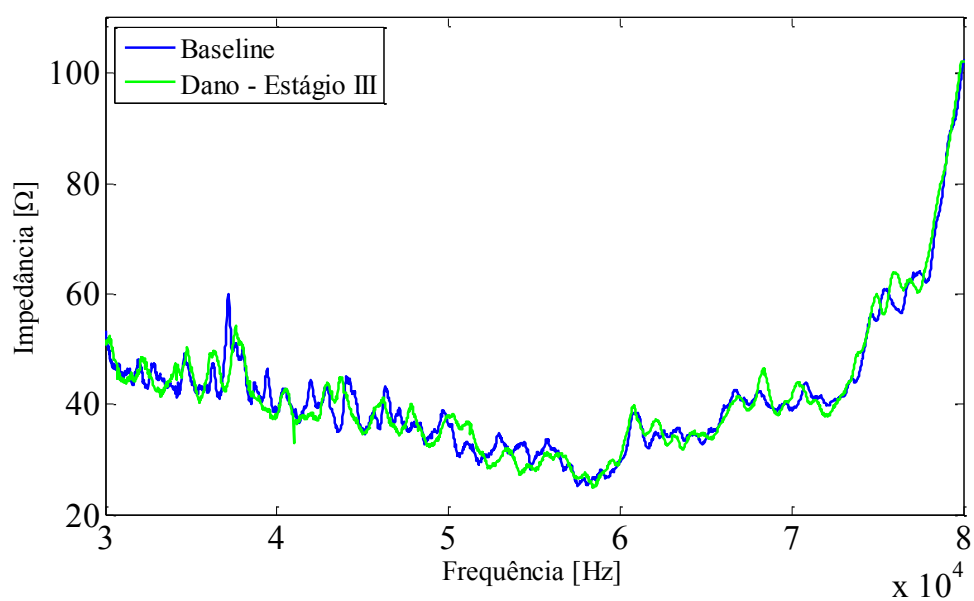
(b)

Figura 5.23 – Métricas de dano para o PZT-1 referentes ao monitoramento em tempo real do corpo de prova prismático de concreto: (a) RMSD; (b) ASD.

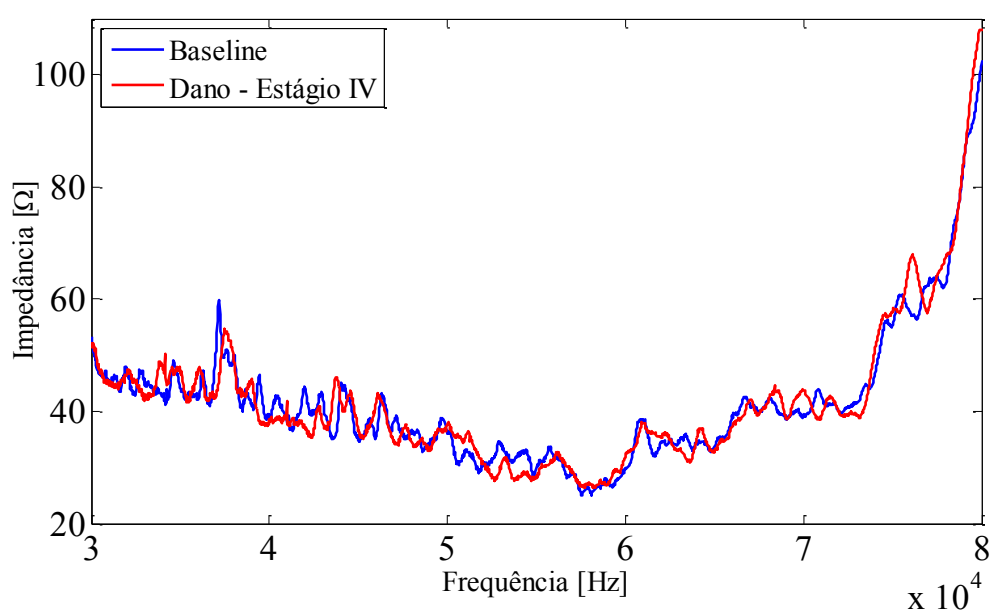
A técnica de compensação de temperatura demonstrou mais uma vez sua eficiência para essa aplicação. Analogamente, para o PZT-2, os seguintes resultados foram obtidos, confirmando o diagnóstico anterior (Figs. 5.24 e 5.25).



(a)

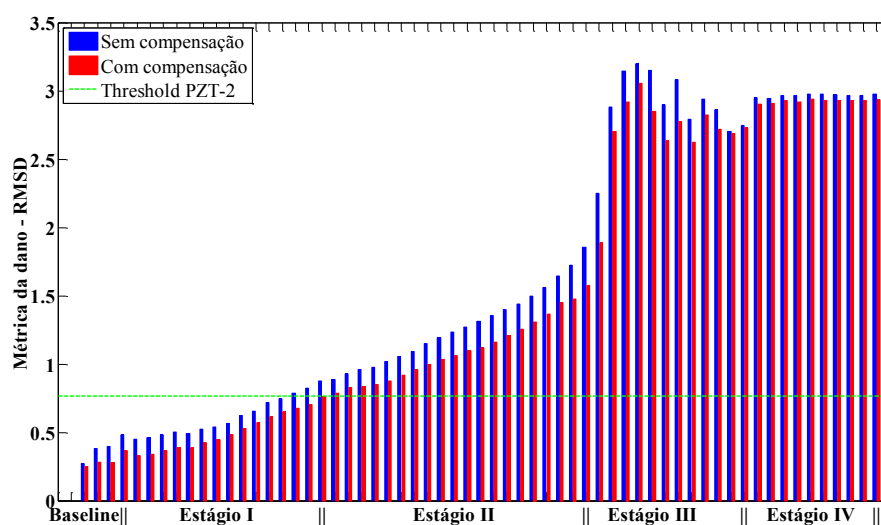


(b)

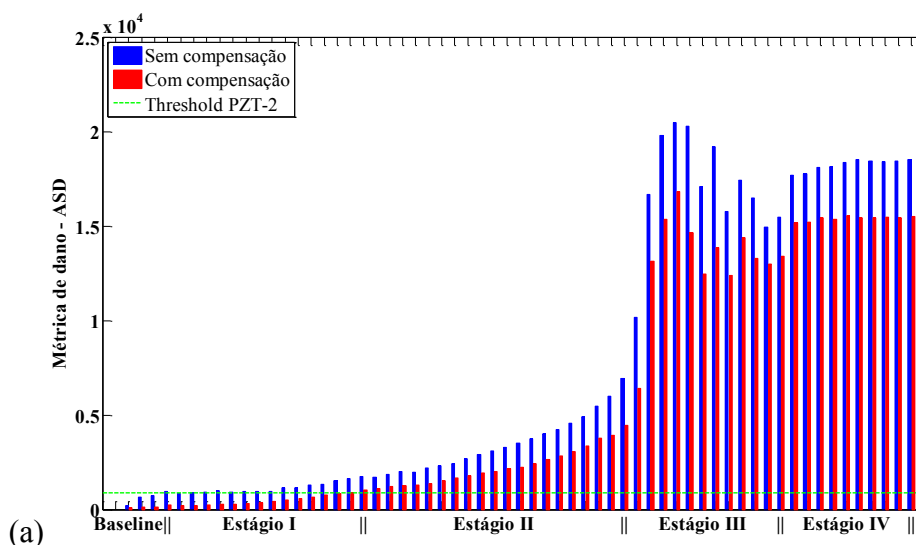


(c)

Figura 5.24 – Assinaturas de impedância (Re) para o PZT-2: (a) referente ao monitoramento em tempo real para os cinco estágios; (b) Baseline e Estágio III; (c) Baseline e Estágio IV.



(a)



(b)

Figura 5.25 – Métricas de dano para o PZT-2 referente ao monitoramento em tempo real do corpo de prova prismático de concreto: (a) RMSD; (b) ASD.

Observe que o dano foi identificado com sucesso e o valor do *threshold* foi determinado, garantindo 95% de confiança na probabilidade de detecção dos danos. Desta forma, observou-se um avanço no processamento dos dados referente às Cápsulas Inteligentes, aumentando a eficiência do monitoramento com a técnica da impedância eletromecânica em estruturas inteligentes de concreto.

Com isso, prosseguiu-se com o monitoramento de um elemento estrutural mais complexo da construção civil.

5.3.3. Aplicação Experimental III: Laje de Concreto Armado

Nesta aplicação experimental, realizou-se o monitoramento de integridade estrutural com a técnica da impedância eletromecânica em uma laje lisa de concreto armado com dimensões de 1800 mm x 1800 mm x 130 mm e massa de aproximadamente 2,0 toneladas. A resistência à compressão estimada do concreto foi de 40 MPa, com uma concentração de 50 kg/m³ de fibras de aço. A armadura de flexão foi dimensionada com taxa de 1,66% de modo que a ruptura ocorresse por punção. Tubos de PVC foram utilizados como molde para evitar a concretagem nos locais de passagem dos tirantes. Esse programa experimental foi baseado na pesquisa de Alves (2017).

Duas Cápsulas Inteligentes (nomeadas como PZT-1 e PZT-2) foram posicionadas no interior da laje durante sua moldagem, sendo esta realizada em agosto de 2016. A estrutura de concreto recebeu cura úmida durante 14 dias. A posição das Cápsulas não foi definida numericamente pois o adensamento do concreto dificultou essa definição. Tem-se, portanto, a posição aproximada das mesmas verificada a partir da Fig. 5.26, assim como a laje após o período de cura.



Figura 5.26 – (a) Armadura posicionada na fôrma para receber o concreto com as Cápsulas Inteligentes já posicionadas; (b) laje finalizada.

Em janeiro de 2017 caracterizou-se o dano realizando um ensaio de punção para provocar a ruptura por cisalhamento em duas direções desse elemento estrutural. A estrutura foi travada em 12 pontos à laje de reação, de modo que tais pontos gerassem a reação. Os travamentos foram feitos por barras CA-50 com diâmetro nominal de 25 mm e comprimento de 2000 mm. O carregamento foi aplicado de baixo para cima utilizando um atuador com capacidade de 1000 kN (Fig. 5.27).

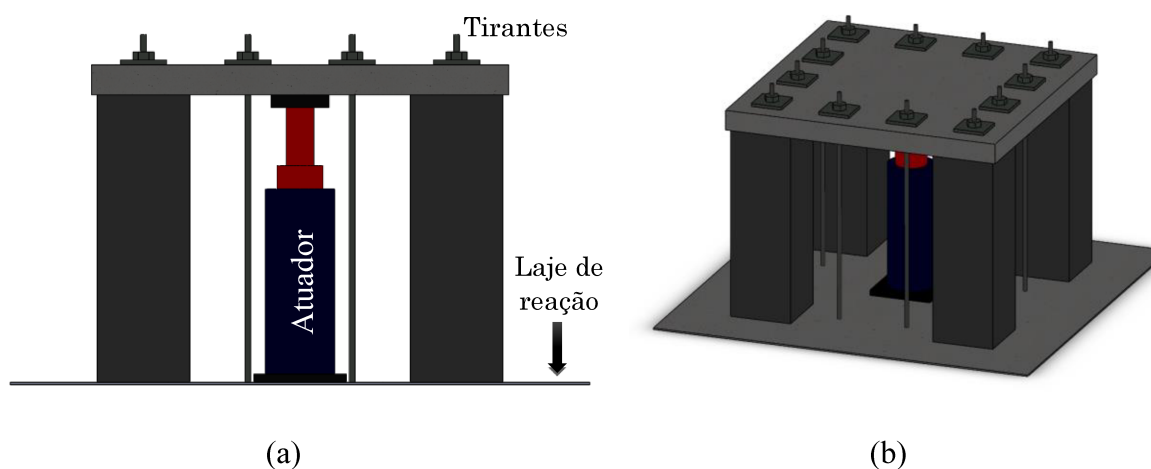


Figura 5.27 – Esquema do ensaio: (a) aplicação de carga; (b) visão geral do ensaio.

Durante o ensaio, a carga foi aplicada em passos de 20 kN e no intervalo destes passos, mapeou as fissuras formadas na superfície da laje. Após a marcação das fissuras, registrou-se as marcações com fotografias e prosseguiu-se com a aplicação da carga até a ruptura da laje (Fig. 5.28).



Figura 5.28 – Laje instrumentada e posicionada para realização do ensaio de punção.

Para medição do sinal de impedância utilizou-se novamente o analisador de impedância portátil *SySHM*. Selecionou-se o intervalo de frequência entre 20 kHz e 80 kHz e, para a estrutura isenta de danos, o sinal da impedância foi registrado durante 58 horas consecutivas, entre os dias 10 e 13 de janeiro de 2017. Após a geração do dano, no dia 14 de janeiro, repetiu-se o processo de medição do sinal com o mesmo período de tempo (14 a 17 de janeiro). Para cada momento totalizaram-se 2880 medições do sinal de impedância que serão apresentadas a seguir através da média desses sinais, destacando as variações entre o Dia 1 (1110 medições), Dia 2 (1110 medições) e Dia 3 (660 medições) para a estrutura ainda íntegra; em seguida, para a estrutura após a geração do dano, totalizando 5760 medidas. Como o tempo total do ensaio de punção foi de 15,5 minutos, tornou-se inviável a medição do sinal de impedância durante o carregamento.

Durante os seis dias de monitoramento houve uma variação de 4,8 °C na temperatura armazenada pelo termopar utilizado, conforme apontado pelo impedancímetro *SySHM*. O local reservado para o desenvolvimento deste ensaio localiza-se no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da UFU, que não conta com um sistema de refrigeração. Portanto, todo procedimento experimental foi desenvolvido na temperatura ambiente do laboratório. As temperaturas máxima e mínima foram respectivamente de 30,5 °C e 25,7 °C (Fig. 5.29).

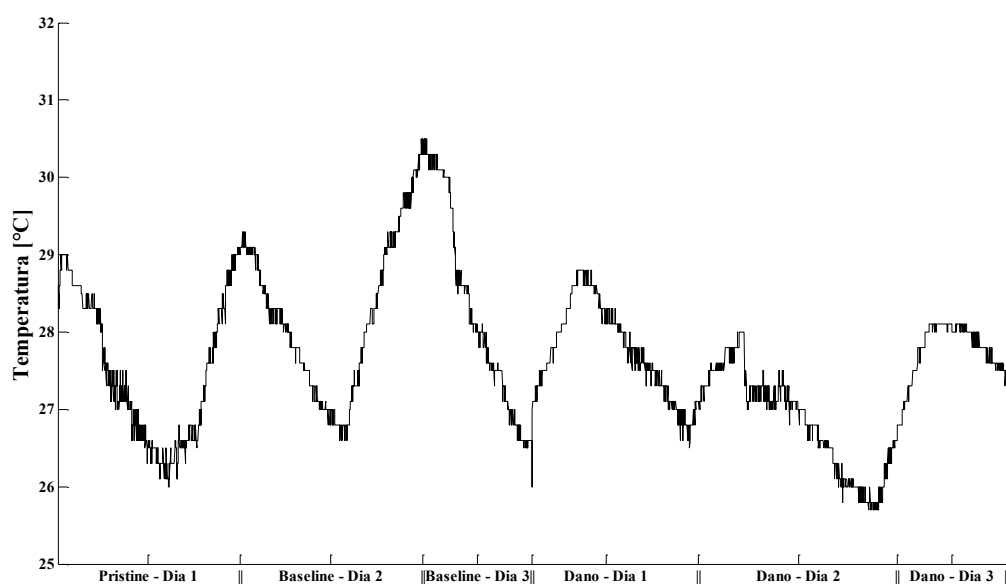
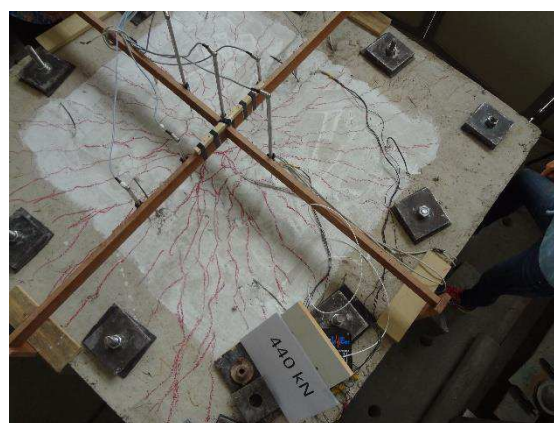


Figura 5.29 – Variação da temperatura durante o monitoramento da laje de concreto.

Como a ruptura por punção realizada na laje em estudo se refere a um fenômeno de natureza frágil devido ao esforço concentrado na área central, tensões elevadas de cisalhamento nesta região foram obtidas. Predominantemente, observou-se a presença de fissuras radiais durante o ensaio até a observação da formação de fissuras circunferenciais características da ruptura por punção (Fig. 5.30).



(a)



(b)

Figura 5.30 – Fissuras radiais mapeadas durante o ensaio de punção: (a) Carga de 100 kN; (b) Carga final de 440 kN.

Para este elemento estrutural observou-se uma carga de 117 kN para as primeiras fissuras, o que corresponde a 26 % da carga de ruptura de 440 kN. Essa carga de ruptura pode ser observada nas Figs. 5.31 no momento em que a curva mantém um comportamento constante indicando a ruptura da estrutura.

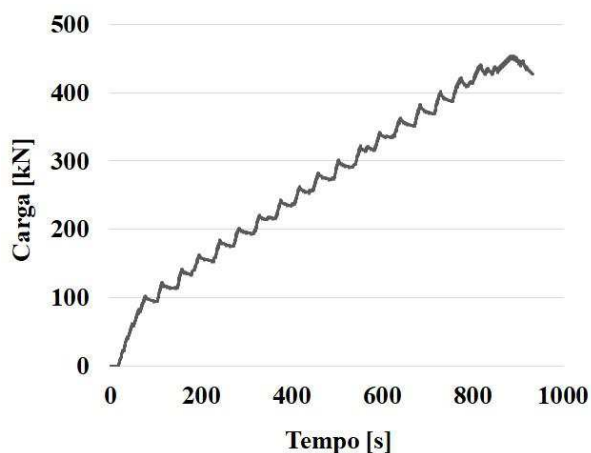


Figura 5.31 – Carregamento durante o ensaio de punção.

Ao analisar o sinal de impedância para o PZT-1, observou-se que os sinais medidos antes da geração do dano durante os três dias, totalizando 2280 medidas, apresentaram poucos picos, porém ficou caracterizada a funcionalidade das Cápsulas Inteligentes após seis meses embutidas no concreto (Fig. 5.32). Nesse caso nomeou-se “*Pristine*” os sinais referentes à estrutura no início do monitoramento e “*Baseline*” os sinais dos dias seguintes onde foi dada sequência às medições.

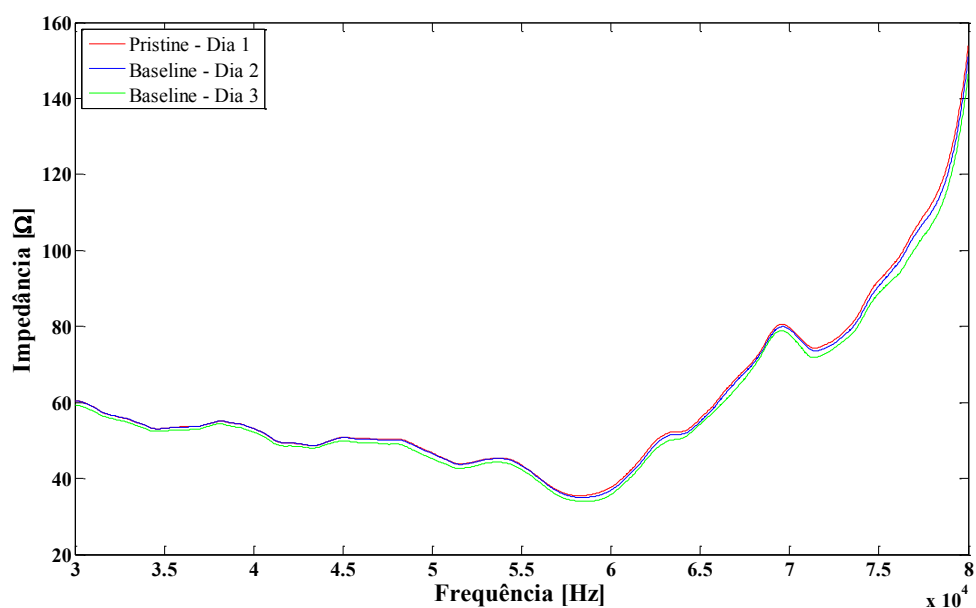


Figura 5.32 – Assinaturas de impedância eletromecânica (Re) para o PZT-1 para a estrutura isenta de danos.

Após a geração do dano a partir do ensaio de punção, observou-se uma significativa mudança no comportamento do sinal, apresentando deslocamentos vertical e horizontal nítidos nos sinais nomeados com o termo “*Dano*”, acompanhado do seu respectivo dia de medição (Fig. 5.33).

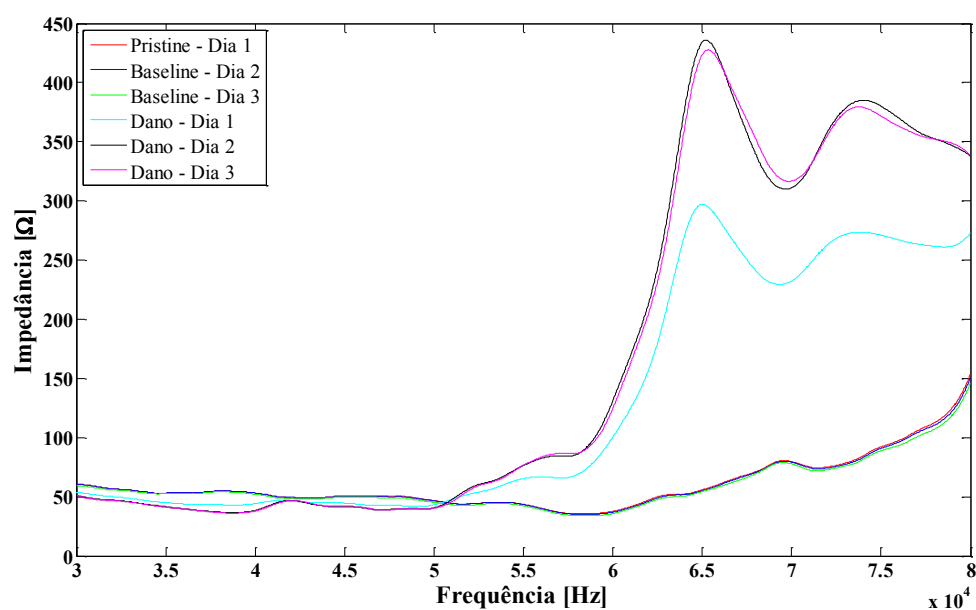


Figura 5.33 – Assinaturas de impedância (Re) para o PZT-1 referente à estrutura antes e após a geração do dano.

Os sinais de impedância apresentados foram atualizados após a compensação da temperatura.

A partir dessas assinaturas modificadas foram calculadas as métricas de dano RMSD, CCD, ASD e M para caracterizar a presença de dano de forma quantitativa (Fig. 5.34). Ressalta-se que os valores apresentados a seguir foram também atualizados após a compensação da temperatura.

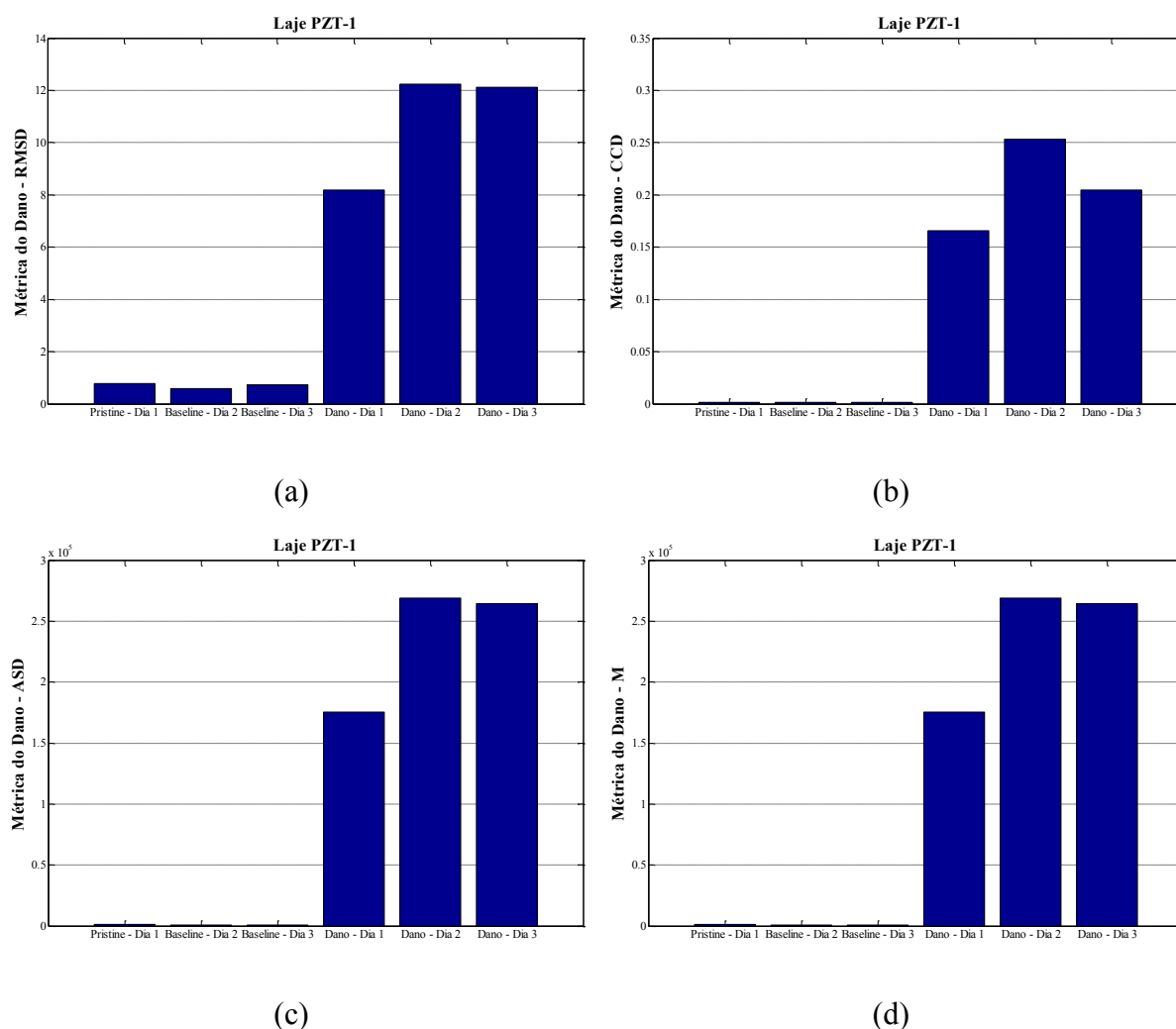


Figura 5.34 – Métricas de dano para o PZT-1: (a) RMSD; (b) CCD; (c) ASD; (d) M.

Na Fig. 5.34 os três primeiros estados referem-se ao *Pristine - Dia 1*, *Baseline - Dia 2* e *Baseline - Dia 3* respectivamente anteriores à geração do dano. Os outros três estados, a saber, *Dano - Dia 1*, *Dano - Dia 2* e *Dano - Dia 3*, referem-se aos sinais para a estrutura isenta de dano *versus* os sinais para a estrutura danificada.

Para o PZT-2 constatou-se um comportamento similar ao PZT-1, como pode ser verificado nas Figs. 5.35 e 5.36.

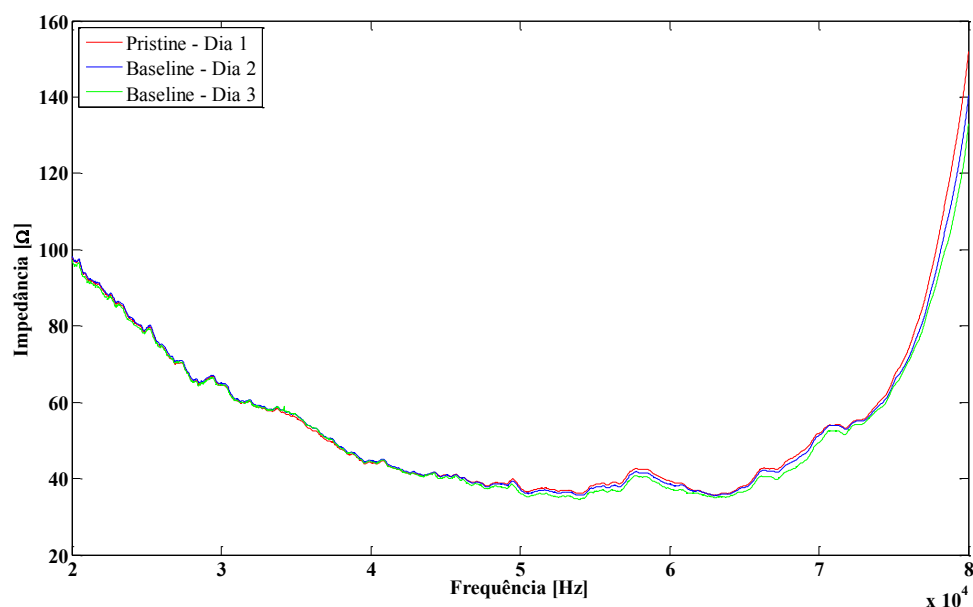


Figura 5.35 - Assinaturas de impedância (Re) para o PZT-2 para a estrutura isenta de danos.

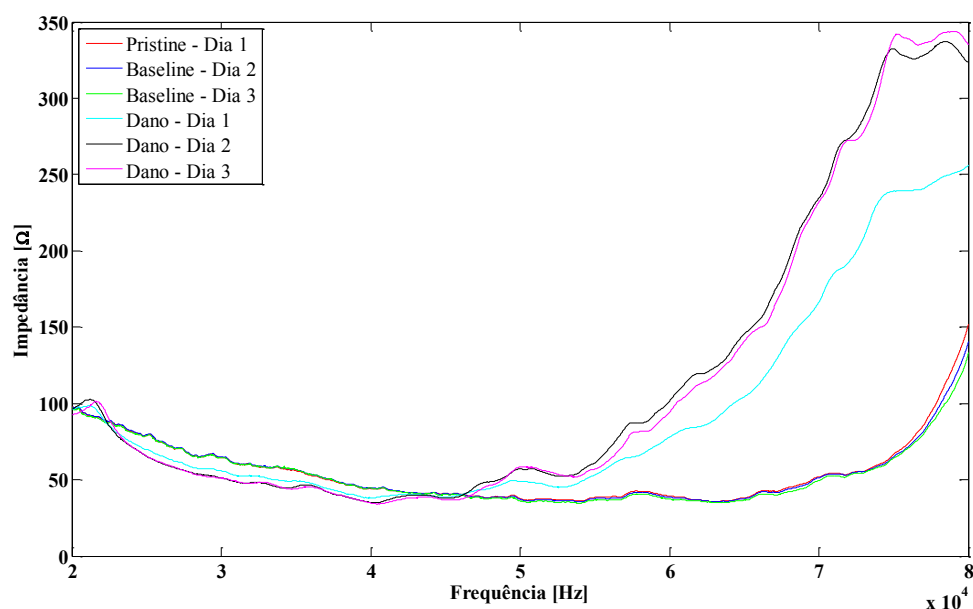


Figura 5.36 - Assinaturas de impedância (Re) para o PZT-2 referentes à estrutura antes e após a geração do dano.

Como apresentado anteriormente, as métricas de dano foram calculadas e atualizadas após a compensação da temperatura. Pode-se observar que as métricas de dano para o PZT-2

demonstraram um comportamento análogo ao do PZT-1, confirmando assim o diagnóstico com a presença do dano para a laje monitorada (Fig. 5.37).

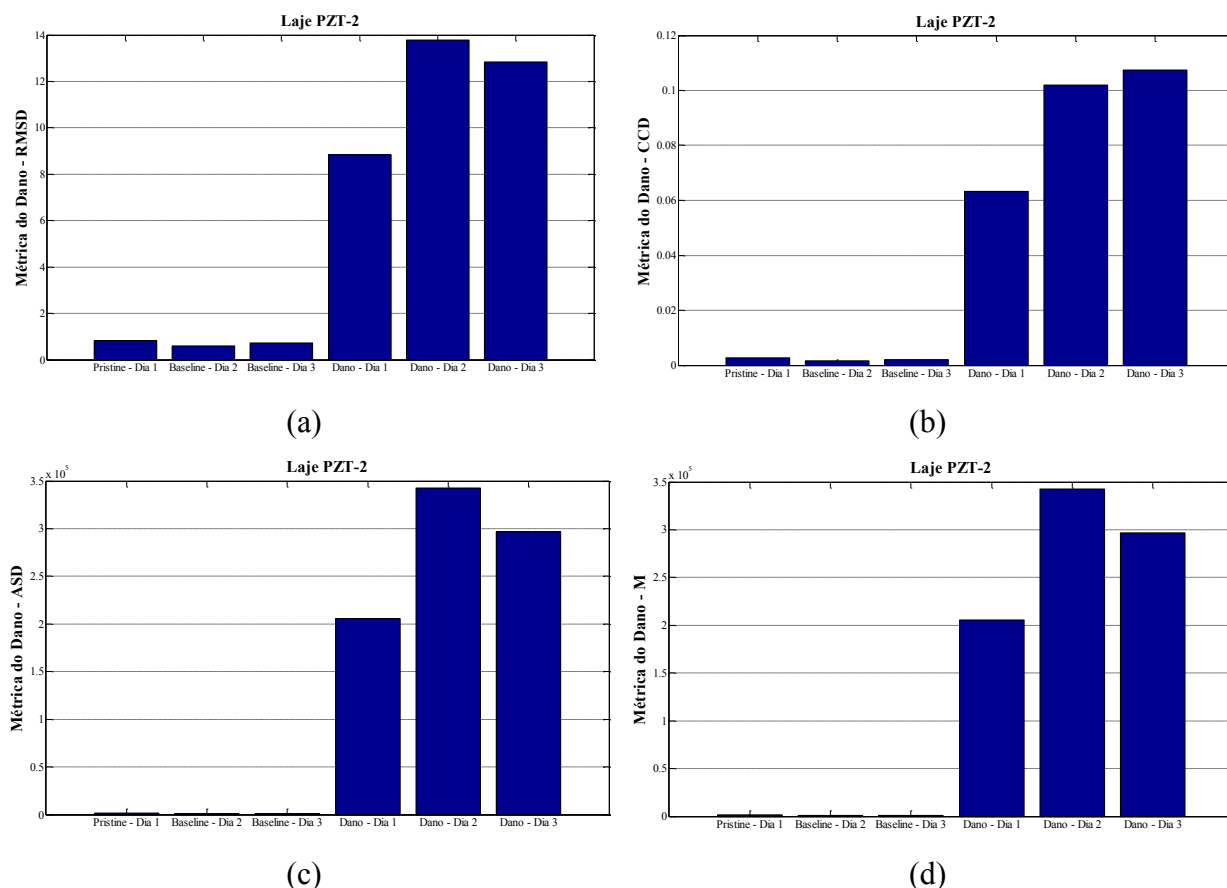


Figura 5.37 - Métricas de dano para o PZT-2: (a) RMSD; (b) CCD; (c) ASD; (d) M.

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 obtidas foram sensíveis ao dano e que as métricas de dano confirmaram o diagnóstico.

Além disso, o método de compensação de temperatura utilizando a abordagem de otimização foi eficiente na compensação dos sinais e métricas, evitando erros de diagnóstico no processo de monitoramento.

Com o intuito de analisar alguns aspectos referentes à influência da temperatura com intervalos amplos como no processo de congelamento e descongelamento do concreto, e também como a variação da umidade nesse composto pode influir na técnica proposta, realizou-

se o monitoramento no interior de uma câmara climática, finalizando assim os procedimentos experimentais desta Tese.

5.3.4. Aplicação experimental IV: Fatores ambientais adversos

Os principais processos que causam a deterioração do concreto podem ser agrupados de acordo com sua natureza, como já foi comentado na Seção 2.4 desta Tese. Trata-se de processos complexos, determinados pelas propriedades físico-químicas do concreto e pela forma como está exposto. Esses processos de degradação alteram a capacidade do material em desempenhar suas funções e nem sempre se manifestam visualmente.

Nesta fase experimental, analisou-se o comportamento da técnica da impedância E/M em estruturas de concreto submetidas a variações bruscas de temperatura, como também diferentes taxas de absorção de água associadas à umidade. Destaca-se que esses dois parâmetros serão analisados separadamente. Para executar os procedimentos correspondentes, dois corpos de prova, sendo um cilíndrico e outro prismático, foram moldados exclusivamente para esta aplicação e todo procedimento experimental foi desenvolvido no interior da câmara climática. Os detalhes de cada etapa serão delineados a seguir.

5.3.4.1. Variações Bruscas de Temperaturas

Apesar desses fenômenos não serem comuns no Brasil, eles são importantes nos países atingidos principalmente por baixas temperaturas durante o inverno. A dificuldade do concreto, ao submetê-lo a baixas temperaturas, consiste no fato de ser um material poroso, capaz de armazenar água, que sob a ação do congelamento aumenta o volume e movimenta-se pelos capilares do concreto causando pressão em suas paredes.

Para observar esse evento, os dois corpos de prova foram posicionados no interior da câmara climática para seis temperaturas distintas. Em um primeiro momento realizou-se o monitoramento para as temperaturas de 25 °C, 10 °C, -5 °C e -20 °C, durante cinco horas para cada temperatura. Na sequência, prosseguiu-se com as temperaturas de 25 °C, 40 °C e 55 °C. O tempo utilizado é recomendado pela norma ASTM C666 (2003), que estabelece o procedimento para a verificação da durabilidade de concretos submetidos a ciclos de gelo e degelo.

Inicia-se então, com a temperatura de 25 °C nos dois momentos, ou seja, tanto no congelamento quanto no aquecimento, sendo esta considerada como referência para a análise dos resultados. Nesta fase do experimento, optou-se por não fazer o controle de umidade no interior da câmara climática (Fig. 5.38). Esse parâmetro será descrito e explorado na Seção seguinte.



Figura 5.38 – Corpos de prova posicionados no interior da câmara climática.

Para medição da impedância utilizou-se o impedancímetro portátil *SySHM* com o intervalo de frequência entre 30 kHz e 80 kHz, 5000 pontos, 2048 médias por pontos e 30 iterações para cada faixa de temperatura. Vale lembrar que as medições foram programadas para iniciar somente após o período de estabilização da temperatura nos corpos de prova de concreto (5 horas), para cada intervalo de temperatura.

A nomenclatura utilizada nesse procedimento experimental foi sequencial: PZT-1 para o corpo de prova prismático, PZT-3 e PZT-4 para o corpo de prova cilíndrico. O PZT-2 foi excluído da análise devido à falta de sinal neste atuador. A posição das Cápsulas Inteligentes se manteve semelhante aos esquemas apresentados nas Seções 5.3.1 e 5.3.2.

As assinaturas de impedância, tanto no congelamento quanto no aquecimento, como também a métrica RMSD para todos os estágios são exibidas nas Figs. 5.39, 5.40, 5.41 e 5.42 para todas as Cápsulas Inteligentes. Percebeu-se que as variações bruscas de temperaturas influenciaram nas modificações nos sinais de impedância, ao se comparar com a configuração inicial a 25 °C (Estágio I), considerada como referência para processamento dos resultados.

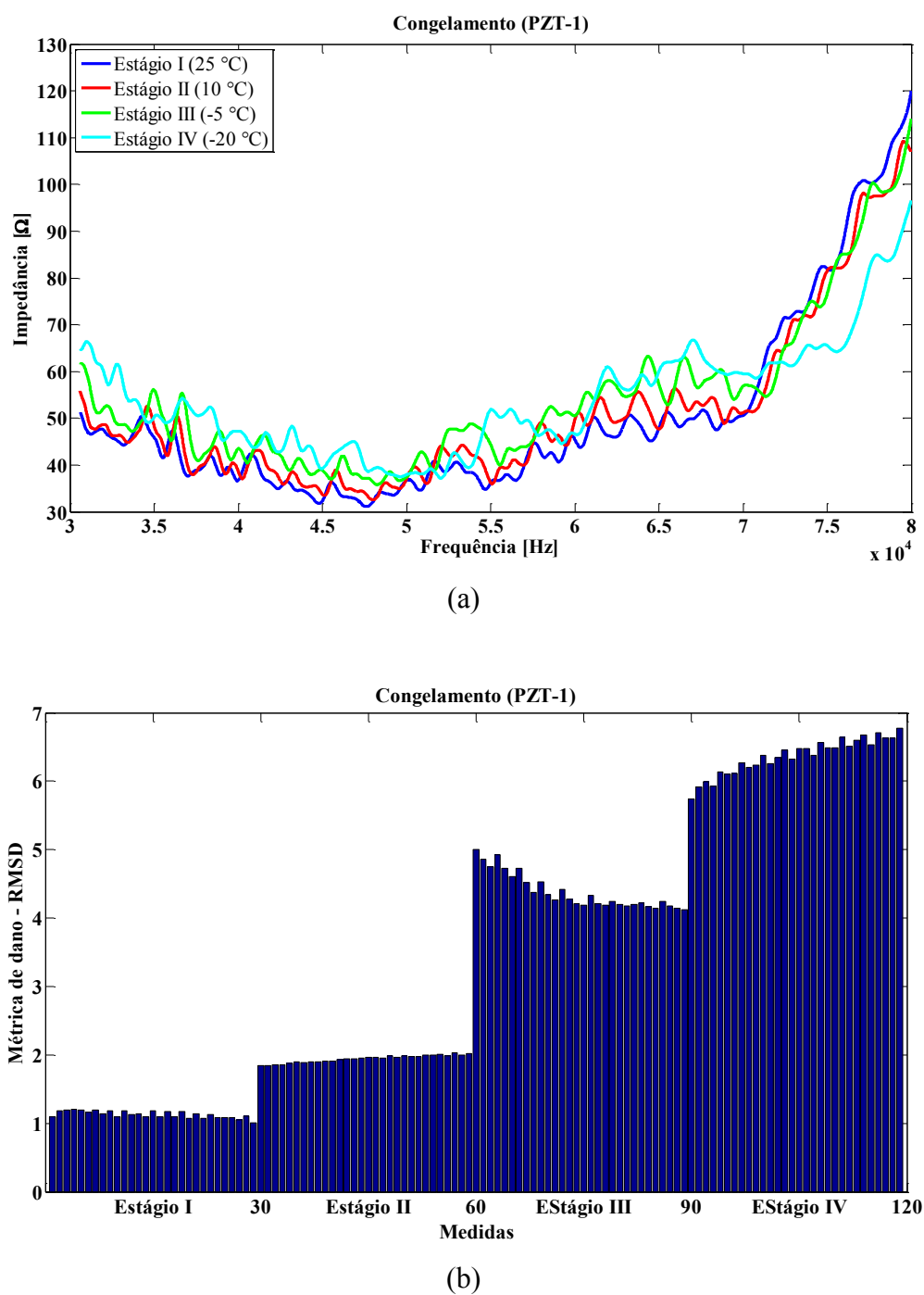
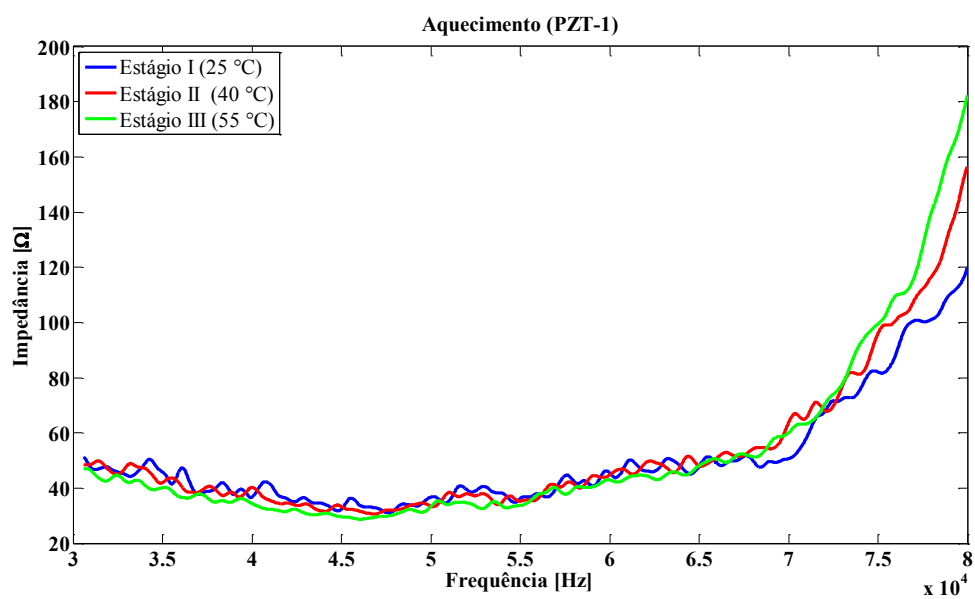
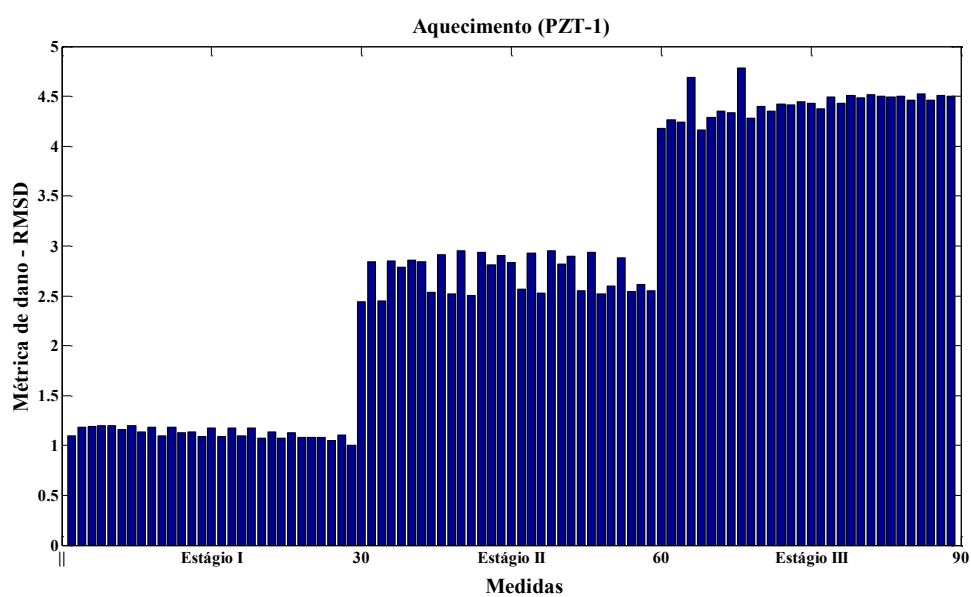


Figura 5.39 – Monitoramento para variações bruscas de temperatura para o PZT-1: (a) Sinais da impedância (Re) para o congelamento; (b) Métrica de dano RMSD para o congelamento.



(a)



(b)

Figura 5.40 – Monitoramento para variações bruscas de temperatura para o PZT-1: (a) Sinais de impedância (Re) para o aquecimento; (b) Métrica de dano RMSD para o aquecimento.

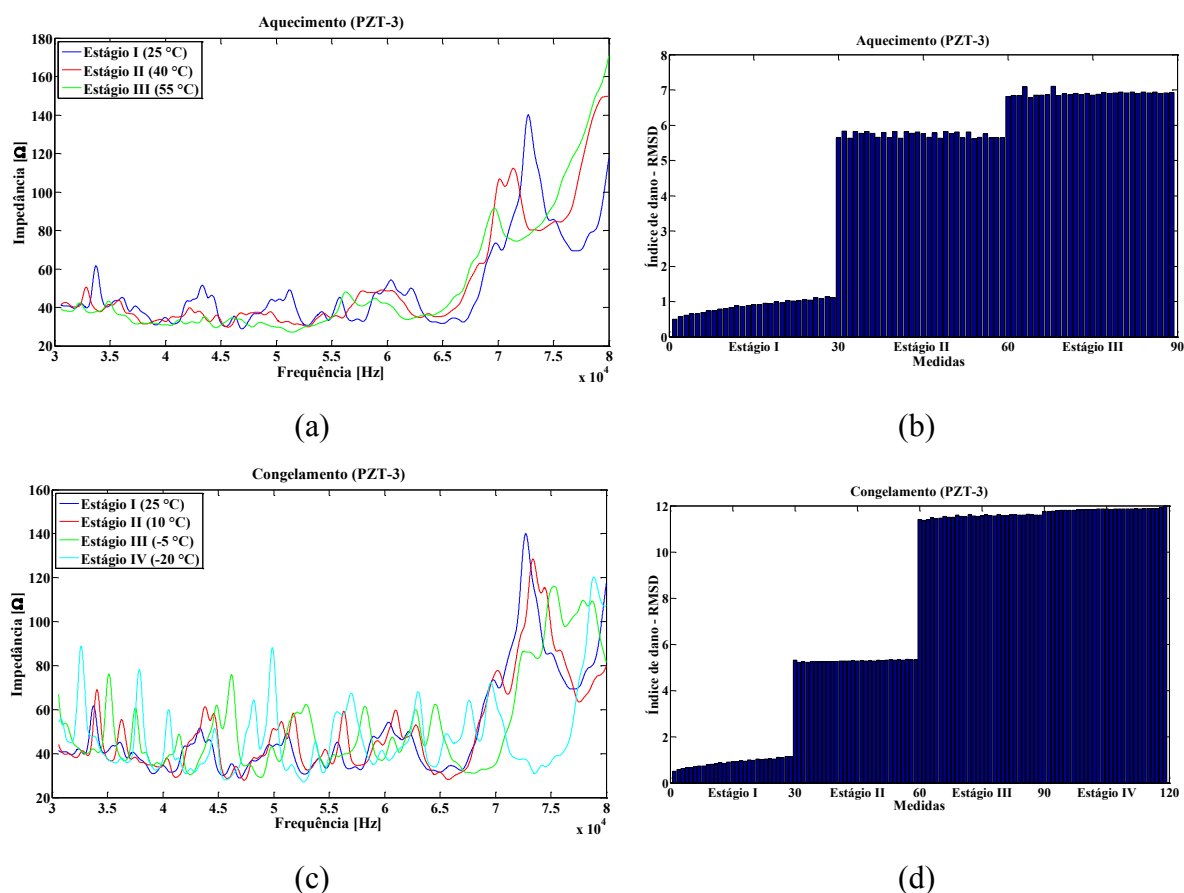


Figura 5.41 - Monitoramento para variações bruscas de temperatura para o PZT-3: (a) Sinais da impedância (Re) para o congelamento; (b) Métrica de dano RMSD para o congelamento; (c) Sinais de impedância (Re) para o aquecimento; (d) Métrica de dano RMSD para o aquecimento.

É possível perceber que para ambas estruturas estudadas, as respostas apresentadas pelos sensores (PZT-1, PZT-3 e PZT-4) confirmaram a presença de modificações das propriedades mecânicas do concreto durante o processo de congelamento e aquecimento. Observa-se ainda que, para os estágios de congelamento, as curvas de impedância apresentaram deslocamentos verticais com disposição para a direita e nos estágios durante o aquecimento esse comportamento deu-se no sentido contrário, ou seja, as curvas se modificaram com deslocamentos verticais com disposição para a esquerda. Isso pode ser explicado pelos danos provocados em decorrência das variações bruscas de temperatura.

No processo de congelamento, o acréscimo do volume da estrutura aumenta a pressão da água não congelada, gerando microfissuras no composto em estudo. Já no aquecimento, à medida que a temperatura do concreto aumenta, sua resistência mecânica diminui em função da perda de água. Por consequência, ocorre a vaporização gradativa da água livre nos poros

onde esse vapor formado não consegue sair e migrar com a mesma velocidade com que foi formado, acarretando pressões internas proporcionais às taxas de aquecimento e também provocando microfissuração.

Como as estruturas foram modificadas durante os processos reportados, pode-se relacionar cada estágio a uma configuração diferente das estruturas consideradas; por isso a métrica de dano calculada foi capaz de, qualitativamente, representar tais modificações.

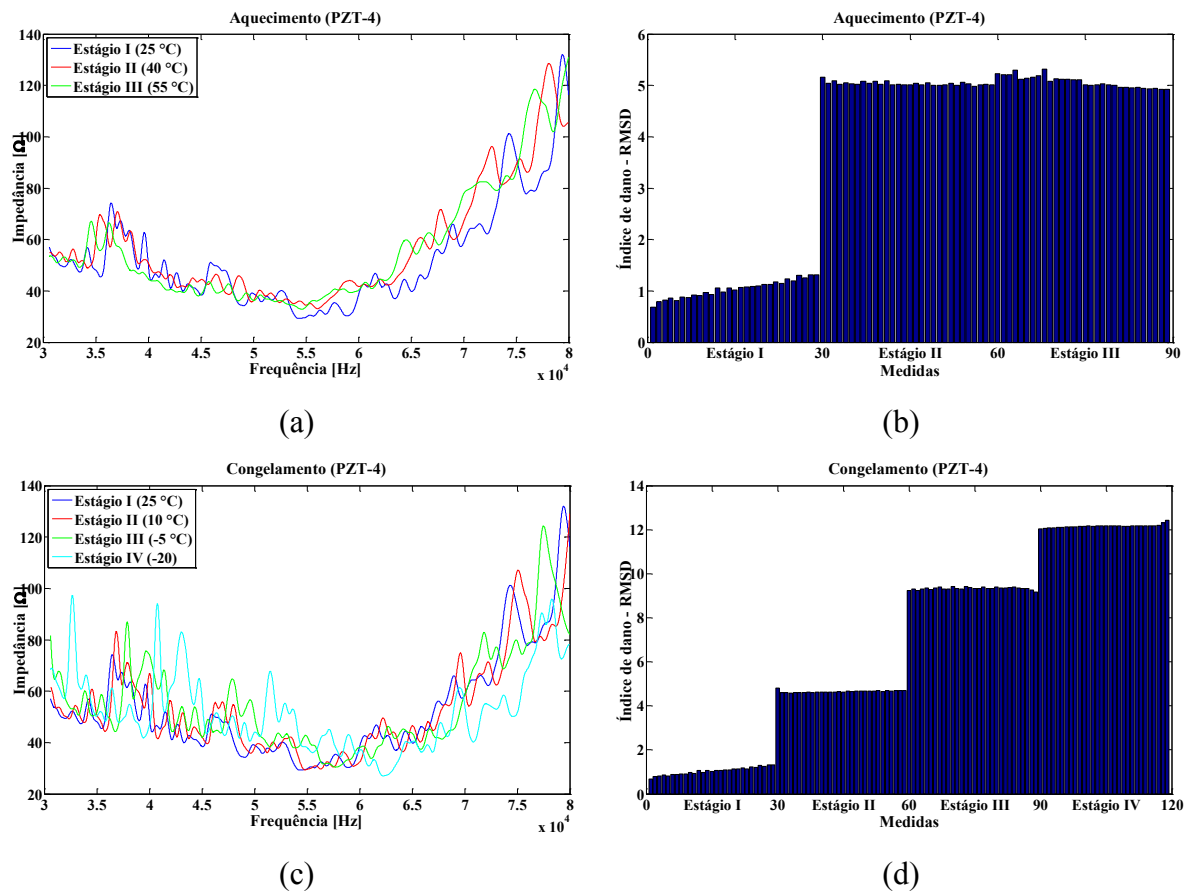


Figura 5.42 - Monitoramento para variações bruscas de temperatura para o PZT-4: (a) Sinais da impedância (Re) para o congelamento; (b) Métrica de dano RMSD para o congelamento; (c) Sinais de impedância (Re) para o aquecimento; (d) Métrica de dano RMSD para o aquecimento.

5.3.4.2. Umidade

A água está sempre envolvida no processo de deterioração do concreto, conforme se observa em quase todos os mecanismos de degradação. Com o intuito de conhecer o comportamento da técnica da impedância E/M para o monitoramento de estruturas de concreto no estado endurecido com diferentes taxas de absorção de água associado à umidade, realizou-se um procedimento que teve início com a secagem de um corpo de prova cilíndrico de concreto contendo duas Cápsulas Inteligentes, aqui nomeadas como PZT-3 e PZT-4. Essa taxa de absorção de água no concreto relaciona a massa seca e a massa “úmida” do concreto, dada em porcentagem.

A norma NBR 9778 (2005) recomenda a determinação da absorção de água por imersão e índices de vazios, após os 28 dias de idade do concreto. Esta norma define o período de secagem do concreto entre 24 h e 48 h em estufa, a 100 °C. Porém, neste caso optou-se por realizar a secagem na temperatura de 60 °C no interior da câmara climática até a estabilização da massa do concreto, para garantir a segurança das Cápsulas Inteligentes. Posicionou-se o corpo de prova no interior da câmara climática, sendo este instalado sobre uma balança semi-analítica da marca *Weblabor*, modelo L5001, com capacidade de 5000 g e resolução de 0,1 g (Fig. 5.43).



Figura 5.43 – Corpo de prova posicionado para o ensaio com controle de umidade.

Nesse período de secagem do concreto, a diminuição da massa foi observada até que a diferença fosse inferior a 0,5% da menor massa, conforme indica a NBR 9778 (2005). Após a

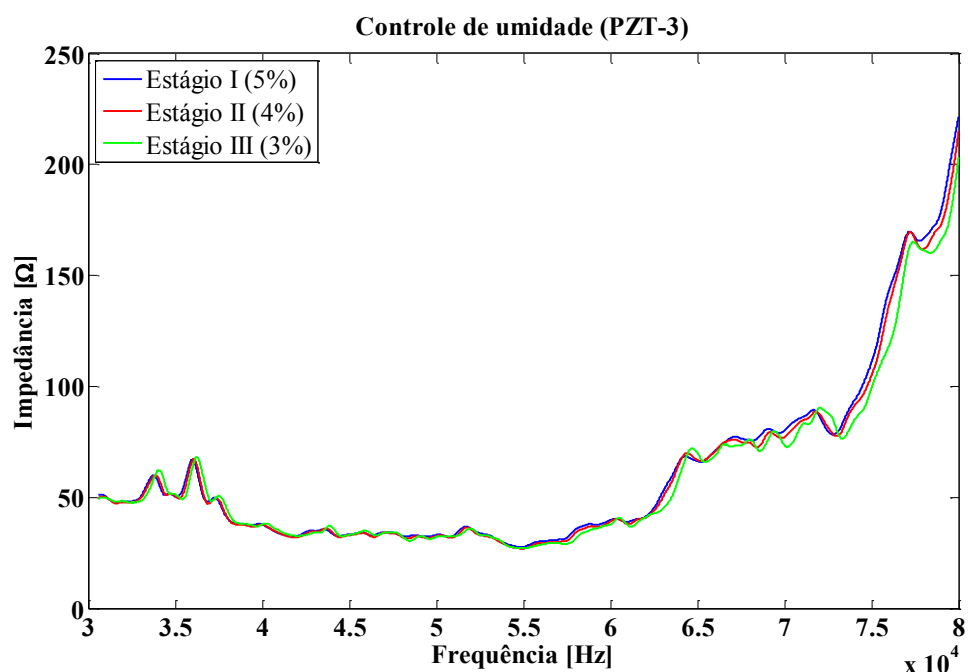
secagem, realizou-se a saturação da amostra durante 24 h com todo seu volume imerso em água à temperatura de 25 °C. A partir daí, calculou-se a relação entre a massa seca e a massa saturada, obtendo assim a taxa de absorção de água da amostra, apresentada em porcentagem. Observe na Tab. 5.1 as informações obtidas para essa amostra de concreto.

Tabela 5.1 – Informações obtidas para a amostra cilíndrica de concreto.

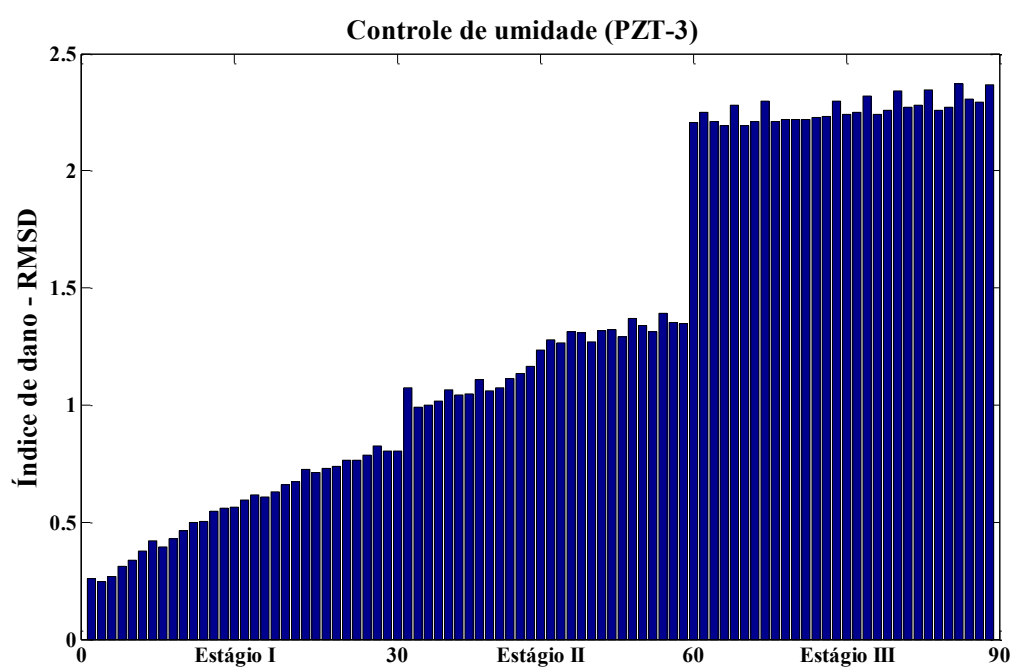
Massa seca	Massa saturada	Absorção de água
3485,3 g	3710,3 g	6,4 %

De posse dessas informações, prosseguiu-se para a medição da impedância elétrica, mantendo a mesma configuração para o sistema de medição do procedimento anterior, porém nesse caso a medição foi realizada durante 24 horas, com o intuito de observar o comportamento dos sinais de impedância com a variação da taxa de absorção de água na estrutura estudada. A medição se iniciou após uma hora de estabilização da câmara climática, com temperatura de 25 °C e controle de umidade em 50%. A massa da amostra foi registrada em alguns momentos do procedimento e, ao iniciar a medição de impedância, essa taxa foi de 5,8 %. Com isso, de acordo com os valores de massa registrados, foi possível relacionar três estágios ao longo das 24 h de medição, com 30 iterações para cada um, a saber: Estágio I com 5 %; Estágio II com 4 % e Estágio III com 3 % de absorção de água na amostra.

Verificou-se uma suave modificação no sinal medido para os dois atuadores envolvidos, ao se relacionar os três estágios para a frequência selecionada de 30 kHz a 80 kHz. Consequentemente, a métrica de dano RMSD calculada exhibe quantitativamente essa alteração (Fig. 5.44 e 5.45).



(a)



(b)

Figura 5.44 – Monitoramento com controle de umidade: (a) Sinais da impedância (Re) para o PZT-3; (b) Métrica de dano RMSD para o PZT-3.

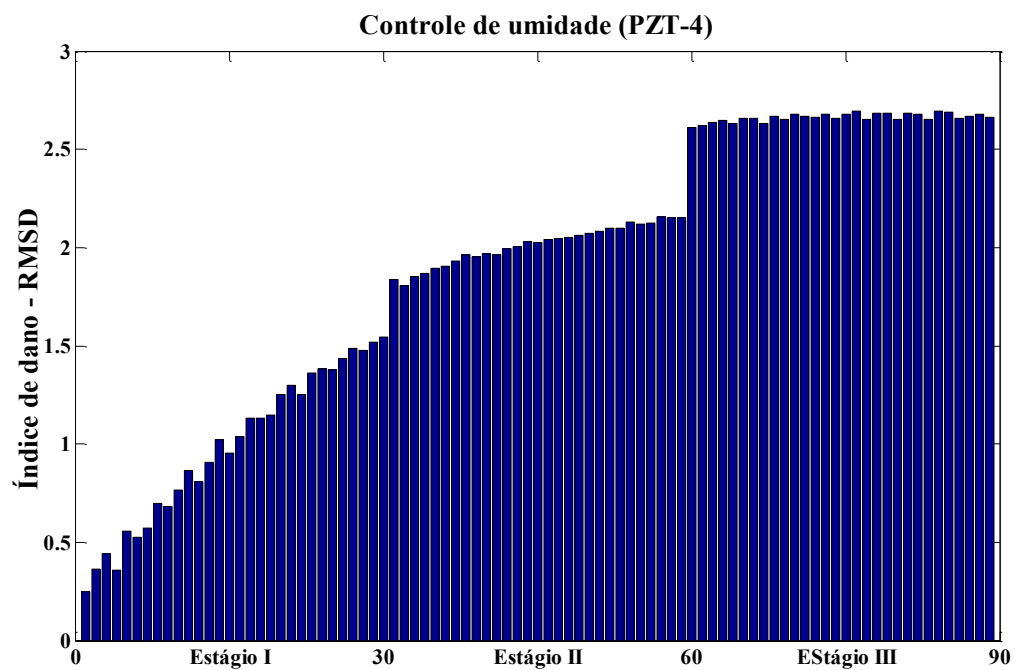
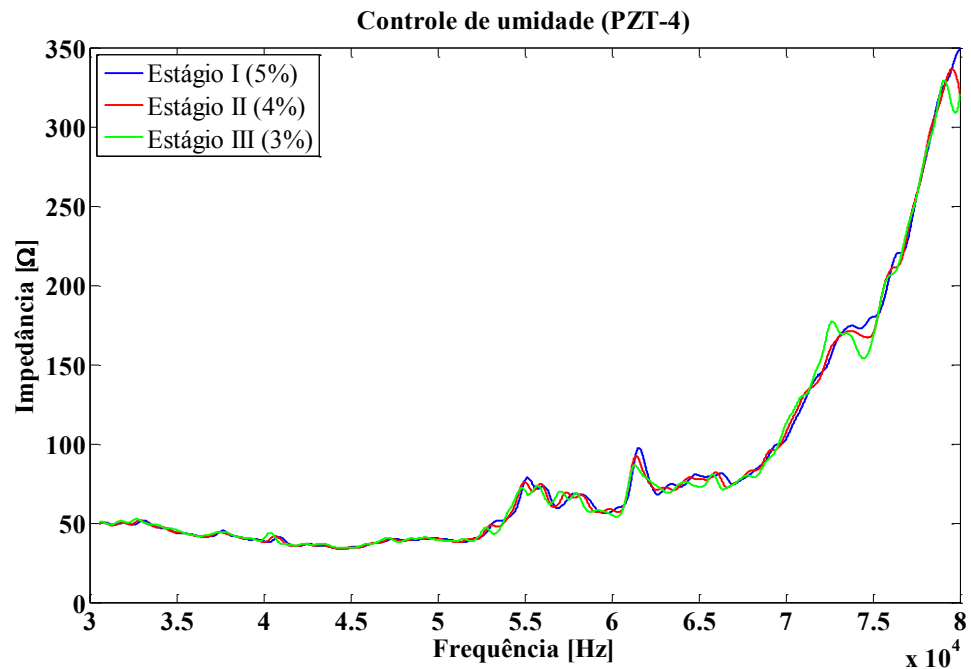


Figura 5.45 – Monitoramento com controle de umidade: (a) Sinais de impedância (Re) para PZT-4; (b) Métrica de dano RMSD para o PZT-4.

A partir desse procedimento, percebeu-se que a técnica de SHM usada nesta Tese foi sensível à variação da taxa da absorção de água no concreto, ao se observar uma suave modificação nos sinais de impedância para ambos os sensores (PZT-3 e PZT-4), como também uma modificação na métrica de dano RMSD (principalmente entre os estágios I e III), onde se verificou uma diferença de massa igual a 92 g.

CAPÍTULO VI

Considerações finais

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais desta Tese, como também as perspectivas futuras do trabalho realizado. Como a pesquisa foi desenvolvida segundo várias etapas, essas considerações serão delineadas separadamente, de modo a facilitar a compreensão do leitor. Cabe salientar que os desdobramentos futuros envolvendo o aprimoramento ou aperfeiçoamento daquilo que foi apresentado ao longo do texto configuram-se como propostas de trabalho que poderão agregar valor às técnicas de monitoramento da integridade estrutural, tornando-as ainda mais robustas e eficientes no contexto da construção civil.

6.1. Conclusões

O conteúdo desta Tese de Doutorado engloba a contextualização do tema geral, interligando as diversas motivações para o estudo do monitoramento da integridade estrutural de estruturas de concreto, buscando contribuir com o estado da arte.

Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os principais conceitos relacionados aos materiais compostos, com maior ênfase no concreto reforçado com fibras de aço, assim como sobre o método de SHM com base na técnica da impedância eletromecânica. Quanto ao estado da arte referente às técnicas de SHM aplicadas em estruturas de concreto, foram enfatizadas as pesquisas que usam a técnica da impedância E/M, ainda pouco explorada no monitoramento destas estruturas. Observou-se a ausência de estudos experimentais mais detalhados e a necessidade de aprimoramento no que diz respeito à aplicação em estruturas de concreto propriamente ditas. Com isso, foi possível definir os primeiros passos para as aplicações feitas, acompanhadas da fundamentação necessária para esta pesquisa. Ficou claro que a técnica da impedância E/M está ganhando espaço gradativamente; no entanto, observou-se também

carência de estudos experimentais sistemáticos voltados para a construção civil em geral, e estruturas de concreto em particular.

Iniciou-se as aplicações experimentais a partir de um corpo de prova prismático de concreto reforçado com fibras de aço, sendo o transdutor instalado na superfície da estrutura estudada. A partir desse ensaio foi possível testar o funcionamento do analisador de impedância *Agilent 4294A*, além conhecer melhor suas especificações e também os métodos de tratamento dos dados correspondentes. Esse primeiro contato foi desafiador para os envolvidos nesta pesquisa, visto que se tratava de um procedimento envolvendo a técnica da impedância E/M aplicada em um composto cimentício. Gráficos da resposta da parte real da impedância eletromecânica foram gerados, buscando uma avaliação qualitativa do dano gerado. Métricas de dano foram então calculadas, permitindo avaliar o dano de forma quantitativa, oferecendo assim um valor numérico capaz de representar as curvas de impedância corretamente. Além disso, o efeito da temperatura sobre os sinais de impedância eletromecânica foi analisado e compensado utilizando o método do deslocamento efetivo, tendo este demonstrado ser uma alternativa importante para tornar os diagnósticos mais confiáveis. Daí, foi possível concluir, após esta primeira aplicação, que os estudos envolvendo a aplicação da técnica apresentada em estruturas de concreto deveriam progredir.

Logo na fase seguinte desta pesquisa, foram realizadas aplicações experimentais com os sensores embutidos nas estruturas de concreto. Para isso, o grande desafio foi incorporar sensores nas estruturas “base”, ou seja, construir estruturas inteligentes de concreto de forma a garantir que os sensores incorporados ficassem isolados e incorporados às estruturas. A consulta à literatura nos permitiu observar que outros pesquisadores já tiveram interesse em buscar proteção para os sensores antes de incorporá-los à estrutura. Com isso, materiais variados foram avaliados e, após serem testados, um adesivo bi componente à base de resina epóxi foi escolhido para proteger o sensor de um possível colapso no interior do concreto. O processo de produção da Cápsula Inteligente requer um período de 24 horas de cura, contando com o auxílio de uma fôrma confeccionada em uma impressora 3D e duas camadas da resina envolvendo o sensor. Para avaliar a funcionalidade dessa cápsula foi realizado um teste em uma viga de alumínio que demonstrou que o método da impedância E/M foi capaz de detectar danos utilizando o sensor protegido. Notou-se ainda que para as temperaturas de 15 °C, 25 °C e 35 °C a Cápsula Inteligente foi capaz de detectar o dano simulado (alteração estrutural) com a adição de massa na viga estudada. Com isso, foi possível iniciar de fato a moldagem dos corpos de prova de concreto incorporando as Cápsulas Inteligentes e obtendo, finalmente, estruturas de concreto

para aplicação da técnica de monitoramento com base na impedância E/M. Estas estruturas podem ser denominadas, doravante, como estruturas inteligentes.

Nas aplicações experimentais envolvendo estruturas de concreto buscou-se explorar elementos com diferentes complexidades, começando com o monitoramento sob diferentes condições de estruturas cilíndricas e prismáticas e, finalmente, em uma laje de concreto armado. Na amostra cilíndrica, devido à posição das duas Cápsulas Inteligentes e a orientação da carga utilizada para gerar o dano, uma suavização significativa dos sinais de impedância E/M após o dano foi observada. No entanto, ainda assim foi possível verificar que a técnica proposta foi capaz de detectar danos. Para a amostra prismática, também contendo duas Cápsulas Inteligentes, além do monitoramento usando medições da impedância eletromecânica antes e após a geração do dano, foi ainda realizado o monitoramento durante todo o carregamento da estrutura. Esse último procedimento foi de grande importância para a avaliação da capacidade das Cápsulas Inteligentes de detectar a progressão dos danos que o concreto reforçado com fibras de aço apresentou durante a realização do ensaio de tenacidade à flexão.

A partir daí, prosseguiu-se com o monitoramento de um elemento estrutural da construção civil com maior nível de complexidade, a saber, uma laje de concreto armado. Observou-se que os sinais medidos antes da geração do dano durante os três dias de medição na laje de concreto apresentaram poucos picos, porém estes foram suficientes para confirmar a manutenção da funcionalidade das Cápsulas Inteligentes, mesmo depois de seis meses incorporadas no concreto. Para a geração do dano, um ensaio de punção foi executado e após a geração desse dano, verificou-se uma significativa mudança no comportamento do sinal de impedância E/M, deixando claro que os sinais analisados foram visivelmente sensíveis ao dano e que as métricas RMSD, CCD, ASD e M confirmaram quantitativamente o diagnóstico.

Pode-se concluir que as Cápsulas Inteligentes aumentam a eficiência do monitoramento com a técnica da impedância E/M em estruturas de concreto, além de evitarem o comprometimento dos sensores utilizados. Este é um aspecto muito importante no monitoramento de longa duração, quando a estrutura é observada por vários meses. De forma geral, foi demonstrado que foi possível identificar o dano em todos os testes realizados. Além disso, foi determinado o valor do *threshold* confiável, garantindo que o sinal medido de fato estava associado a um dano estrutural. Para todos os casos envolvendo estruturas inteligentes de concreto, o método da compensação da temperatura utilizando otimização se mostrou eficaz. Neste contexto, ao atualizar os sinais e as métricas de dano, ficou evidenciada a importância da compensação de temperatura para evitar falsos diagnósticos no processo de monitoramento.

Verificou-se, portanto, que o efeito da temperatura foi um parâmetro importante considerado nesta pesquisa.

Analisou-se também o comportamento da técnica da impedância E/M em estruturas de concreto submetidas a condições ambientais adversas, como variações bruscas de temperatura e absorção de água associada à umidade relativa do ar. A partir das assinaturas de impedância geradas, observou-se que a variação da temperatura pode provocar uma mudança volumétrica nas estruturas estudadas; logo, a técnica de impedância E/M se demonstrou sensível a tais modificações.

Por fim, a partir das análises realizadas para diferentes taxas de absorção de água no concreto, notou-se que a técnica também foi sensível à variação de massa da amostra. A amostra de concreto apresentou uma queda da taxa de absorção de água no intervalo de tempo considerado, para as situações analisadas. Isso mostra que o desempenho de estruturas de concreto mais complexas como lajes, vigas e pilares está relacionado a diversos fatores ambientais que devem ser levados em consideração no processo de monitoramento, como foi o caso da consideração da umidade relativa do ar, apontando para o cuidado que deve se ter com a orientação de chuvas e ventos, por exemplo.

Em síntese, esta Tese de Doutorado oferece várias contribuições científicas, a saber:

- Avaliação do método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica para detecção de danos em estruturas de concreto, possibilitando a redução de custos de manutenção e contribuindo para o aumento da segurança das estruturas de construção civil.
- Desenvolvimento da chamada Cápsula Inteligente e, consequentemente, de estruturas inteligentes, ou seja, estruturas de construção civil que oferecem condições de monitoramento contínuo através da incorporação de cerâmicas piezelétricas.
- Compensação do efeito da temperatura, tendo em vista que esta variável pode influenciar no monitoramento.
- Implementação de algoritmos dedicados a cada aplicação experimental, em ambiente MATLAB®, tendo em vista fatores como a tomada de decisões com base em reconhecimento de padrões, técnicas estatísticas, otimização, bem como regras de análise e interpretação de resultados.
- Avaliação preliminar da influência de fatores ambientais adversos sobre o monitoramento da integridade estrutural de estruturas de concreto.

Cita-se também a seguinte produção bibliográfica decorrente desta pesquisa:

- SILVA, R. N. F.; STEFFEN Jr., V.; Estudo sobre o Monitoramento de Integridade Estrutural, baseado na impedância E/M, aplicado em estruturas civis. POSMEC 2015. Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. 2015.
- SILVA, R. N. F.; TSURUTA, K. M.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN Jr., V.; The use of electromechanical impedance based structural health monitoring technique in concrete structures. EWSHM 2016 – In: 8th European Workshop on Structural Health Monitoring, Bilbao, Spain. 2016.
- SILVA, R. N. F.; TSURUTA, K. M.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN Jr., V.; Monitoramento de Integridade Estrutural, baseado em impedância eletromecânica, aplicado em estruturas de concreto. 58º Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte, 2016.
- SILVA, R. N. F.; TSURUTA, K. M.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN Jr., V.; The use of electromechanical impedance based structural health monitoring technique in concrete structures. E-Journal of Nondestructive Testing. ISSN 1435-4934. <http://www.ndt.net/search/docs.php3?id=19905>. 2016.
- SILVA, R. N. F.; TSURUTA, K. M.; RABELO, D. S.; FINZI NETO, R. M.; CAVALINI Jr., A. A.; STEFFEN Jr., V.; Study of the piezoelectric smart capsule used on the SHM impedance method for concrete structures. International Conference on Structural Engineering Dynamics. ICEDyn2017. Ericeira, Portugal. Julho de 2017.
- SILVA, R. N. F.; TSURUTA, K. M.; RABELO, D. S.; FINZI NETO, R. M.; CAVALINI Jr., A. A.; STEFFEN Jr., V.; Using a piezoelectric smart capsule in the SHM impedance method for concrete structures. Mechanical Systems and Signal Processing. Submetido em setembro de 2017.
- SILVA, R. N. F.; TSURUTA, K. M.; FINZI NETO, R. M.; CAVALINI Jr., A. A.; STEFFEN Jr., V.; Real-time structural health monitoring method based on the electromechanical impedance approach applied on concrete structures. 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering. Curitiba. Dezembro de 2017.

Estudos futuros deverão ser conduzidos para buscar o refinamento dos procedimentos de monitoramento propostos, tornando-os ferramentas efetivas de SHM com base no método da impedância E/M de estruturas de concreto. Assim sendo, os resultados obtidos neste esforço de pesquisa deverão permitir que essa técnica se desenvolva continuamente atraindo a atenção de pesquisadores e engenheiros para as técnicas de SHM, particularmente visando aplicações em estruturas civis de grande porte, tais como pontes, edifícios, viadutos e hidrelétricas.

6.2. Perspectivas futuras

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

- Compensar a influência da umidade nas assinaturas de impedância no sistema de monitoramento proposto. Como foi discutido anteriormente, a água sempre está envolvida no processo de degradação do concreto. Esse assunto foi estudado apenas em caráter exploratório, já demonstrando, porém, resultados promissores. Entretanto, o tema merece maior aprofundamento.
- Implementar no sistema de monitoramento desenvolvido um código computacional voltado para reconhecimento de padrões, com capacidade de classificar outras manifestações patológicas em estruturas de concreto (corrosão de armaduras, ataque químico, recalque diferencial, dentre outros).
- Desenvolver um sistema de monitoramento baseado em impedância eletromecânica que opere remotamente, de modo que seja possível avaliar sua integridade durante toda a vida útil, aumentando a segurança dos usuários. Além disso, o monitoramento remoto permite que os sinais decorrentes do processo sejam avaliados por um especialista à distância sempre que necessário.
- Aplicar e avaliar a técnica em estruturas reais como pontes, hidrelétricas e viadutos, a fim de aumentar a robustez da técnica na detecção de danos em estruturas civis, como também complementar os métodos convencionais de ensaios não destrutivos e de monitoramento estrutural já consolidados.

REFERÊNCIAS

AGNESINI, M. V. C. **Concretos com ar incorporado. Efeitos produzidos pela incorporação de ar sobre as propriedades dos concretos dosados com os agregados usualmente empregados na região de São Carlos.** 24ª Edição. São Carlos: EESS-USP, 1988. 161 p.

AGUIAR, J. E. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis.** 173 p. 2006. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ALVES, V. S. S. **Avaliação do efeito de punção em lajes lisas de concreto com fibras com a variação do índice de retangularidade.** 2017. 142 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 201.2R.** Guide to durable concrete. ACI Committee. Detroit. 2001, 41 p.

_____. **ACI 228.1R.** In-place methods to estimate concrete strength. ACI Committee, 1995. Reapproved 2002. 35 p.

_____. **ACI 318:** Building Code Requirements for Structural Concrete. Michigan, USA, 2014. 524 p.

_____. **ACI 544.1R.** State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI committee, 1996. Reapproved 2002. 66 p.

_____. **ACI 544.4R.** Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete. ACI committee, 1988. Reapproved 2009. 22 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C597-97.** Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2002.

_____. **ASTM C666.** Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. West Conshohocken. 6 p. 2003.

_____. **ASTM C803.** Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete," Annual Book of ASTM Standards, v. 4, 1992.

_____. **ASTM C1609.** Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber- Reinforce Concrete (Using Beam with Third-Point Loading). Pennsylvania, 9 p. 2012.

ANNAMDAS, V. G. M., YANG, Y., SOH, C. K. Impedance based concrete monitoring using embedded PZT sensors. **International journal of civil and structural engineering**, v. 1, n. 3, p. 414, 2010.

ANDRADE, T. Tópicos sobre durabilidade do concreto. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 752-792, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto: procedimento de moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 6 p.

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

_____. **NBR 7584**. Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Especificações. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 8802**. Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 1994. 8 p.

_____. **NBR 9778**. Argamassa e Concretos Endurecidos – Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 12815**. Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear. Método de ensaio. Rio De Janeiro, 2012. 3 p.

_____. **NBR 12817**. Concreto endurecido – Determinação do calor específico – Método de ensaio. Rio De Janeiro, 2012. 11 p.

_____. **NBR 12820**. Concreto endurecido – Determinação da condutividade térmica – Método de ensaio. Rio De Janeiro, 2012. 10 p.

_____. **NBR 15220**. Desempenho térmico de edificações. Rio De Janeiro, 2005. 66 p.

_____. **NBR 15530**. Fibras de aço para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2007. 7 p.

AZEVEDO, A. P. **Resistência e Ductilidade das Ligações Laje-Pilar em Lajes-Cogumelo de Concreto de Alta Resistência Armado com Fibras de Aço e Armadura Transversal de Pinos**. 1999. 194 p. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo. São Paulo.

AZEVEDO, M. T. **Patologia das estruturas de concreto**. In: Isaia, G. C. (Ed) Concreto: ciência e tecnologia, v. 2, São Paulo, 2011.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 1v. 488p.

BARBÁN, V. V. **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Protendido com Cabos Não-Aderentes na Ligação Laje-Pilar de Borda**. 2008. 379 p. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Brasília.

BARBAR, J. S. **Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados**. 2016. 150p. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Carlos.

BARROS, J. A. O. Betão reforçado com fibras de aço: conceitos fundamentais. **Revista Betão**. v. 2, n. 5, p. 29-34, 2000.

BASTOS, P. S. S. **Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço**. 256p. 1999. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.18.1999.tde-17022005-165347>

BATTAGIN A. F. **Associação Brasileira de Cimentos Portland**. Disponível em: < <http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>> Acesso: 19 de maio de 2017.

BENDAT, J. S.; PERSOL, A. G. **Random Data – Analysis and Measurement Procedures**. 4th edition. ISBN: 978-0470248775. John Wiley, New York, NY, USA, 2000.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. 2ª ed. United Kingdom: Elsevier, 2007.

BEUTEL, R. et al. Performance Demonstration of Non-Destructive Testing Methods. In: **European NDT Conference (ECNDT 2006)**, 9, 2006, Berlin.

BRANDÃO, A.M.S. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto**. 149p. 1998. Dissertação de mestrado – Universidade de São Paulo. São Carlos.

BRANDT, A. M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composite Structures**. v. 86, n.1, p. 3-9, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>

BRUNAUER, S.; COPELAND, L. E. The chemistry of concrete. **Scientific American**, Vol. 210, n. 4, p 80-92. 1964. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0464-80>

BUNGEY, J. H.; MILLARD, S. G.; GRANTHAM, M. G. **Testing of Concrete in Structures**. 4th Edition. Taylor & Francis Group. New York. 2006.

CALLISTER Jr., W. D; RETHWISCH; D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 8ª ed., 817 p. 2002.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. 1ª ed. São Paulo: PINI, 1988. 522 p.

CAVALCANTI, R. R. **Ensaio de ondas ultrassônicas e redes neurais artificiais na avaliação da resistência à compressão do concreto**. 165p. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Católica de Pernambuco.

CHARLES ANNIS, P. E., **Statistical best-practices for building Probability of Detection (POD) models**. R package mh1823, version 3.1.4, available in: Accessed in: August 5th 2013.

CRAWLEY, P., et al. The impedance method of non-destructive inspection. **NDT&E international**, v. 17, n. 2, p. 59-65, 1983. [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(84\)90045-2](https://doi.org/10.1016/0308-9126(84)90045-2)

CHALIORIS, C. E. et al. Applications of smart piezoelectric materials in a wireless admittance monitoring system (WiAMS) to structures – Tests in RC elements. **Case Studies in Construction Materials**, v. 5, p. 1-18, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.03.003>

CHIES, J. A. **Ensaios não destrutivos em concreto: Detecção de falhas no interior de estruturas de concreto com o uso de ultrassom**. 133p. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CHO, Y. S. Non-destructive Testing of High Strength Concrete using Spectral Analysis of Surface Waves. **NDT&E International**, n. 36, p. 229-235, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00067-1](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00067-1)

COPAN. **Edifício COPAN**. 2008. Disponível em <http://www.copansp.com.br/>. Acesso em: 18 de maio de 2017.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Estruturas de concreto armado em situação de incêndio**. In: XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 30, 2002, Brasília.

DANIEL, M. I.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2006.

DIÁRIO COMÉRCIO INDÚSTRIA & SERVIÇOS – DCI. **Manutenção de pontes e viadutos**. 2011. Disponível em: <<http://www.dci.com.br/opinio/manutencao-de-pontes-e-viadutos-id260857.html>> Acesso em 21 de abril de 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE – DNIT. **Audiência pública detalha programa de recuperação de pontes – PROARTE**. <<http://www.dnit.gov.br/noticias/dnit-realizou-audiencia-publica-para-proarte>> Acesso em: 16 de maio de 2017.

EURO, CEB Comitê. International du Beton: CEB-FIP Model Code 1990, Final Draft 1991. **Bulletin d'Information**, n. 203, p. 2.1-2.16, 1991.

EMMONS, P. H. **Concrete repair and maintenance illustrated**. Kingston: R. S. Means Company, 1993. 295 p.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 239 p. 2002. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FARRAR, C. R.; LIEVEN, N. A. J.; BEMEND, M. T. An introduction to damage prognosis. **Damage Prognosis for aerospace, civil and mechanical systems**. Bristol: John Wiley & Sons, p. 1-12. 2005.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB. **Fib Model Code 2010**: Final Draft. Bulletin D' Information 65. Lausanne, Switzerland, 2012.

FERRARI, V. J. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por composto cimentício de alto desempenho**. 328 p. 2007. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Carlos.

FERREIRA, L. E. T. **Sobre a resistência ao fraturamento do concreto e do concreto reforçado com fibras de aço.** 261 p. 2002. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo.

FERREIRA, M. P. **Punção em Lajes Lisas de Concreto com Armaduras de Cisalhamento e Momentos Desbalanceados.** 299p. 2010. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com Fibras de Aço. **Boletim Técnico (BT/PCC/260).** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 69 p. 2000.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras de aço.** 247 p. 2011. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FIGUEIREDO, E. P. Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência, Fissuras e Deformações. In: ISAIA, G. C. (Editor), **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, cap. 33, vol. 2, p. 985-1015. 2005.

FINZI NETO, R. M., et al. Low-cost electromechanical impedance-based SHM architecture for multiplexed piezoceramic actuators. **Journal of Structural Health Monitoring.** v. 10, n. 4, p. 391-402, 2011. <https://doi.org/10.1177/1475921710379518>

GARCEZ, E. O. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto.** 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

GILBERT, R. I.; RANZI, G. **Time Dependent Behaviour of Concrete Structures,** 1ed. CRC Press. 426 p. 2011.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. Damage detection in thin plates and aerospace structures with the electro-mechanical impedance method. **Structural Health Monitoring,** v. 4, n. 2, p. 99-118, 2005. <https://doi.org/10.1177/1475921705049752>

G1 PR. **Justiça determina suspensão das obras de viaduto na rodovia PR-445.** <<http://g1.globo.com/pr/norte-noroeste/noticia/2016/02/justica-determina-suspensao-das-obras-de-viaduto-na-rodovia-pr-445.html>> Acesso em: 16 de maio de 2017.

GÓIS, F. A. P. **Avaliação Experimental do Comportamento de Concreto Fluido Reforçado com Fibras de Aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto.** 157 p. 2010. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

HANNANT, P. J. **Fibre cements and fibre concretes.** John Wiley and Sons. 1978.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** 1ªEd. São Paulo: PINI, 349 p. 1992.

HU, X.; ZHU, H.; WANG, D. A study of concrete slab damage detection based on the electromechanical impedance method. **Sensors,** v. 14, n. 10, p. 19897-19909, 2014. <https://doi.org/10.3390/s141019897>

INMAN, D. J., FARRAR, C. R., JÚNIOR, V. L., STEFFEN JR, V. **Damage Prognosis. For Aerospace, Civil and Mechanical Systems.** Wiley Editorial. 417 p. 2005.
<https://doi.org/10.1002/0470869097>

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SP – IPT. **41 anos da Ponte Rio-Niterói.** 2015. Disponível em < http://www.ipt.br/institucional/campanhas/44-41_anos_da_ponte_rio_niteroi.htm> Acesso em: 19 de maio de 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOESTATÍSTICA – IBGE. **Amplitude térmica média anual no Brasil.** Disponível em: <<http://portaldemapas.ibge.gov.br>> Acesso em: 16 de maio de 2017.

ITAIPU BINACIONAL. **Barragem.** 2010. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br>> Acesso em 25 de maio de 2017.

JANG, B. Z. Advanced polymer composites: principles and applications. **ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, USA, 1994.** 305, 1994.

KHANTE, S. N.; GEDAM, S. R. PZT Based Smart Aggregate for Unified Health Monitoring of RC Structures. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 6, n. 01, p. 42, 2016.
<https://doi.org/10.4236/ojce.2016.61005>

KUMAR, S. A.; SANTHANAM, M. Detection of Concrete Damage Using Ultrasonic Pulse Velocity Method. In: **Proc. national Seminar on Non-Destructive Evaluation Dec.** p. 7-9. 2006.

LEUCAS, L. F. **Utilização das Técnicas de Impedância eletromecânica e Ondas de Lamb para Identificação de Dano em Estruturas com Rebite.** 2009. 58f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

LEONHARDT F.; MONNIG E. **Construções de Concreto Volume 2: Casos Especiais de Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado.** Rio de Janeiro: Interciência, 1979.

LEVY-NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compostos Estruturais: Ciência e Tecnologia.** 1 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 313 p. 2006.

LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Coupled Electro-Mechanical Analysis of Adaptive Material Systems-Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 8, n. 4, p. 335-343, 1994.
<https://doi.org/10.1177/1045389X9700800406>

LIMA, M. G. **Ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto.** Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 713-751, 2005.

LIU, P., et al. Concrete damage diagnosis using electromechanical impedance technique. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 450-455, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.173>

LOTURCO, B. **Fissuras no último pavimento.** Técnica, São Paulo, v. 99, p. 32-25, jun. 2005. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br>>. Acesso em: 05 de maio/ 2017.

MALHORTA, V. M; CARRETE, G.C. In situ tests: variability and strength prediction of concrete early ages. **Special Publication**, v. 82, p. 111-142, 1984.

MARAR, K.; EREN, O.; YITMEN, I. Compression specific toughness of normal strength steel fiber reinforced concrete (NSSFRC) and high strength steel fiber reinforced concrete (HSSFRC). **Materials Research**, São Carlos, v. 14, n. 2, p. 239-247, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000042>

MARCELLI, M. **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras**. São Paulo: PINI, 259 p. 2007.

MARTIN, J. F. M. **Aditivos para concreto**. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, v. 2, 2005.

MATTHEWS, F. L, RAWLINGS, R. D. **Composite Materials: Engineering And Science**. Elsevier, 1999.

MAZUMDAR, S. K. **Composites manufacturing: materials, product, and process engineering**. Nova York: CRC Press, 2001. <https://doi.org/10.1201/9781420041989>

MAYA, L. F., et al. Punching shear strength os steel fibre reinforced concrete slabs. **Engineering Structures**. v.40, p. 83-94, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.02.009>

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 3. ed. São Paulo. Editora IBRACON, 674 p. 2008.

MEHTA, P. K., et al. Cracking-corrosion interaction in concrete exposed to marine environment. **Concrete International**, v. 4, n. 10, p. 45-51, 1982.

MELO, C. E. L. **Punção em lajes protendidas com pilares de extremidade**. 185 p. 2005. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais compostos e estruturas-sanduiche: projeto e análise**. Editora Manole, 1 ed. Barueri, SP. 632 p. 2005.

MORAES NETO, B. N. **Comportamento à Punção de Lajes Lisas em Concreto Reforçado com Fibras de Aço sob Carregamento Simétrico**. 363 p. 2013. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Brasília.

MOURA Jr., J. R. V. **Métodos de Identificação de Falhas em Estruturas Aeronáuticas Utilizando Meta-Modelagem Aliada às Técnicas de Impedância e Estruturas Inteligentes**. 2004. 158 F. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MOURA Jr., J. R. V. **Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Aplicada a Estruturas Aeronáuticas e Espaciais**. 2008. 264f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MUSSE, T. H. **Punção em lajes cogumelos – fibras de aço e armadura de cisalhamento**. 166 p. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

NA, S.; LEE, H. K. A technique for improving the damage detection ability of the electro-mechanical impedance method on concrete structures. **Smart Materials and Structures**, v. 21, n. 8, p. 085024, 2012. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/8/085024>

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>

NAAMAN, A.E; REINHARDT, H.W. **High Performance Fiber Reinforced Cement Composites**. 1ª ed. USA: E & FN SPON, 1995.

NAAMAN, A. E. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. **Journal of advanced concrete technology**, v. 1, n. 3, p. 241-252, 2003. <https://doi.org/10.3151/jact.1.241>

NAAMAN, A. E. Development and evolution of tensile strain hardening FRC composites. In: Proceedings of the seventh RILEM international symposium on fibre reinforced concrete: **design and applications (BEFIB 2008)**. RILEM Publications, Chennai, India. 2008. p. 1-28.

NEPOMUCENO, A. A. **Mecanismo de transporte fluido no concreto**. In: ISAIA, G. C. Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005, v.2.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª Edição. São Paulo: PINI, 828 p. 1997.

NGUYEN-MINH, L. et al. Punching shear resistance of steel fiber reinforced concrete flat slabs. **Procedia Engineering**, v. 14, p. 1830-1837, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.230>

NUNES, N. L.; AGOPYAN, V. A influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço. 18 p. **Boletim Técnico BT/PCC/225**. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, 1998.

OLIVEIRA, D. C. **Punção de lajes lisas de concreto armado com furo adjacente ao pilar e transferência de momento**. 195 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

OLIVEIRA I. J. **A retomada do crescimento e emprego passa pela Engenharia e Construção**. Disponível em: <<http://www.sinduscon-mg.org.br/retomada-do-crescimento-e-emprego-passa-pela-engenharia-e-construcao/>> Acesso em: 22 de maio de 2017.

OLIVEIRA JR, L. A. **Ligação viga-pilar em elementos pré-moldados de concreto solidarizados por concreto reforçado com fibras de aço: análise estática e dinâmica**. 255 p 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos.

PALOMINO, L. V. **Análise das métricas de dano associadas à técnica da Impedância Eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural**. 117 p. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PALOMINO, L. V.; STEFFEN Jr., V. Damage metrics associated with electromechanical impedance technique for SHM applied to a riveted structure". In **Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM2009**. Porto Alegre, Brazil, 2009.

PALOMINO, L. V., et al. Evaluation of the influence of sensor geometry and physical parameters on impedance-based structural health monitoring. **Shock and Vibration**, 19, p. 811-823, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/169372>

PARDINI, L.C; LEVY NETO, F. **Compostos estruturais: ciência e tecnologia**. 1. Ed. São Paulo: EDGARD BLÜCHER Ltda, 313 p. 2006.

PARK, G., et al. Impedance-Based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications. **JSME International Journal**. v. 42. n.2. p. 249-258. 1999. <https://doi.org/10.1299/jsmea.42.249>

PARK, G., et al. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. **Shock and Vibration Digest**, v. 35, n. 6, p. 451-463, 2003. <https://doi.org/10.1177/05831024030356001>

PARK, S., et al. Multiple crack detection of concrete structures using impedance-based structural health monitoring techniques. **Experimental Mechanics**, v. 46, n. 5, p. 609-618, 2006. <https://doi.org/10.1007/s11340-006-8734-0>

PARK, G.; INMAN, D. J. Impadance-Based Structural Health Monitoring. **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**. Wyle, Inglaterra, p. 275-292, 2005. <https://doi.org/10.1002/0470869097.ch13>

PARK, S., et al. Electro-Mechanical Impedance-Based Wireless Structural Health Monitoring Using PCA-Data Compression and k-means Clustering Algorithms Monitoring and Path Forward. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, vol. 19, n. 4, p. 509-520, 2008. <https://doi.org/10.1177/1045389X07077400>

PARK, S., et al. Impedance-based wireless debonding condition monitoring of CFRP laminated concrete structures. **NDT & E International**, v. 44, n. 2, p. 232-238, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.10.006>

PROCEQ. **Portable non-destructive measurement solutions**. <<https://www.proceq.com>> Acesso: 15 de maio de 2017.

QUINN, W.; KELLY, G.; BARRETT, J. Development of an embedded wireless sensing system for the monitoring of concrete. **Structural Health Monitoring**, v. 11, n. 4, p. 381-392, 2012. <https://doi.org/10.1177/1475921711430438>

RABELO, D. S. **Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado na Técnica da Impedância Eletromecânica Incorporando Compensação do Efeito da Variação da Temperatura.** 103 p. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RABELO, D. S.; STEFFEN JR., V.; FINZI NETO, R. M.; LACERDA, H. B. Impedance-based structural health monitoring and statistical method for threshold-level determination applied to 2024-T3 aluminum panels under varying temperature, **Structural Health Monitoring**, Online First, 2016. <https://doi.org/10.1177/1475921716671038>

RABELO, D. S. **Técnicas Avançadas de normalização de Dados Aplicadas ao Método de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado na Impedância Eletromecânica.** 145 p. 2017. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RAJU, V. **Implementig impedance-based health monitoring.** 240 p. 1997. Dissertação de Mestrado. Virgínia.

Raghavan, A.; Cesnik, C. E. S. Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring. **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**, Wiley, Cap.11, pp. 235-274. 2005.

ROCHA, L. A. A. **Identificação de Dano em Estruturas Utilizando uma Metodologia que Integra a Técnica da Impedância Eletromecânica e Ondas de Lamb.** 100 p. 2017. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RODRIGUES, G. S. S. **Contribuição ao Estudo da Retração e da Fluência e seus Mecanismos de Atuação a Baixas Idades em Concretos Estruturais.** 222 p. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília.

SANTOS, J. M. M. N. D. **Avaliação da integridade estrutural de pontes de betão – o caso da ponte Nossa Senhora da Guia.** 244 p. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade de Porto, Porto.

SANTOS, S. B.; BITTENCOURT, R. M.; GRAÇA, N. G. **Efeitos da Temperatura sobre o Concreto.** In: IBRACON. Volume I e II. 1.ed. São Paulo: G.C. Isaia, 1956 p. 2011.

SAHUINCO, M. H. C. **Utilização de métodos não destrutivos e semi-destrutivos na avaliação de pontes de concreto.** 170 p. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

SAGASETA, J. et al. Punching of flat slabs supported on rectangular columns. **Engineering Structures.** v.77, p. 17-33, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.007>

SAVAGE, E. **Carbon-carbon composites.** London, UK: Chapman & Hall, 1993. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1586-5>

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais.** 6 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SHUTTERSTOCK. **Agência de banco de imagens**. Nova York. <www.shutterstock.com> Acesso em: 15 de maio de 2017.

SINDUSCON-MG. Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de Minas Gerais. **O desempenho da Construção Civil nas duas décadas do Plano Real e desempenho recente**. 2014. Disponível em: < <http://www.sinduscon-mg.org.br/pesquisas-estudos/o-desempenho-da-construcao-civil-nas-duas-decadas-do-plano-real-e-desempenho-recente/>> Acesso em: 20 de abril de 2017.

SILVA, R. N. F., et al. The use of electromechanical impedance based structural health monitoring technique in concrete structures. **E-Journal of Nondestructive Testing**. ISSN 1435-4934. 2016.

SOH, C. K., et al. Performance of smart piezoceramic patches in health monitoring of a RC bridge. **Smart Materials and Structures**, v. 9, n. 4, p. 533, 2000. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/9/4/317>

SOHN, H. **Statistical Pattern Recognition Paradigm Applied to Defect Detection in Composite Plates in Damage Prognosis – for Aerospace, Civil and Mechanical Systems**. John Wiley & Sons, p. 293-303, 2005.

SONG, P. S; HWANG, S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 18, p. 669-673, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027>

SOUZA, M. L. M. **Estudo da Fluência e Retração na Análise de um Tabuleiro em Vigas Múltiplas de uma Ponte Rodoviária**. 201 p. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

SOUZA, R. **Galeria de fotos**. Disponível em: < <https://www.renattodsousa-fotogaleria.com.br/> > Acesso em: 20 de maio de 2017.

STRONG, A. B. **Fundamentals of Composite Manufacturing: Materials, Methods and Applications**. 2. ed. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Michigan, 2008.

STURRUP, V. R.; Vecchio, F. J.; Caratin, H. Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength. **Special Publication**. v. 82, p. 201-228, 1984.

SUN, X., et al. Computational investigation of pore permeability and connectivity from transmission X-ray microscope images of a cement paste specimen. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 240-251, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.049>

SUN, F. P.; et al. Truss structure integrity identification using PZT sensor–actuator. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, vol. 6, p. 134–139, 1995. <https://doi.org/10.1177/1045389X9500600117>

TAN, K. H.; PARAMASIVAM, P. Punching Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Slabs. **Journal of Materials in Civil Engineering**. ASCE, v.6, n.2, p. 240-253, may. 1994.

TALAKOKULA, V., BHALLA, S., GUPTA, A. Corrosion assessment of reinforced concrete structures based on equivalent structural parameters using electro-mechanical impedance technique. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 25, n. 4, p. 484-500, 2014. <https://doi.org/10.1177/1045389X13498317>

TSURUTA, K. M., **Monitoramento de Integridade Estrutural de Materiais Compostos Sujeitos a Impactos Empregando a Técnica de Impedância Eletromecânica**. 114 p. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

TRAUTWEIN, L. M. **Punção em lajes cogumelo e concreto armado: análise experimental e numérica**. 190 p. 2005. Tese de Doutorado. Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

VALLE, J. B.S. **Patologia das alvenarias**. 72 p. 2008. TCC (Graduação). Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

VALLUZZI, M. R., et al. A contribution to the characterization of masonry typologies by using sonic waves investigations. In: **7th Int. Symp. in Non Destructive Testing in Civil Engineering**. Nantes, France: LCPC, 2009. p. 713-718.

VOUTETAKI, M. E., PAPADOPOULOS, N. A., ANGELI, G. M., PROVIDAKIS, C. P. Investigation of a new experimental method for damage assessment of RC beams failing in shear using piezoelectric transducers. **Engineering Structures**, v. 114, p. 226-240, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.02.014>

VIEIRA, G. L. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. 2008. 189 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

VITOR, P.C.P. **Resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado sem armadura transversal reforçadas com fibras de aço**. 217 p. 2017. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

WANG, D.; ZHU, H. Monitoring of the strength gain of concrete using embedded PZT impedance transducer. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 9, p. 3703-3708, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.020>

WIGHT, J. K; RICHARD JUNIOR, F. E.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced Concrete: Mechanics and Design**. 6. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2011.

WU, H.; et al. Experimental investigation on freeze-thaw durability of Portland cement pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 63-71, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.130>

XU, D., et al. Temperature and loading effects of embedded smart piezoelectric sensor for health monitoring of concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 187-193, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.067>

YANG, Y.; HU, Y.; LU, Y. Sensitivity of PZT impedance sensors for damage detection of concrete structures. **Sensors**, v. 8, n. 1, p. 327-346, 2008. <https://doi.org/10.3390/s8010327>

YANG, Y.; DIVSHOLI, B. S. Sub-frequency interval approach in electromechanical impedance technique for concrete structure health monitoring. **Sensors**, v. 10, n. 12, p. 11644-11661, 2010. <https://doi.org/10.3390/s101211644>

ZAMBRANA VARGAS, E. N. **Punção em lajes-cogumelo de concreto de alta resistência reforçado com fibras de aço**. 190 p. 1997. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos.

ZHANG, P.; et al. Flexural toughness of steel fiber reinforced high performance concrete containing nano-Sio2 and fly ash. **The Scientific World Journal**, 2014.

ZHAO, J., et al. Smart aggregate-piezoceramic patch combination for health monitoring of concrete structures. **Journal of Sensors**, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3270916>